

USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO DE ESMERALDAS DE CAMPOS VERDES (GO) EM CONJUNTO COM RESÍDUOS DE TECIDOS DE POLIÉSTER E DE PÓ DE GARRAFAS PET NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS.

Hélio Elias da Silva*, Nelson Roberto Antoniosi Filho

LAMES – Laboratório de Métodos de Extração e Separação, Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, 74.690-900.

* helioeliasdasilva@yahoo.com.br

RESUMO

A exploração de recursos minerais para obtenção de pedras preciosas para a indústria joalheira é uma atividade muito lucrativa para os países que a realizam. Essas atividades trazem benefícios econômicos e sociais às comunidades, mas, por outro lado, também desempenham um papel importante em termos do favorecimento ao esgotamento ambiental nas proximidades dos empreendimentos de mineração. É o caso, por exemplo, da mineração de esmeraldas, que, devido à forma como é realizada, exige a escavação de poços profundos, resultando na remoção de grandes quantidades de materiais rochosos que são posteriormente processados, gerando enormes quantidades de materiais residuais altamente finos. Esses resíduos de mineração invariavelmente permanecem espalhados no meio ambiente, causando vários incômodos. Por outro lado, também há grandes quantidades de materiais poliméricos, de difícil degradação, espalhados no meio ambiente, principalmente restos de tecidos de Poliéster e garrafas de Politereftalato de Etileno (PET) pós-consumo que são descartados em grandes quantidades e são difíceis de reutilizar. Este trabalho apresenta uma proposta para o aproveitamento de três materiais residuais (resíduos de mineração de esmeralda, resíduos de tecido de Poliéster e resíduos plásticos de Politereftalato de Etileno (PET)), convertendo-os em dois tipos diferentes de tijolos ecológicos que, devido às suas excelentes propriedades técnicas, podem inclusive exceder os requisitos das normas técnicas aplicáveis aos tijolos tradicionais de solo-cimento.

Palavras-chave: tijolo ecológico, termoplástico, reciclagem, compósito, esmeralda.

1. Introdução

As atividades de mineração são muito importantes para o desenvolvimento das nações, uma vez que são necessárias para produzir vários tipos de produtos finais que são atualmente utilizados pelas pessoas para atender às suas necessidades. Por outro lado, a exploração de recursos minerais leva

à geração de enormes quantidades de subprodutos, os chamados rejeitos de mineração (Fontes et al. 2018). O mesmo princípio se aplica às atividades de mineração de esmeraldas, que, por um lado, trazem desenvolvimento econômico devido ao alto valor agregado do produto final, mas, por outro lado, deixam enormes quantidades de resíduos granulares, bem como materiais em pó finos dispersos no solo e nos cursos d'água, causando problemas para os municípios onde essa atividade ocorre. Pouco foi encontrado em artigos, dissertações e bancos de dados de teses sobre mineração de esmeraldas, com foco específico no uso dos respectivos rejeitos de mineração. Ainda, de acordo com Araújo et al (2014), o Brasil detém um enorme patrimônio mineral, sendo um dos maiores produtores e exportadores de minerais do mundo. O país produz 72 minerais, sendo 23 metálicos, 45 não metálicos e 4 energéticos. O minério de ferro lidera com 60% do valor total da produção mineral brasileira, e em segundo lugar está o ouro, com apenas 5%. Os mesmos autores ressaltam que, apesar de, sem dúvida, gerar riqueza e crescimento econômico, sendo um dos setores importantes da economia brasileira, a indústria extrativa mineral está entre as atividades humanas que mais causam impactos socioeconômicos e ambientais negativos, afetando, portanto, o território onde a mineração ocorre. Corroborando com isso, Barros (2013) aponta que a indústria da mineração é um dos setores mais importantes de qualquer país e, por outro lado, é um dos setores que mais polui e cujos rejeitos da mineração são invariavelmente abandonados no entorno das mineradoras causando danos à fauna e à flora. O mesmo autor menciona ainda que, historicamente, as atividades de mineração em todo o país, em geral, causam impactos ambientais significativos nas áreas submetidas a esse tipo de extração devido ao uso de técnicas rudimentares e predatórias. Em termos de mineração, há uma significativa atividade extrativista dedicada à obtenção de pedras preciosas, devido ao seu alto valor comercial, não apenas no Brasil, mas em vários países que se beneficiam desses extratos minerais dedicados à fabricação de joias. Dentre as pedras preciosas de interesse comercial, destacam-se as esmeraldas. O termo esmeralda vem do latim *smaragdus* e é um mineral de cor verde brilhante e transparente. É considerada uma das pedras preciosas mais valiosas do mundo da joalheria e a intensidade de sua cor está diretamente relacionada ao seu preço. Seu alto valor de mercado faz com que as esmeraldas sejam popularmente consideradas “ouro verde”. Em alguns países, sua exploração está associada a todos os tipos de conflitos e interesses sociais, razão pela qual se fala em “guerra verde”, como é o caso em algumas partes da Colômbia. Este mineral é formado por silicato de Alumínio e Berílio, possui dureza de 7,5 em 10 na escala de Mohs e cristalização hexagonal. Sua cor característica é produzida por duas substâncias: Crômio e Vanádio (Conceitos.com, 2023). No Estado de Goiás, em especial, encontra-se uma jazida mineral de esmeraldas de grande relevância, citada por Nascimento (2009), em que é relatado que

