



INSTITUTO FEDERAL EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAPÁ
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MINERAÇÃO

BRUNA DOS SANTOS MELO
MARIA CECILIA RODRIGUES CARDOSO

**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE BRITA PARA
LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES NO SOLO**

MACAPÁ
2025

BRUNA DOS SANTOS MELO
MARIA CECILIA RODRIGUES CARDOSO

**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE BRITA PARA
LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES NO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a coordenação do curso de Tecnologia em Mineração, como requisito avaliativo para obtenção de título de Tecnólogo em Mineração. Orientador: Profa. Me. Lídia Dely Alves de Sousa.

MACAPÁ

2025

Biblioteca Institucional - IFAP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M528a Melo, Bruna dos Santos

Análise do uso de resíduos da mineração de brita para liberação de nutrientes no solo / Bruna dos Santos Melo, Maria Cecília Rodrigues Cardoso. - Macapá, 2025.

50 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá, Campus Macapá, Tecnologia em Mineração, 2025.

Orientadora: Ma. Lídia Dely Alves de Sousa.


1. Rochagem. 2. Resíduo de granito. 3. Fertilização natural. I. Cardoso, Maria Cecília Rodrigues. I. Sousa, Ma. Lídia Dely Alves de , orient. II. Título.

BRUNA DOS SANTOS MELO
MARIA CECILIA RODRIGUES CARDOSO


**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE BRITA PARA
LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES NO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a coordenação do curso de Tecnologia em Mineração, como requisito avaliativo para obtenção de título de Tecnólogo em Mineração.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LIDIA DELY ALVES DE SOUSA**
Data: 27/01/2026 12:19:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora: Profa. Me. Lídia Dely Alves de Sousa

Documento assinado digitalmente
 **FRANCIOLLI DA SILVA DANTAS DE ARAUJO**
Data: 27/01/2026 11:12:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador: Prof. Dr. Franciulli da Silva Dantas de Araujo

Documento assinado digitalmente
 **SANDRO ROGERIO BALIEIRO DE SOUZA**
Data: 29/01/2026 11:24:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador: Prof. Me. Sandro Rogério Balieiro de Souza

Apresentado em: 02 / 12 / 2025.

Conceito/Nota: 9.

AGRADECIMENTOS

A nossa orientadora Lúcia Sousa, pela orientação durante a execução dessa pesquisa.

Ao professor Osvaldo Vasconcelos, pela contribuição nessa pesquisa com orientações de estruturação, bibliografias pertinentes e por ter nos conduzido ao EMBRAPA para realizar o ensaio de fotometria de chama.

Ao Instituto Federal do Amapá, por disponibilizar os laboratórios para realizarmos os ensaios de amostragem e cinética química.

Aos nossos companheiros, Anderson Amaro Monteiro e Rener Soares Gouvêa, por todo o apoio e consolo nos momentos desafiadores dessa pesquisa.

RESUMO

A rochagem é uma técnica de fertilização natural que utiliza pós de rochas para recompor nutrientes em solos empobrecidos. O resíduo granítico apresenta-se como material de baixo custo e alternativa ao uso de fertilizantes químicos, cujo preço foi elevado pela recente guerra entre Rússia e Ucrânia. Este trabalho teve como objetivo avaliar, sob o ponto de vista físicoquímico, o potencial do resíduo da mineração de granito como biofertilizante. Foram realizados ensaios de caracterização física (densidade real e aparente, peneiramento via úmido), análise química por fluorescência de raios X (FRX) e cinética de liberação de potássio com ácido cítrico em diferentes concentrações. O material apresentou distribuição granulométrica adequada à aplicação agrícola, com frações finas que favorecem a liberação gradual de nutrientes. A composição química demonstrou predominância de SiO_2 (62,3%) e teores significativos de K_2O (7,6%), CaO (3,0%) e P_2O_5 (1,1%), evidenciando potencial agrônomo. A redução da granulometria aumentou a solubilização do potássio, demonstrando maior reatividade em meio ácido. Conclui-se que o resíduo granítico apresenta propriedades físicas e químicas compatíveis com o uso agrícola como fonte complementar de nutrientes, atendendo parcialmente à Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Recomenda-se a determinação do quartzo livre e de elementos potencialmente tóxicos, além de ensaios de campo, para comprovar a eficiência e a adequação normativa.

Palavras-chave: rochagem; resíduo granítico; fertilizante natural.

ABSTRACT

Rock remineralization is a natural fertilization technique that uses ground rocks to restore nutrients in depleted soils. Granite residue is a low-cost material and an alternative to chemical fertilizers, whose prices have risen due to the recent war between Russia and Ukraine. This study aimed to evaluate, from a physicochemical perspective, the potential of granite mining residue as a biofertilizer. Physical characterization tests (real and apparent density, wet sieving), chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF), and potassium release kinetics using citric acid at different concentrations were performed. The material presented a particle size distribution suitable for agricultural application, with fine fractions that favor the gradual release of nutrients. The chemical composition showed a predominance of SiO_2 (62.3%) and significant levels of K_2O (7.6%), CaO (3.0%), and P_2O_5 (1.1%), indicating agronomic potential. The reduction in particle size increased potassium solubilization, demonstrating greater reactivity under acidic conditions. It is concluded that the granite residue has physicochemical properties compatible with agricultural use as a complementary nutrient source, partially meeting the requirements established by Normative Instruction No. 5/2016 of the Brazilian Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA). Determination of free quartz and potentially toxic elements, as well as field tests, is recommended to confirm efficiency and regulatory compliance.

Keywords: rock dust; granitic residue; natural fertilizer.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Pilha de rejeito da Pedreira Santa Bárbara..... | 20 |
| Figura 2 - Fluxograma de caracterização do resíduo de brita..... | 25 |
| Figura 3 - Mapa de localização da coleta do pó de brita. | 26 |
| Figura 4 - Pilhas de resíduo da mineração de brita depositadas próximo à empresa. | 26 |
| Figura 5 - Amostra sendo coletada após a homogeneização..... | 27 |
| Figura 6 - Amostra no quarteador giratório | 28 |
| Figura 7 - (a) Materiais utilizados nos testes de picnometria; (b) Picnômetro com água e amostra na balança..... | 29 |
| Figura 8 - (a) Polpa (água + alíquota de 1 kg); (b) Peneiras e amostras utilizadas | 30 |
| Figura 9 - Peneiramento suspenso via úmido..... | 31 |
| Figura 10 - (a) Amostra retida nas peneiras; (b) Amostras na estufa | 31 |
| Figura 11 - (a) Adição da amostra no erlenmayer com a solução de ácido cítrico; (b) Ensaio de cinética de liberação na incubadora shaker..... | 32 |
| Figura 12 - Leitura das amostras no fotômetro de chama. | 33 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Curva granulométrica do ensaio de peneiramento via úmido | 37 |
| Gráfico 2 - Gráficos da liberação em função do tempo em Repouso e Agitação, respectivamente..... | 40 |
| Gráfico 3 - Quantidade de extração acumulada de potássio em função do tempo em repouso e agitação, respectivamente..... | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Densidade real das frações granulométricas menores que 200# | 35 |
| Tabela 2 - Densidade real da amostra in natura | 35 |
| Tabela 3 - Médias entre as frações retidas do peneiramento via úmido | 36 |
| Tabela 4 - Análise química das amostras para avaliação da fertilidade no solo | 37 |
| Tabela 5 - Interpretação das análises de fertilidade no solo | 38 |
| Tabela 6 - Composição química do pó de rocha analisado | 38 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | OBJETIVOS | 14 |
| 2.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 2.1.1 | Objetivos Específicos | 14 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3.1 | Fertilizantes | 15 |
| 3.2 | Produção e consumo de fertilizantes | 16 |
| 3.2.1 | Contexto mundial | 16 |
| 3.2.2 | Crise dos Fertilizantes | 16 |
| 3.2.3 | Contexto nacional | 16 |
| 3.3 | Fontes alternativas de fertilizantes | 17 |
| 3.4 | Granito | 18 |
| 3.4.1 | Lavra e beneficiamento | 20 |
| 3.4.2 | Potencial Agrônômico do Granito como Remineralizador | 21 |
| 3.5 | Classes de solos | 22 |
| 3.5.1 | Solos da região do Amapá..... | 24 |
| 3.6 | Cinética de liberação de nutrientes do solo | 24 |
| 4 | METODOLOGIA | 26 |
| 4.1 | Amostragem | 26 |
| 4.2 | Densidade real e aparente | 29 |
| 4.3 | Peneiramento via úmido | 31 |
| 4.4 | Análise química | 33 |
| 4.5 | Fluorescência de raios-x | 33 |
| 4.6 | Cinética de liberação do potássio | 33 |
| 4.7 | Análise de fertilidade do pó de brita | 35 |
| 4.8 | Determinação do ph das amostras | 36 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 5.1 | Densidade real e aparente | 37 |
| 5.2 | Análise Granulométrica por Via Úmida | 38 |
| 5.3 | Análises químicas | 40 |
| 5.3.1 | Análise de fertilidade do pó de brita..... | 40 |
| 5.4 | Fluorescência De Raios-X – FRX | 41 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5.5 | Cinética de liberação do potássio | 42 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 45 |
| | REFERÊNCIAS..... | 46 |

1 INTRODUÇÃO

A importância das práticas sustentáveis na agricultura moderna e da agricultura orgânica tem crescido rapidamente entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (Aquino et al., 2020). Nesse contexto, encontrar alternativas aos fertilizantes químicos torna-se fundamental, especialmente no Brasil, onde a agricultura representa uma parcela significativa da economia e apresenta elevada dependência de insumos importados (cerca de 73% dos fertilizantes utilizados no país são adquiridos no mercado externo) (ANDRADE, 2021). Essa dependência evidencia a necessidade de buscar opções mais acessíveis, estáveis e ambientalmente sustentáveis para a manutenção da produtividade agrícola.

As importações provenientes da Rússia correspondem a 23% do total de fertilizantes adquiridos pelo Brasil (Caffagni, 2022). Com os conflitos entre Rússia e Ucrânia, já é possível observar um aumento significativo nos preços desses insumos no mercado nacional, uma vez que a logística e o transporte se tornaram mais complexos. Diante disso, torna-se ainda mais relevante investigar alternativas acessíveis e sustentáveis capazes de reduzir essa dependência externa.

De acordo com Theodoro (2020), o uso de pó de rocha na agricultura consiste em uma técnica de fertilização natural que, além de corrigir a acidez do solo, contribui com a reposição dos nutrientes. Esta técnica denominada de rochagem (rocks for crops) ou remineralização é um recurso com valor agregado baixo e uma prática fundamental para o desenvolvimento de um sistema agrícola sustentável, que poderá diminuir a dependência de fertilizantes químicos tradicionais.

