

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE LAVAGEM DE BAUXITA DA AMAZONIA
PARA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMERO**DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.5.22.V-010>**Nayme Lopes Dolzane do Couto (*), Ana Cláudia Paiva de Santiago, Igor Alexandre Rocha Barreto, Renata de Souza Nascimento, Bruno Apolo Miranda Figueira*** Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA e-mail: nayme-
lopes@hotmail.com**RESUMO**

Um dos maiores desafios da mineração na atualidade é encontrar formas de minimizar o impacto de suas operações ao meio ambiente e reduzir a produção de seus resíduos. Por isso, o aproveitamento do rejeito torna-se uma alternativa ambientalmente sustentável, pois evita que o mesmo seja despejado em locais impróprios. Uma das soluções possíveis para sanar esses problemas de gerenciamento de resíduos é utilizá-los na produção de material cimentício baseado em geopolímero. Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi investigar a transformação de rejeitos de lavagem de bauxita em geopolímero. Os rejeitos foram caracterizados por difratometria de raios-X (DRX), Fluorescência de Raio X (FRX) e Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). Os geopolímeros foram sintetizados utilizando os reagentes hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) na concentração de 15 Molar. Os tamanhos dos moldes foram de 20 x 20 mm e 50 x 100 mm para os corpos de prova. Foram realizados testes de resistência à compressão, absorção de água e porosidade aberta. A caracterização mineral mostrou que o rejeito possui em sua composição mineralógica hematita, caulinita, gibbsita e anatásio, enquanto sua composição química, altos teores (% em peso) de Fe e Al, Si e Ti. Os resultados de resistência à compressão em 28 dias foram de 9,0 Mpa para geopolímeros ativados com NaOH e 14,0 Mpa para os geopolímeros de KOH. Os parâmetros físicos como absorção de água e porosidade aberta apresentaram-se maiores para os geopolímeros de NaOH. A pesquisa demonstrou que os materiais geopoliméricos resultantes a partir do emprego de rejeitos de bauxita apresentaram resultados satisfatórios para aplicação de produtos cimentícios, apresentando grande potencial na produção de novos materiais de engenharia e na reciclagem desse tipo de resíduo.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos, mineração, bauxita, geopolímeros, Amazônia**ABSTRACT**

One of the biggest challenges in mining today is finding ways to minimize the impact of your operations on the environment and reduce the production of your waste. Therefore, the use of tailings becomes an environmentally sustainable alternative, as it prevents it from being dumped in inappropriate places. One of the possible solutions to solve these waste management problems is to use them in the production of geopolymer-based cementitious material. In this context, the objective of this research was to investigate the transformation of bauxite washing tailings into geopolymer. The tailings were characterized by X-ray diffractometry (XRD), X-ray Fluorescence (XRF) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The geopolymers were synthesized using the reagents sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) at a concentration of 15 Molar. The mold sizes were 20 x 20 mm and 50 x 100 mm for the specimens. Compressive strength, water absorption and open porosity tests were performed. The mineral characterization showed that the tailings has in its mineralogical composition hematite, kaolinite, gibbsite and anatase, while its chemical composition has high contents (% by weight) of Fe and Al, Si and Ti. Compressive strength results at 28 days were 9.0 MPa for NaOH-activated geopolymers and 14.0 MPa for KOH geopolymers. Physical parameters such as water absorption and open porosity were higher for NaOH geopolymers. The research showed that the geopolymer materials resulting from the use of bauxite tailings showed satisfactory results for the application of cement products, showing great potential in the production of new engineering materials and in the recycling of this type of waste.

KEY WORDS: Waste, mining, bauxite, geopolymers, Amazon**INTRODUÇÃO**

Um dos maiores desafios da mineração na atualidade é encontrar formas de minimizar o impacto de suas operações ao meio ambiente e reduzir a produção de resíduos. Na mineração de bauxita, um dos principais tipos de resíduos gerados é o rejeito resultado dos processos de beneficiamento do minério (SILVA et al., 2012).



Uma das soluções para os problemas de gerenciamento de resíduos seria utilizá-los em outras aplicações, a fim de agregar valores e diminuir os riscos associados ao seu armazenamento, evidenciados após os episódios de rompimento de barragens de rejeitos no Brasil nos últimos anos. Como exemplos recentes pode-se citar o rompimento da Barragem do Fundão em Mariana-MG, no ano de 2015 e mais recente o da barragem de Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG no ano de 2019 (INFOGRÁFICO, 2019).