a mineração de esmeraldas localizada em Campos Verdes, iniciou suas atividades a partir da descoberta do afloramento de um veio de esmeralda em 1981. Matsuura et al (2021) ressaltam que, na época da descoberta desta jazida, quando o município de Campos Verdes ainda pertencia à cidade de Santa Terezinha de Goiás, houve grande valorização imobiliária, surgimento de hotéis na cidade e rápida ocupação, levando à superpopulação da cidade, que chegou a ter mais de 25.000 habitantes e se tornou a maior produtora de esmeraldas do mundo, levando o comércio de esmeraldas a ser a atividade local mais importante, superando a atividade pecuária. Segundo Nascimento (2009), essa exploração mineral era inicialmente realizada por garimpeiros artesanais, a céu aberto ou em profundidades rasas. Atualmente, no mesmo local, a mineração de esmeralda ocorre em galerias subterrâneas, por meio da abertura de poços verticais e subverticais, com profundidades entre 300 e 400 m por meio da retirada de minério bruto, transporte vertical, cominuição mecanizada, coleta manual de gemas e produção de grandes quantidades de rejeitos de diversas granulometrias. Tais rejeitos têm sido simplesmente dispostos em áreas próximas aos locais de beneficiamento, amontoados às margens de cursos d'água, em terrenos privados e públicos, sem qualquer tipo de tratamento ou destinação. Do ponto de vista do aproveitamento desses rejeitos da mineração de esmeralda, poucas referências foram encontradas. Destas, a mais notável, conforme citado por Oliveira (2012), é a utilização de rejeitos da mineração de esmeralda e outros minerais na produção de revestimentos cerâmicos. Ao final de seu programa experimental, o autor concluiu que a incorporação desses rejeitos de mineração levou à produção de materiais cerâmicos com propriedades compatíveis com revestimentos nobres, como revestimentos de grés e porcelana. Barros (2013) estudou a incorporação de rejeito de mineração de esmeralda para obtenção de materiais refratários e isolantes. Seus resultados mostraram que o rejeito de mineração de esmeralda pode ser utilizado na produção de massas cerâmicas de materiais refratários devido à sua alta refratariedade. De fato, observou-se uma alta taxa de aproveitamento desse resíduo, uma vez que a adição de 45% de rejeito de mineração de esmeralda à massa cerâmica resultou em produtos que atenderam às normas técnicas aplicáveis. Ainda na área de materiais cerâmicos, Cavalcante et al (2012) avaliaram o potencial de utilização do rejeito de mineração de esmeralda como matéria-prima fundente para a produção de revestimentos cerâmicos. Os resultados mostraram que o rejeito de esmeralda estudado pode ser incorporado à massa do revestimento cerâmico em até 20% como substituição ao feldspato sem comprometer as propriedades do produto final. Além disso, não foi apenas na área de materiais de construção que foi possível verificar a empregabilidade do rejeito de mineração de esmeralda. Martins et al (2008) e Aguiar et al (2012) relatam que o rejeito mineral gerado pelos processos de mineração de esmeralda possui composição mineralógica e química

peculiar aos insumos agrícolas (corretivos e fertilizantes). Silva et al (2010) e Lima et al (2019) caracterizaram um rejeito de esmeralda a fim de verificar a possibilidade de seu uso como subproduto para o setor agrícola. Concluíram que esses rejeitos apresentam fases minerais que contêm elementos de interesse agrônômico, incluindo magnésio e potássio, importantes para uso como fertilizantes de solo.

Como os tijolos são elementos essenciais para a construção civil e para atender às demandas da sociedade, além da necessidade de descarte de rejeitos minerais, diversos pesquisadores têm se dedicado a desenvolver tijolos a partir de diversos tipos de rejeitos de mineração. Dentre estes, trabalhos como os de Wang et al. (2023) e (2024) demonstram a viabilidade da produção de tijolos crus a partir de rejeitos e cinzas, apresentando bom desempenho ambiental e estabilização de metais pesados. Guan et al. (2024) e El Khazanti et al. (2024) focam na incorporação de rejeitos de minério de ferro e rejeitos de caulim em tijolos permeáveis e de argila vermelha, respectivamente, apresentando melhorias na resistência e na sustentabilidade ambiental. Rana et al. (2024) exploraram o uso de rejeitos de moinhos de urânio na fabricação de tijolos e avaliam sua segurança radiológica. Outros estudos, como o de Bao et al. (2023), investigam mecanismos de queima e a influência de tijolos de rejeitos de minério de ferro no desempenho estrutural de materiais de aterro de rejeitos cimentados. Chen et al. (2024) apresentam soluções para tijolos de baixo carbono, enquanto Lin et al. (2024) e Kang et al. (2023) avaliaram a produção de tijolos sinterizados e álcali-ativados a partir de rejeitos de chumbo-zinco e minério de Ferro. Por fim, Deng et al. (2024) e Chandra et al. (1992) analisaram tijolos reciclados com rejeitos de ouro, destacando o potencial de uso de resíduos siliciosos na fabricação de tijolos de silicato de cálcio. Portanto, diante do desafio de desenvolver as formas de aproveitamento do rejeito de mineração de esmeraldas, aglomerados pelo uso de rejeitos poliméricos, este trabalho apresenta a pesquisa com a qual foram desenvolvidos tijolos à base do uso do rejeito de mineração de esmeralda em conjunto com resíduos de tecidos de Poliéster e tijolos à base do uso do rejeito de mineração de esmeralda em conjunto com resíduos de garrafas de Politereftalato de Etileno (PET) pós-consumo, que se assemelham aos tijolos tradicionais solo-cimento. A motivação para a escolha do rejeito de mineração de esmeralda partiu do fato de o próprio Governador do Estado de Goiás, por ocasião de um evento ambiental em que teve contato com este projeto de pesquisa, o mandatário manifestou interesse no tema e lançou o desafio para que estendêssemos as descobertas científicas obtidas anteriormente com o rejeito de mineração de ferro de Brumadinho, Minas Gerais, para aqueles rejeitos de mineração de esmeralda que permaneciam espalhados pelo município de Campos Verdes, Goiás, causando poluição de cursos d'água, bem como poluição visual e outros transtornos aos moradores e à administração pública. A