O granito é uma rocha ígnea plutônica, que apresenta em sua composição quartzo, feldspato, micas, anfíbolos, piroxenas e olivina. É uma rocha holocristalina, de grão médio a grosso. Sua composição varia conforme o processo de formação ao qual esteve submetido (Faria et al., 2013; Costa, 2021). Devido a sua composição química, espera-se que o resíduo de pó do granito possa conter teores significativos de alguns elementos considerados macro e micronutrientes para as plantas.

Nesse sentido, investigar o resíduo de granito torna-se relevante não apenas pela ampla disponibilidade desse material no estado do Amapá, mas também pelo seu potencial de agregar valor a um subproduto mineral normalmente descartado. A possibilidade de utilizar esse resíduo como fonte complementar de nutrientes atende tanto às demandas ambientais, ao reduzir o acúmulo de rejeitos, quanto às demandas agronômicas, ao oferecer uma alternativa de

fertilização mais acessível em um cenário marcado pela alta dependência de insumos importados e pelas oscilações de mercado que afetam diretamente o setor agrícola brasileiro.

Diante dessa necessidade, este estudo se propõe a avaliar tecnicamente o resíduo granítico por meio de sua caracterização física, química e mineralógica, buscando verificar se suas propriedades atendem aos critérios estabelecidos para remineralizadores e se apresentam potencial para aplicação no solo. Assim, o trabalho concentra-se em analisar suas características granulométricas e densimétricas, identificar os teores de macronutrientes presentes e verificar seu enquadramento nas exigências legais, além de compreender de que forma o tamanho das partículas pode influenciar o comportamento do material quando destinado ao uso agrícola.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar, por meio de caracterização físico-química em laboratório, o potencial técnico do resíduo da mineração de granito para uso como remineralizador de solo.

2.1.1 Objetivos Específicos

1. Determinar as características físicas (granulometria e densidade) e mineralógicas do resíduo de granito, por meio de análises químicas de fertilidade e de Fluorescência de Raios X (FRX).
2. Identificar e quantificar o teor de macronutrientes (potássio, cálcio e fósforo) presentes no resíduo e verificar a conformidade da soma de bases e dos óxidos com os requisitos mínimos estabelecidos na legislação brasileira para remineralizadores.
3. Analisar a influência da granulometria na cinética de liberação do potássio (K) em solução extratora ácida, simulando o processo de dissolução do material em condições edáficas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fertilizantes

Os solos brasileiros geralmente são pobres em nutrientes e ácidos, ou seja, apresentam pH inferior à faixa ideal de cultivo (5,5 a 6,0), o que indica alta concentração de íons H^+ e alumínio trocável (Al^{3+}), elementos que reduzem a disponibilidade de nutrientes essenciais e prejudicam o desenvolvimento das plantas (EMBRAPA, 2020; EMBRAPA, 2023).

Dessa maneira, se faz necessário suprir esta carência com adubos (Barros; Ribeiro, 2021). Os fertilizantes ou adubos são compostos químicos, orgânicos ou de origem mineral, utilizados na agricultura para aumentar a produtividade e fornecer nutrientes às plantas. Estes insumos são responsáveis por elevar a qualidade do solo (e conseqüentemente dos vegetais) no aspecto físico-químico e biológico (Borges, 2021).

Existem 17 nutrientes essenciais para o desenvolvimento e nutrição das plantas, os quais são responsáveis por ajudar a diminuir perdas de água, auxiliar no transporte de nutrientes, sintetizar enzimas, formar proteínas, atuar no metabolismo energético e na respiração celular dentre outras funções. O carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) são provenientes da atmosfera e água e representam mais de 90% da matéria seca de uma planta (Borges, 2021).

Os principais micronutrientes como: Boro (B); Cloro (Cl); Molibdenio (Mo); manganês (Mn); e zinco (Zn) são requeridos pelas plantas em menor quantidade. Enquanto os macronutrientes, Nitrogênio (N), Fósforo (P) e o Potássio (K), em concentrações mais elevadas (Borges, 2021).

Os fertilizantes podem ser de origem orgânica (esterco de animais ou resíduos de alimentos) ou de origem mineral (rochas). Os adubos minerais podem vir com um único nutriente na sua composição de maneira isolada denominados de fertilizantes simples, ou de forma composta com dois ou mais elementos misturados, as formulações de NPK. A definição do tipo de fertilizante a ser utilizado, vai depender da cultura e características do solo (Borges, 2021).

Os adubos NPK são amplamente utilizados na agricultura, são fertilizantes que contém em sua fórmula diferentes concentrações de Nitrogênio, Fósforo e Potássio. Nestas formulações podem também conter pequenas doses de micronutrientes (Borges, 2021).

3.2 Produção e consumo de fertilizantes

3.2.1 Contexto mundial

China, Índia, Estados Unidos e Brasil responderam por mais da metade do consumo global de fertilizantes (58%) no ano de 2020. A China foi a principal consumidora em nitrogênio, fósforo e potássio, sendo responsável por 24% de todo consumo global (Brasil, 2022).

No ano de 2019, Canadá, Rússia e Bielorrússia foram os principais produtores de fertilizantes potássicos, responsáveis por, respectivamente 26%, 19% e 16% da produção total. Em relação a produtos fosfatados a China lidera a produção mundial, seguido por EUA, Índia, Rússia e Marrocos (Randive et al., 2021).

3.2.2 Crise dos Fertilizantes

Além da pandemia da Covid-19 e o aumento no preço do gás natural (essencial para produção de fertilizantes nitrogenados), a Guerra da Ucrânia e Rússia no início do ano de 2022, também influenciou significativamente na alta dos preços de fertilizantes. A Rússia e Bielorrússia sofreram sanções impostas por Canadá, União Européia e Estados Unidos e outras nações. Ainda que, essas restrições não atinjam os insumos agrícolas de forma direta, por outro lado elevados custos, taxas altas ou restrições bancárias podem ter levado o mercado de fertilizantes a regredir em algumas regiões (Hebebrand; Glauber, 2023).

De acordo com o The International Food Policy Research Institute (IFPRI) as sanções e as medidas restritivas aplicadas pela União Europeia à Bielorrússia, como a proibição de embarques de fertilizantes potássicos pelo seu território, contribuíram na redução de cerca 50% em 2022, em comparação ao ano anterior, no fluxo de exportação de fertilizantes. O preço médio do MAP (fosfato monoamônico) também foi afetado, matéria-prima utilizada na produção de vários fertilizantes (Fieldview, 2022).

3.2.3 Contexto nacional

É inquestionável a importância que a agricultura brasileira tem sobre a economia do país, representando cerca de 27% na formação do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. O Brasil é responsável por 7,8% da produção mundial de grãos (arroz, trigo, soja, cevada, milho),

é o quarto maior produtor de alimentos do mundo (Brasil, 2022). De 1989 a 2020, a produção brasileira de grãos cresceu mais de 30% (ANDA, 2021).

Estima-se que mais de 800 milhões de pessoas vivam em situação gravíssima de fome, número que tende a crescer ao passo que a projeção de crescimento da população nacional aumenta. Nesse cenário, espera-se que a agricultura brasileira aumente sua produção de alimentos e contribua até 2050, com pelo menos 40% dessa demanda (Caligaris *et al.*, 2022).

Para atender a demanda de 80 milhões de hectares plantados entre todas as culturas, o Brasil consome cerca de 44 milhões de toneladas de fertilizantes, dos quais mais de 80% são provenientes do mercado externo (ANDA, 2021). Os principais fornecedores são: Rússia; Canadá; Estados Unidos e China.

Dos fertilizantes que o país mais importa, o cloreto de potássio (KCl) representa 31%, sendo seguido por ureia, com 17%, e fosfato monoamônico, com 12%. Em menor escala o Brasil importa outros fertilizantes como o sulfato de amônia, rocha fosfática, superfosfatos, formulações NPK, nitrato de amônio dentre outros (Caffagni, 2022).

A Rússia é o principal fornecedor, responsável por 22% do total (Caffagni, 2022). Mediante este fato, a guerra entre a Rússia e Ucrânia no ano de 2022, tem gerado preocupações no que diz respeito às exportações de fertilizantes para o Brasil. Segundo a Globalfert (2022), a produção da Rússia de fertilizantes potássicos caiu 27%.

Nos últimos anos a produção nacional de fertilizantes vem diminuindo consideravelmente. No ano de 2016, numa relação de consumo e produção, o Brasil produziu 27,5%, enquanto que quatro anos depois, essa porcentagem reduziu para 12,6%. Nesse período de 2016 a 2020 as importações cresceram cerca de 43,8%, análogo a isso a produção decresceu 43,5%. Mediante o exposto é possível verificar que o consumo brasileiro de fertilizantes é extremamente superior à produção, gerando o elevado grau de dependência que a agricultura brasileira detém por fertilizantes atualmente (ANDA, 2021).

3.3 Fontes alternativas de fertilizantes

A Rochagem é uma técnica de remineralização dos solos agrícolas, a partir de frações finas de rochas, com o intuito de fornecer às plantas nutrientes, além de ser uma alternativa de baixo custo em relação aos fertilizantes químicos. Com princípios de sustentabilidade a rochagem buscar conciliar a fertilidade dos solos, produtividade e a conservação de recursos naturais (Theodoro, 2022).

A ideia de remineralizar os solos com rochas não é recente; no livro “Pães de Pedra”, publicado em 1898 na cidade de Leipzig, na Alemanha, Henzel faz uma analogia em que a rocha poderia ser transformada em alimento. As pesquisas sobre rochagem se intensificaram nas décadas de 1970 e 1980, no sentido de buscar uma fonte alternativa de fertilização dos solos, de modo que fornecesse K (potássio) e outros nutrientes para as culturas (Brito et al., 2019).

Eventos de grande porte, como o I Congresso Brasileiro de Rochagem realizados em 2009, evidenciaram o fortalecimento de pesquisas voltadas para a utilização de rochagem no país, onde neste foram apresentados mais de sessenta trabalhos científicos com a participação de representantes de diversas áreas de interesse, tais resultados positivos acarretaram na realização do II Congresso Brasileiro de Rochagem em 2013 (Brito *et al.*, 2019).

Mediante as discussões e resultados satisfatórios das pesquisas, o Governo Federal formulou a Lei 12.890, de 10 de dezembro de 2013 (Brasil, 2013), que incentiva e normaliza o emprego de pós de rocha como remineralizadores do solo, substituindo relativamente o uso de fertilizantes químicos (Brito *et al.*, 2019). Para que um remineralizador possa ser comercializado ele deve atender às seguintes soma de bases: K_2O , CaO e $MgO \geq 9\%$, teores de quartzo $\leq 25\%$ e limites mínimos de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). As quais é determinada pelas Instruções Normativas (INs) 05 e 06/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Huff, 2022).

O pó de rocha e minerais silicatados primários como fonte de nutrientes, em específico o K, são alvos de diversas pesquisas que apresentam um alto potencial como fonte de nutrientes. No entanto, relacionando a espécies agrícolas que contém ciclo curto, torna-se limitado, uma vez que pode não atender às carências dessas culturas (Silva, 2021).