De acordo com Silva et al. (2012), na mineração existem dois tipos principais de resíduos gerados, que são o rejeito e os estéreis. Os estéreis são geralmente materiais argilosos extraídos da parte superior do depósito mineral e não são aproveitados economicamente. Já o rejeito é resultado do processo de beneficiamento do minério e são armazenados em barragens ou lagoas artificiais. Os mesmos autores dizem ainda que, entre os anos 1996 a 2005, a geração de rejeitos aumentou de 202 milhões de toneladas em 1996 para 290 milhões de toneladas em 2005.

O aproveitamento desse tipo de resíduo torna-se uma alternativa ambientalmente sustentável, pois evita que o mesmo seja despejado em locais impróprios (PETRY, 2015). No entanto, ainda que o mesmo não seja reaproveitado, a modificação de suas propriedades pode aperfeiçoar as condições de armazenamento, melhorando a segurança das barragens.

Nesse contexto, uma das alternativas possíveis para a reciclagem desse resíduo de forma mais sustentável e inovadora é a sua utilização na produção de cimentos geopoliméricos. Os geopolímeros são uma classe de materiais sintetizados a partir de uma mistura de duas partes, uma consistindo de uma solução alcalina e outra de um material sólido rico em aluminossilicatos (ZHANG et al., 2008).

Os cimentos geopoliméricos possuem propriedades mecânicas muito semelhantes ao do cimento Portland (CP), maior durabilidade e menores custos e impactos ambientais (DAVIDOVITS, 1982). De acordo com o mesmo autor, cada tonelada de clínquer de cimento Portland fabricado, equivale a 0,95 toneladas de dióxido de carbono liberados na atmosfera. Portanto, essa classe de material apresenta-se como uma alternativa para a redução de emissão de gases de efeito estufa, principalmente o CO₂, já que dispensa o uso do cimento Portland (DAVIDOVITS, 1993).

Diante das vantagens econômicas e ambientais desse material e o aumento de interesse em pesquisas com a reutilização e tratamento dos rejeitos, o trabalho almeja realizar a caracterização mineral do rejeito de mineração de bauxita e sintetizá-lo com objetivo de obter geopolímero com propriedades cimentícias.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Desenvolver um processo de transformação de rejeitos de lavagem de bauxita da região Oeste do Pará em um produto de valor agregado com importância tecnológica na área da construção civil.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização química e mineral dos rejeitos por DRX, FRX e FTIR;
- Transformação dos resíduos em geopolímero por ativação alcalina;
- Caracterização mecânica dos produtos;
- Caracterização física dos produtos.

METODOLOGIA

O rejeito de bauxita utilizado neste trabalho foi cedido gentilmente por uma mineradora da região Oeste do Pará. As amostras, caracterizadas por sua coloração avermelhada foram secadas a 110 °C por 24 horas, e pulverizadas até a obtenção de um produto com granulometria de ~ 0,004 mm. Em seguida, o rejeito foi submetido à calcinação, em forno mufla da marca JUNG, à temperatura de 700 °C por 6 horas. Esse procedimento foi necessário para obtenção da fase amorfa metacaulinita, pois de acordo com Sampaio et al. (2005), a calcinação muda a composição das fases do material, principalmente por promover a eliminação de fases hidratadas, com a destruição dos grupos OH- presentes nos compostos Al(OH)₃ e FeO(OH) além de melhorar seu caráter amorfo. Após o esfriamento da amostra em temperatura ambiente, foi realizado o procedimento de ativação alcalina através da reação de 15 mol.L⁻¹ de NaOH ou KOH com o material calcinado em corpos de provas segundo Merabtene et al. (2019). Posteriormente os corpos de prova foram submetidos à cura por 7, 14 e 28 dias à temperatura ambiente. Após o tempo de cura, as amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão. Nessa etapa, foram utilizados os corpos de prova de 50x100 mm para obedecer a NBR 7215. Os parâmetros físicos analisados foram absorção de água (Aa) e porosidade aberta (Pa), e se basearam nos trabalhos de Felizardo et al.

