AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO DA MINA DE ÁGUA LIMPA EM MATRIZES GEOPOLOMÉRICAS

Evaluation of the potential for use of iron mining tailings from Água Limpa mine in geopolymeric matrices

Fernanda Cristina Resende Ramos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | nandacrr@hotmail.com

Paulo Henrique Ribeiro Borges
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | paulo.borges@cefetmg.br

Resumo

A mineração de ferro, embora essencial economicamente, gera grandes volumes de rejeitos com alto impacto ambiental. Este estudo avaliou a viabilidade do uso de rejeitos espiral e jigue da Mina de Água Limpa como agregados em concretos geopoliméricos. A metodologia incluiu coleta, preparação, moldagem de corpos de prova e caracterização mineralógica por DRX. Os resultados indicaram composição majoritária de hematita e quartzo, ambos inertes na geopolimerização, mas úteis como agregados pesados. A aplicação demonstrou vantagens como sustentabilidade e redução de custos, embora enfrente desafios como baixa reatividade e variabilidade dos rejeitos. Conclui-se que os rejeitos são viáveis como agregados, e recomenda-se novos ensaios de desempenho e tratamentos para aumentar sua reatividade, visando à ampliação do uso em larga escala na construção civil.

Palavras-chave: Geoplímeros. Rejeitos de mineração. Sustentabilidade na construção civil.

ABSTRACT

Iron mining, although economically essential, generates large volumes of waste with a significant environmental impact. This study evaluated the feasibility of using spiral and jig tailings from the Água Limpa Mine as aggregates in geopolymeric concretes. The methodology included collection, preparation, molding of test specimens, and mineralogical characterization by X-ray diffraction (XRD). The results indicated a predominant composition of hematite and quartz, both inert in geopolymerization but useful as heavy aggregates. The application showed advantages such as sustainability and cost reduction, although it faces challenges like low reactivity and variability of the tailings. It is concluded that the tailings are viable as aggregates, and further performance tests and treatments are recommended to increase their reactivity, aiming for large-scale use in civil construction.

Keywords: Geopolymers. Mining waste. Sustainability in civil construction.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é fundamental para a economia brasileira, representando cerca de 4% do PIB e gerando aproximadamente 1 milhão de empregos. Em 2023, o setor teve um faturamento de R$ 248,2 bilhões, com Minas Gerais liderando com R$ 103,6 bilhões (AGÊNCIA BRASIL, 2024; IBRAM, 2023). No entanto, a mineração também causa grandes impactos ambientais, especialmente devido à geração de rejeitos. Estudos apontam que a atividade é uma das principais responsáveis por danos ao meio ambiente, afetando principalmente as áreas adjacentes às minas. Para mitigar esses impactos, o setor minerário brasileiro tem buscado alternativas sustentáveis. Em 2023, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) anunciou um aumento de 62,7% nos investimentos em projetos socioambientais até 2028, somando US$ 10,7 bilhões, com foco na sustentabilidade das operações.

Portanto, embora essencial para a economia, é crucial adotar práticas responsáveis e sustentáveis para minimizar os impactos ambientais. Apesar da importância econômica, a gestão dos rejeitos da mineração ainda é um grande desafio. A destinação inadequada desses materiais compromete o meio ambiente, evidenciando a necessidade de soluções sustentáveis para o seu reaproveitamento.

Os concretos geopoliméricos surgem como uma alternativa promissora, sendo uma tecnologia ambientalmente amigável baseada em materiais inorgânicos compostos por aluminossilicatos ativados alcalinamente. Esses concretos permitem a incorporação de resíduos industriais e rejeitos de mineração, oferecendo vantagens como a redução das emissões de CO_2 e maior durabilidade química (Medeiros *et al.,* 2021). No entanto, o uso de rejeitos para a produção de geopolímeros ainda enfrenta desafios, especialmente em função das variações nas composições físicas e químicas dos rejeitos, que dependem do tipo de minério e das características geológicas da mina. Além disso, nem todos os minérios podem ser utilizados diretamente, sendo necessário o beneficiamento físico ou químico para otimizar sua reatividade e adequação ao processo de geopolimerização (Almeida *et al.,* 2024).

O reaproveitamento de rejeitos de mineração em matrizes geopoliméricas representa uma oportunidade para promover maior sustentabilidade no setor mineral e na construção civil. A viabilidade dessa aplicação depende da caracterização mineralógica dos materiais. A Difração de Raios X (DRX) é fundamental para identificar os compostos cristalinos desses materiais (Nagem, 2013).