Além da nutrição da cultura, as rochas silicáticas como o granito podem trazer outros resultados benéficos. O silício, apesar de não ser considerado um dos elementos pertencente ao grupo de essenciais para o crescimento e desenvolvimento da planta, ele é tido como benéfico, uma vez que estudos apontam que quando a planta está bem nutrida de sílica, ela apresenta um maior potencial a resistência ao ataque de pragas e doenças (Santos, 2014; Brito *et al.*, 2019).

3.4 Granito

O granito é uma rocha ígnea, gerada pelo arrefecimento lento do magma em profundidade, o qual promove o crescimento dos minerais, desenvolvendo uma textura

denominada fenerítica (cristais visíveis a olho nu). Mais de 80% do granito é composto por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino (Faria *et al.*, 2013; Costa, 2021).

Quando ocorre o predomínio do feldspato alcalino sobre o plagioclásio a rocha é denominada de sienogranito, já se o predomínio é do plagioclásio a rocha é denominada de monzogranito. Muscovita, biotita e anfibólio também são minerais comuns nessas rochas. Alguns granitos também podem conter piroxênio ou granada. Os minerais acessórios mais comuns nessas rochas são apatita, zircão, monazita, titanita, allanita, magnetita e ilmenita (Klein & Dutrow, 2012).

Devido a mineralogia, espera-se que o resíduo de beneficiamento do granito possa conter teores significativos de alguns macronutrientes importantes para as plantas, especialmente K, P, Ca, Mg. Possibilitando assim, que este resíduo seja utilizado na agricultura como fertilizante natural. Neste sentido, várias pesquisas já foram realizadas ou estão em andamento.

Guarçoni e Fanton (2011), analisou o efeito do resíduo de beneficiamento do granito na absorção de macronutrientes e no desenvolvimento inicial do café conilon em solo argiloso e arenoso. A maior eficiência na disponibilização de nutrientes foi em solo argiloso enquanto que no solo arenoso as plantas de café conilon apresentaram maior desenvolvimento em relação à altura de plantas, matéria seca de raízes (MSR) e matéria seca da parte aérea (MSPA). O autor reportou que o pó de granito deve ser utilizado prioritariamente, como fonte de K e Ca, sendo necessário, para isso, que o pH do solo esteja em torno de 5,0.

Conforme Oliveira (2019), avaliou-se o efeito da aplicação de pó de granito/gnaiss nos atributos de fertilidade do solo e no crescimento da braquiária. As doses do pó de granito/gnaiss não alteraram nenhum atributo de fertilidade do solo, entretanto associado ao esterco pode ser utilizada como uma fonte extra de nutrientes, além de proporcionar um destino para o resíduo.

Khan (2020) buscou avaliar se a fração fina do granito apresentava potencial como corretivo de solo e insumo fertilizante para a liberação de macro e micronutrientes. Na pesquisa, foi utilizada a fração com partículas inferiores a 150 µm, com o objetivo de analisar parâmetros como condutividade elétrica, pH, concentração de elementos principais, além das concentrações de metais pesados e nutrientes.

A aplicação de resíduo de brita no sorgo, segundo Bondarenko (2021), reportou efeitos positivos. Os resultados do experimento mostraram que em substrato de turfa com adição de rocha houve um aumento na biomassa e no número de raízes secundárias e terciárias da planta

cultivada. Um sistema radicular mais desenvolvido permite que as plantas recebam mais umidade e conseqüentemente mais nutrientes.

3.4.1 Lavra e beneficiamento

A demanda na construção civil tem crescido significativamente nos últimos anos, a consequência disso é uma alta produtividade de agregados para esta indústria. Este elevado consumo tem gerado preocupações no contexto ambiental, pois atrelado a isso está a grande quantidade de rejeitos gerados na produção desse tipo de indústria (Miranda, 2021).

A lavra de materiais granulares para a construção civil, é realizada por pedreiras onde as seguintes operações unitárias são efetuadas em sequência: desmonte da rocha, britagem e classificação granulométrica.

O método de lavra adotado pela Pedreira Santa Bárbara, situada no município de Ferreira Gomes (AP), é o de lavra a céu aberto, envolvendo as etapas de capeamento, perfuração, detonação controlada, carregamento, transporte e beneficiamento mineral. Após o desmonte primário por explosivos, o material fragmentado é transportado por correias até o britador de mandíbula, onde passa por redução granulométrica para posterior classificação.

Segundo informações obtidas durante a visita técnica, a produção estimada da unidade gira em torno de 500 m³ de material por dia, totalizando aproximadamente 15.000 m³ por mês e cerca de 180.000 m³ por ano. Essa produção inclui tanto a fração aproveitável comercialmente (brita de diversas granulometrias) quanto o resíduo de britagem (pó de pedra), sendo este último o foco do presente estudo. Vale ressaltar que uma parcela significativa desse resíduo é acumulada em pilhas próximas à planta de beneficiamento, configurando um passivo ambiental com potencial para uso agrônômico como remineralizador de solos.

Figura 1 - Pilha de rejeito da Pedreira Santa Bárbara.



Fonte: Autoras (2022).

3.4.2 Potencial Agronômico do Granito como Remineralizador

O granito, por ser uma rocha ígnea intrusiva de ampla ocorrência geológica, apresenta propriedades físico-químicas que o tornam um insumo estratégico no contexto da rochagem, sobretudo em regiões como o Amapá, onde o acesso a fertilizantes industriais é limitado. A mineralogia típica do granito inclui feldspatos potássicos (ortoclásio e microclina), plagioclásios, quartzo, micas (biotita e muscovita) e minerais acessórios como zircão, ilmenita, apatita e titanita (Faria et al., 2013; Klein & Dutrow, 2012; Costa, 2021). Essa diversidade mineralógica está diretamente relacionada ao fornecimento de macro e micronutrientes essenciais às plantas, como potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S).

A presença expressiva de K_2O (7,6%), CaO (3,0%) e P_2O_5 (1,1%) nas amostras analisadas por Fluorescência de Raios X neste estudo corrobora com a literatura que aponta o granito como um dos pós de rocha com maior potencial remineralizador (Theodoro, 2020; Câmara et al., 2021). Esses teores atendem à Instrução Normativa n.º 5/2016 do MAPA, que exige que a soma de bases (K_2O , CaO e MgO) seja igual ou superior a 9% — valor superado pela amostra estudada (10,6%).

Do ponto de vista agrônomo, os feldspatos presentes no granito são fontes lentas de liberação de potássio, especialmente quando submetidos a processos de intemperismo físico-químico no solo. Segundo Brito et al. (2019), a rochagem com materiais silicáticos como o granito fornece nutrientes de maneira gradual, o que favorece o desenvolvimento sustentável das culturas e reduz a perda por lixiviação, em comparação aos fertilizantes solúveis.

O experimento conduzido por Khan (2020) reforça essa perspectiva ao demonstrar que partículas finas (<150 µm) de granito apresentaram condutividade elétrica e liberação de nutrientes compatíveis com as exigências de plantas cultivadas. Isso também foi evidenciado no presente trabalho, em que a fração <0,15 mm liberou significativamente mais potássio ao longo do tempo, especialmente sob agitação, atingindo concentrações de até 140 mg/L (em ácido cítrico a 10%).

Outro aspecto relevante é o papel secundário do silício ($\text{SiO}_2 = 62,3\%$) na nutrição vegetal. Embora não essencial, o silício é reconhecido como um elemento benéfico que confere resistência a doenças, pragas e estresses abióticos, como a seca (Santos et al., 2014; Brito et al., 2019). Portanto, o granito não apenas atua na fertilização do solo, mas também na melhoria da resiliência das plantas.

Adicionalmente, estudos como os de Guarçoni e Fanton (2011) mostraram que o resíduo de granito, em solo argiloso, favoreceu o acúmulo de matéria seca nas raízes e parte aérea do café conilon. Oliveira (2019) também observou que, quando aplicado em conjunto com esterco, o pó de granito aumentou a produtividade de braquiária, mesmo sem alterações diretas na fertilidade do solo.

Por fim, a baixa concentração de alumínio trocável nas amostras e o pH próximo à neutralidade são características desejáveis, indicando que o resíduo não compromete a toxicidade do solo e pode inclusive atuar como corretivo (Alovisi et al., 2020; Vasques et al., 2019). Esses dados reforçam a viabilidade técnica e ambiental do uso do resíduo granítico como remineralizador.

3.5 Classes de solos

A caracterização das classes de solos é relevante neste estudo porque o potencial agrônomo do resíduo granítico depende diretamente das condições químicas e físicas do solo onde será aplicado. Assim, a presente seção apresenta inicialmente uma visão geral das principais classes de solos brasileiros que possuem características semelhantes às do Amapá,

para então direcionar a discussão especificamente aos solos amapaenses, onde se insere a área de estudo

O solo é um conglomerado de materiais naturais, constituído por partes sólidas, líquidas e gasosas formados pelo intemperismo das rochas. A classificação do solo é determinada de acordo com as suas características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas. As classes Latossolos e Argissolos ocupam aproximadamente 58% do território nacional (Embrapa, 2021; Santos *et al.*, 2018).

Os Argissolos são moderadamente ácidos, com saturação por bases alta ou baixa, predominantemente caulíníficos e com cores características de tons avermelhados ou amarelados e mais raramente brunadas ou acinzentadas. A textura deste tipo de solo varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B (Santos, *et al.*, 2018).

Os latossolos são muito intemperizados, com pequena reserva de nutrientes para as plantas, representados normalmente por sua baixa a média capacidade de troca de cátions. Mais de 95% dos latossolos são distróficos e ácidos, com pH entre 4,0 e 5,5 e teores de fósforo disponível extremamente baixos. Este tipo de solo é definido em sete classes diferenciadas com base na combinação de características com teor de Fe_2O_3 , cor do solo e relação Ki ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) (Embrapa, 2021; Santos *et al.*, 2018).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos são identificados em extensas áreas dispersas em todo o território nacional associados aos relevos, plano, suave ondulado ou ondulado. Ocorrem em ambientes bem drenados, sendo muito profundos e uniformes em características de cor, textura e estrutura em profundidade (Santos *et al.*, 2018).

De acordo com Santos *et al.* (2014), os latossolos vermelho-amarelos são muito utilizados para agropecuária apresentando limitações de ordem química em profundidade ao desenvolvimento do sistema radicular se forem álicos, distróficos ou ácricos. Em condições naturais, os teores de fósforo são baixos, sendo indicada a adubação fostatada. Outra limitação ao uso desta classe de solo é a baixa quantidade de água disponível às plantas.

Após essa contextualização geral, a subseção seguinte foca exclusivamente nos solos do Estado do Amapá, destacando suas propriedades químicas, limitações naturais e a importância do uso de fontes alternativas de nutrientes, como o resíduo granítico no manejo dessas áreas.

3.5.1 Solos da região do Amapá

No Estado do Amapá, os solos são geralmente ácidos e de baixa fertilidade. Os principais solos são os: Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Gleissolos (Araújo *et al.*, 2014).