(2016). Nesse método, os corpos de prova ativados com NaOH (GEOP-01) e KOH (GEOP-02) foram secados à 105°C/72 horas. Após esse período, a massa seca (Ms) foi medida em uma balança analítica, da marca SHIMADZU, modelo AW220, capacidade de 200 g e precisão 0,0001 g. Em seguida, o corpo de prova foi imerso em água à temperatura ambiente por até 72 horas para que todos os poros fossem preenchidos e assim realizar a pesagem imersa (Mi). Posteriormente, a massa saturada (Msat) foi obtida pela pesagem da amostra com sua superfície seca. A obtenção de absorção de água e porosidade aberta foi realizada através das equações 1 e 2.

$$Aa = \frac{Msat - Ms}{Mi} \times 100 \quad \text{equação (1)}$$

$$Pa = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} \times 100 \quad \text{equação (2)}$$

RESULTADOS

A composição mineralógica dos rejeitos de lavagem de bauxita da Amazonia foi realizada por DRX e espectroscopia FTIR e os resultados são mostrados na Fig. 1. O padrão DRX dos rejeitos (Fig. 1a) mostrou a presença dos minerais hematita, caulinita, gibbsita e anatásio, que são minerais característicos de bauxita da região. A fase gibbsita é o mineral fonte de alumina presente no minério de bauxita e que contribui diretamente para a geopolimerização da matéria prima. Já a caulinita presente é um argilomineral característico da origem geológica e é bastante comum em gangas de bauxita, assim como anatásio e a hematita, que também são minerais considerados como impurezas e são dispensados na lavagem do minério. O espectro FTIR dos rejeitos é apresentado na Fig. 1b. As bandas das faixas entre 4000-3000 cm⁻¹ estão associadas às vibrações das hidroxilas. Conforme Barbato et al. (2013), a banda em 3.625 cm⁻¹ pode estar atribuída ao estiramento Al-O-H, característicos da caulinita e da gibbsita. A banda em 3.704 cm⁻¹ está relacionada ao estiramento O-H da Caulinita. A banda 915 cm⁻¹ está relacionada a deformação do grupo Al-O-H da caulinita e a banda 565 cm⁻¹ pode estar relacionada ao estiramento Fe-O da hematita. Para Silva et al. (2009), bandas observadas em 3.525 cm⁻¹, 3.454 cm⁻¹ e 3.625 cm⁻¹ podem estar relacionadas ao estiramento O-H da Gibbsita, assim como o estiramento 1014 cm⁻¹, pode estar relacionado ao estiramento Al-O-Al do mesmo mineral. Nos estudos de Resende et al. (2012), afirma-se que uma alta cristalinidade da caulinita é representada também pelas bandas de deformação dos grupos Al-OH, em 751 cm⁻¹.

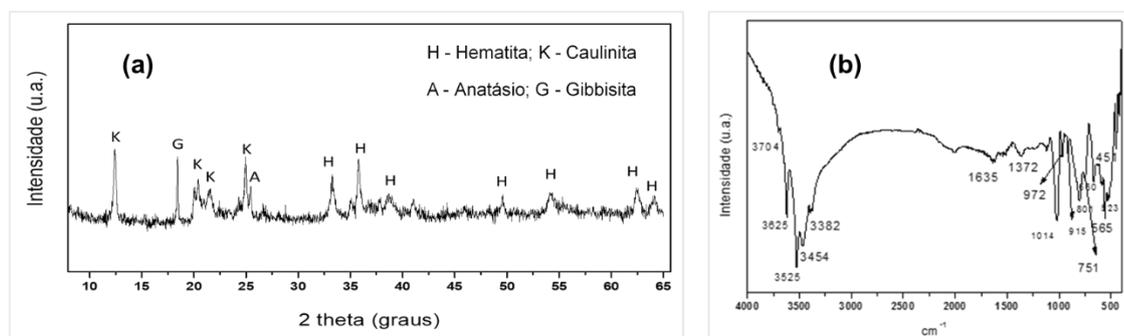


Figura 1: Padrão DRX (a) e espectro FTIR (b) dos rejeitos de lavagem de bauxita da Amazônia. Fonte: Autores.

A composição química analisada por fluorescência de raios-X (FRX) dos rejeitos mostrou elevados teores (% em peso) de Fe₂O₃ (34 %), Al₂O₃ (29 %), SiO₂ (22,3 %) e TiO₂ (4,8 %), e se correlacionou bem com a composição mineral descrita anteriormente para o material. A caracterização químico-mineral dos rejeitos indicou que eles eram adequados para a produção de geopolímero, uma vez que a presença de alumínio silicatos é essencial na obtenção do material.

