

VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR PÓ DE BRITA DE GRANITO MOÍDO DA AMAZÔNIA

TECHNICAL FEASIBILITY OF PRODUCING MORTAR WITH PARTIAL
REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT BY GROUND GRANITE CRUSHED
STONE POWDER FROM THE AMAZON

VIABILIDAD TÉCNICA DE LA PRODUCCIÓN DE MORTERO CON
SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND POR POLVO DE PIEDRA
GRANÍTICA TRITURADA DE LA AMAZONÍA

Erick Souza Machado¹
Rodrigo Rodrigues da Cunha²
Marcelo de Souza Picanço³
Alcebíades Negrão Macêdo⁴

RESUMO: A indústria da construção civil, embora essencial para o desenvolvimento socioeconômico, destaca-se como uma das maiores consumidoras de recursos naturais e emissoras de gases de efeito estufa, principalmente devido à produção de cimento Portland. Nesse contexto, a incorporação de materiais cimentícios suplementares (MCSs) derivados de resíduos industriais e minerais tem se destacado como uma estratégia promissora para reduzir os impactos ambientais e promover maior sustentabilidade no setor. Este estudo investiga a viabilidade técnica da produção de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por pó de brita de granito moído (PBGGM), um resíduo gerado pelo processamento de granito no município de Tracuateua, Pará, Brasil. O material foi processado mecanicamente por moagem em moinho de bolas durante 45 minutos e subsequentemente peneirado em malha n^o 200 (75 μ m). O programa experimental quantitativo foi realizado em laboratórios da Universidade Federal do Pará (UFPA) e no laboratório especializado Totalmix. Foram produzidas misturas de argamassa com substituição parcial do cimento Portland nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%, além de uma mistura de referência sem substituição. Também foram preparadas misturas comparativas contendo sílica ativa e metacaulim. As argamassas foram avaliadas por meio de ensaios de resistência à compressão, determinação da resistência potencial de aderência à tração e análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que teores de substituição de até 10% de PBGM mantêm desempenho satisfatório de resistência mecânica e de aderência. Portanto, o PBGM demonstrou potencial para aplicação em argamassas, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos minerais e para a redução do consumo de cimento Portland na construção civil.

Palavras-chave: Pó de brita de granito moído. Material cimentício suplementar. Argamassa. Sustentabilidade.

¹ Mestre em Engenharia Civil no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará (UFPA).

² Professor Doutor e Pesquisador. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA).

³ Professor Doutor e Pesquisador no Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará (UFPA).

⁴ Professor Doutor e Pesquisador no Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará (UFPA).

ABSTRACT: The construction industry, although essential for socioeconomic development, stands out as one of the largest consumers of natural resources and emitters of greenhouse gases, mainly due to the production of Portland cement. In this context, the incorporation of supplementary cementitious materials (SCMs) derived from industrial and mineral waste has emerged as a promising strategy to reduce environmental impacts and promote greater sustainability in the sector. This study investigates the technical feasibility of producing mortars with partial replacement of Portland cement by ground granite aggregate powder (GGAP), a residue generated from granite processing in the municipality of Tracuateua, Pará, Brazil. The material was mechanically processed by grinding in a ball mill for 45 minutes and subsequently sieved through a No. 200 sieve ($75 \mu\text{m}$). The quantitative experimental program was carried out in laboratories at the Federal University of Pará (UFPA) and at the specialized laboratory Totalmix Technological Control in Concrete and Mortar. Mortar mixtures were produced with partial replacement of Portland cement at levels of 5%, 10%, 15%, and 20%, in addition to a reference mixture without replacement. Comparative mixtures containing silica fume and metakaolin were also prepared. The mortars were evaluated through compressive strength tests, determination of potential tensile bond strength, and microstructural analysis using scanning electron microscopy. The results indicated that replacement levels of up to 10% of GGAP maintain satisfactory mechanical and bond strength performance. Therefore, GGAP demonstrated potential for application in mortars, contributing to the reuse of mineral waste and to the reduction of Portland cement consumption in civil construction.

Keywords: Ground granite aggregate powder. Supplementary cementitious material. Mortar. Sustainability.

RESUMEN: La industria de la construcción civil, aunque esencial para el desarrollo socioeconómico, se destaca como una de las mayores consumidoras de recursos naturales y emisoras de gases de efecto invernadero, principalmente debido a la producción de cemento Portland. En este contexto, la incorporación de materiales cementicios suplementarios (MCSs) derivados de residuos industriales y minerales ha surgido como una estrategia promisoría para reducir los impactos ambientales y promover una mayor sostenibilidad en el sector. Este estudio investiga la viabilidad técnica de la producción de morteros con sustitución parcial del cemento Portland por polvo de brita de granito molido (PBGGM), un residuo generado por el procesamiento de granito en el municipio de Tracuateua, Pará, Brasil. El material fue procesado mecánicamente mediante molienda en un molino de bolas durante 45 minutos y posteriormente tamizado en malla nº 200 ($75 \mu\text{m}$). El programa experimental cuantitativo se realizó en laboratorios de la Universidad Federal de Pará (UFPA) y en el laboratorio especializado Totalmix. Se produjeron mezclas de mortero con sustitución parcial del cemento Portland en contenidos del 5%, 10%, 15% y 20%, además de una mezcla de referencia sin sustitución. También se prepararon mezclas comparativas que contenían sílice activa y metacaolín. Los morteros fueron evaluados mediante ensayos de resistencia a la compresión, determinación de la resistencia potencial de adherencia por tracción y análisis microestructural por microscopía electrónica de barrido. Los resultados indicaron que los contenidos de sustitución de hasta el 10% de PBGM mantienen un desempeño satisfactorio de resistencia mecánica y de adherencia. Por lo tanto, el PBGM demostró potencial para aplicación en morteros, contribuyendo al reaprovechamiento de residuos minerales y a la reducción del consumo de cemento Portland en la construcción civil.

Palabras clave: Polvo de brita de granito molido. Material cementicio suplementario. Mortero. Sostenibilidad.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel estratégico no desenvolvimento socioeconômico; no entanto, também está entre as maiores consumidoras de recursos naturais

e as principais contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa, principalmente devido à produção de cimento Portland. Estima-se que a fabricação de clínquer seja responsável por uma parcela significativa das emissões globais de CO₂, o que impulsionou, nas últimas décadas, a busca por alternativas tecnicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para reduzir o consumo de cimento em matrizes cimentícias. A incorporação de materiais cimentícios suplementares (MCSs) derivados de resíduos industriais e minerais tem emergido como uma estratégia promissora alinhada aos princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

A Amazônia, bioma de relevância global para a regulação climática e manutenção da biodiversidade, conforme destacado por Nobre et al. (2016), é intrinsecamente caracterizada por extensos depósitos minerais, cuja exploração se intensificou nas últimas décadas como vetor de desenvolvimento econômico regional, segundo Fernandes et al. (2017). A extração de rochas ornamentais, agregados e outros recursos minerais, embora essencial para a cadeia de suprimentos da indústria da construção, gera volumes significativos de subprodutos, incluindo pó de britagem, rejeitos de mineração e resíduos de beneficiamento, conforme Sabbag et al. (2019). Na ausência de políticas públicas eficazes e tecnologias de reutilização, esses materiais são frequentemente descartados em lixões, às margens de estradas ou em corpos d'água, comprometendo a integridade de ecossistemas sensíveis, como apontado por Silva e Almeida (2020). Na região amazônica, esse descarte inadequado causa assoreamento de igarapés, contaminação de solos e aquíferos por metais pesados naturalmente presentes na matriz rochosa e emissão de material particulado, que afeta a qualidade do ar e a saúde das comunidades ribeirinhas e indígenas, conforme demonstrado por Vasconcelos, Souza e Costa (2018) e por Costa e Souza (2021). Esta situação evidencia a necessidade urgente de soluções sustentáveis que conciliem o aproveitamento econômico dos recursos minerais com a proteção ambiental, como argumentado por Ferreira, Oliveira e Santos (2019). Nesse contexto, o uso desses subprodutos como insumos para a indústria da construção — particularmente como materiais cimentícios suplementares — surge como uma abordagem promissora, alinhando-se aos princípios da economia circular e à redução de passivos ambientais na Amazônia, conforme Kaza et al. (2018).

Pesquisas recentes, resumidas na Tabela 1, abordam materiais que têm sido estudados e classificados como promissores para substituir parcialmente o cimento em argamassas sem alterar suas propriedades mecânicas. Resíduos como escória de alto-forno, cinza volante, sílica ativa, metacaulim, resíduos da indústria do silício e outros subprodutos da mineração têm o

potencial de substituir parcialmente o cimento Portland, promovendo melhorias no desempenho mecânico, na durabilidade e na microestrutura de argamassas e concretos, ao mesmo tempo que reduzem os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos. Estudos de Mehta e Monteiro (2014) e de Neville (2016) indicam que a viabilidade técnica de tais substituições depende fundamentalmente da composição química, finura, área superficial específica e reatividade dos materiais incorporados.