decisão de estudar o uso de retalhos de tecido de Poliéster foi tomada porque esses materiais residuais são descartados em aterros sanitários após o descarte de sobras da indústria de vestuário. Sabe-se que aproximadamente 20% do volume total de tecidos utilizados na confecção de roupas é descartado na forma de pequenos retalhos, que se tornam material de baixo valor agregado e com poucas possibilidades de uso na produção de outros produtos. Como esses retalhos de tecido de Poliéster levam muito tempo para se degradar, eles têm um alto potencial de causar danos ao meio ambiente. Em relação aos resíduos de garrafas de Politereftalato de Etileno (PET) pós-consumo, a decisão de utilizá-los neste programa experimental foi tomada devido ao fato de que, no Brasil e em todo o mundo, existe uma quantidade imensurável de garrafas PET que, após o uso, são descartadas nas ruas, córregos, cursos d'água e aterros sanitários. Sabe-se que, embora esse material permita diversos processos de reaproveitamento, infelizmente, a quantidade desse material simplesmente descartado na natureza tem aumentado ano após ano. A literatura técnica relata que a degradação de garrafas PET libera grandes quantidades de microplásticos que já são encontrados em órgãos humanos e em organismos vivos terrestres e marinhos. Testes exploratórios, ainda que em escala laboratorial, demonstraram que esses dois materiais poliméricos apresentaram resultados bastante satisfatórios do ponto de vista de sua capacidade de atuar como ligantes, demonstrando a capacidade de amalgamar partículas sólidas para formar produtos denominados materiais compósitos. Esses materiais compósitos têm se mostrado particularmente úteis para a obtenção de tijolos, materiais essenciais para praticamente qualquer tipo de construção. Nesse caso, este trabalho utilizou como referência comparativa as propriedades técnicas exigidas para tijolos solo-cimento, uma vez que esses materiais são obtidos a partir da utilização de uma fase granular (solo), cujas partículas terrosas são aglomeradas pelo efeito cimentante dos grãos de cimento Portland em contato com a água. No caso do material compósito aqui referido, a fase granular provém dos grãos de rejeito da mineração de esmeralda, enquanto a ação aglomerante provém da fase polimérica, seja ela proveniente de resíduos de tecido de Poliéster ou de resíduos de garrafas PET pós-consumo. A propriedade ligante desses materiais poliméricos é obtida pelo aquecimento da mistura da fase granular previamente misturada com a fase polimérica até uma temperatura de 300°C. Nessas condições, o material polimérico se liquefaz e preenche os diversos espaços entre os grãos da fase granular. À medida que o material esfria, a fase polimérica endurece e mantém os grãos da fase granular aderidos, conferindo solidez, resistência e impermeabilidade ao material compósito assim obtido.

Para facilitar a compreensão deste trabalho, optou-se por apresentar os dados do desenvolvimento da fase experimental juntamente com os respectivos resultados laboratoriais e discussões sobre os

mesmos, com foco em: (1) obtenção das amostras de tijolos em pequena escala à base de rejeito de mineração de esmeralda utilizando rejeito polimérico de tecidos de Poliéster e também amostras de tijolos em pequena escala com rejeito de mineração de esmeralda e rejeito de garrafa PET e, (2) obtenção dos tijolos em escala real à base de rejeito de mineração de esmeralda utilizando rejeito polimérico de tecidos de Poliéster e tijolos em escala real à base de rejeito de mineração de esmeralda utilizando rejeito de garrafa PET, verificando sua conformidade com as normas técnicas relativas aos tijolos solo-cimento utilizados como referência.

2. Métodos experimentais

2.1 Amostragem

Amostras de rejeitos de mineração de esmeralda foram inicialmente obtidas diretamente de uma área de disposição de uma pequena empresa de beneficiamento de extração mineral no município de Campos Verdes, Goiás, Brasil. A data da coleta foi 01 de janeiro de 2023. O local de onde foram retiradas as amostras de material fino e grosso tem as coordenadas geográficas 14°16'5,1"S e 49°39'25,8"W e está localizado a 164 metros acima do nível do mar. A Figura 1 ilustra como os extratos minerais são fornecidos aos pequenos beneficiadores no município de Campos Verdes (GO).

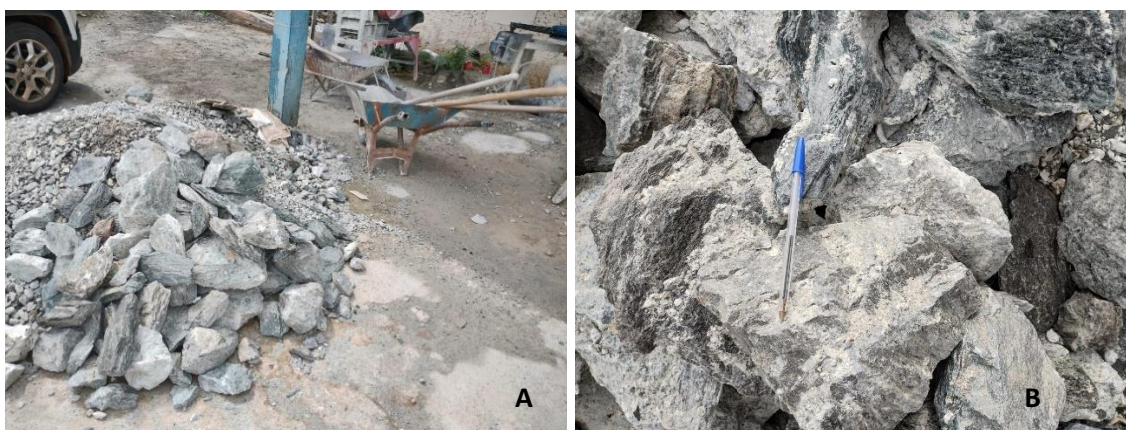


Figura 1 – Aspecto visual dos extratos minerais para processamento

(Fonte: o próprio autor)

Esses extratos minerais primários passam por um processo de britagem utilizando um britador mecânico, que os converte em um material com granulometria menor. Após a britagem, o material com granulometria menor é levado para uma mesa de separação, onde ocorre a etapa manual, localmente chamada de "catação". Esta é a fase em que as gemas são coletadas à medida que o minério inerte mais grosso é separado e, como resultado da lavagem e peneiramento que ocorrem nesta fase, é produzido um resíduo fino com aparência arenosa. A Figura 2 ilustra esta fase do processo de beneficiamento.



Figura 2 – Separação manual das gemas de esmeralda e disposição dos resíduos de mineração.