Os resultados de caracterização mecânica referem-se na resistência à compressão dos materiais. A amostra GEOP-01 corresponde às amostras tratadas com NaOH e amostra GEOP-02 foi tratada com KOH. Os valores obtidos são dados em Mpa (Mega Pascal) e estão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados de caracterização mecânica das amostras GEOP-01 e GEOP-02. Fonte: Autores.

Amostras	Resistência à compressão (Mpa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
GEOP-01	2,0	5,0	9,0



GEOP-02 4,0 9,0 14,0

Com base nos resultados demonstrados acima, a amostra GEOP-02 apresentou melhor resistência à compressão em 28 dias de cura (14,0 MPa) que a amostra GEOP-01 (9,0 MPa), esse valor se dá principalmente, devido ao tipo de reagente utilizado. De acordo com os estudos de Duxson et al. (2007) os geopolímeros ativados com KOH fornecem melhores resultados à compressão do que geopolímeros ativado com NaOH. Esse comportamento é atribuído à maior alcalinidade do hidróxido de potássio, devendo mostrar maior trabalho de dissolução. Os autores também atribuem o tamanho do íon como fator importante, devido a tendência do K⁺ formar grandes oligômeros de silicatos.

Os resultados mostram-se satisfatórios quando comparados a outros estudos desenvolvidos. Zhang et al. (2010) em seus estudos de síntese de geopolímeros com resíduo de bauxita obtiveram resultados de resistência à compressão no valor de 7,0 a 13,0 Mpa, utilizando como ativador silicato de sódio. Da mesma forma He & Zhang (2011) também obtiveram 13,0 Mpa em 28 dias de idade. Ribeiro (2011) obteve resistência à compressão de 12,5,0 Mpa em 28 dias de cura. Komnitsas et al. (2015) em seu trabalho alcançaram resistência de 13 Mpa com o mesmo tempo de cura. Dessa forma, os resultados indicam que os geopolímeros obtidos no presente estudo apresentam propriedades mecânicas semelhantes aos da literatura, realizados com o mesmo tipo rejeito.

A absorção de água (Aa) e porosidade aberta (Pa) são ensaios de caráter físico, diferente do apresentado anteriormente, que é mecânico. As pesagens foram realizadas após idade de 28 dias para os dois tipos de geopolímeros. A Tabela 2 mostra os dados obtidos em gramas (g) das massas pesadas dos corpos de prova de 20 x 20 mm, em que Ms é a massa seca, Mi é a massa imersa e Msat é a massa saturada.

Tabela 2 – Pesagem das massas dos geopolímeros em 28 dias de cura. Fonte: Autores.

Massas medidas	Peso das amostras (g)	
	GEOP-01	GEOP-02
Ms	7,30	7,75
Mi	7,56	7,83
Msat	7,69	7,93

A partir das pesagens foi possível calcular através das fórmulas 1 e 2 os parâmetros físicos analisados, os resultados estão ilustrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos testes de parâmetros físicos com cura de 28 dias. Fonte: Autores.

Parâmetros físicos	GEOP-01	GEOP-02
Aa (%)	5,15	2,29
Pa (%)	3,0	1,8

A absorção de água refere-se ao percentual de ganho de massa que tem a amostra quando absorve o máximo de água. Observa-se que o valor de absorção foi maior para GEOP-01 (5,15%). A absorção de água está diretamente relacionada com a porosidade do material, quanto maior for a absorção, mais porosa é a estrutura e consequentemente menor a compactação do material. Esse valor reflete no resultado de resistência à compressão, que demonstrou um melhor valor para a amostra GEOP-02, que apresenta porosidade menor, no valor de 1,8%. Os trabalhos de Felizardo et al. (2016) com geopolímeros apresentaram essa relação entre absorção de água, porosidade e resistência à compressão. Os autores obtiveram dados de absorção de água de 1% a 3% após 7 dias de cura. Os geopolímeros com 1% apresentaram maior resistência à compressão e menor porosidade que os geopolímeros com absorção de água de 3%.