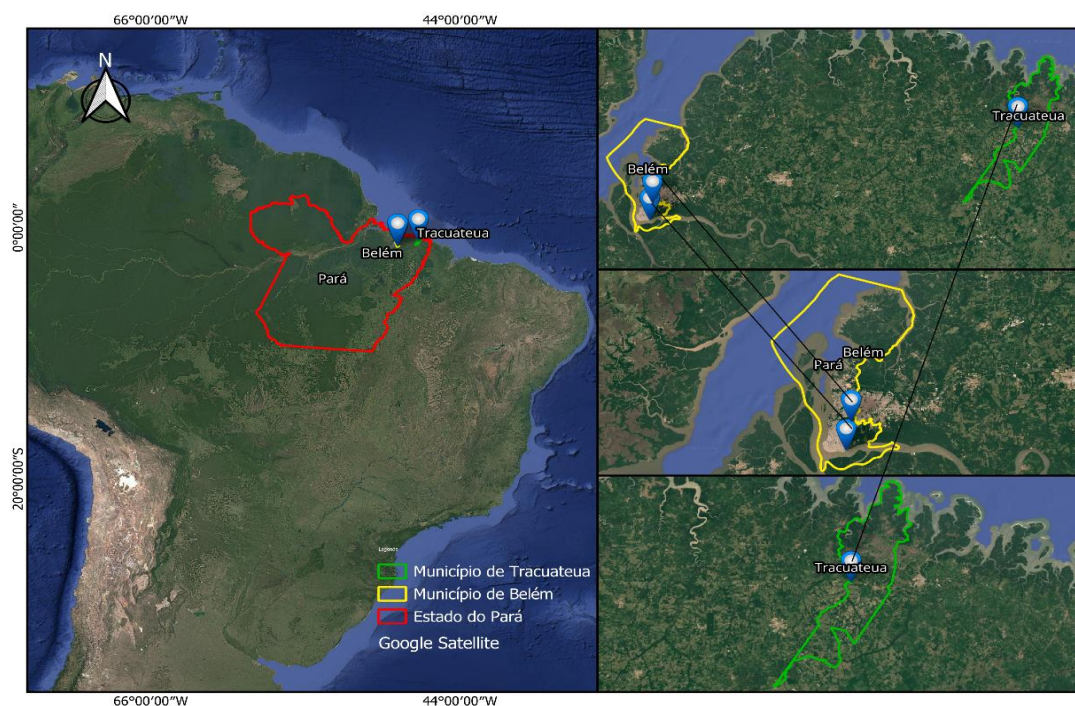
Esses estudos demonstraram que a substituição parcial do cimento Portland por MCSs pode ser tecnicamente viável, desde que a composição química, a finura e a reatividade dos resíduos sejam adequadamente caracterizadas. Benjeddou, Soussi e Mnif (2020) mostraram que a adição de 5% de resíduo de pó de mármore em argamassas proporcionou resistência à compressão comparável à da mistura de referência, enquanto teores superiores a 10% reduziram o desempenho mecânico. Esta constatação destaca a importância do controle tanto da taxa de substituição quanto da área superficial específica do material. De forma semelhante, Dossena et al. (2019) observaram que a substituição de 10% do cimento por filler basáltico resultou em comportamento mecânico próximo ao da argamassa de referência, com efeitos positivos atribuídos ao preenchimento de vazios na matriz. Hsu, Chi e Huang (2018) demonstraram que a finura da cinza volante moída influencia diretamente as propriedades da argamassa. Um nível de substituição de 20% com uma finura de 5690 cm²/g proporcionou os maiores ganhos em resistência à compressão e a maior redução na porosidade. Em relação ao uso de argilas, Karatas, Gökçe e Gökçe (2020) relataram que a substituição de até 15% de caulim calcinado em argamassas autoadensáveis manteve resistências mecânicas aceitáveis, embora reduções lineares tenham sido observadas com o aumento do teor. Yang, Kim e Choi (2020) descobriram que a adição de 8% de bentonita promoveu um aumento de 61,5% na resistência à compressão e uma redução significativa na permeabilidade, atribuída ao refinamento da estrutura porosa. Wahedy, Hossain e Anwar (2023) mostraram que uma pozolana natural afegã, rica em sílica e alumina, quando usada como substituta em até 13%, aumentou a resistência à tração e a durabilidade das argamassas, além de oferecer benefícios ambientais e econômicos. Finalmente, Wang et al. (2023) demonstraram que o pó de pedra granítica, embora promova uma redução nas propriedades mecânicas quando adicionado em teores acima de 10%, atua como agente de nucleação e preenchimento, indicando seu potencial para uso em argamassas autoadensáveis após processamento adequado.

Tabela 1 - Materiais Cimentícios Suplementares em Substituição Parcial do Cimento na Fabricação de Argamassa

Autores, Ano de Publicação	MCS	Porcentagens estudada (%)	Melhores resultados (%)
Subas et al., 2015	Pó de mármore	5, 10, 15, 20 e 25	15
Sharbatdar et al., 2017	Metacaulim e sílica ativa	5,10,15 e 20	15
Hsu et al., 2018	Cinza volante	0, 10, 15 e 20	10
Dossena et al., 2019	Resíduos de britagem de pedra	5, 10, 15, 20 e 30	10
Yang et al., 2020	Betonita	0, 4 e 8	3 - 5
Karatas et al., 2020	Caulim calcinado	5, 10, 15, 20	15 - 20
Benjeddou et al., 2020	Pó de mármore residual	5, 15 e 25	5
Sultana e Islam, 2022	Escoria de forno de panela	5, 10, 15, 20, 25 e 50	5 - 10
Wahedy et al., 2023	Pozolana natural afegã	6, 13 e 20	13

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 1 - Localização geográfica do local de coleta do material e laboratórios de ensaio



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Dentro deste contexto, o PBGM (Pó de Brita de Granito Moído) — um resíduo gerado em larga escala durante a extração e beneficiamento de rochas ornamentais e agregados no município de Tracuateua, Estado do Pará, como georreferenciado na Imagem 1 — é frequentemente descartado sem destinação adequada, constituindo um passivo ambiental na Amazônia. Estudos recentes têm mostrado que o PBGM, quando devidamente caracterizado e processado, apresenta composição rica em sílica e alumina, com potencial para atuar como material cimentício suplementar, seja por meio de efeitos de preenchimento físico, seja por reatividade pozolânica em idades mais avançadas. Um tempo de moagem de 45 minutos proporciona uma distribuição granulométrica e uma área superficial específica mais favoráveis às reações de hidratação e à densificação da matriz. Esses resultados indicam que o processamento adequado do resíduo é uma etapa fundamental para sua aplicação eficiente.

Este artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por PBGM nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% em argamassas, utilizando como referência comparativa os resultados obtidos por diferentes autores que estudaram a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares. Os objetivos específicos são: (i) verificar se os percentuais de substituição propostos atendem aos requisitos normativos de desempenho mecânico de argamassas de revestimento; (ii) propor uma destinação ambientalmente correta para um resíduo mineral que vem sendo descartado irregularmente na região amazônica; e (iii) contribuir para a redução do consumo de cimento Portland e mitigação dos impactos associados à sua produção. A investigação inclui ensaios de resistência à compressão axial, ensaios de desempenho de aderência à tração e análises microestruturais, permitindo uma compreensão integrada das correlações entre a microestrutura desenvolvida, a evolução da porosidade e o comportamento mecânico das matrizes cimentícias modificadas. Esta abordagem integrada sustenta a proposição de uma alternativa viável e sustentável aplicada à construção civil na Amazônia.

METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida em laboratórios da Universidade Federal do Pará (UFPA) e em parceria com o laboratório especializado Totalmix Controle Tecnológico de Concreto e Argamassa, seguindo rigorosamente as normas técnicas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O programa experimental foi estruturado para avaliar o desempenho de argamassas produzidas com a incorporação de PBGM (Pó de Brita de Granito

Moído) proveniente de resíduo de britagem de granito do município de Tracuateua. O material foi processado por moagem em moinho de bolas por 45 minutos, peneirado em malha 200 (75 μm) e analisado por difratometria de raios X (DRX) para posterior caracterização.

Para a produção das argamassas destinadas aos diferentes ensaios, os materiais foram selecionados de acordo com a finalidade de cada análise. O cimento Portland CP II F foi utilizado como aglomerante principal. PBGM, sílica ativa (SA) e metacaulim (MK) foram usados como materiais pozolânicos para substituição parcial do cimento para fins de comparação de desempenho. O planejamento experimental incluiu a produção de misturas de argamassa com teores de substituição de 0% (referência), 5%, 10%, 15% e 20% para cada um dos materiais analisados. Todas as misturas seguiram uma relação de massa unitária de 1:3 (aglomerante:areia) e uma relação água/aglomerante fixa de 0,48. Os materiais foram misturados em argamassadeira conforme os procedimentos normativos da ABNT NBR 16541.

Para a avaliação da resistência à compressão axial, as argamassas foram dosadas sem adição de aditivos. Areia normatizada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP) foi utilizada como agregado miúdo, garantindo a padronização e a comparabilidade dos resultados. O ensaio foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 7215:2019. Corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura foram moldados e curados em câmara úmida até as idades de 3, 7 e 28 dias. Para cada mistura (PBGM, SA e MK nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%), além da mistura de referência e respectiva idade, 78 corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica com capacidade de 100 kN sob taxa de carregamento constante. O resultado foi expresso como a média aritmética dos valores obtidos, em megapascals (MPa).