De acordo com os dados do Ministério Público do Amapá (2011), a ordem predominase por “Solos com B Latossólico”, sendo coberto 50% do Estado com a sub-ordem “LV -

Latossolo Vermelho Amarelo 2”. Tratam-se de solos mais antigos, sujeitos a processos de intemperismo e lixiviação, conseqüentemente, gerando baixos níveis de nutrientes e capacidade de troca catiônica (CTC). Identifica-se pelo alto teor de ferro, e altamente resguardado por florestas densas. Os nutrientes desse sistema encontram-se em tecidos de plantas e em finas camadas orgânicas sub-superficiais (MPAP, 2011).

As ordens “Solos com B Latossólico”, sub-ordem “LA - Latossolo Amarelo 1” ocupam aproximadamente 15% do estado (MPAP, 2011). A estrutura física desses dois tipos de solo demonstra-se ser favorável à agricultura, porém se faz uso necessário de adubação e correção para alcançar a produção desejada (Melo, 2014).

3.6 Cinética de liberação de nutrientes do solo

Para que um nutriente seja absorvido pelas raízes das plantas, este deve estar na sua forma disponível, ou seja, na sua forma molecular ou iônica. Fatores como pH, aeração, umidade, matéria orgânica, temperatura, presença de outros íons, dentre outros afetam a passagem de nutrientes da forma sólida para a fase líquida, conseqüentemente afetando a sua futura absorção pelos vegetais.

No processo de absorção de nutrientes é necessário que ocorra o contato íon-raiz. Esse encontro pode ocorrer, por fluxo de massa, interceptação radicular e difusão.

A liberação lenta de nutrientes é um entrave na utilização da técnica de rochagem. A cominuição da rocha é a etapa primordial para acelerar a solubilização, pois a redução do tamanho das partículas aumenta a área superficial exposta, favorecendo a dissolução dos minerais (Câmara *et al.*, 2021). Entretanto, além da superfície específica, a disponibilidade efetiva dos nutrientes também depende das características do solo, especialmente da sua capacidade de troca catiônica (CTC), que pode reter parte dos íons liberados e modular sua passagem para a solução do solo. Além disso, quanto mais fina a fração granulométrica, maior

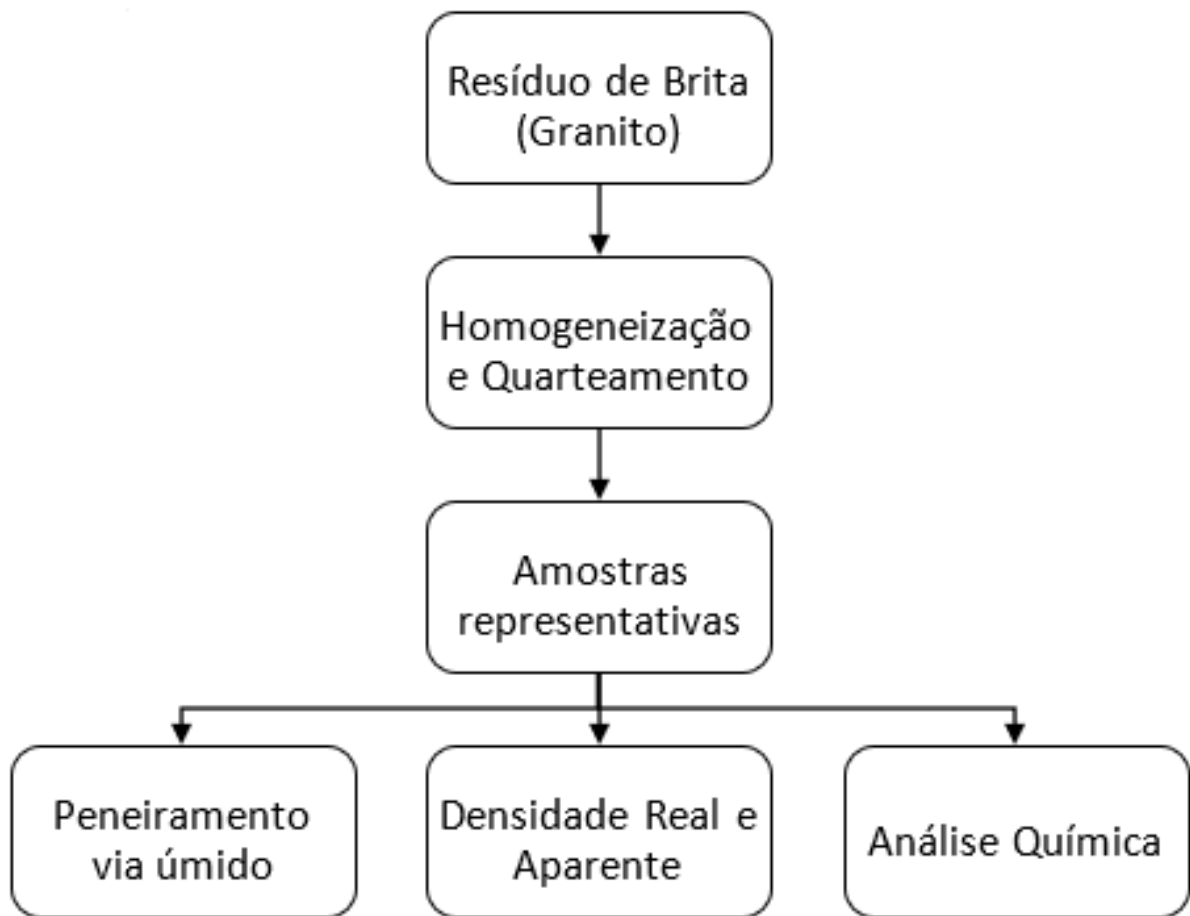
o custo energético do processo de moagem, exigindo equilíbrio entre eficiência agrônômica e viabilidade técnica (Lima et al., 2015).

A compreensão da cinética de liberação dos nutrientes é essencial para avaliar o desempenho agrônômico de materiais silicáticos utilizados na rochagem, uma vez que a disponibilidade desses elementos não depende apenas da granulometria, mas também do comportamento temporal de solubilização. Duarte et al. (2021) demonstraram essa relação ao avaliarem a liberação de potássio e sódio em resíduos de diferentes rochas submetidos a extrações sucessivas com Mehlich-1 e ácido cítrico 2% durante 21 dias. Os autores observaram que a liberação acumulada de potássio frequentemente ultrapassou $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de resíduo, evidenciando que, mesmo em materiais de dissolução lenta, a quantidade liberada pode aumentar gradualmente ao longo do tempo. Esses resultados ressaltam a importância de considerar tanto a composição química quanto a dinâmica de liberação para estimar o potencial agrônômico de insumos aplicados em solos tropicais.

4 METODOLOGIA

Após realizar uma pesquisa bibliográfica sobre fertilizantes, estudos sobre rochagem, composição do granito e solos do Amapá, o procedimento experimental foi delineado como apresenta o fluxograma a seguir.

Figura 2 - Fluxograma de caracterização do resíduo de brita.

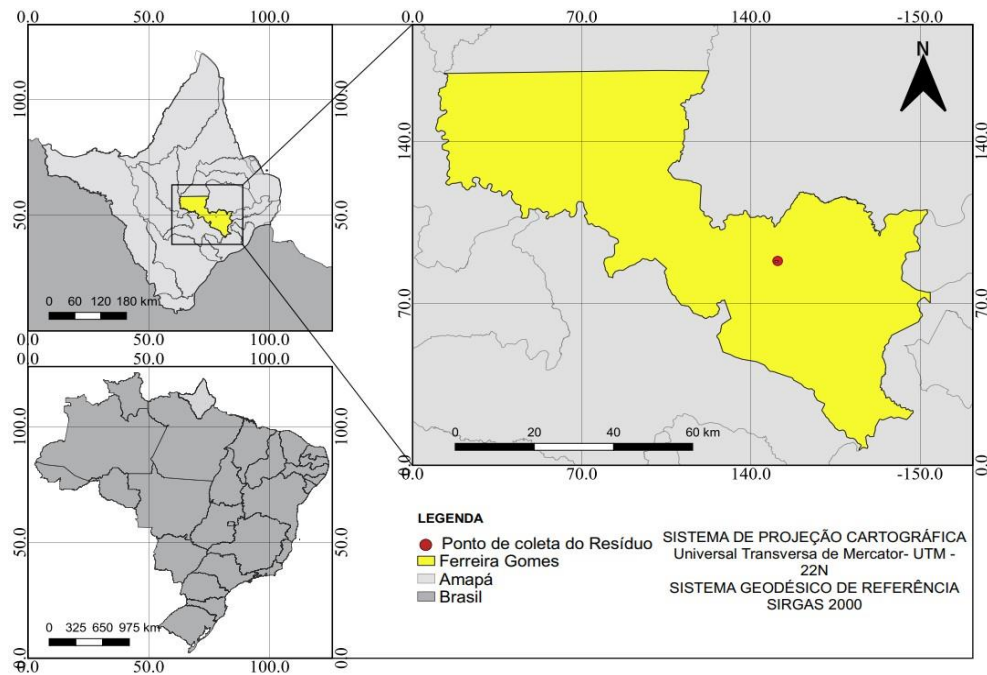


Fonte: Autoras (2023).

4.1 Amostragem

Foram coletados de diferentes pontos, aproximadamente 200 kg de resíduo da mineração de granito da pedreira Santa Bárbara, localizada no município de Ferreira Gomes no estado do Amapá (figura 1). O rejeito é depositado próximo à empresa, como mostra a figura 3.

Figura 3 - Mapa de localização da coleta do pó de brita.



Fonte: Elaborado pelas Autoras no software QGIS 3.22, com base em dados do IBGE (2023).

A Figura 3 apresenta a localização do ponto de coleta do resíduo granítico no município de Ferreira Gomes, no estado do Amapá. O mapa destaca a posição geográfica da área de estudo em diferentes escalas: no contexto nacional (Brasil), estadual (Amapá) e municipal, permitindo visualizar a distribuição espacial do local de amostragem. O ponto marcado em vermelho indica exatamente onde o material foi coletado, facilitando a identificação da área de origem do resíduo e situando o leitor quanto ao contexto geográfico do estudo.

Figura 4 - Pilhas de resíduo da mineração de brita depositadas próximo à empresa.



Fonte: Autoras (2023).

No laboratório de processamento mineral e químico do Instituto Federal do Amapá (IFAP) – Campus Macapá, foram realizados os procedimentos de amostragem do material, homogeneização e quarteamento conforme Sampaio *et al.* (2007), a fim de se obter uma distribuição granulométrica mais uniforme das partículas. A homogeneização, foi realizada no homogeneizador em y, como mostra a figura 5.

Figura 5 -Amostra sendo coletada após a homogeneização.



Fonte: Autoras (2023).

Após a homogeneização do material, foi quarteado em quarteador giratório por 10 minutos em frequência de 170 rpm, visando à redução da massa da amostra global em alíquotas menores. O quarteador é composto por 12 caixas de separação, as quais foram selecionadas alternadamente, sendo 6 caixas para compor as amostras arquivo e 6 caixas para as amostras representativas.