(Fonte: o próprio autor)

O beneficiamento dos extratos minerais obtidos naquele município produz principalmente duas variedades de rejeito de mineração. Uma fase mais grossa, com diâmetro característico que varia de 1 mm a 4 mm, popularmente chamada de “bagaço” naquele município. Além disso, há um segundo tipo de rejeito, com granulometria bem mais fina, com diâmetro característico inferior a 1,00 mm. No estabelecimento onde as amostras foram coletadas, a água utilizada no processo de lavagem, que carrega as partículas finas produzidas na britagem do rejeito de mineração, é despejada em um curso d’água adjacente ao empreendimento. Como resultado, observou-se que o curso d’água foi completamente assoreado pela fase mais fina do rejeito de mineração. A fase mais grossa, chamada de “bagaço”, é simplesmente lançada em um terreno vizinho, também próximo ao curso d’água, e deixada à disposição dos moradores locais, que ganham a vida “recolhendo” minúsculas gemas de esmeralda ainda presentes naquele resíduo, as quais têm baixo valor comercial e não interessam ao empreendedor.

Foi realizada uma coleta de aproximadamente 200 litros de cada um desses dois tipos de rejeitos de mineração. Os rejeitos de granulação fina, coletados nas margens do curso d’água, foram removidos com uma certa quantidade de água, enquanto os rejeitos mais grossos foram coletados praticamente secos.

2.2 Análises físico-químicas dos resíduos de mineração de esmeraldas

Esses dois tipos de materiais foram armazenados em laboratório, onde foram submetidos à secagem ao ar, quarteamentos sucessivos e separação de alíquotas representativas para as operações de granulometria por peneiramento, obtenção da massa específica aparente seca, difração de raios X e

obtenção de imagens por microscópio eletrônico de varredura, além da identificação das fases mineralógicas.

O peneiramento dos dois tipos de rejeito de mineração de esmeralda (rejeito fino e rejeito grosso) foi realizado de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR NM 248 (2003). Observa-se que o resíduo do tipo fino apresenta uma concentração significativa de grãos com dimensões próximas a 0,6 mm, mas também uma grande variedade de grãos pequenos, com diâmetros entre 0,6 mm e 0,15 mm. Em suma, trata-se de um material com ampla distribuição granulométrica, onde predominam grãos de pequena dimensão. Adicionalmente, a massa unitária deste resíduo fino foi medida de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR NM 45 (2006) e o valor obtido foi de 1,57 gramas por centímetro cúbico.

O peneiramento do resíduo grosso apresentou resultados como uma variação suave na distribuição granulométrica de um diâmetro de 4,75 mm a até menor que 0,15 mm, porém, com uma alta concentração de quase 60% de partículas com diâmetro próximo a 1,18 mm. Adicionalmente, a massa unitária deste resíduo grosso foi medida de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR NM 45 (2006). O valor obtido foi de 1,61 gramas por centímetro cúbico.

De acordo com os achados da microscopia eletrônica de varredura, foi verificada a presença de Alumínio, Cálcio, Potássio e Magnésio, entre outros. Este achado está em consonância com diversas menções citadas ao longo deste trabalho, na seção de revisão bibliográfica, onde são mencionadas aplicações de rejeito de mineração de esmeralda na área agrícola para correção de solos devido aos seus teores típicos dessas frações minerais.

A Figura 3 mostra uma ampliação de uma imagem obtida de uma amostra de rejeito de mineração de esmeralda (fase fina), que destaca o pequeno tamanho dos grãos que formam esta fase, bem como a presença de grãos de tamanhos variados e de pequena magnitude

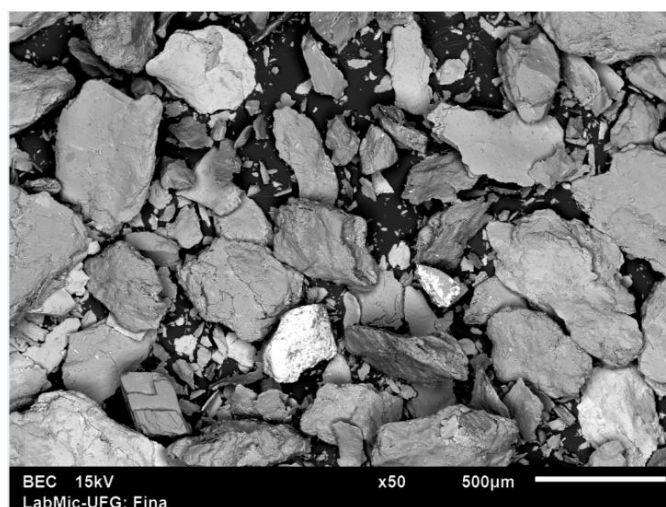


Figura 3 – Imagem aumentada dos grãos de resíduos de mineração de esmeralda (fase fina)

Uma amostra representativa de rejeito de mineração de esmeralda (fase fina) foi enviada ao Centro Analítico do Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás para análise termogravimétrica. Observou-se que entre as temperaturas de 350°C e 570°C não há perda de massa da amostra. Entretanto, entre as temperaturas de 6.000°C e 6.650°C há perda acentuada de massa da amostra. Para os fins práticos deste trabalho, em que a temperatura ajustada no forno mufla utilizado para aquecer os corpos de prova foi de 300°C enquanto a temperatura dos moldes metálicos foi consistentemente de 265°C, não se espera que tenha havido qualquer alteração substancial na estrutura do rejeito de mineração de esmeralda que pudesse afetar o comportamento do produto final obtido.

2.3 Análise física de resíduos têxteis de Poliéster

O resíduo têxtil utilizado neste programa experimental, para aglutinar as partículas sólidas do rejeito da mineração de esmeralda, foi originalmente obtido como subproduto de fábricas de roupas na forma de pequenas aparas. Essas aparas eram fornecidas em cores variadas e um total de cerca de 500 kg foi coletado e levado a um moedor para triturá-lo até atingir uma condição semelhante a um pó. Os testes de laboratório realizados no resíduo de tecido de Poliéster triturado mostraram que ele é finamente moído, com 65,38% de sua massa retida na peneira *Tyler Mesh 16*, com comprimento menor que 1,0 mm. A análise termogravimétrica do tecido triturado demonstrou que entre 370°C e 3.780°C, não foi observada perda de massa. No entanto, para temperaturas acima desta e até 4.510 °C, foi observada perda repentina de massa.