Este estudo justifica-se por sua relevância ambiental e econômica ao propor o reaproveitamento de rejeitos de mineração da Mina de Água Limpa na produção de concretos geopoliméricos, com os objetivos de caracterizar os rejeitos espiral e jigue, avaliar sua viabilidade como agregados em matrizes geopoliméricas e analisar suas propriedades físico-químicas. O estudo contribui para soluções mais sustentáveis na construção civil.

2 METODOLOGIA

2.1 COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Foram realizadas duas campanhas de coleta na Mina de Água Limpa, localizada em Rio Piracicaba (MG). A primeira, em dezembro de 2012, teve como objetivo caracterizar os rejeitos espiral e jigue da Pilha do Monjolo, coletando quatro amostras de forma manual e aleatória (uma do espiral e três do jigue, devido à sua maior heterogeneidade visual) (Figura 1). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes e secas a 150°C por 24 horas.

Em julho de 2013, uma nova coleta foi realizada com volume suficiente para os ensaios experimentais. Foram obtidos aproximadamente 90 kg de rejeito espiral e 80 kg de rejeito jigue, coletados a 10 cm de profundidade. As amostras foram reduzidas conforme a norma NBR NM 27 (ABNT, 2001) e classificadas por faixas granulométricas: rejeito jigue (9,0–0,3 mm) e rejeito espiral (0,3–0,075 mm), sendo armazenadas separadamente.

2.2 FORMULAÇÃO E MOLDAGEM DOS GEOPOLÍMEROS

Para a produção dos corpos de prova geopoliméricos, foi utilizada uma solução ativadora alcalina composta por hidróxido de sódio (14 M), silicato de sódio e água. A solução foi preparada com, no mínimo, 24 horas de antecedência, permitindo o equilíbrio térmico da mistura, uma vez que a reação é exotérmica. A ordem de adição dos componentes seguiu recomendações técnicas para garantir homogeneidade.

Figura 1: Pilha de rejeito em espiral (a) e em jigue (b)



Fonte: Ramos, 2012.

Após o repouso, os agregados (quartzo e rejeitos) foram incorporados à solução ativadora e homogeneizados com misturador mecânico (Fisatom) por cerca de 5 minutos. A moldagem foi realizada em formas prismáticas (20 × 40 × 160 mm) e cúbicas (50 mm). A cura térmica dos corpos de prova foi feita em estufa a 45 °C por 24 horas, conforme protocolos já validados na literatura (Borges *et al.,* 2014), considerando que a ativação alcalina exige fornecimento de calor para desenvolver resistência mecânica (Katz, 1998).

2.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Para compreender a composição dos rejeitos e sua adequação à geopolimerização, foi realizada a Difração de Raios X (DRX), técnica essencial para identificar as fases cristalinas presentes. Os ensaios foram conduzidos no CEFET-MG (Campus II) com equipamento Shimadzu XRD-7000.

Amostras com tamanho de partículas inferiores a 0,075 mm também foram utilizadas para análise, sendo compactadas no porta amostra e submetidas aos ensaios de DRX que trabalha com fonte de radiação de cobre com comprimento de onda λ = 1,5418 Å. O varrimento se deu entre os ângulos 5º ≤ 2ɵ ≤ 80º a cada 0,02º (step size) e à velocidade de 1 º/min. O software Match! foi utilizado para identificação das fases presentes.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A análise por Difração de Raios X (DRX) foi empregada para determinar a composição mineralógica dos rejeitos de mineração do tipo espiral e jigue. Embora a DRX não seja a técnica mais indicada para caracterizar materiais geopoliméricos em si — devido à sua natureza predominantemente amorfa, ela é fundamental na identificação das fases cristalinas dos precursores sólidos, como os rejeitos estudados.