A determinação da resistência potencial de aderência à tração ao substrato foi realizada de acordo com a ABNT NBR 15258:2021. Nesta etapa, foi utilizada areia quartzosa natural do município de Tracuateua-PA como agregado miúdo. Sua distribuição granulométrica foi determinada segundo a NBR NM 248, enquadrando-se na zona ótima de utilização, com módulo de finura de 2,1 e diâmetro máximo de 1,2 mm. Para este ensaio, um aditivo plastificante e incorporador de ar à base de tensoativos foi incorporado à mistura. O substrato padrão foi moldado conforme a ABNT NBR 14081-2. O procedimento de aplicação seguiu as diretrizes da norma, com a argamassa aplicada sobre o substrato horizontal utilizando-se um gabarito para controle da espessura em (18 ± 2) mm. As placas cerâmicas utilizadas atenderam às normas da ABNT NBR 14081-2, sendo cortadas em seções quadradas com arestas de 50 mm, limpas e secas.

Após 27 dias, dispositivos metálicos de carregamento foram colados à superfície das placas cerâmicas. Aos 28 dias, o ensaio de arrancamento foi realizado utilizando-se uma máquina de ensaio de tração, aplicando uma carga constante de (250 ± 50) N/s. Para cada mistura, 10 corpos de prova foram ensaiados. Os resultados foram expressos em megapascais (MPa), conforme o cálculo estabelecido na norma, e os modos de ruptura foram classificados seguindo os critérios da ABNT NBR 15258.

Para a análise microestrutural, fragmentos das argamassas curadas por 28 dias, obtidos dos corpos de prova ensaiados nos ensaios mecânicos, foram submetidos à microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises foram realizadas no Laboratório de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA). As amostras foram metalizadas com ouro e analisadas em microscópio eletrônico de varredura operando com feixe de elétrons de 15 kV. A imagem por elétrons secundários foi empregada para observar a morfologia da superfície de fratura, a zona de transição interfacial entre a pasta e o agregado, a presença de produtos de hidratação como C-S-H, portlandita e etringita, bem como a distribuição e morfologia das partículas de PBGM na matriz cimentícia. As imagens obtidas foram fundamentais para correlacionar o comportamento mecânico observado com as características microestruturais das diferentes composições.

MATERIAIS E MÉTODOS

I. Caracterização dos Materiais

Para a análise dos materiais, foram seguidos os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas nacionais e internacionais. Informações complementares, especificadas abaixo, foram obtidas dos fabricantes.

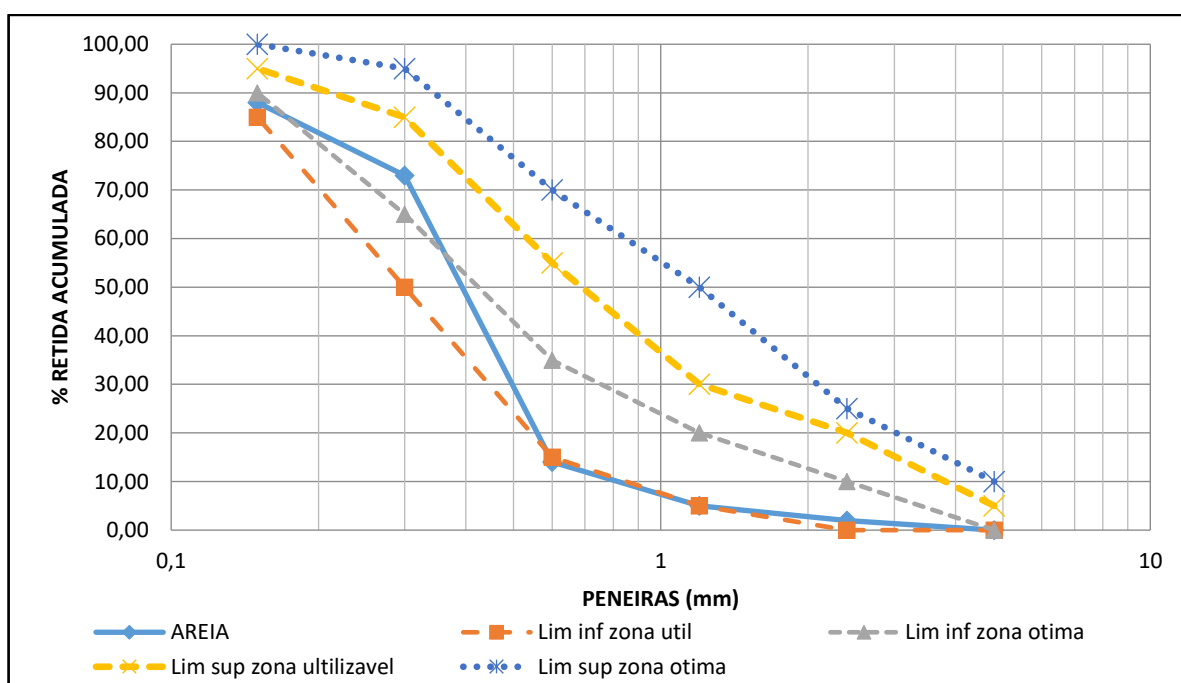
- **Água**

A água utilizada nos experimentos foi obtida do sistema público de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém, fornecida pela empresa Águas do Pará, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira vigente, Portaria GM/MS nº 888 de 2021.

- **Areia**

Areia natural foi utilizada para preparar as argamassas. Sua distribuição granulométrica foi determinada a partir da análise realizada segundo a NBR NM 248, atendendo aos limites estabelecidos pela NBR 7211. A curva granulométrica do agregado miúdo situa-se predominantemente na zona ótima (Figura 2), o que indica uma distribuição granulométrica adequada para a pesquisa.

Figura 2 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

- **Aditivo Plastificante**

O aditivo plastificante Quartzolit foi utilizado devido às propriedades especificadas pelo fabricante. É um aditivo líquido transparente à base de tensoativos, cuja função principal é atuar como plastificante e incorporador de ar, visando melhorar a trabalhabilidade da mistura.

- **Cimento**

O cimento Portland CP II F foi selecionado para os ensaios de resistência à compressão axial e resistência de aderência à tração por apresentar características adequadas à produção de argamassas de revestimento. Este tipo de material cimentício contém filler calcário em sua composição (6% a 10%), o que proporciona maior trabalhabilidade e menor retração à mistura — propriedades essenciais para aplicações em substratos. Além disso, o CP II F exibe calor de hidratação moderado e boa estabilidade dimensional, fatores que reduzem a ocorrência de fissuras e favorecem a aderência ao substrato.

- **Sílica Ativa (SA)**

A sílica ativa utilizada nos experimentos foi adquirida em Belém do Pará. Originária da indústria de silício metálico e ferrossilício, este material pozolânico altamente reativo atende às especificações da NBR 13956 (2019). Suas propriedades incluem teor de SiO_2 acima de 90%, perda ao fogo inferior a 6% e tamanho médio de partícula abaixo de $45 \mu\text{m}$.

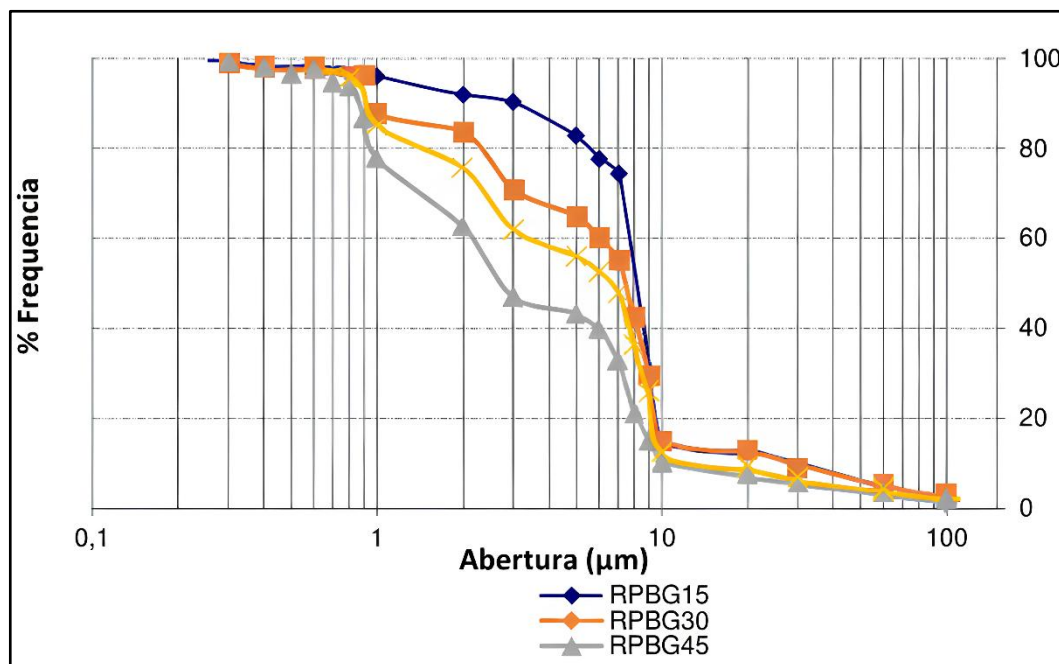
- **Metacaulim (MK)**

O metacaulim utilizado nos experimentos, obtido em Belém do Pará, provém da calcinação controlada de caulim, matéria-prima rica em aluminossilicatos. Em conformidade com a NBR 15895 (2019), o material apresenta composição química com teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ superior a 85%, perda ao fogo abaixo de 2% e tamanho médio de partícula inferior a $20 \mu\text{m}$.