Figura 6 - Amostra no quarteador giratório



Fonte: Autoras (2023).

Os processos de homogeneização e quarteamento, foram realizados várias vezes, pois o elevado quantitativo de material atingia facilmente a capacidade máxima dos equipamentos. Foram armazenadas em sacos plásticos, 10 alíquotas de 1kg, para serem utilizados nos ensaios seguintes.

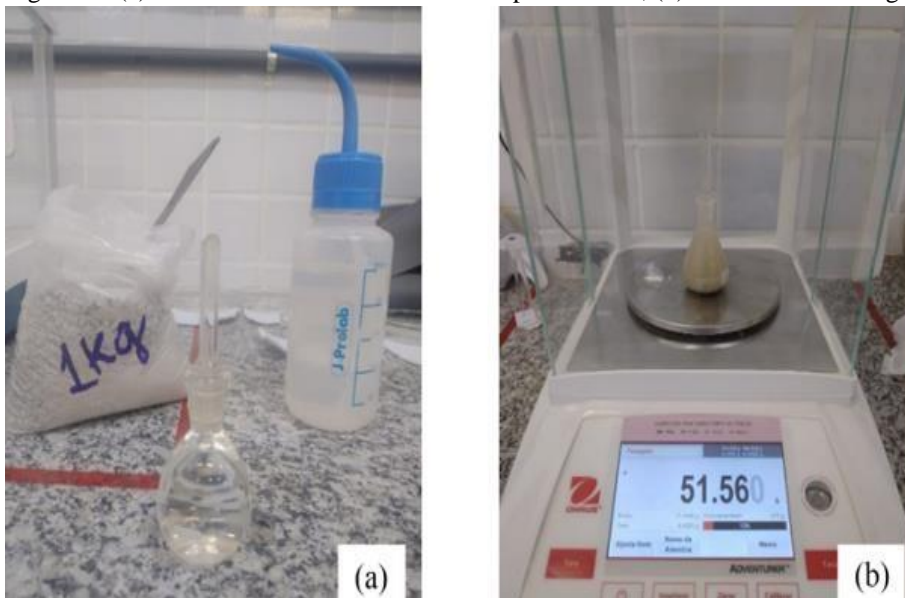
4.2 Densidade real e aparente

Baseando-se na metodologia descrita por Chaves e Peres (2012), foi realizado o ensaio de densidade aparente, que considera o volume total da amostra e os espaços vazios entre os grãos que a compõem. O objetivo desse ensaio é determinar a massa do material em seu estado solto, permitindo avaliar o grau de empacotamento das partículas e caracterizar fisicamente o resíduo. Esse parâmetro é importante para compreender o comportamento do material durante armazenamento, manuseio e aplicação no solo, além de auxiliar em cálculos de massa por volume.

Posteriormente, foi executado o ensaio de densidade real ou relativa do mineral estudado. O objetivo da determinação da densidade real é obter a massa específica das partículas, desconsiderando os vazios entre os grãos, o que permite caracterizar a composição mineralógica do material e compará-la com valores típicos de rochas graníticas. O método mais

prático de se determinar, com precisão razoável, a densidade de uma rocha, de um minério ou de um mineral é por meio da picnometria. Primordialmente, foi aferido o peso do picnômetro vazio, com água e, por fim, com amostra e água. Foram realizadas cinco repetições da amostra in natura (sem peneiramento) e da amostra passante na peneira de 200# (<75 mm) para aumentar a confiabilidade dos resultados, reduzir a variabilidade experimental e permitir o cálculo de médias representativas. A análise das duas granulometrias (com e sem peneiramento) possibilitou verificar se a redução do tamanho das partículas influencia o valor da densidade real, proporcionando uma caracterização mais completa do resíduo.

Figura 7 - (a) Materiais utilizados nos testes de picnometria; (b) Picnômetro com água e amostra na balança.



Fonte: Autoras (2023).

Aplicou-se na equação da densidade real os dados obtidos nas pesagens.

Equação da densidade real:

$$D_R = \frac{(P_p + Am) - (P_p)}{(P_p + Ag) + (P_p + Am) - (P_p) + (P_p + Ag + Am)}$$

Onde:

D_R = Densidade real

P_p = Peso do picnômetro vazio e seco (g)

$P_p + Am$ – Peso do picnômetro + amostra (g)

$P_p + Ag + Am$ – Peso do picnômetro + amostra + água (g)

$P_p + Ag$ – Peso do picnômetro + água (g)

4.3 Peneiramento via úmido

Foram realizados 3 ensaios de peneiramento via úmido no peneirador suspenso, conforme a metodologia de Chaves e Peres (2012), utilizando 1 kg para cada repetição. As amostras foram submetidas à sequência de nove peneiras com aberturas aproximadas de: 5,66 mm (3,5 mesh), 4,00 mm (5 mesh), 2,00 mm (9 mesh), 1,40 mm (12 mesh), 0,425 mm (35 mesh), 0,212 mm (65 mesh), 0,180 mm (80 mesh), 0,150 mm (100 mesh) e 0,106 mm (150 mesh) iniciando o procedimento com o preparo da polpa com água, como mostra a imagem abaixo.

Figura 8 - (a) Polpa (água + alíquota de 1 kg); (b) Peneiras e amostras utilizadas



Fonte: Autoras (2023).

Com a polpa na primeira peneira, o peneirador suspenso foi acionado, com irrigação de água contínua, na qual a fração passante da última peneira era aparada por um balde. O processo de peneiramento se encerrava após a água da última peneira sair limpa.

Figura 9 - Peneiramento suspenso via úmido.



Fonte: Autoras (2023).

Posteriormente, o que ficou retido em cada peneira foi coletado e depositado em cápsulas de alumínio, sendo encaminhado imediatamente para secagem em estufa a 150 °C. Essa temperatura foi adotada para garantir a remoção completa da umidade aderida às partículas após o peneiramento via úmido, evitando que a água residual alterasse a massa final das frações. A temperatura elevada acelera o processo de secagem e assegura que o material atinja massa constante antes da pesagem.

Figura 10 - (a) Amostra retida nas peneiras; (b) Amostras na estufa



Fonte: Autoras (2023).

O passante da última peneira de 150#, foi posto em processo de sedimentação por 24 horas. E em seguida, colocado na estufa.

4.4 Análise química

Duas amostras de 500g, uma na granulometria de $< 3\text{mm}$ e outra na granulometria de $< 0,15\text{mm}$, foram enviadas para análise química no Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS) – Campus Corumbá. Os métodos e classificações atribuídos para a análise basearam-se nas literaturas de Ribeiro *et al.*, (1999) e Teixeira *et al.*, (2017).

4.5 Fluorescência de raios-x

Para a identificação da concentração de elementos presentes na amostra foi utilizada a técnica de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX). Conforme os procedimentos padrão adotados pelo Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS) – Campus Corumbá, sendo duas amostras de 5g na granulometria abaixo de 325#.

4.6 Cinética de liberação do potássio

Os ensaios de cinética basearam-se na metodologia de estudos presentes na literatura de Castilhos e Meurer (2001), Sousa (2012) e Duarte (2019). Foram separadas 5 gramas das duas granulometrias da amostra do resíduo de granito ($< 3\text{mm}$ e $< 0,15\text{mm}$), que em seguida foram transferidas para o erlenmeyer contendo 50 mL de solução extratora, ou seja, na proporção 1:10. Os ensaios foram executados em triplicata.

Figura 11 - (a) Adição da amostra no erlenmayer com a solução de ácido cítrico; (b) Ensaio de cinética de liberação na incubadora shaker



Fonte: Autoras (2023).

Para a solução extratora, utilizou-se o ácido cítrico - $H_8C_6O_7$, em concentrações de 1% e 10%. Empregando como variável os modos em repouso na bancada e em agitação com auxílio da incubadora shaker, onde os erlenmeyers mantiveram-se sob agitação de 250 rpm. O tempo de contato de cada extração variou de 1 até 216 horas (1, 24, 48, 96, 120, 144, 168, 192 e 216h), de modo que o tempo acumulativo para o estudo de liberação de potássio foi de 1.009 horas.

Após cada tempo de extração eram adicionados mais 50 mL de solução e a lixívia era armazenada em tubos de ensaios.

Os teores de potássio foram determinados por fotometria de chama, utilizando o fotômetro de chama marca Analyser, modelo 910. Os dados obtidos foram tratados para cálculo da média e do desvio padrão das triplicatas, além da análise do efeito do tempo por regressão, sendo posteriormente representados em gráficos de dispersão elaborados no Microsoft Excel.

Figura 12 - Leitura das amostras no fotômetro de chama.



Fonte: Autoras (2023).

Assim, o procedimento de cinética de liberação permitiu acompanhar, de forma controlada, o comportamento do potássio presente no resíduo granítico frente ao ácido cítrico em diferentes tempos de extração e condições operacionais. A leitura das soluções no fotômetro de chama (Figura 12) forneceu os dados quantitativos necessários para avaliar a influência da granulometria e da agitação na solubilização do K^+ . Essa etapa final consolidou a metodologia aplicada, garantindo a precisão das concentrações obtidas e possibilitando a construção dos gráficos e análises apresentadas no capítulo de Resultados.

4.7 Análise de fertilidade do pó de brita

A avaliação da fertilidade do material foi realizada a partir da análise química das amostras destinadas à caracterização agrônômica. Duas frações granulométricas (<3 mm e <0,15 mm) foram separadas no laboratório e enviadas ao Instituto Federal de Mato Grosso do

Sul (IFMS) – Campus Corumbá, onde passaram pelos procedimentos analíticos descritos nas referências metodológicas de Ribeiro et al. (1999) e Teixeira et al. (2017), conforme indicado na seção de Análise Química.

Foram determinados os seguintes parâmetros químicos: pH em água, matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P), potássio trocável (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), alumínio (Al^{3+}), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC pH 7). Esses resultados permitiram interpretar o comportamento químico do resíduo granítico quando aplicado ao solo, incluindo seu potencial como fonte complementar de nutrientes e sua possível influência nas propriedades químicas do ambiente edáfico.

Os dados obtidos nessas análises foram posteriormente organizados nas Tabelas 4 e 5, que apresentam os valores medidos e suas classificações segundo recomendações agronômicas tradicionais.

4.8 Determinação do pH das amostras

A determinação do pH das amostras de resíduo granítico foi realizada como parte da análise química destinada à avaliação do potencial agronômico do material. Para isso, duas frações granulométricas (<3 mm e <0,15 mm) foram enviadas ao Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS) – Campus Corumbá, onde foram analisadas conforme metodologias descritas por Ribeiro et al. (1999) e Teixeira et al. (2017).