É importante destacar que a temperatura de operação do forno mufla, conforme adotada neste programa experimental, foi de 300°C. As medições da temperatura interna dos moldes metálicos de teste indicaram sempre em torno de 265°C. Portanto, o mais provável é que o resíduo têxtil no produto final não tenha se degradado perdendo massa.

2.4 Análise física de resíduos de pó de garrafas PET

Uma amostra de aproximadamente 50 kg foi adquirida de uma empresa que recicla garrafas PET. Após um processo de homogeneização e quarteamento, cerca de 500 gramas de pó de garrafas PET trituradas foram coletadas e submetidas à análise de peneiramento de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR NM 248 (2003). Os resultados indicaram que 50% da amostra possui diâmetro entre 1,18 mm e 2,36 mm.

Uma análise termogravimétrica foi realizada em uma pequena amostra de resíduos de garrafas PET trituradas. Os resultados mostraram que a perda de massa começa quando a temperatura atinge 285°C. Desde que a temperatura da mufla durante o aquecimento das amostras tenha sido ajustada

em 300°C enquanto a temperatura dos moldes metálicos foi encontrada em 265°C, é mais provável que a fase polimérica não tenha sofrido degradação.

3. Programa experimental

Inicialmente, com o objetivo de verificar se esses dois resíduos de mineração de esmeralda teriam alguma afinidade com o processo desenvolvido anteriormente por Silva & Antoniosi Filho (2025) para resíduos de mineração de ferro com aparas têxteis pós-consumo trituradas, bem como com pó de garrafa de Politereftalato de Etileno (PET), foi realizado um teste piloto utilizando moldes em escala reduzida com dimensões proporcionais às de um tijolo convencional solo-cimento conforme a Norma Brasileira ABNT NBR 8491 (2012), as dimensões internas do molde eram: comprimento - 12 cm, largura - 6 cm e altura - 3,5 cm. Esses moldes foram feitos em aço carbono e foram equipados com um sistema de compactação tal que as matérias-primas pudessem ser misturadas, compactadas por prensagem e aquecidas em forno mufla a 300°C para obtenção de um bloco com as dimensões desejadas. A Figura 4 ilustra o molde metálico e o dispositivo de compressão.



Figura 4 – Aparato de compressão (esquerda) e corpos de prova finalizados (direita)(Fonte: o próprio autor)

Decidiu-se realizar dois tipos de ensaios: o primeiro utilizando resíduos de tecido de Poliéster triturado como material aglomerante e o segundo utilizando pó de garrafas de Politereftalato de Etileno (PET) pós-consumo. Para cada uma dessas duas variedades, decidiu-se realizar três modalidades diferentes: a primeira utilizando 100% dos resíduos grossos, a segunda utilizando 50% dos resíduos grossos e 50% dos resíduos finos e a terceira com 100% dos resíduos finos.

A matriz experimental foi projetada para incluir a combinação das seguintes variáveis: quantidade em peso de resíduo de mineração de esmeralda, quantidade em peso de material polimérico, força de compactação aplicada aos corpos de prova e temperatura de exposição (esta última sempre fixada em 300°C). As quantidades em peso de material polimérico e resíduo de mineração de esmeralda foram expressas como uma razão entre elas. Por exemplo, onde se lê uma relação mássica

de 1:20, isso significa uma unidade em massa de material polimérico para vinte unidades em massa de resíduo de mineração de esmeralda. A força de compactação adotada para produzir os corpos de prova foi de 1,5 tonelada, o que implica em uma tensão de compactação de 2,083 MPa. O tempo de aquecimento adotado no forno mufla foi de 60 minutos. Esses parâmetros foram considerados por Silva & Antoniosi Filho (2025) como os mais eficazes para alcançar os resultados desejados. A Tabela 1 resume os resultados dos corpos de prova em termos de absorção de água e resistência à compressão ao utilizar resíduos de tecido de Poliéster como material aglomerante. A medição dessas propriedades técnicas foi feita de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 8492 (2012).

Uma vez que os resultados do programa experimental de pequena escala realizado por Silva & Antoniosi Filho (2025) com rejeito de mineração de ferro sob as mesmas condições mencionadas anteriormente mostraram os seguintes resultados: absorção de água de 17,76% e resistência à compressão de 1,996 MPa, pode-se verificar que, em termos de absorção de água, os três resultados foram mais satisfatórios do que aqueles observados para o rejeito de mineração de ferro. Em termos de resposta de resistência à compressão, o corpo de prova com 100% de material fino apresentou uma ligeira diminuição em comparação ao programa experimental inicial, enquanto o corpo de prova com 50% de material fino + 50% de material grosso e o corpo de prova com 100% de material grosso apresentaram resultados superiores neste quesito.

Tabela 1 – Absorção de água e resistência à compressão de corpos de prova em pequena escala com material aglomerante de resíduos de tecidos de Poliéster.

	Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)
100% material fino	16.4	1.73
50% material fino + 50% material grosso	13.28	2.63
100% material grosso	12.76	2.62

Da mesma forma, três corpos de prova em pequena escala foram produzidos no seguinte formato: relação mássica 1:20, força de compactação de 1,5 tonelada (tensão de compactação de 2,083 MPa), tempo de exposição de 60 minutos a uma temperatura de 300°C utilizando rejeito de mineração de esmeralda e resíduos de garrafas de Politereftalato de Etileno (PET) pós-consumo. Um corpo de prova foi feito com 100% de rejeito fino de mineração, enquanto outro corpo de prova foi feito com 50% de rejeito fino e 50% de rejeito grosso e o terceiro corpo de prova foi feito com 100% de rejeito

grosso. Os resultados obtidos de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 8492 (2012) são apresentados na Tabela 2.

Considerando que os resultados do programa experimental em pequena escala, realizado por Silva & Antoniosi Filho (2025) com rejeito de mineração de ferro, indicaram um resultado característico de absorção de água de 17,76% e resistência à compressão de 1,996 MPa, pode-se observar que, em termos de absorção de água, as três formulações foram muito superiores aos valores observados para o rejeito de mineração de ferro. Do ponto de vista da resistência à compressão, da mesma forma, as três formulações apresentaram resultados superiores nesse quesito.