- **Pó de Brita de Granito Moído (PBGGM)**

O material de estudo consiste em resíduos do processo de britagem de rochas graníticas, coletados diretamente em uma usina de beneficiamento mineral localizada no município de Tracuateua, no nordeste do Estado do Pará. A fração mais promissora para aplicação em materiais de construção civil corresponde ao resíduo de pó de pedra britada submetido à moagem por 45 minutos, que apresentou a melhor distribuição granulométrica e a maior reatividade entre as amostras analisadas. Os resultados são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Granulometria a laser do resíduo em diferentes tempos de moagem.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2. Ensaio Realizados

- **Difração de Raios X (DRX)**

A caracterização mineralógica do pó de pedra granítica britada foi realizada utilizando-se difração de raios X (DRX), com o objetivo de identificar as fases cristalinas predominantes após o processo de beneficiamento do material. O ensaio foi conduzido em um instrumento BRUKER D2 Phaser, usando radiação Cu K α ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$), em modo de pó, com varredura aproximada de 5° a 70° 2θ . O difratograma da amostra de PBGM apresentou vários picos intensos e bem definidos distribuídos ao longo da faixa angular analisada, evidenciando um material de natureza predominantemente cristalina, típica de agregados de origem ígnea ácida, como granitos e rochas correlatas. Observa-se um conjunto significativo de reflexões entre aproximadamente 20° e 30° 2θ , além de picos relevantes em regiões próximas a $8-10^\circ$, $40-45^\circ$ e 50° 2θ , compatíveis com silicatos e aluminossilicatos comumente encontrados em materiais graníticos. Em geral, o padrão de DRX do pó de pedra granítica britada apresenta reflexões típicas dos minerais constituintes de rochas graníticas, especialmente quartzo, feldspatos e

possivelmente micras. A intensidade e a nitidez dos picos sugerem que o material possui alto grau de cristalinidade e baixa fração amorfa.

- **Ensaio de Resistência à Compressão Axial**

A avaliação da resistência à compressão axial de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por diferentes materiais cimentícios suplementares (MCSs) reflete os efeitos que esses materiais exercem sobre a capacidade de carga da matriz cimentícia. No presente experimento, argamassas formuladas com PBGM foram comparadas com argamassas incorporando sílica ativa (SA) e metacaulim (MK), dois MCSs produzidos industrialmente e amplamente estudados na literatura devido à sua alta reatividade pozolânica e contribuição para o desempenho mecânico de argamassas e concretos. O ensaio de resistência à compressão axial foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 7215:2019, utilizando corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, curados em câmara úmida por 3, 7 e 28 dias, e rompidos em prensa hidráulica de 100 kN a uma taxa de carregamento constante. Os resultados foram expressos como a média aritmética em megapascais (MPa).

- **Determinação da Resistência de Aderência à Tração**

O ensaio para determinação da resistência de aderência à tração foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 15258:2021 — *Argamassa para revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência potencial de aderência à tração*. Esta norma estabelece os procedimentos para aplicação da argamassa em substrato padrão, cura, colagem dos dispositivos metálicos de carregamento e ensaio de arrancamento, garantindo a confiabilidade e comparabilidade dos resultados.

Neste ensaio, a argamassa foi aplicada sobre um substrato horizontal com espessura controlada de 18 ± 2 mm, utilizando-se placas cerâmicas de 50 mm \times 50 mm conforme a ABNT NBR 14081-2. Após 27 dias de cura, dispositivos metálicos de carregamento foram colados à superfície das placas. Aos 28 dias, um ensaio de arrancamento foi realizado utilizando uma máquina de ensaio de tração aplicando uma carga constante de 250 ± 50 N/s. Os resultados foram expressos em megapascais (MPa), e os modos de ruptura foram classificados de acordo com os critérios estabelecidos na norma.

A importância deste ensaio para a pesquisa reside no fato de que a aderência ao substrato é uma das propriedades mais críticas para o desempenho de argamassas de revestimento, uma vez que a baixa resistência de aderência pode resultar em descolamento, fissuração e falha

prematura do sistema de revestimento cerâmico. Assim, ao comparar argamassas incorporando PBGM, sílica ativa (SA) e metacaulim (MK) nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% com a mistura de referência, o ensaio permite avaliar se a substituição parcial do cimento por esses materiais compromete ou melhora a interface entre a argamassa e o substrato, bem como a interação com as placas cerâmicas.

Adicionalmente, os resultados de aderência são correlacionados com as análises microestruturais (MEV), especialmente com a observação da zona de transição interfacial, permitindo identificar se o PBGM, apesar de sua natureza predominantemente cristalina evidenciada na DRX, atua como filler melhorando o empacotamento e a aderência, ou se sua incorporação reduz a aderência ao enfraquecer a matriz. Finalmente, o ensaio auxilia na determinação do teor máximo de substituição viável para aplicações práticas em revestimentos, considerando os requisitos normativos mínimos de aderência para argamassas industrializadas e preparadas em obra.

- **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A análise por microscopia eletrônica de varredura é de fundamental importância para esta pesquisa por várias razões, alinhando-se às melhores práticas para a caracterização de materiais cimentícios, conforme discutido por diversos autores. A técnica permite correlacionar o desempenho macroscópico com a microestrutura. Os resultados de resistência à compressão, que indicaram a viabilidade técnica de todos os níveis de substituição, são agora compreendidos à luz da microestrutura observada. A presença de etringita bem cristalizada e portlandita, juntamente com uma matriz de C-S-H coesa, válida a hipótese de que o PBGM não interfere negativamente no processo de hidratação do cimento.

A identificação da portlandita é essencial para avaliar o potencial pozolânico do PBGM. Embora os ensaios tenham demonstrado a conformidade do material com as normas, a observação direta da portlandita nas micrografias permite inferir sobre a extensão da reação pozolânica. A presença de cristais de portlandita bem formados indica a disponibilidade deste composto para reações futuras, sugerindo que o potencial pozolânico do PBGM pode se manifestar de forma mais pronunciada em idades mais avançadas.

A análise microestrutural permite a identificação de possíveis mecanismos de reforço ou degradação. A ausência de microfissuras extensas ou zonas de fragilidade na interface entre as partículas de PBGM e a matriz cimentícia indica boa compatibilidade e aderência, fator crucial

para a durabilidade do material a longo prazo. A presença de etringita em quantidades adequadas e com morfologia bem desenvolvida indica que não há risco de expansão deletéria devido à formação tardia deste mineral, aspecto frequentemente investigado em estudos de durabilidade.

As amostras de argamassa com PBGM demonstram que a incorporação deste resíduo, em todos os teores estudados (5% a 20%), resulta em microestruturas com fases hidratadas típicas do cimento Portland (C-S-H, portlandita e etringita) bem desenvolvidas e bem distribuídas. Essas descobertas corroboram os resultados de resistência à compressão e confirmam a viabilidade técnica do PBGM como material cimentício suplementar para a produção de argamassas.

RESULTADOS

A análise de difração de raios X (DRX) do PBGM revelou um material predominantemente cristalino, típico de rochas ígneas ácidas. O difratograma mostrou picos intensos e bem definidos, destacando uma reflexão extremamente intensa em torno de $26,6^\circ 2\theta$, característica do α -quartzo, o que indica que este mineral constitui a fase predominante e uma parte importante da fração mineral do material.

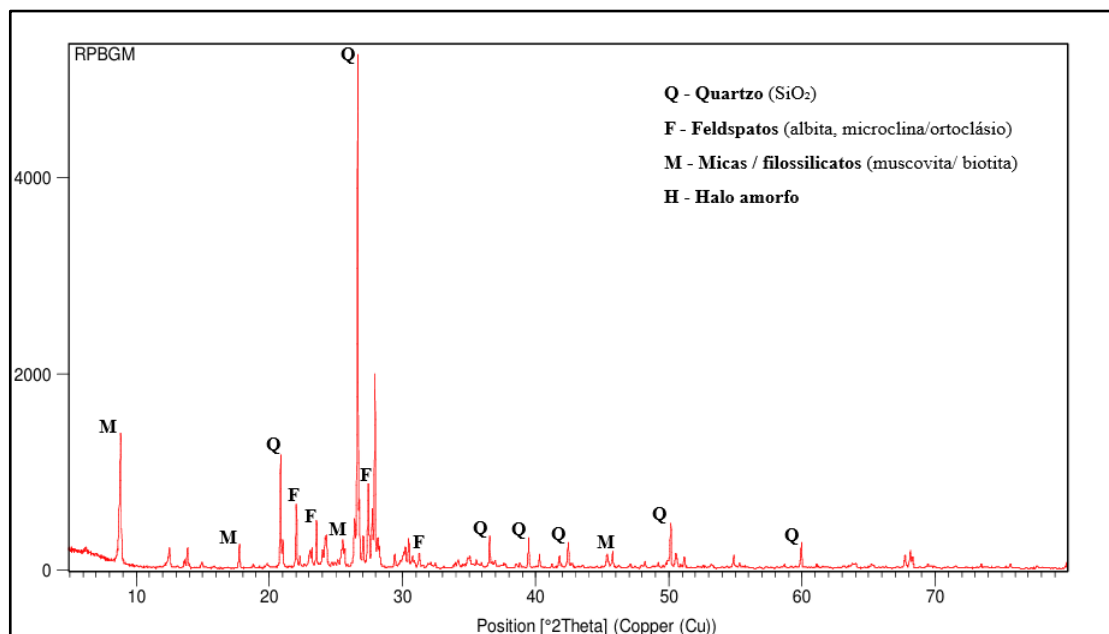
Além do quartzo, observou-se um conjunto complexo de picos entre aproximadamente 22° e $30^\circ 2\theta$, consistente com a presença significativa de feldspatos, provavelmente albita e microclina ou ortoclásio. Estes minerais, associados ao quartzo, compõem a maior parte da matriz cristalina da rocha granítica. Também foram identificados picos de baixa a moderada intensidade em ângulos baixos ($2\theta \approx 8-10^\circ$), sugerindo a provável presença de micas ou outros filossilicatos laminares, como muscovita e/ou biotita, em menores concentrações, o que é típico do pó de pedra granítica britada.