O pH foi determinado em suspensão solo-água, utilizando-se a relação 1:2,5 (amostra:água), procedimento amplamente recomendado para caracterização química de materiais aplicáveis ao solo. As amostras previamente secas e homogeneizadas foram pesadas e transferidas para recipientes adequados, aos quais se adicionou água destilada. A suspensão foi agitada e posteriormente deixada em repouso pelo tempo indicado nos métodos de referência, sendo então efetuada a leitura em pHmetro devidamente calibrado.

Os valores obtidos foram apresentados na Tabela 4, permitindo avaliar o comportamento químico do resíduo quanto à acidez e sua possível interação com o solo. Ressalta-se que os resultados de pH dizem respeito exclusivamente ao material analisado, não representando medições diretas no solo, mas sim um indicativo do potencial do resíduo para atuar como corretivo ou neutralizante complementar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade real e aparente

Os dados de densidade real da fração passante da malha de 200# e *in natura* foram plotados nas tabelas 1 e 2 respectivamente, como mostra abaixo.

Tabela 1 - Densidade real das frações granulométricas menores que 200#

| Densidade Real #200 | | | | | | |
|---------------------|-----------|--------|--------|----------|-----------|-----------------------|
| Amostra | Massa (g) | Pp (g) | Pp+Ag | Pp+Ag+Am | Densidade | Média |
| 1 | 1,001 | 24,819 | 50,933 | 51,567 | 2,73 | 2,7 g/cm ³ |
| 2 | 0,999 | 24,819 | 50,933 | 51,560 | 2,69 | |
| 3 | 1,006 | 24,819 | 50,933 | 51,566 | 2,70 | |
| 4 | 0,997 | 24,819 | 50,933 | 51,557 | 2,67 | |
| 5 | 1,005 | 24,819 | 50,933 | 51,568 | 2,72 | |

Fonte: Autoras (2023).

Tabela 2 - Densidade real da amostra *in natura*

| Densidade Real #200 | | | | | | |
|---------------------|-----------|---------|-------|----------|-----------|------------------------|
| Amostra | Massa (g) | Pp (g) | Pp+Ag | Pp+Ag+Am | Densidade | Média |
| 1 | 1,0046 | 24,4218 | 56,15 | 56,7944 | 2,79 | 2,86 g/cm ³ |
| 2 | 1,0099 | 24,4218 | 56,15 | 56,8038 | 2,84 | |
| 3 | 1,0088 | 24,4218 | 56,15 | 56,8057 | 2,86 | |
| 4 | 1,0105 | 24,4218 | 56,15 | 56,8066 | 2,93 | |
| 5 | 1,0057 | 24,4218 | 56,15 | 56,8066 | 2,88 | |

Fonte: Autoras (2023).

Foram encontradas densidades médias para o resíduo passante na peneira de 200# de 2,7 g/cm³ e 2,86 g/cm³ para o material *in natura*, valores próximos aos encontrados na literatura (Spala *et al.*, 2017; Vallejo *et al.*, 2002).

Esses resultados indicam que o material é formado predominantemente por minerais densos, como ilmenita, magnetita ou hematita. Contudo, não é possível afirmar, com base nos testes realizados, que essa composição esteja diretamente relacionada à porosidade ou à reatividade química do material. Em termos agronômicos, pode-se apenas destacar que materiais com esse tipo de constituição tendem a apresentar liberação mais lenta e gradual, embora tal comportamento não tenha sido especificamente avaliado neste estudo.

Após a coleta dos dados do ensaio de densidade aparente, foi realizado o cálculo da massa pelo volume, e por fim encontrado o valor de 1,68 g/cm³. Esse resultado indica apenas a densidade do material em estado solto, refletindo o empacotamento das partículas, sem permitir conclusões sobre porosidade, mineralogia ou reatividade.

5.2 Análise Granulométrica por Via Úmida

Após a secagem em estufa, foi possível realizar a pesagem das frações retidas nas peneiras. A tabela abaixo compõe a média de 3 repetições.

Tabela 3 - Médias entre as frações retidas do peneiramento via úmido

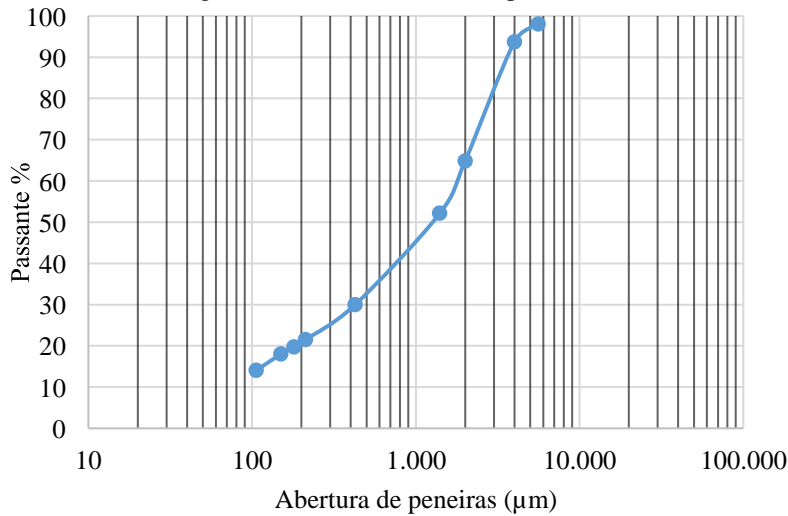
| Ensaio de peneiramento via úmido | | | | | |
|---|------|------------------|---------|------------|-----------|
| Abertura | | Massa Retida (g) | %Retido | %Acumulado | %Passando |
| Mesh | µm | | | | |
| 3.5# | 5600 | 19,29 | 1,92 | 1,92 | 98,08 |
| 5# | 4000 | 43,71 | 4,35 | 6,27 | 93,73 |
| 9# | 2000 | 290,42 | 28,93 | 35,20 | 64,80 |
| 12# | 1400 | 127,25 | 12,67 | 47,87 | 52,13 |
| 35# | 425 | 222,67 | 22,18 | 70,05 | 29,95 |
| 65# | 212 | 84,67 | 8,43 | 78,49 | 21,51 |
| 80# | 180 | 17,95 | 1,79 | 80,27 | 19,73 |
| 100# | 150 | 17,15 | 1,71 | 81,98 | 18,02 |
| 150# | 106 | 40,22 | 4,01 | 85,99 | 14,01 |
| -150# | -106 | 124,70 | 12,41 | 100 | 0 |
| Total | | 988,03 | | | |

Fonte: Autoras (2023).

Ao final do peneiramento constatou-se uma perda mássica de 1,62%.

Subsequente a essa etapa, foi elaborado o gráfico contendo a curva granulométrica do resíduo de granito. Observou-se que 93,7% do material apresenta diâmetros de partículas variando entre 60 e 4000 µm, enquanto os 6,3% restantes foram retidos na peneira de 3,5 mesh, cuja abertura corresponde aproximadamente a 5,7 mm.

Gráfico 1 - Curva granulométrica do ensaio de peneiramento via úmido



Fonte: Autoras (2023).

Os resultados da análise granulométrica mostram que a maior parte do material encontra-se na faixa entre 60 e 4000 μm . Considerando a classificação granulométrica utilizada em estudos de remineralizadores, partículas finas são aquelas inferiores a 200 μm , enquanto partículas médias situam-se entre 200 e 2000 μm . Assim, a predominância dessas duas faixas no resíduo de brita indica características físicas favoráveis à sua aplicação como remineralizador de solo, uma vez que frações mais finas apresentam maior área superficial específica, o que tende a favorecer a liberação de nutrientes (Câmara et al., 2021; Lima et al., 2015).

De acordo com Theodoro (2020) e Câmara et al. (2021), a granulometria ideal para aplicação agrícola de pós de rocha situa-se preferencialmente abaixo de 0,3 mm (300 μm), pois partículas menores apresentam maior taxa de solubilização de nutrientes. No entanto, Lima et al. (2015) ressaltam que a redução excessiva do tamanho das partículas, embora aumente a reatividade, eleva o custo energético da cominuição, sendo necessário buscar um equilíbrio entre eficiência agrônômica e viabilidade técnica. Nesse contexto, a predominância de frações finas observada no resíduo estudado demonstra que o material encontra-se dentro da faixa granulométrica recomendada, apresentando potencial para liberação gradual e sustentável de nutrientes no solo.

5.3 Análises químicas

5.3.1 Análise de fertilidade do pó de brita

Para caracterizar o tamanho das partículas do resíduo de brita, foi realizado o ensaio de peneiramento via úmido, procedimento que permite separar e quantificar as frações granulométricas conforme as aberturas das peneiras. A Tabela 3 apresenta as massas retidas, os percentuais individuais e acumulados referentes às três repetições realizadas, permitindo avaliar a distribuição granulométrica do material e identificar as faixas predominantes.

Tabela 4 - Análise química das amostras para avaliação da fertilidade no solo

| Granulometria | pH | MO | P | K ⁺ | Ca ²⁺ +Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | Al ³⁺ | H ⁺ +Al ³⁺ | SB | CTC (pH7) |
|---------------|------------------|------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------|----------------------------------|-----|-----------|
| | H ₂ O | g/Kg | mg/dm ³ | cmol _c /dm ³ | | | | | | |
| -3mm | 6,6 | 5,00 | 53 | 0,20 | 1,8 | 1,5 | 0,0 | 0,2 | 2,0 | 2,2 |
| -0,15mm | 6,8 | 5,34 | 66 | 0,32 | 2,5 | 2,3 | 0,0 | 0,1 | 2,8 | 2,9 |

Fonte: Autoras (2023).

Tabela 5 - Interpretação das análises de fertilidade no solo

| Granulometria | pH | MO | P | K ⁺ | Ca ²⁺ +Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | Al ³⁺ | H ⁺ +Al ³⁺ | SB | CTC (pH7) |
|---------------|------------------|-------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------|----------------------------------|-------|-----------|
| | H ₂ O | g/Kg | mg/dm ³ | cmol _c /dm ³ | | | | | | |
| -3mm | Alto | Muito baixo | Muito bom | Bom | Médio | Médio | Muito baixo | Muito baixa | Média | Baixa |
| -0,15mm | Alto | Muito baixo | Muito bom | Muito bom | Médio | Médio | Muito baixo | Muito baixa | Média | Baixa |

Fonte: Autoras (2023)

Segundo os resultados da análise química para verificação da fertilidade do resíduo no solo, o quantitativo de alumínio é muito baixo, resultado satisfatório, pois em concentrações elevadas esse elemento poderia representar toxidez para a cultura.

O pH das amostras se mostraram próximas a neutralidade indicando uma possível atividade complementar como corretor de solo. Estudos revelam que alguns pós de rocha apresentam potencial para atuarem como corretores de pH, necessidade muito comum no Brasil, onde os solos, de maneira geral, são ácidos (Alovisi *et al.*, 2020; Correia Junior, 2022; Vasques *et al.*, 2019).

Observou-se que o material apresenta teores relevantes de potássio e fósforo, sobretudo nas frações de granulometria mais fina, o que indica um potencial para atuar como fonte complementar desses nutrientes. Contudo, não é possível afirmar, com base nesta etapa do trabalho, que o material efetivamente disponibiliza esses elementos ao solo, uma vez que os ensaios de solubilização ainda não foram apresentados.