Tabela 2 – Absorção de água e resistência à compressão de corpos de prova em pequena escala com pó de garrafa PET como aglomerante

	Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)
100% material fino	11.54	2.954
50% material fino + 50% material grosso	7.03	3.589
100% material grosso	6.80	3.769

Constatou-se que, na dimensão absorção de água, em todas as situações avaliadas, independentemente da quantidade relativa de resíduo fino e resíduo grosso, os valores alcançados foram inferiores a 20%, sendo, portanto, considerados adequados para os fins pretendidos. Por outro lado, do ponto de vista da dimensão resistência à compressão, há quase igualdade entre os valores obtidos com 50% de resíduo fino e 50% de resíduo grosso, quando comparado com a formulação contendo 100% de resíduo grosso. Dito isso, e considerando o viés ambiental deste trabalho e considerando a necessidade de dar igual destinação a ambos os tipos de rejeito de mineração, optou-se por prosseguir com esta investigação considerando o uso combinado de 50% de rejeito fino e 50% de rejeito grosso. Portanto, tendo em vista que o ensaio em pequena escala apresentou resultados muito positivos, optou-se por realizar um ensaio em escala real para verificar a possibilidade de atingir valores relevantes utilizando um molde em suas dimensões reais, conforme a Norma Brasileira ABNT NBR 8491 (2012), referente a tijolos solo-cimento (24 cm de comprimento, 12 cm de largura e 7 cm de altura). O molde metálico utilizado para a obtenção das amostras, de acordo com suas dimensões, bem como o produto final, são apresentados na Figura 5.



Figura 5 – Molde metálico com a tampa fechada (esquerda) e tijolo ecológico com resíduo de tecido de Poliéster (direita). (Fonte: o próprio autor)

Assim, dois corpos de prova em escala real foram produzidos sob as seguintes condições de processo: relação mássica de 1:20, força de compactação de 9,0 toneladas (tensão de compactação de 3,125 MPa), tempo de exposição de 3 horas a uma temperatura de 300 °C, utilizando 50% de resíduo mineral fino e 50% de resíduo mineral grosso. Um dos corpos de prova tinha resíduo têxtil de Poliéster como agente aglomerante, enquanto o outro corpo de prova usava garrafas PET trituradas pós-consumo como agente aglomerante. Esses parâmetros estão de acordo com Silva & Antoniosi Filho (2025). Os ensaios de compressão foram realizados com os tijolos inteiros. Os resultados obtidos de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 8492 (2012) são os seguintes na Tabela 3.

Tabela 3 – Absorções de água e resistências à compressão de corpos de prova em escala real usando resíduos têxteis e pó de garrafas PET como aglomerante

Amostras	Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)
Resíduo de tecido	13.89	2.073
Pó de garrafa PET	6.07	3.229

Sabendo que os resultados do programa experimental em escala real, conforme Silva & Antoniosi Filho (2025), utilizando rejeito de mineração de ferro com corpos de prova inteiros, apresentaram os seguintes resultados: absorção de água característica de 17,29% e resistência à compressão característica (com tijolo inteiro ensaiado) de 1,093 MPa, é fácil observar que os resultados apresentados pelo produto obtido com rejeito de mineração de esmeralda são robustamente superiores aos obtidos com rejeito de mineração de ferro. Por esse motivo, decidiu-se continuar

testando esses rejeitos de mineração de esmeralda, expandindo o espaço amostral dos corpos de prova e investigando as respostas obtidas, ambos utilizando resíduo de tecido de Poliéster e pó de PET pós-consumo como aglomerantes.

Com o objetivo de dar continuidade ao programa experimental envolvendo rejeito de mineração de esmeralda, tanto com uma fase polimérica à base de tecido de Poliéster triturado quanto com pó de PET pós-consumo, foram produzidos diversos corpos de prova em escala real sob as seguintes condições: relação mássica 1:20, força de compactação de 9,0 toneladas (3,125 MPa) e 25,0 toneladas (8,680 MPa), tempo de exposição de 3 horas a uma temperatura de 300°C, utilizando 50% de rejeito fino e 50% de rejeito grosso, juntamente com resíduo de tecido de Poliéster e outro conjunto de corpos de prova com resíduo de pó de PET. Os resultados obtidos de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 8492 (2012) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Sumário dos resultados da produção de corpos de prova em escala real

Agente aglomerante	Formato de teste	Força de compactação (ton)	Número de corpos de prova	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
Pó de tecido de Poliéster	Cortado	9.0	5	1.078	16.65
Pó de tecido de Poliéster	Inteiro	9.0	5	1.812	14.44
Pó de garrafa PET	Cortado	9.0	5	0.813	10.75
Pó de garrafa PET	Inteiro	9.0	5	2.318	8.42
Pó de tecido de Poliéster	Cortado	25.0	5	1.960	9.53
Pó de garrafa PET	Cortado	25.0	5	3.532	7.62

Vale ressaltar que a resistência à compressão é expressa como um valor característico, calculado de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 12.655 (2022), da seguinte forma: $F_k = \text{valor médio} - 1,65 \times \text{desvio padrão}$. Por outro lado, a absorção de água também é expressa como um valor característico, calculado da seguinte forma: $Abs_k = \text{valor médio} + 1,65 \times \text{desvio padrão}$.

Com atenção especial aos dois últimos ensaios da tabela anterior, pode-se concluir que os tijolos obtidos tanto com resíduos de tecido de Poliéster quanto com resíduos de pó de PET apresentaram absorções de água muito inferiores ao valor máximo aceitável pela Norma Brasileira ABNT NBR 8491 (2012); menor ou igual a 20%. No caso da resistência à compressão dos tijolos à base de resíduos de tecido de Poliéster, o valor foi marginalmente inferior ao valor recomendado pela Norma Brasileira ABNT NBR 8491 (2012) (igual ou superior a 2,0 MPa). Pequenos ajustes podem ser feitos em termos de preparação da mistura ou mesmo em termos de aumento da força de compactação para atingir o valor mínimo esperado. Portanto, o resultado obtido é considerado aceitável para os fins a que se destina este trabalho. Por outro lado, para os tijolos à base de resíduos de pó de garrafas PET, a resistência à compressão obtida está muito além do limite considerado por Norma Técnica e o produto é considerado aprovado em ambos os parâmetros, conforme exigido pela Norma Técnica Brasileira para tijolos solo-cimento.