Possíveis fases acessórias, como anfibólios, óxidos de ferro e minerais titaníferos, podem justificar picos discretos e isolados em regiões de ângulo mais alto (35° a $55^\circ 2\theta$), embora estas identificações devam ser tratadas como potenciais e não conclusivas.

Ao contrário de materiais pozolânicos convencionais com alta fração vítrea, o difratograma não mostrou um halo amorfo significativo, confirmando que o PBGM é predominantemente cristalino, com boa organização estrutural e ausência de amorfização significativa causada pelo processo de moagem. Este resultado é consistente com o pó de rocha silicática britada, que tende a exibir baixa reatividade pozolânica intrínseca, a menos que seja

submetido a moagem extremamente fina ou ativação complementar. No entanto, o material pode ter potencial para uso como filler mineral, material de empacotamento granulométrico ou aditivo físico em compósitos cimentícios, dependendo de sua finura, distribuição granulométrica e interação com a matriz.

Figura 1 - Difratoograma de raio X (DRX) do PBGM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Tabela 2 - Resistência a Compressão axial aos 03,07 e 28 dias.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL - NBR 7215:2019			
AMOSTRA	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (MPa)		
	03 DIAS	07 DIAS	28 DIAS
REF	15,65	20,00	32,07
RPBGM05	17,76	26,69	33,63
RPBGM10	15,47	25,86	33,70
RPBGM15	17,43	24,97	33,54
RPBGM20	15,72	24,21	33,66
MC05	22,76	27,21	32,25
MC10	18,76	27,25	33,33
MC15	15,68	20,60	33,59
MC20	16,35	20,00	34,58
SA05	19,02	26,48	33,38

SA10	16,28	25,58	33,46
SA15	16,42	21,93	33,78
SA20	17,23	21,98	35,48

MPa - Megapascoal, REF - Referência normativa, RPBGGM - Resíduo do pó de brita de granito Moído, MC - Metacaulim, SA - Sílica Ativa.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os resultados mostram que as argamassas contendo sílica ativa (SA) apresentaram os maiores valores de resistência à compressão axial em todas as idades analisadas. Este comportamento é consistente com os estudos apresentados na Tabela 2, que demonstraram que a SA, devido à sua alta área superficial específica e alto teor de sílica amorfa, reage rapidamente com o hidróxido de cálcio formando silicatos de cálcio hidratados densos e bem cristalizados, promovendo uma microestrutura mais compacta e, conseqüentemente, maior resistência mecânica. De forma semelhante, as argamassas com metacaulim (MK) também apresentaram desempenho superior ao da referência convencional, indicando que o MK melhora a matriz formando fases secundárias de hidratação por meio do refinamento dos poros.

As argamassas incorporando PBGM apresentaram resistência à compressão axial intermediária entre as formulações com SA, MK e a argamassa de referência. Observou-se que, até certos níveis de substituição (especialmente 5% e 10%), o PBGM foi capaz de manter valores de resistência próximos aos das argamassas com MK, sugerindo que este resíduo mineral possui características físicas e químicas que favorecem, pelo menos parcialmente, a contribuição para a formação de uma matriz cimentícia competente. Esta similaridade com o desempenho de MCSs industrializados pode ser atribuída à combinação de um efeito de preenchimento proporcionado pela finura das partículas, aliado a um potencial de reatividade pozolânica moderada, conforme observado nas análises da influência do tempo de moagem nas propriedades reativas do PBGM.

Por outro lado, em níveis de substituição mais elevados (15% e 20%), as argamassas com PBGM começaram a mostrar diminuições mais evidentes na resistência à compressão axial, o que difere do comportamento observado para a SA e o MK, que mantiveram ganhos mesmo em níveis mais elevados de incorporação. Este fenômeno está associado à sua maior reatividade e capacidade de ativar reações de hidratação de forma mais eficiente. Este aspecto reforça a necessidade de otimização da taxa de substituição ao se utilizar PBGM, de forma a equilibrar

os ganhos ambientais e de sustentabilidade com o desempenho mecânico exigido para o uso específico em argamassas.

A resistência à compressão axial não é meramente um indicador mecânico isolado, mas sim uma medida da densificação microestrutural e da qualidade geral do sistema cimentício. A comparação entre o PBGM e MCSs industriais, tradicionalmente aceitos, permite posicionar o novo material no quadro de alternativas tecnológicas, avaliando sua real viabilidade técnica. Em termos práticos, a constatação de que o PBGM pode produzir argamassas com desempenho mecânico competitivo em níveis moderados de substituição sugere que ele representa uma alternativa sustentável para reduzir o consumo de cimento Portland, ao mesmo tempo em que agrega valor a um resíduo de mineração que, de outra forma, ocuparia áreas de descarte inadequado, gerando passivos ambientais. Esta análise também contribui para a literatura científica ao ampliar o escopo dos MCSs estudados, além de apoiar decisões de engenharia e políticas para o uso de resíduos na construção civil.

Tabela 3 - Determinação da Resistência Potencial de Aderência à Tração ABNT NBR 15258/2021

MÉDIA DOS DADOS COLETADOS DO ENSAIO - ABNT NBR 15258/2021								
Corpo de prova	Carga de ruptura (N)	Tensão Ra (MPa)	Forma de ruptura (%)					
			Substrato	Substrato / Argamassa	Argamassa	Argamassa / Cola	Cola	Cola / Pastilha
RPBGM 05	1014,988275	0,500196744	32	48	18	2	0	0
RPBGM 10	974,78101	0,481398006	0	97	3	0	0	0
RPBGM 15	725,6921	0,358124207	0	90	10	0	0	0
RPBGM 20	438,357255	0,216169823	0	90	10	0	0	0
ANÁLISE ESTÁTISTICA E CLASSIFICAÇÃO - ABNT NBR 13281/2023								
	Média	Ri	Classificação					
RPBGM 05	0,50 Mpa	0,50 Mpa	RA2 (Ri ≥ 0,30MPa)					
RPBGM 10	0,48 Mpa	0,48 Mpa	RA2 (Ri ≥ 0,30MPa)					

RPBGM 15	0,36 Mpa	0,36 Mpa	RA ₂ (R _i ≥ 0,30MPa)
RPBGM 20	0,22 Mpa	0,22 Mpa	RA ₁ (R _i ≥ 0,20MPa)
RA ₁ : ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de pintura e/ou textura.			
RA ₂ : ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de peças cerâmicas (ABNT NBR 13754) ou de revestimento externo.			

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os resultados obtidos na Tabela 3 mostram claramente a influência do percentual de substituição do cimento Portland por PBGM no desempenho das argamassas. A resistência de aderência é uma propriedade fundamental para sistemas de revestimento, representando a capacidade da argamassa de transferir tensões entre o substrato e o revestimento cerâmico sem que ocorra descolamento. Neste contexto, os resultados demonstraram que percentuais de substituição mais baixos apresentaram comportamento favorável, enquanto o aumento da incorporação do resíduo mineral resultou em uma redução gradual da resistência.

A argamassa com 5% de substituição do cimento por PBGM apresentou uma resistência média de aderência de aproximadamente 0,50 MPa, representando o melhor desempenho entre as misturas analisadas. Este resultado pode ser associado, em parte, ao efeito de preenchimento físico promovido pelas partículas finas do PBGM. Quando incorporado em pequenas quantidades, o material tende a ocupar vazios entre os grãos do sistema cimentício, promovendo melhor empacotamento das partículas e contribuindo para uma microestrutura mais densa. Este fenômeno favorece um aumento da área de contato efetiva entre a argamassa e o substrato, além de melhorar a ancoragem mecânica da argamassa.