5.4 Fluorescência De Raios-X – FRX

Na tabela 6 são apresentadas a análise química por Fluorescência de raios – X do resíduo de brita.

Tabela 6 - Composição química do pó de rocha analisado

| Óxidos | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | Fe ₂ O ₃ | CaO | SO ₃ | P ₂ O ₅ | outros |
|--------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-----|-----------------|-------------------------------|--------|
| % | 62,3 | 18,5 | 7,6 | 4,8 | 3 | 1,6 | 1,1 | 1 |

Fonte: Autoras (2023).

De acordo com a legislação vigente que define os critérios para enquadramento de materiais como remineralizadores de solo (BRASIL, 2016), o material analisado apresentou resultados compatíveis com os requisitos mínimos exigidos. A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) indicou teores de K₂O de 7,6% e CaO de 3,0%, correspondendo a uma soma de bases de 10,6%, valor superior ao limite mínimo de 9% estabelecido pela norma. Observa-se também que o teor de K₂O, acima de 1%, atende à garantia mínima individual para o potássio, indicando o potencial do resíduo como fonte desse macronutriente.

Observa-se ainda a presença de P₂O₅ (1,1%) e SO₃ (1,6%), elementos que contribuem para a fertilidade do solo e o desenvolvimento vegetal. O fósforo, ainda que em baixo teor, pode auxiliar no metabolismo das plantas, pois participa da formação de compostos energéticos responsáveis pelos processos de crescimento e desenvolvimento. Já o enxofre atua na síntese de proteínas e enzimas essenciais ao metabolismo vegetal (Borges, 2021).

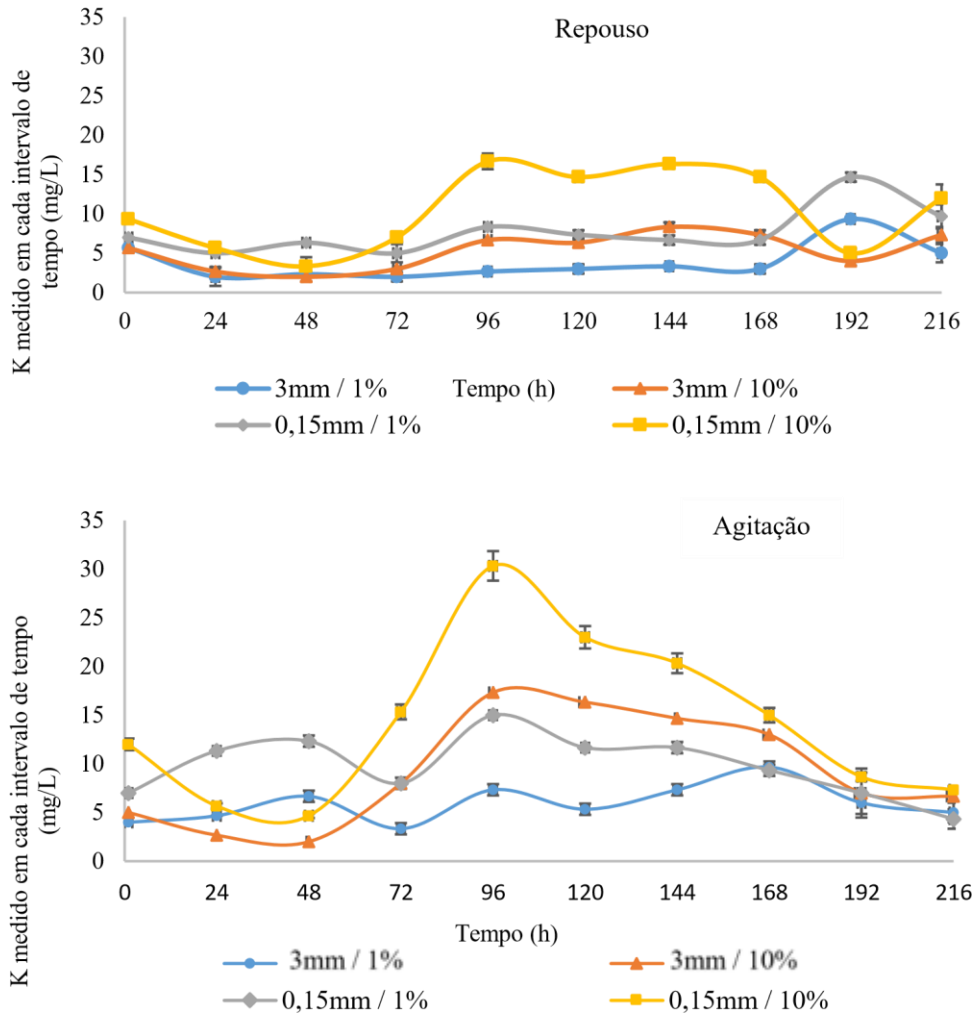
A presença desses elementos é consistente com resultados obtidos em estudos de rochagem, que demonstram que resíduos de rochas silicáticas, como o granito, podem atuar como fontes naturais de fósforo, potássio, cálcio e enxofre, favorecendo o aumento da fertilidade e a sustentabilidade agrícola (Theodoro, 2020; Câmara et al., 2021).

A concentração de Al₂O₃ (18,5%) e de Fe₂O₃ (4,8%) encontra-se dentro dos padrões esperados para rochas graníticas, não havendo indícios de teores excessivos de elementos potencialmente tóxicos.

5.5 Cinética de liberação do potássio

Os gráficos a seguir mostram os resultados de liberação de potássio em cada tempo de contato com a solução extratora (ácido cítrico) no modo de operação em repouso e agitação.

Gráfico 2 - Gráficos da liberação em função do tempo em Repouso e Agitação, respectivamente

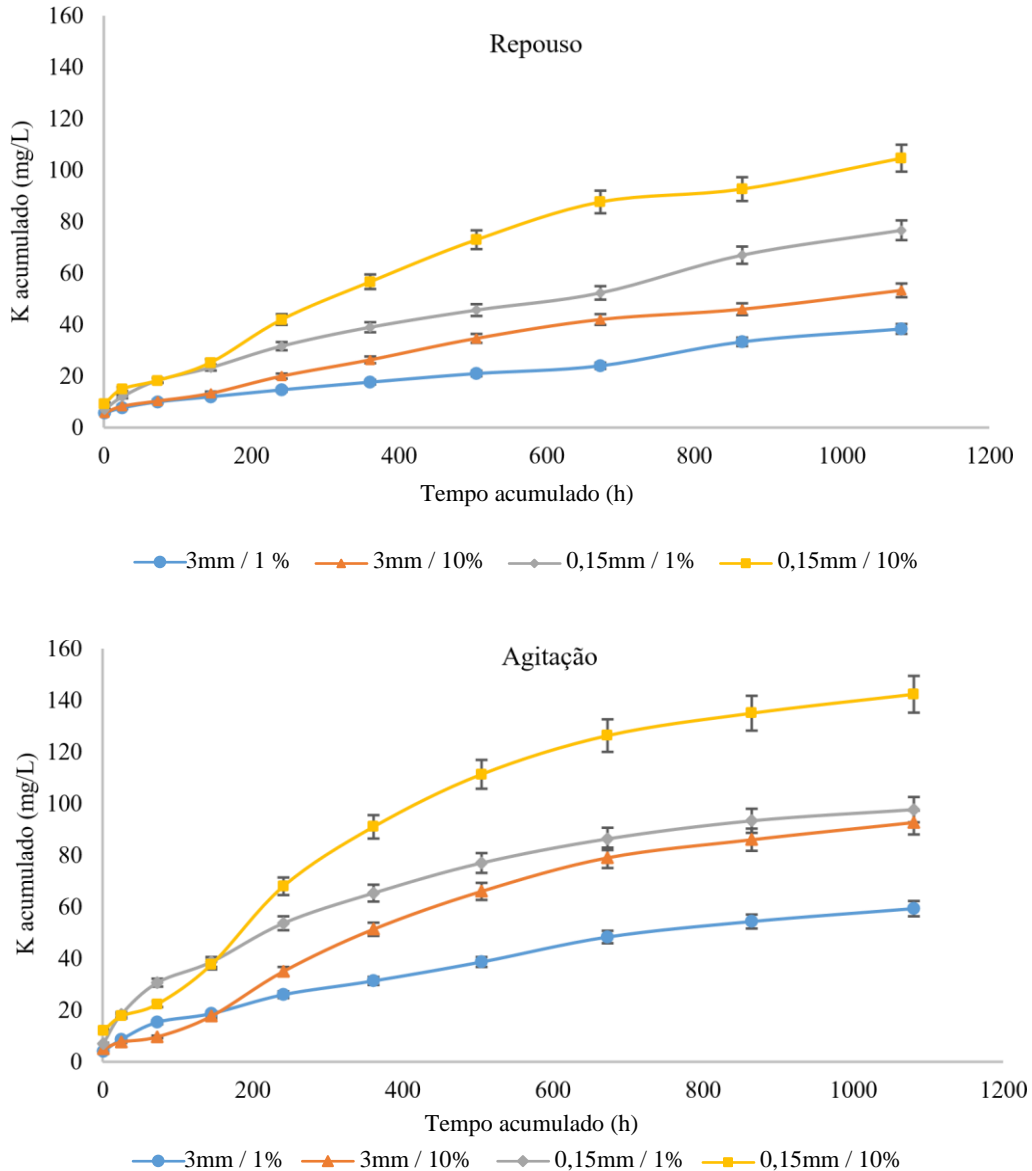


Fonte: Autoras (2023).

Em repouso, as liberações do potássio nas amostras finas foram mais acentuadas em comparação com as de granulometria abaixo de 3mm. Os maiores picos de liberação foram no tempo de 96 a 168h da granulometria abaixo de 0,15mm com concentração a 10%

Em agitação, a granulometria abaixo de 0,15mm com concentração a 10%, liberou pequenas frações de potássio nos tempos iniciais, e teve seu ápice no tempo de 96h e posteriormente foi sofrendo quedas gradativas. Após o tempo de 168h todas as amostras começaram a ter liberações de k semelhantes, entre 5 e 10 mg/L.

Gráfico 3 - Quantidade de extração acumulada de potássio em função do tempo em repouso e agitação, respectivamente.



Fonte: Autoras (2023).

Pode-se observar que, após 1.081h de contato com o ácido cítrico, a amostra fina com 10% de concentração teve maior desempenho que as demais, liberando um total de 105 mg/L e 140 mg/L de K em repouso e agitação, respectivamente.

A granulometria do mineral torna-se fundamental quando se fala em rochagem, uma vez que, quanto mais finas forem as partículas, maior será a área de contato exposta do material, resultando em uma maior liberação de nutrientes (Câmara *et al.*, 2021). Portanto, a maior eficiência de extração do potássio na fração mais fina já era esperada.