Com relação às recomendações para estudos futuros, sugerimos avaliar os mecanismos de intemperismo, permeabilidade à água, estabilidade dimensional, propriedades térmicas e acústicas dos tijolos compósitos produzidos conforme este estudo.

4. Conclusões

Com base nos dados disponíveis, conclui-se que, no caso de tijolos produzidos a partir de rejeito da mineração de esmeralda, sejam aglomerados com resíduos de tecido de Poliéster triturado ou com resíduos de garrafas PET pós-consumo trituradas, os produtos finais, produzidos sob uma força de compactação de 25 toneladas (tensão de compactação de 8,68 MPa), apresentaram resistência à compressão e absorção de água em níveis ainda melhores que os valores de referência. Por essa razão, em ambos os casos, é possível utilizar esses tijolos para a construção de unidades habitacionais de interesse social na forma convencional, bem como para a construção de muros.

Considerando uma habitação social, com três dormitórios e área total de cerca de 62 m², tal como um projeto padrão elaborado de acordo com as exigências do Programa Minha Casa Minha Vida, desenvolvido pelo Governo Federal (disponível em <https://casaconstrucao.org/projetos/planta-minha-casa-minha-vida/>), estima-se que essa edificação necessite de uma área total de paredes de cerca de 132 m². Um tijolo como o aqui mencionado, pelas suas dimensões e com a argamassa de assentamento ao seu redor, tem uma área lateral líquida de 0,02 m². Uma casa como a mencionada anteriormente pode consumir cerca de 7.300 tijolos. De acordo com nossos resultados, cada tijolo demanda cerca de 180 gramas (0,18 kg) de material polimérico, independentemente de ser proveniente de resíduos têxteis ou pó de garrafa PET, para sua produção. Portanto, para construir

esta casa, espera-se gastar cerca de 1.314 kg de resíduos de tecido de Poliéster e/ou pó de PET. Sabe-se que uma garrafa de refrigerante de 2 litros pesa cerca de 47 g (0,047 kg), enquanto uma habitação social como esta demandaria cerca de 20.000 garrafas PET de 2 litros. Pelo mesmo raciocínio, uma camiseta comum de Poliéster pesa cerca de 170 g (0,17 kg), uma habitação social como a aqui considerada pode exigir 7.700 camisetas de Poliéster.

O Brasil produz 175 mil toneladas (175 milhões de kg) de retalhos de tecido de Poliéster por ano. Além disso, 259,7 mil toneladas (259,7 milhões de kg) de resíduos de PET são descartados em aterros sanitários todos os anos. A soma dessas duas quantidades gera 434,7 milhões de kg de resíduos poliméricos por ano. Se todas essas quantidades fossem convertidas em tijolos, de acordo com o processo aqui apresentado, quase 331 mil unidades residenciais de três dormitórios poderiam ser construídas a cada ano. Essa quantidade seria suficiente para acomodar quase 2 milhões de habitantes em suas moradias próprias anualmente.

Por outro lado, a quantidade de rejeito de mineração de esmeralda espalhado pelo município de Campos Verdes (GO) é tão grande que, se fosse tomada a decisão de aplicar os achados deste trabalho naquele município, toda a demanda por habitação social seria atendida localmente e ainda haveria uma quantidade incontável de rejeitos minerais que poderia ser convertida em tijolos para construções de interesse social em toda a região, dando um destino muito mais nobre a esses rejeitos de mineração, bem como aos rejeitos de materiais poliméricos (tecidos e garrafas PET). Estima-se que o custo de produção deste tijolo ecológico seja marginalmente menor do que o custo de produção de tijolos solo-cimento. Mesmo assim, este novo material traz consigo uma grande vantagem do ponto de vista ambiental. Isso se deve ao fato de que este novo material, ao mesmo tempo em que utiliza resíduos industriais existentes, que podem ser usados para evitar danos ambientais, ao mesmo tempo permite uma redução na demanda pela extração de matérias-primas virgens do meio ambiente. Quando comparado aos tijolos solo-cimento, este novo material implica uma redução no consumo de cimento. Quando comparado aos tijolos cerâmicos, implica na redução da extração de argila, na redução da queima de lenha para a sinterização dos tijolos e na consequente geração de fumaça e liberação de CO₂ na atmosfera. Assim, pode-se afirmar que foi desenvolvido um novo material compósito com propriedades técnicas adequadas e uma solução ecologicamente correta para as necessidades de habitação social no Brasil e no mundo

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45 (2006). Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248 (2003). Agregados - Determinação da composição granulométrica.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8491 (2012). Tijolo de solo-cimento - Requisitos.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8492 (2012). Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.655 (2022). Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.

AGUIAR, A. P., HORN, A. H., COSTA, A. S. V., LEAL, J. M., ALVES, G. P. P. - ESTUDO DA VIABILIDADE EM SOLOS AGRÍCOLAS DO USO DA BIOTITA ANFIBÓLITO/XISTO CONTIDO NOS REJEITOS GERADOS PELOS GARIMPOS DA PROVÍNCIA ESMERALDÍFERA DE NOVA ERA – MG. Geonomos, 20(1), 76-80, CPMTCC - Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

ARAÚJO, E. R., OLIVIERI, R. D., FERNANDES, F. R. C. - Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Capítulo do livro “Recursos Minerais e Sociedade: Impactos humanos, socioambientais e econômicos”. Rio de Janeiro, 2014.

BAO, P.; JING, J.; QI, Y.; MA, J.; PING, H.; WANG, C.; LIU, Z.; ZHENG, Y.; ZHAI, Y.; LIU, F. (2023). Firing mechanism and benefit evaluation of high-strength fired water permeable brick containing vanadium-titanium iron ore tailings. FRONTIERS IN EARTH SCIENCE. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1214184>.

BARROS, J. A. A. – Estudo do aproveitamento do rejeito de mineração de esmeraldas na produção de refratários conformados isolantes. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de pós graduação em engenharia mecânica. Natal, 2013.