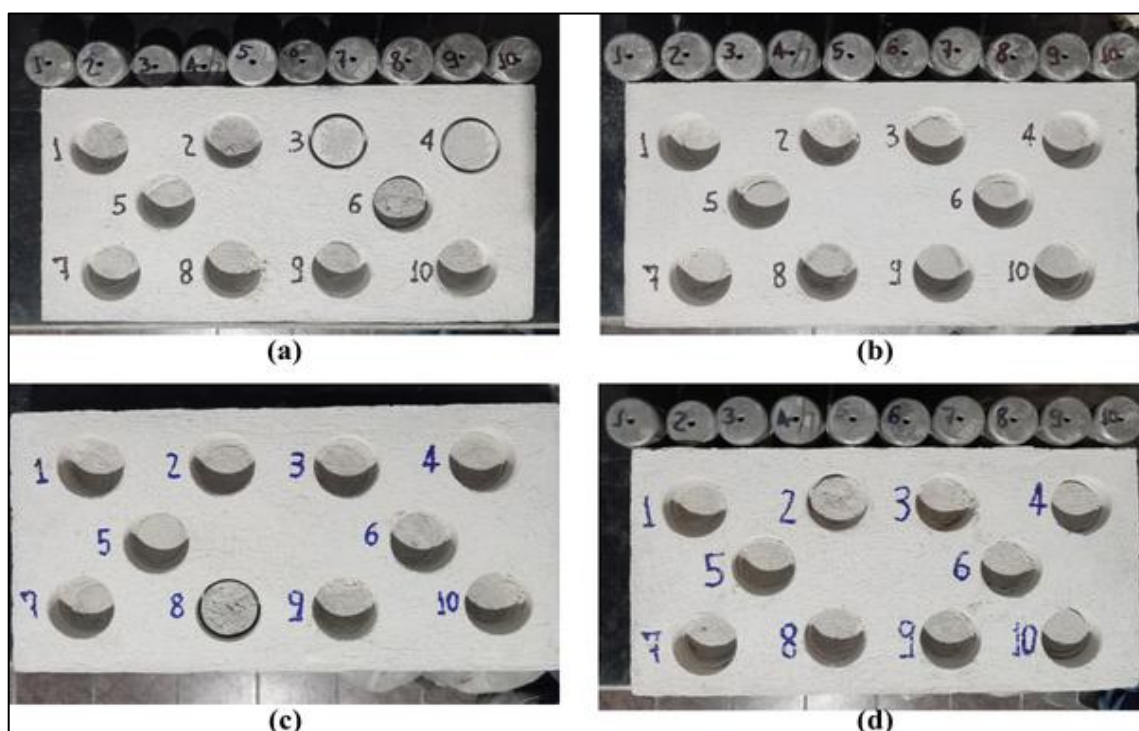
Resultados semelhantes foram observados na argamassa com 10% de substituição, que apresentou resistência média de aproximadamente 0,48 MPa. Embora ligeiramente inferior à mistura com 5%, o valor manteve-se elevado e dentro de uma faixa considerada satisfatória para argamassas destinadas ao assentamento de placas cerâmicas. Este comportamento sugere que, até este nível de substituição, o PBGM continua a contribuir favoravelmente para a estrutura da matriz cimentícia, seja pelo efeito filler, seja pela reatividade pozolânica resultante da presença de sílica e alumina em sua composição mineralógica. Assim, mesmo com uma redução parcial no teor de clínquer disponível para as reações de hidratação, a matriz resultante mantém coesão suficiente para garantir níveis adequados de aderência.

À medida que o teor de substituição aumenta para 15%, observou-se uma redução mais significativa na resistência de aderência à tração, atingindo um valor médio de aproximadamente 0,36 MPa. Embora este resultado ainda atenda aos requisitos para classificação na categoria RA₂, a

diminuição observada indica que a quantidade de cimento disponível para a formação de produtos de hidratação começa a se tornar insuficiente para manter o nível de coesão e capacidade de ligação interfacial observado nas misturas com menores teores de substituição. Nesta fase, o efeito de preenchimento positivo promovido pelo PBGM começa a ser parcialmente compensado pela redução no teor de aglomerante efetivamente reativo, o que pode resultar em uma microestrutura menos densa e uma menor capacidade de transferência de tensões entre os componentes do sistema.

Este comportamento torna-se evidente na formulação com 20% de substituição, que apresentou resistência média de aproximadamente 0,22 MPa. Neste caso, a redução da resistência foi suficientemente significativa para alterar a classificação da argamassa, que passou então para a categoria RA1. Esta classe corresponde a argamassas indicadas principalmente para revestimentos internos destinados à aplicação de pintura ou textura, que exigem níveis de aderência mais baixos em comparação com sistemas destinados ao assentamento de revestimentos cerâmicos. A diminuição da resistência neste teor mais elevado pode ser explicada pela redução mais pronunciada da fração de cimento Portland na mistura, o que implica menor formação de produtos de hidratação responsáveis pela ligação entre as partículas e pela resistência do sistema. Além disso, a maior presença de partículas de resíduo mineral pode resultar em aumento da porosidade da matriz, favorecendo a formação de zonas fracas na interface argamassa-substrato.

Figura 6 - Padrões de ruptura observados no ensaio de resistência de aderência à tração: (a) interface substrato/argamassa; (b) ruptura coesiva; (c) ruptura mista.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

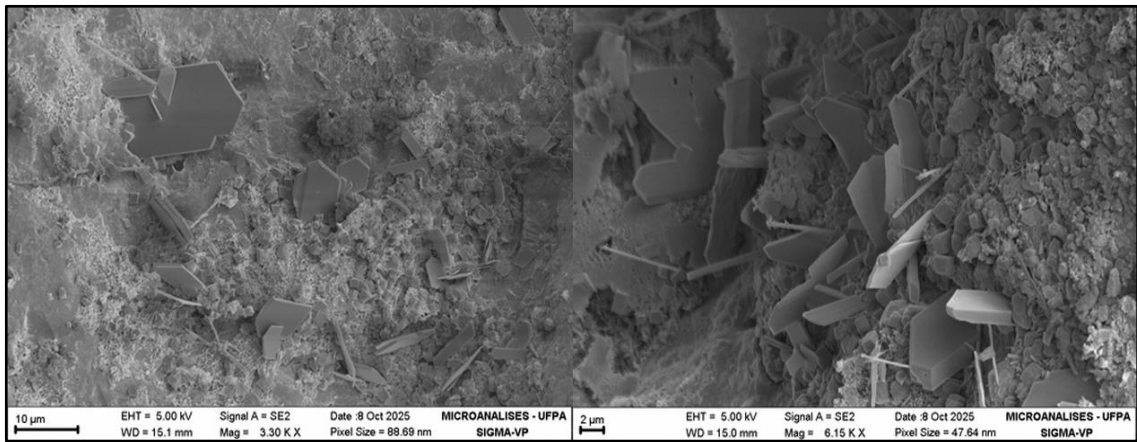
A análise dos padrões de ruptura observados durante o ensaio (Figura 6) completa a interpretação dos resultados. Nas misturas com menores teores de PBGM, especialmente na amostra com 5% de substituição, predominaram rupturas na interface entre o substrato e a argamassa, bem como ocorrências de ruptura dentro da própria argamassa. Este tipo de comportamento indica que a ligação estabelecida entre os componentes do sistema é relativamente homogênea e que a resistência global do conjunto está distribuída entre as diferentes interfaces. Na mistura com 10% de PBGM, observou-se uma predominância ainda maior de rupturas na interface substrato/argamassa, sugerindo que a aderência ao substrato constitui o principal mecanismo de transferência de tensão.

Nas misturas com teores de substituição mais elevados, particularmente nas formulações com 15% e 20% de PBGM, as rupturas continuaram a ocorrer principalmente na interface substrato/argamassa, mas foram acompanhadas por valores de tensão significativamente mais baixos. Este comportamento indica que, embora o mecanismo de ruptura permaneça semelhante, a capacidade da argamassa de suportar tensões de tração diminuiu devido à menor coesão interna da matriz cimentícia.

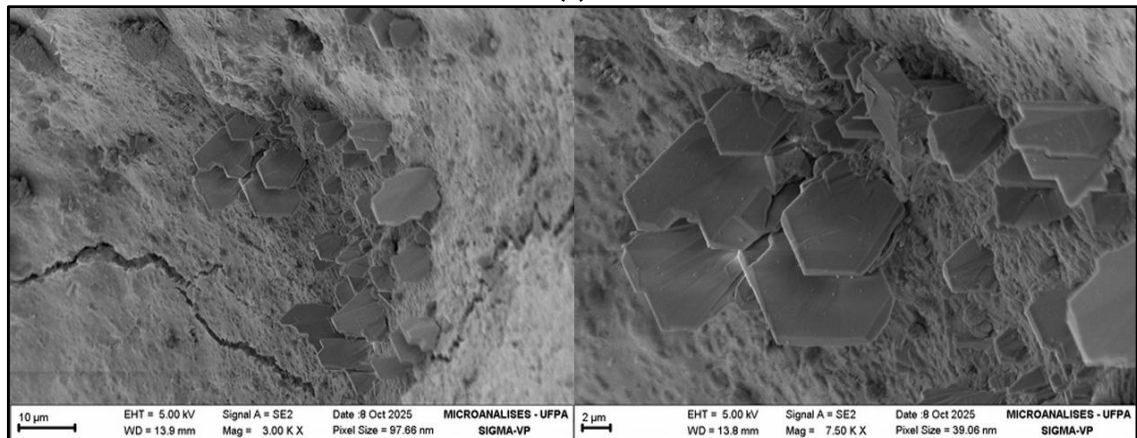
A incorporação de PBGM apresenta potencial técnico para uso em argamassas de revestimento, desde que aplicada em quantidades moderadas. Níveis de substituição de até 10% apresentaram desempenho bastante satisfatório, mantendo níveis elevados de aderência e classificando-se na categoria RA2, adequada para revestimentos cerâmicos e aplicações externas. Níveis de substituição de até 15% ainda apresentam desempenho aceitável dentro desta mesma classe, embora com uma redução perceptível na resistência. Por outro lado, o nível de substituição de 20% demonstrou que aumentar excessivamente a fração de resíduo pode comprometer parcialmente o desempenho da aderência, restringindo sua aplicação a sistemas menos exigentes do ponto de vista de desempenho mecânico.

A importância de definir níveis ótimos de substituição ao buscar incorporar resíduos minerais em matrizes cimentícias demonstra que o PBGM pode representar uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para reduzir o consumo de cimento Portland na produção de argamassas, contribuindo para o aproveitamento de resíduos da indústria de britagem de rochas e mitigando os impactos ambientais associados ao descarte desses materiais.