O regime em agitação liberou mais K em todas as amostras, em comparação ao sistema em repouso. Este fato deve-se ao sistema turbulento que promove maior interação entre o reagente e as partículas liberando o mineral mais rapidamente do que em repouso.

França et al. (2019) caracterizaram o rejeito de nefelina sienito e observaram que a extração máxima de potássio em 15 dias atingiu cerca de 5% do K total da rocha, evidenciando a dificuldade de liberação desse elemento em minerais de estrutura cristalina compacta. Embora esse estudo trate de outra litologia e não do material analisado neste trabalho, ele ilustra o comportamento típico de rochas silicáticas quanto à solubilização lenta de K, reforçando a importância de avaliar a cinética de liberação também no resíduo granítico estudado.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas análises granulométricas indicaram que o material apresenta predominância de partículas finas a médias, com boa distribuição entre as faixas de tamanho, o que favorece a reatividade e a solubilização gradual de nutrientes no solo.

A caracterização química por Fluorescência de Raios X (FRX) revelou teores expressivos de K_2O (7,6%) e CaO (3,0%), totalizando uma soma de bases superior a 9%, o que atende às exigências mínimas da Instrução Normativa MAPA nº 05/2016. A presença de P_2O_5 (1,1%) e SO_3 (1,6%) reforça o potencial agrônomo do resíduo, pois esses elementos participam de processos essenciais ao metabolismo vegetal. Esses resultados indicam que o resíduo granítico estudado possui composição química compatível com o uso agrícola, sendo uma alternativa sustentável para o aproveitamento de subprodutos da mineração.

A análise da cinética de liberação de potássio demonstrou que as frações mais finas (<0,15 mm) apresentaram maior taxa de dissolução, especialmente em meio ácido e sob agitação, evidenciando que a granulometria influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes. Esse comportamento confirma a viabilidade do uso do pó de brita como fonte de liberação lenta de potássio, contribuindo para o fornecimento contínuo de nutrientes às plantas e reduzindo a dependência de fertilizantes solúveis convencionais.

O resíduo de brita granítica estudado apresenta características físicas e químicas adequadas para sua utilização como remineralizador de solo, atendendo parcialmente aos requisitos normativos e demonstrando potencial agrônomo e ambiental relevante. Contudo, para a completa certificação do material junto ao MAPA, recomenda-se a determinação do teor de quartzo livre e dos elementos potencialmente tóxicos, bem como a realização de ensaios agrônômicos de campo que comprovem sua eficiência no aumento da fertilidade do solo e na produtividade das culturas.

Assim, o aproveitamento desse resíduo representa uma alternativa sustentável para o setor mineral, contribuindo para a redução do passivo ambiental, o uso racional dos recursos naturais e o fortalecimento de práticas agrícolas sustentáveis baseadas no conceito de rochas silicáticas como fontes naturais de nutrientes.

REFERÊNCIAS

- ALOVISI, A. M. T. *et al.* Rochagem como alternativa sustentável para a fertilização de solos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, p. 918-932, 2020.
- AQUINO, J. M. *et al.* The potential of alkaline rocks from the Fortaleza volcanic province (Brazil) as natural fertilizers. **Journal of South American Earth Sciences**, Amsterdam, v. 103, p. 102800, 2020.
- ARAÚJO, D. M. F. *et al.* Acidez potencial de solos do Estado do Amapá estimada pelo método potenciométrico SMP. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 3, n. 3, p. 57–65, 2014.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS E CORRETIVOS AGRÍCOLAS (ANDA). **Estatísticas** [online], 2021. Disponível em: <http://anda.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 23 out. 2022.
- BARROS, M. B.; RIBEIRO, R. C. C. **Fertilização e correção de solos utilizando resíduos de rochas ornamentais: estado da arte**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI), 2021. (Série Tecnologia Ambiental, 116). 98 p.
- BLOG FIELD VIEW. **Aumento do custo dos fertilizantes: como a agricultura digital pode ajudar na economia de insumos?** publicado em 28 jun. 2022. Disponível em: <https://blog.climatefieldview.com.br/aumento-custo-fertilizantes>. Acesso em: 15 out. 2022.
- BONDARENKO, A. *et al.* The use of waste from the production of gravel as fertilizer for cultivation of technical energy crops. **Technology Audit and Production Reserves**, Kharkiv, v. 3, n. 1, p. 59-63, 2021.
- BORGES, A. L. Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. *In: Recomendações de calagem e adubação para o Estado da Bahia*. Brasília, DF: EMBRAPA, 2021. Cap. 14, p. 263-303.
- BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050)**. Brasília, DF: SAE, 2021. 195 p. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf>. Acesso em: 12 set. 2022.
- BRITO, M. F. *et al.* Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação complementar. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 6, n. 1, p. 528-540, 2019.
- CAFFAGNI, L. C. Um olhar sobre o mercado de fertilizantes. **AgroANALYSIS**, São Paulo, v. 42, n. 4, p. 27-30, 2022.
- CALIGARIS, R. *et al.* A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 31, n. 1, p. 3-8, 2022.
- CÂMARA, G. R. *et al.* **Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem – Parte I**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021.

- CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 979-983, 2001.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 5. ed. atual. e aum. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 324 p.
- CORREIA JUNIOR, N. R. **Alterações químicas do solo e avaliação agrônômica das culturas de milho e sorgo em resposta à aplicação de doses de pó de basalto**. 83 f. TCC (Graduação em Engenharia Agrônoma) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira – SP, 2022.
- COSTA, A. G. **Rochas ígneas e metamórficas: petrografia, aplicações e degradação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 176 p.
- DUARTE, L. A. *et al.* Liberação de potássio e sódio a partir de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 48, n. 1, e101373, 2021.
- DUARTE, R. C. **Extração de potássio a partir da rocha verdete empregando ácidos orgânicos e fungos**. 2019. 38 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.32>.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Correção do solo e calagem para a cultura da batata** [online]. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortaliças/batata/correcao-do-solo>. Acesso em: 31 out. 2024.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Latossolos** [online]. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/solo/tipos-de-solo/latossolos>. Acesso em: 9 out. 2022.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação** [online]. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1127245/1/LV-RecomendacaoSolo-2020-123-133.pdf>. Acesso em: 31 out. 2024.
- FARIA, M. R. *et al.* Utilização de resíduos de granito na correção da acidez de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO*, 34., 2013, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.
- FRANÇA, S. C. A. *et al.* Avaliação da extração de potássio de nefelina sienito para uso como remineralizador de solos. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA*, 28., 2019, Belo Horizonte, MG. **Anais** [...]. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2019.

GLOBAL FERT. **A produção de fertilizantes na Rússia cai quase 10%**. publicado em 13 out. 2022. Disponível em: <https://globalfert.com.br/noticias/producao/a-producao-de-fertilizantes-na-russia-cai-quase-10/>. Acesso em: 24 nov. 2022.

GOMES, J. I. T. *et al.* Resposta da cultura da soja à aplicação de subprodutos de rochagem e de *Azospirillum brasilense*. In: SALÃO INTEGRADO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UERGS (SIEPEX), 10., 2021, Porto Alegre, RS. **Anais [...]**. Porto Alegre: Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2021.

GONDIN, J. C. *et al.* Emergência de plântulas de *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke (Caesalpiniaceae) em diferentes substratos e sombreamento. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 2, p. 329-338, 2015.

GUARÇONI, A.; FANTON, C. J. Resíduo de beneficiamento do granito como fertilizante alternativo na cultura do café. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 16-26, 2011.

HEBE BRAND, C.; GLAUBER, J. **A guerra Rússia-Ucrânia depois de um ano: impactos na produção de fertilizantes, nos preços e nos fluxos comerciais.** 2023. Disponível em: <https://www.ifpri.org/blog/russia-ukraine-war-after-year-impacts-fertilizer-production-pricesand-trade-flows>. Acesso em: 4 abr. 2023. <https://doi.org/10.5151/1516-392X-26783>.

KHAN, M.; RANA, H. Granite slurry: a valued by-product as fertilizer. **International Journal of Research and Innovation in Applied Science**, v. 4, n. 4, p. 143-145, 2020.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 724 p.

LIMA, R. M. R. *et al.* Avaliação das características físicas e da liberação de potássio da nefelina sienito para uso na agricultura. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, 70., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2015. p. 1454-1464. DOI: <https://doi.org/10.5151/1516-392X-26783>.

LODI, L. A. *et al.* Unveiling the solubilization of potassium mineral rocks in organic acids for application as K-fertilizer. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 194, n. 6, p. 24312447, 2022.

MELO, N. C. *et al.* Caracterização química de diferentes sistemas de uso do solo. **Revista Agroecossistemas**, Belém, v. 5, n. 2, p. 8-13, jul. 2014. ISSN 2318-0188. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/agroecossistemas/article/view/1793/2223>. Acesso em: 3 dez. 2022.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO AMAPÁ (MPAP). **Solos**. Amapá, 2011. Disponível em: <https://mpap.mp.br/2013-06-24-13-10-10/2013?view=article&id=194:solos&catid=111>. Acesso em: 15 nov. 2022.

MIRANDA, A. C. B. **Estudo das propriedades físicas do pó do granito Corumbá em função dos parâmetros de fabricação por metalurgia do pó**. 2021. 89 f. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, 2021.

OLIVEIRA. **Potencial remineralizador do solo de um pó de granito/gnaiss em Latossolo cultivado com braquiária.** 43 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2019.

RANDIVE, K. R. *et al.* An overview of the global fertilizer trends and India's position in 2020. **Mineral Economics**, v. 34, p. 371–384, 2021.

RIBEIRO *et al.* **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** SBCS, 1999.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (orgs.) **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356 p.

SANTOS, J. C. F. *et al.* Produção agroecológica de batata em relação a doses de pó de rocha. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 8, n. 1, p. 29-35, 2014.

SILVA, M. R. *et al.* Influência do enxofre elementar adicionado em um resíduo da mineração visando à liberação de nutrientes no solo. **Engenharia Sanitária e Ambiental** [online], Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, p. 309-316, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413415220190360>. Acesso em: 2 dez. 2022.

SOUSA, L. D. A. de. **Cinética de liberação do potássio em rejeito de mineração de vermiculita para o fortalecimento do solo.** 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* (eds.) **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA – Embrapa Solos, 2017.

THEODORO, S. H. **Cartilha de rochagem.** 2. ed. Brasília, DF: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2020. 32 p. Disponível em: http://sgbeduca.cprm.gov.br/media/adultos/cartilha_rochagem.pdf. Acesso em: 14 ago. 2022.

VALLEJO, L. G. *et al.* **Ingeniería geológica.** Madrid: Pearson Educación, 2002.

VASQUES, L. C. *et al.* Uso de rejeito de mineração de calcário ornamental para a correção de acidez do solo e desenvolvimento de plantas. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 2, p. 169-177, 2019.

VIEIRA, C. R. *et al.* Crescimento e nutrição do paricá após adubação com N, P e K. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 1, p. 17-25, 2020.