CAVALCANTE, R. F., NASCIMENTO, R. M., PASKOCIMAS, C. A., DUTRA, R. P. S. - Utilização do resíduo da extração de esmeraldas em uma formulação de massa de revestimento cerâmico. Cerâmica, n.58, pp. 158-164, 2012.

CHANDRA, D.; GUPTA, R.L.; JAIN, S.K. (1992). GOLD TAILING - A SUITABLE SILICEOUS WASTE FOR THE MANUFACTURE OF CALCIUM SILICATE BRICKS. INDIAN JOURNAL OF TECHNOLOGY.

CHEN, Y.; GAN, Y.; FU, X.S.; LU, Y.; TAKAI, A.; LIU, L.; KANG, X. (2024). Towards a sustainable thermodynamic optimization solution for preparing unburned low-carbon bricks from low-activity tailings. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111206>.

Conceitos.com – 2023 - website accessible via the electronic address <https://conceitos.com/esmeralda/>. Accessed on 06/14/2023.

DENG, P.; CHANG, Z.; LENG, H.; ZHONG, H.; CHEN, Y.; REN, Y. (2024). Experimental investigation on properties of gold tailings recycled brick-concrete aggregate concrete under microwave curing. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110104>.

EI KHAZANTI, F.; RACHID, A.; EL OUAHABI, M.; NASRI, H.; AZERKANE, D.; ET-TAYEA, Y.; GHARIBI, EK. (2024). Valorization of Iron Ore Tailings from Nador, Morocco, as a Sustainable Additive in the Manufacture of Red Clay Fired Bricks. JOURNAL OF ECOLOGICAL ENGINEERING. <https://doi.org/10.12911/22998993/187956>.

FONTES, W.C.; COSTA, E.C.P.; MENDES, J. C.; FONTES, G. G.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F. Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability. AMBIENTE CONSTRUÍDO (ONLINE), v. 18, p. 395-412, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400312>

GUAN, H.; ZHANG, B.; YANG, J.; ZHAN, X.; FENG, P. (2024). Effect of Iron Content on High Strength and Environmentally Friendly Water-Permeable Bricks Prepared from W-Mo Tailing and Iron Slags. JOM. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-06284-6>.

KANG, X.; LI, Y.; LI, W.; ZHOU, Y.; CUI, J.; CAI, B.; ZI, Y.; FANG, J.; CHEN, Y.; LI, S.; KANG, X. (2023). Synthesis and Characterization of Sustainable Eco-Friendly Alkali-Activated High-Content Iron Ore Tailing Bricks. BUILDINGS. <https://doi.org/10.3390/buildings13112743>.

LIMA, I. C. F., PAULINO, G. M., NEVES, A. B. V., DINIZ, F. F. – Caracterização de rejeito do beneficiamento de esmeraldas visando seu aproveitamento no setor agrícola. Revista Eletrônica Engenharia de Interesse Social, v.1, n.4. Universidade do Estado de Minas Gerais unidade João Monlevade. ISSN 25256041. 2019.

LIN, H.; LI, R.; LI, S. (2024). Fabrication of Lead-Zinc Tailings Sintered Brick and Its Effect Factors Based on an Orthogonal Experiment. MATERIALS. <https://doi.org/10.3390/ma17102352>.

MARTINS, E. S., OLIVEIRA, C. G., RESENDE, A. V., MATOS, M. S. F. - Agrominerais – Rochas Silicáticas como Fontes Minerais Alternativas de Potássio para a Agricultura. CETEM - Capítulo 9 - pp. 205-221, 2ª ed., 2008.

MATSUURA, F., PASQUALETTO, A., FERREIRA, U. L. - Uma cidade, o garimpo de esmeraldas e a decadência: o caso de Santa Terezinha de Goiás. Revista Brasileira de Desenvolvimento Regional. v.9, n.1, P.105-122, ISSN 2317-5443, DOI: 10.7867/2317-5443.2021, 2021.

NASCIMENTO, I. B. Problemáticas socioambientais e implicações à saúde do trabalhador: O caso do garimpo de esmeraldas em Campos Verdes – GO. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Brasília, 2009.

OLIVEIRA, CELSO LUÍS EVANGELISTA. Obtenção de revestimento cerâmico a partir da mistura de argila plástica com resíduos do caulim, esmeralda, chamote de telha e cinza vegetal. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tese de doutorado. Natal. Rio Grande do Norte, 2012.

RANA, B.K.; MOLLA, S.; KUMAR, R.; JHA, S. K.; KULKARNI, M.S.; ASWAL, D.K. (2024). Feasibility Study of Uranium Mill Tailings as Construction Material by Making Bricks and Assessment of Its Radiological Significance. MAPAN-JOURNAL OF METROLOGY SOCIETY OF INDIA. <https://doi.org/10.1007/s12647-023-00727-w>.

SILVA, H. E., ANTONIOSI FILHO, N.R. Remediation of iron ore tailings from Brumadinho (Brazil), polymeric waste from polyester fabrics and from PET bottle powder based on the production of ecological bricks. Remediation Journal. Wiley. 2025. <https://doi.org/10.1002/rem.70012>

SILVA, J. D., MENDES, A. M. S., SILVA, D. O. M., LINS, M. A., SILVA, E. R. - Potencial de um Resíduo de Mineração no Suprimento de Potássio para Culturas Anuais. I. Cultivo em Argissolo. XXIX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Guarapari – ES, Brasil, 13 a 17 de setembro de 2010.

WANG, H.; LI, Y.; YIN, B.; LI, S.; HE, X.; XIANG, R.; QIAO, Z. (2023). Synthesis and application evaluation in lithium battery furnace of mullite insulating refractory bricks from tailings. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED CERAMIC TECHNOLOGY. <https://doi.org/10.1111/ijac.14408>.

WANG, P., LI, J.; HU, Y.; CHENG, H. (2024). Environmental performance of unfired bricks produced from co-disposal of mine tailings and municipal solid waste incineration fly ash based on comprehensive leaching tests. ENVIRONMENTAL POLLUTION. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123795>.