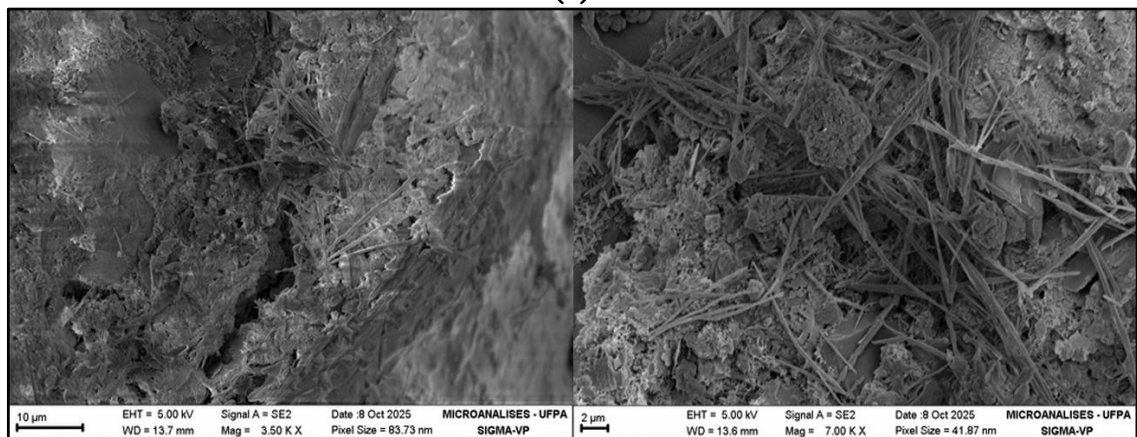
Figura 7 - Micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV): (a) PBGM₀₅; (b) PBGM₁₀; (c) PBGM₁₅; (d) PBGM₂₀.



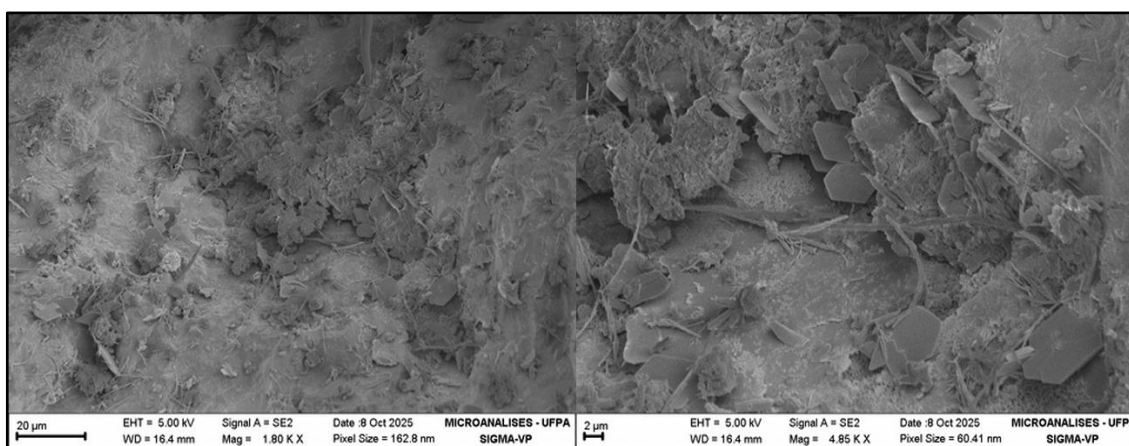
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise das micrografias permite a identificação das principais fases hidratadas típicas de matrizes cimentícias, como extensamente documentado na literatura especializada. Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), em seu trabalho fundamental sobre a microestrutura do concreto, estabelecem as características morfológicas distintivas dos produtos de hidratação do cimento Portland, que servem de base para esta análise.

Etringita (AFt): Nas micrografias das amostras PBGM15 -- Figura 7(c) e PBGM20 -- Figura 7(d), observa-se a presença de cristais aciculares alongados, com morfologia típica de agulhas característica da etringita (trisulfoaluminato de cálcio hidratado). Estes cristais, conforme descrito por Mehta e Monteiro (2014), formam-se nos estágios iniciais da hidratação do cimento e desempenham um papel fundamental na pega inicial da pasta, além de contribuírem para a resistência mecânica quando homogeneamente distribuídos na matriz. Os cristais aciculares entrelaçados formam uma rede que contribui para a coesão da matriz e justifica parcialmente o bom desempenho mecânico observado para esta mistura. A presença de etringita cristalizada indica que o processo de hidratação ocorreu adequadamente, mesmo com a substituição parcial do cimento pelo PBGM.

Portlandita (CH): Cristais de portlandita (hidróxido de cálcio), com sua morfologia hexagonal característica e hábito laminar, são claramente identificáveis em várias micrografias, especialmente nas amostras PBGM05 -- Figura 7(a) e PBGM10 -- Figura 7(b). A portlandita é um produto primário da hidratação do silicato tricálcico (C_3S) e do silicato dicálcico (C_2S). Como apontado por Neville (2016), sua morfologia e distribuição na matriz influenciam propriedades como resistência e durabilidade. Observam-se cristais hexagonais bem formados

de portlandita em contato íntimo com a matriz de C-S-H, indicando uma zona de transição interfacial bem desenvolvida. A presença destes cristais é particularmente relevante para o estudo de materiais pozolânicos, uma vez que a reatividade do PBGM será evidenciada pelo consumo deste hidróxido de cálcio para a formação de C-S-H.

Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H): A matriz predominante em todas as micrografias é composta por gel de C-S-H, que apresenta uma fase amorfa de morfologia irregular, preenchendo os espaços entre os grãos de agregado e os cristais de portlandita e etringita. Na amostra PBGM₀₅ -- Figura 7(a), observa-se uma matriz de C-S-H densa, com pouca porosidade aparente, o que justifica a alta resistência à compressão desta mistura. Nas amostras mostradas nas Figuras 7(c) e 7(d), a microestrutura é ligeiramente mais porosa, com a presença de C-S-H tipo II (fibroso), que se forma nos espaços originalmente preenchidos com água.

PBGM₀₅ -- Figura 7(a): Apresenta a microestrutura mais densa e homogênea entre todas as amostras, com predominância de C-S-H compacto e porosidade reduzida. Esta morfologia justifica o excelente desempenho mecânico desta mistura e sugere que, em baixos teores, o PBGM atua predominantemente como filler, preenchendo vazios intersticiais e promovendo a nucleação de produtos de hidratação.

PBGM₁₀ -- Figura 7(b): Esta amostra exhibe uma microestrutura rica em fases cristalinas bem definidas, com portlandita hexagonal em evidência. A presença destas fases, juntamente com uma matriz de C-S-H bem desenvolvida, resulta na maior resistência à compressão observada. Este comportamento sugere que, neste teor, o PBGM começa a participar mais ativamente das reações, possivelmente por meio de pozolanicidade incipiente, consumindo parte da portlandita para formar C-S-H adicional.

PBGM₁₅ -- Figura 7(c): A microestrutura mostra uma boa distribuição dos cristais de portlandita, mas com uma matriz de C-S-H ligeiramente menos densa do que nas amostras com teores mais baixos.

PBGM₂₀ -- Figura 7(d): Observa-se uma microestrutura com maior porosidade aparente e presença de C-S-H fibroso mais evidente. No entanto, a resistência à compressão permanece elevada, indicando que, mesmo com uma matriz aparentemente mais porosa, a integridade estrutural é mantida. A presença de cristais de etringita bem formados nesta amostra sugere que a hidratação do cimento remanescente prossegue adequadamente, compensando o maior teor de substituição.

CONCLUSÃO

A análise integrada dos resultados obtidos nos ensaios permite estabelecer correlações significativas entre a composição das misturas com substituição parcial do cimento Portland por PBGM e o desempenho mecânico e microestrutural das argamassas produzidas. Em relação à resistência à compressão axial, os resultados demonstraram que todas as formulações contendo PBGM apresentaram desempenho mecânico satisfatório quando comparadas à argamassa de referência, especialmente nas idades de cura mais avançadas. Observou-se que, aos 28 dias, os valores de resistência das argamassas com PBGM foram muito próximos ou ligeiramente superiores aos da mistura de referência, independentemente do nível de substituição utilizado. Este comportamento sugere que a incorporação de PBGM contribui para a capacidade resistente da matriz cimentícia, principalmente em níveis moderados de substituição. Este resultado pode ser amplamente explicado pelo efeito de preenchimento físico promovido pelas partículas finas do resíduo mineral. Quando incorporadas à mistura, essas partículas atuam preenchendo vazios entre os grãos de cimento e areia, promovendo melhor empacotamento das partículas e contribuindo para a formação de uma microestrutura mais densa e menos porosa.

Além do efeito filler, a ocorrência de reações pozolânicas também pode ser considerada. O PBGM possui composição mineral rica em sílica e alumina, o que pode favorecer a reação com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados adicionais (C-S-H). Este processo contribui para a densificação da matriz e para o aumento gradual da resistência mecânica ao longo do tempo. Este comportamento foi particularmente perceptível ao observar a evolução da resistência entre as idades de 7 e 28 dias, indicando que o material pode exibir reatividade tardia, característica frequentemente observada em materiais cimentícios suplementares de origem mineral. Em comparação com as argamassas contendo SA e MK, verificou-se que estes materiais ainda apresentam desempenho superior em certos casos, especialmente nas primeiras idades de cura. Este comportamento já era esperado, uma vez que ambos são materiais altamente reativos e possuem alta área superficial específica, o que favorece reações pozolânicas mais intensas e rápidas. A sílica ativa, em particular, é reconhecida por promover densificação significativa da matriz cimentícia devido à sua granulometria extremamente fina e alto teor de sílica amorfa. O metacaulim, por sua vez, contribui para a formação de fases secundárias de hidratação e para o refinamento da estrutura porosa, fatores que resultam em ganhos de resistência e durabilidade.