CONCLUSÕES

Diante dos grandes acidentes ambientais ocorridos nos últimos anos relacionados à mineração, especificamente ao acondicionamento de rejeitos, verifica-se a necessidade constante de reaproveitamento dos sub-produtos gerados sem valor econômico, que possam reduzir seus impactos ambientais além de agregar valor a um produto indesejável.



Os rejeitos de lavagem de bauxita da Amazônia compostos por caulinita, hematita, gibbsite e anatasio, com elevados teores de Al, Fe e Si se mostraram como uma matéria prima interessante para a produção de geopolímeros cimentícios, material que além de mostrar benefícios ambientais, apresenta benefícios econômicos, já que o rejeito utilizado como matéria prima não necessita de tratamentos onerosos para a confecção dos cimentos geopoliméricos. No Brasil, não existem normas regulamentadoras para a confecção desse material, apesar das vantagens apresentadas, sua aplicação restringe-se aos países desenvolvidos.

Na síntese dos geopolímeros a quantificação das fases mineralógicas é parte crucial no processo de caracterização tecnológica dos minerais. As técnicas analíticas demonstraram os principais minerais constituintes do rejeito analisado, notando-se mais de 50% do material constituído de sílica e alumínio, elementos importantes para o processo de síntese. Os resultados dos testes mecânicos estão intimamente ligados aos parâmetros físicos analisados e mostraram-se satisfatórios, obtendo-se melhores valores para o geopolímero ativado com KOH, como menor absorção de água e porosidade, resultando em maior resistência à compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBATO, C. N., SILVA, F. A., SAMPAIO, J. A., MEDEIROS, M. E., FRANÇA, S. C., NELE, M., GARRIDO, F. M. (2013). Avaliação Estatística das Variáveis que Influenciam a Viscosidade da Polpa de Bauxita do Pará com Alto Teor de SiO₂ Reativa. *Matéria*. Rio de Janeiro. v 18, n 4. 1410-1424 p.
2. DUXSON P., PROVIS J. L., LUKEY G. C., VAN DEVENTER, J. S. J. (2007). O papel da tecnologia de polímeros inorgânicos no desenvolvimento do 'concreto verde'. *Pesquisa em cimento e concreto*. v 37, n 12. 1590-1597 p.
3. FELIZARDO, V., NANDI, V. D. S., DONADEL, K., NOVAIS, R., LABRINCHA, J., ZACCARON, A. (2016). Desenvolvimento de geopolímeros de baixa condutividade térmica. *Matéria*. Rio de Janeiro v 21, n. 2. p. 429-436.
4. HE, J., ZHANG, G. (2011). Geopolymerization of red mud and fly ash for civil infrastructure applications. *Geotechnical Engineering*. 1287-1296 p.
5. KOMNITSAS, K., ZAHARAKI, D., VLACHOU, A., BARTZAS, G., GALETAKIS, M. (2015). Efeito de parâmetros de síntese na qualidade dos geopolímeros de resíduos de construção e demolição (CDW). *Advanced Powder Technology*. v 26, n 2. 368-376 p.
6. SAMPAIO, J. A., ANDRADE, M. C., DUTRA, A. J. B. (2005). Bauxita. CETEM/MCTI. 26 p.
7. MERABTENE, M., KACIMI, L., CLASTRES, P. (2019). Elaboration of geopolymer binders from poor kaolin and dam sludge waste. *Heliyon*, v. 5, n 6. 12 p.
8. SILVA, P. D., CRENSTIL, K. S., SIRIVIVATNANOM, V. (2009). Kinetics of Geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*. v 37. 512-518 p.
9. RESENDE, E. P., MANGRICH, A. S., MANGONI, A. P., SCARPELLINI, M., CASELLATO, A., FERNÁNDEZ, T. (2012). Estudo espectroscópico de composto obtido da reação no estado sólido entre um complexo mononuclear de vanádio (IV) e caulinita. *Química Nova*. v 35, n. 2. 257-261 p.
10. RIBEIRO, D. V. (2011). Influência da temperatura de calcinação nas propriedades cimentícias do resíduo de bauxita. Relatório final de pós-doutorado. Fapesp. 78 p.
11. ZHANG, G., HE, J., GAMBRELL, R. P. (2010). Synthesis, characterization, and mechanical properties of red mud-based geopolymers. *Transportation research record*. v 2167, n 1. 1-9 p.