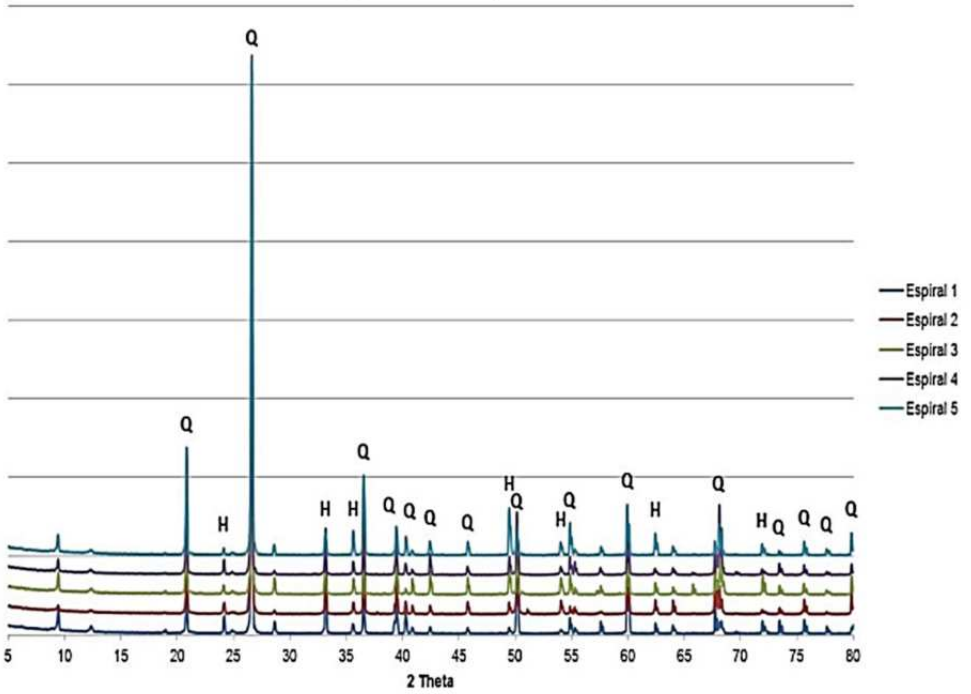
Os resultados indicaram uma predominância dos óxidos ferrosos (Fe_2O_3) e da sílica (SiO_2) em ambas as amostras, correspondendo a cerca de 98% da composição no rejeito espiral e 94% no rejeito jigue. No entanto, a DRX mostrou que esses óxidos estão presentes principalmente na forma de hematita (Fe_2O_3 - H) e quartzo (SiO_2 - Q), conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3, que apresentam difratogramas representativos de cinco amostras de cada tipo de rejeito.

Embora o alto teor de sílica seja, em princípio, desejável para a reação de geopolimerização, a forma cristalina (quartzo) na qual ela se apresenta é quimicamente inerte. Portanto, esses rejeitos não atuam como precursores reativos, mas sim como agregados inertes, contribuindo para a estrutura física das matrizes geopoliméricas.

O uso de rejeitos da mineração de ferro como agregados em concretos geopoliméricos apresenta vantagens significativas, como a contribuição para a sustentabilidade ambiental, ao reduzir o acúmulo de resíduos em barragens, a diminuição de custos com materiais, ao substituir agregados convencionais, e o aumento da densidade dos compósitos, favorecendo aplicações específicas como barreiras contra radiação. No entanto, existem desafios técnicos importantes, como a baixa reatividade química dos rejeitos devido à presença de sílica na forma de quartzo, a variabilidade composicional entre lotes, possíveis impactos na durabilidade e resistência das matrizes e a necessidade de infraestrutura adequada para processamento. Assim, os resultados apontam que esses rejeitos são viáveis como agregados, mas sua aplicação em larga escala

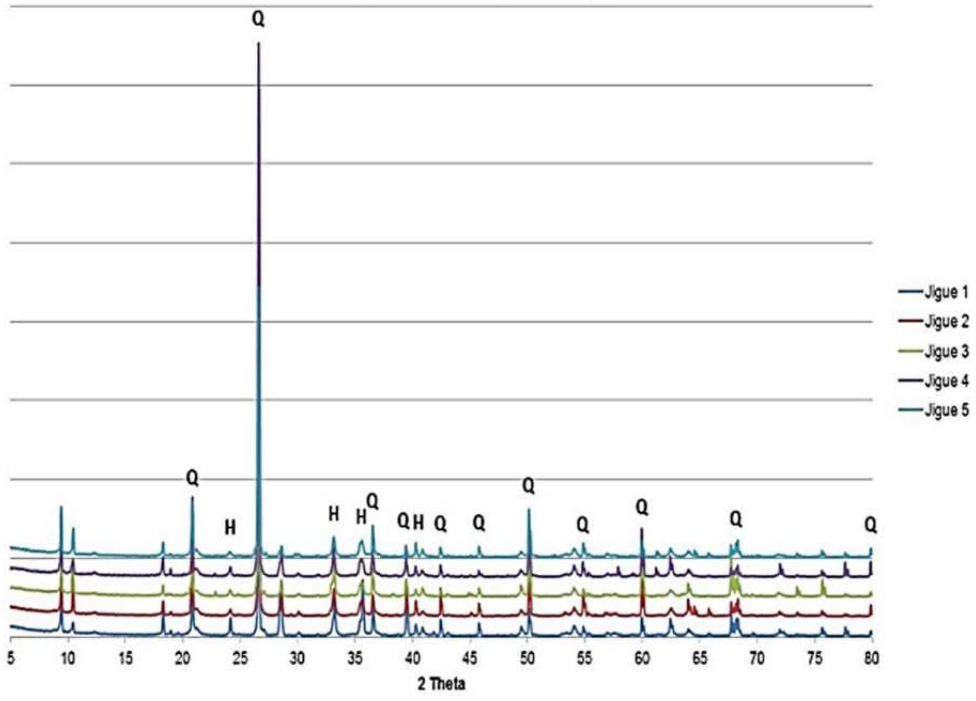
requer protocolos técnicos bem definidos e estudos adicionais sobre desempenho mecânico e ambiental dos materiais desenvolvidos

Figura 2: Difratograma do espiral



Fonte: Autores, 2024

Figura 3: Difratograma do jigue



Fonte: Autores, 2024

4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o uso de rejeitos de mineração de ferro, oriundos dos processos de classificação por espiral e concentração por jigagem, como substitutos parciais dos agregados naturais em argamassas geopoliméricas. A caracterização mineralógica indicou que ambos os rejeitos possuem composição predominantemente cristalina, com alto teor de hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2), classificando-os como agregados pesados e inertes no processo de geopolimerização. A aplicação desses rejeitos resultou em materiais com maior densidade, o que pode ser vantajoso em aplicações específicas da construção civil, como concretos para isolamento de vibrações ou radiações.

Os resultados apontam que os rejeitos são tecnicamente viáveis como agregados, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e redução de custos. No entanto, para validar sua aplicação em larga escala, são necessários testes adicionais, como ensaios de resistência mecânica (compressão, tração, módulo de elasticidade), análises de durabilidade (ciclos de congelamento e descongelamento, ataque químico, carbonatação), além de ensaios de envelhecimento acelerado com acompanhamento por DRX para monitoramento de possíveis alterações na composição dos geopolímeros ao longo do tempo.

Adicionalmente, para aumentar a participação reativa dos rejeitos no processo de geopolimerização, recomenda-se investigar tratamentos prévios, como ativação térmica, moagem ultrafina ou tratamento químico, com o objetivo de modificar a estrutura cristalina do quartzo e viabilizar uma maior liberação de sílica amorfa. Tais estratégias podem ampliar o potencial de uso dos rejeitos não apenas como agregados, mas também como precursores parciais na matriz geopolimérica.

5 AGRADECIMENTOS

A presente pesquisa contou com o apoio e a colaboração de diversas pessoas e instituições, às quais expresso meus sinceros agradecimentos: aos meus pais (Cláudia e Ivo), irmãos (Isabella e Leonardo), tia (Natália) e familiares pelo apoio e incentivo; aos professores e orientadores (Paulo, Túlio e Hersília) pelas contribuições fundamentais; aos servidores do CEFET-MG e aos colegas pela colaboração ao longo da jornada. Reconheço, ainda, o apoio das instituições VALE, UFMG, Magnesita e da Capes pelo suporte oferecido à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Setor de mineração fatura menos devido à queda de preços no exterior. 2024.** Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-01/setor-de-mineracao-fatura-menos-devido-queda-de-precos-no-exterior. Acesso em: 2 abr. 2025.

ALMEIDA, R. M. de; SANTOS, A. P.; COSTA, B. L. **Comportamento de rejeitos de mineração na síntese de geopolímeros: desafios e potencialidades.** Minerals, Basel, v. 14, n. 10, p. 997, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-163X/14/10/997. Acesso em: 14 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27:** agregados – redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

BORGES, P. H. R., FONSECA, L. F.; NUNES, V. A.; PANZERA, T. H.; MARTUSCELLI, C. C. Andreasen particle packing method on the development of geopolymer concrete for civil engineering. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, p. 692-697, 2014.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. 394 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Em 2023, mineração repete faturamento do ano anterior e pretende ampliar investimentos até 2028.** 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/release/em-2023-mineracao-repete-faturamento-do-ano-anterior-e-pretende-ampliar-investimentos-ate-2028. Acesso em: 9 abr. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. [S.l.]: [s.n.], 2012. 68 p.

KATZ, A. Microscopic study of alkali-activated fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 2, p. 197-208, 1998.

MEDEIROS, M. H. F. de; SILVA, M. R.; OLIVEIRA, M. T. **Concretos geopoliméricos como alternativa sustentável ao cimento Portland: propriedades e desafios.** Construction and Building Materials, v. 304, p. 124605, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821025162. Acesso em: 17 abr. 2025.

NAGEM, N. F. **Geopolímero a partir de resíduos oriundos da indústria de alumínio para reutilização e coprocessamento**. 2013. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

RAMOS, F. C. R. **Aplicação de rejeitos de mineração de ferro como agregados em compósitos geopoliméricos.** 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.