O desempenho apresentado pelas argamassas com PBGM demonstra que o resíduo possui potencial técnico relevante, especialmente quando utilizado em níveis moderados de substituição. A proximidade dos valores de resistência obtidos indica que o PBGM pode atuar efetivamente como material de substituição parcial do cimento, especialmente considerando seu baixo custo e ampla disponibilidade em regiões com atividade de britagem de rochas. A análise dos resultados do ensaio de resistência de aderência à tração reforça esta interpretação. As argamassas contendo PBGM apresentaram desempenho satisfatório até o nível de substituição de 15%, mantendo valores de resistência acima do limite mínimo exigido para a classificação na categoria RA2. Esta classificação indica que as argamassas apresentam desempenho adequado para aplicação em revestimentos internos destinados ao assentamento de placas cerâmicas, bem como para revestimentos externos. O melhor resultado foi observado para a mistura com 5% de substituição, que atingiu resistência média de aproximadamente 0,50 MPa. Este comportamento pode ser explicado pelo equilíbrio entre a presença de cimento Portland e o efeito de preenchimento proporcionado pelo PBGM, resultando em uma matriz suficientemente coesa e capaz de promover ancoragem mecânica adequada ao substrato.

Com o aumento do nível de substituição, observou-se uma redução gradual da resistência de aderência, especialmente na mistura com 20% de PBGM, que apresentou valor médio de aproximadamente 0,22 MPa e foi classificada como RA1. Este resultado indica que níveis mais elevados de substituição podem comprometer parcialmente a capacidade de aderência da argamassa. Embora o PBGM apresente potencial de uso, a definição de um nível ideal de substituição torna-se fundamental para garantir o desempenho adequado em aplicações que exigem maior resistência de aderência. A análise dos padrões de ruptura observados durante o ensaio de aderência fornece informações adicionais sobre o comportamento das argamassas. Em misturas com menores teores de PBGM, a predominância de rupturas na interface substrato/argamassa indica que a ligação entre os materiais é suficientemente forte para transferir tensões para esta região. Em misturas com maiores teores de substituição, a redução nos valores de tensão de ruptura sugere uma diminuição da coesão interna da matriz cimentícia, que pode estar relacionada ao aumento da porosidade e à menor formação de produtos de hidratação.

Estas interpretações são corroboradas pelos resultados obtidos a partir da análise microestrutural por MEV. As micrografias evidenciaram a presença das principais fases hidratadas típicas de sistemas cimentícios, como gel C-S-H, cristais de portlandita e estruturas

aciculares de etringita. A presença destas fases em todas as amostras indica que a hidratação do cimento ocorre adequadamente mesmo com a substituição. Em níveis mais baixos de substituição, a matriz apresentou aspecto mais denso e homogêneo, com menor presença de vazios aparentes, o que está diretamente relacionado aos melhores resultados mecânicos obtidos nestas misturas. A correlação entre os resultados dos diferentes ensaios permite concluir que o PBGM, resíduo do beneficiamento de granito no município de Tracuateua-PA, processado mecanicamente por moagem, apresenta potencial técnico para uso como material cimentício suplementar em argamassas, desde que respeitados os limites adequados de substituição. A combinação do efeito filler, proporcionado pela finura das partículas, com a moderada reatividade pozolânica confere ao material a capacidade de manter ou mesmo melhorar o desempenho mecânico em níveis de substituição de até 10%, atuando de forma complementar à matriz cimentícia. Em níveis mais elevados, a diluição do cimento e o excesso de partículas não reativas começam a comprometer propriedades críticas como a aderência, exigindo cautela em aplicações que demandam elevada resistência de ancoragem ao substrato. A análise integrada posiciona o PBGM como uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para redução do consumo de cimento Portland, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados à indústria cimenteira e agregando valor a um resíduo mineral regional.

REFERÊNCIAS

- [1] Nobre CA, Sampaio G, Borma LS, Castilla-Rubio JC, Silva JS, Cardoso M (2016) Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc Natl Acad Sci USA* 113(39):10759–10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- [2]. Fernandes GW, Goulart FF, Ranieri BD, Coelho MS, Dales K, Boesche N, Bustamante M, Carvalho FA, Carvalho DC, Dirzo R, Fernandes S, Galetti PM, Garcia VAS, Lara AC, Lima PEC, Lopes LE, Medeiros A, Meyer ALS, Nogueira A, Ourem PC, Rodrigues L, Souza ID, Suarez YR, Viana LA, Villar EG (2017) Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Nat Conserv* 14(2):35–45. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.003>
- [3]. Sabbag AF, Souza ML, Silva RV, Almeida MF (2019) Mining waste and sustainable development: challenges and opportunities. *J Clean Prod* 228:1168–1178. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.298>
- [4]. Silva RV, Almeida MF (2020) Environmental impacts of improper disposal of construction waste. *Waste Manag* 102:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.041>
- [5]. Vasconcelos RM, Souza JP, Costa AL (2018) Environmental impacts of mining activities in the Amazon. *Environ Sci Pollut Res* 25:12345–12356. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-5>

- [6]. Costa JP, Souza ML (2021) Air pollution and particulate matter from mining residues. *Environ Monit Assess* 193:1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08999-4>
- [7]. Ferreira H, Oliveira R, Santos L (2019) Sustainable alternatives for mineral waste reuse. *Resour Conserv Recycl* 145:10–20. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.019>
- [8]. Kaza S, Yao L, Bhada-Tata P, Van Woerden F (2018) *What a Waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- [9]. Subasi S, Öztürk M, Bayram M (2015) Effects of marble powder on mortar properties. *Constr Build Mater* 95:458–467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.109>
- [10]. Sharbatdar MK, Abbasi M, Fakhri M (2017) Mechanical properties of mortar with metakaolin and silica fume. *Constr Build Mater* 148:711–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.078>
- [11]. Hsu SH, Chi M, Huang R (2018) Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of mortar. *Constr Build Mater* 176:230–238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.104>
- [12]. Dossena MH, Silva PR, Oliveira FM (2019) Mortar with crushed stone waste. *Mater Res* 22(Suppl 1):e20180868. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0868>
- [13]. Yang KH, Kim GH, Choi YH (2020) Bentonite-modified mortars: mechanical properties and microstructure. *Constr Build Mater* 247:118542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118542>
- [14]. Karatas M, Gökçe HS, Gökçe A (2020) Calcined kaolin in mortars: mechanical performance and durability. *Constr Build Mater* 265:120300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120300>
- [15]. Benjeddou O, Soussi C, Mnif T (2020) Waste marble powder in mortar: effect on mechanical and durability properties. *J Build Eng* 32:101642. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101642>
- [16]. Sultana S, Islam M (2022) Ladle furnace slag as a supplementary cementitious material in mortar. *Constr Build Mater* 344:128210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128210>
- [17.] Wahedy A, Hossain KMA, Anwar MS (2023) Natural pozzolan from Afghanistan: characterization and performance in mortar. *Constr Build Mater* 365:130120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130120>
- [18]. Wang Y, Liu J, Zhang P (2023) Granite powder as a supplementary cementitious material in mortar. *Mater Today Commun* 35:105634. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105634>
- [19]. Mehta PK, Monteiro PJM (2014) *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 4th edn. McGraw-Hill Education, New York
- [20]. Neville AM (2016) *Properties of concrete*, 5th edn. Pearson Education, London

- [21]. Scrivener K, Snellings R, Lothenbach B (2016) A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781315279923>
- [22]. ABNT (2004a) NBR 10004: Solid waste – Classification. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [23]. ABNT (2004b) NBR 10005: Procedure for obtention of leaching extract of solid wastes. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [24]. ABNT (2004c) NBR 10006: Procedure for obtention of solubilized extract of solid wastes. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [25]. ABNT (1991) NBR 5733: High early strength Portland cement. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [26]. ABNT (2015a) NBR 5751: Pozzolanic materials – Determination of pozzolanic activity with lime. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [27]. ABNT (2014) NBR 5752: Pozzolanic materials – Determination of pozzolanic activity index with Portland cement. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [28]. ABNT (2015b) NBR 7211: Aggregates for concrete – Specification. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [29]. ABNT (2019) NBR 7215: Portland cement – Determination of compressive strength. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [30]. ABNT (2015c) NBR 11578: Composite Portland cement. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [31]. ABNT (2014) NBR 12653: Pozzolanic materials – Specification. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [32]. ABNT (2015d) NBR 13281: Mortars for laying and covering walls and ceilings – Requirements. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [33]. ABNT (2015e) NBR 13956: Silica fume – Specification. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [34]. ABNT (2021a) NBR 14081-2: Adhesives for ceramic application – Requirements. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [35]. ABNT (2023) NBR 14656: Chemical analysis by X-ray fluorescence spectrometry. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [36]. ABNT (2021b) NBR 15258: Mortar for laying and covering walls and ceilings – Determination of tensile bond strength. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro

- [37]. ABNT (2015f) NBR 15895: Metakaolin for use with Portland cement in concrete, mortar and paste – Specification. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [38]. ABNT (2015g) NBR 16372: Determination of fineness by the air permeability method (Blaine). Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [39]. ABNT (2015h) NBR 16541: Mortar for laying and covering walls and ceilings – Mix preparation for testing. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [40]. ABNT (2022) NBR 17054: Aggregates – Determination of particle size distribution. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro
- [41]. ABNT (2003) NBR NM 248: Aggregates – Determination of particle size distribution. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro