

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA EM UMA REGIÃO AMAZÔNICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

ANALYSIS OF BAUXITE MINING WASTE CHARACTERISTICS IN AN AMAZONIAN REGION: A LITERATURE REVIEW

MATHEUS CAVALCANTE SILVA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, PA, Brasil, matheuscavalcante_s@hotmail.com

DÉBORA DIAS COSTA MOREIRA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Tucuruí, PA, Brasil, debora.dias@ufpa.br

JUNIOR HIROYUKI ISHIHARA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Tucuruí, PA, Brasil, jhi@ufpa.br

CHRISTIANE DO NASCIMENTO MONTE

Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil, christiane.monte@yahoo.com.br

JADELENE RAMOS DE SOUZA

Universidade Federal do Pará – UFPA, Tucuruí, PA, Brasil, jadelene.souza @tucurui.ufpa.br

ANA CRISTINA CAVALCANTE SELFE

Universidade Federal do Pará – UFPA, Tucuruí, PA, Brasil, ana.selfe@tucurui.ufpa.br

CARLOS DAVID VEIGA FRANÇA

Academia Maranhense de Ciências, Letras e Artes Militares, São Luís, Maranhão, Brasil, tutorveiga@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

As atividades de mineração possuem grande relevância no cenário mundial, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico e na produção de bens e serviços. No Brasil, o estado do Pará tem recebido destaque, sobretudo pela produção, beneficiamento e comercialização de Bauxita. Não obstante, a demanda por tais insumos minerais acarretou no aumento da produção de rejeitos que, apesar de apresentarem métodos de disposição distintos, sempre representam riscos, os quais podem ser evidenciados nos últimos desastres envolvendo barragens de mineração sob jurisdição nacional. Posto isso, este estudo objetivou a discussão de métodos de beneficiamento de bauxita, variações granulométricas e mineralógicas e métodos de armazenamento de rejeitos em áreas estratégicas da Amazônia,

Mining activities have great relevance on the world stage, contributing to socioeconomic development and the production of goods and services. In Brazil, the state of Pará has received attention, especially for the production, processing and commercialization of Bauxite. However, the demand for such mineral inputs has led to an increase in the production of tailings which, despite having different disposal methods, always represent risks, which can be evidenced in the latest disasters involving mining dams under national jurisdiction. Thus, this study aimed to discuss bauxite processing methods, granulometric and mineralogical variations and tailings storage methods in strategic areas of the Amazon, aiming to support risk control actions in bauxite tailings disposal systems. To this end,

visando subsidiar ações de controle de riscos em sistemas de disposição de rejeitos de bauxita. Para tanto, o estudo constituiu uma revisão bibliográfica sistemática, priorizando os artigos mais relevantes e atuais sobre a temática, cujos descritores foram utilizados em base de dados confiável. Os resultados demonstraram que o beneficiamento do minério de bauxita necessita de dois processos para a transformação deste insumo em alumínio metálico; As variações granulométricas foram mais evidentes no município de Paragominas-PA, enquanto em Barcarena-PA houve predominância de silte; A mineralogia enfatizou maiores teores de hidróxidos de alumínio em Paragominas-PA em relação à Barcarena-PA; Os sistemas de armazenamento de rejeitos de bauxita em Paragominas-PA ainda são mais inseguros em relação aos aplicados em Barcarena-PA, que priorizam sistemas alternativos com maiores teores de sólidos e, conseqüentemente, facilitam as ações de controle.

Palavras-chaves - Beneficiamento mineral; Rejeitos de bauxita; Amazônia

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade econômica importante para o Brasil, e sua importância pode ser notada desde o período colonial, quando bandeirantes realizavam incursões em busca de metais preciosos, até os dias atuais, com avanços significativos na compreensão geológica, descobertas de depósitos minerais e melhorias nos processos industriais. Dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), apontam que o setor da indústria extrativa mineral, em 2017, representou 1,4% de todo o PIB brasileiro, sendo também uma importante fomentadora da indústria nacional, pois é o segmento fornecedor de matéria-prima para todos os tipos de indústrias existentes no país (IBRAM, 2019). Essa atividade tem sido um fator essencial para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, com destaque especial para os estados de Minas Gerais e Pará (IBRAM, 2016; ANM, 2021).

O estado do Pará possui grande potencial para se tornar um dos maiores centros mineradores mundiais, principalmente considerando que mais de 80% do total de exportações estaduais estão relacionadas às indústrias de mineração e de transformação mineral, que totalizam bilhões de reais (SIMINERAL, 2019), com destaque, dentre

the study constituted a systematic bibliographic review, prioritizing the most relevant and current articles on the topic, whose descriptors were used reliable database. The results demonstrated that the processing of bauxite ore requires two processes to transform this input into metallic aluminum; Granulometric variations were more evident in the municipality of Paragominas-PA, while in Barcarena-PA there was a predominance of silt; Mineralogy emphasized higher levels of aluminum hydroxides in Paragominas-PA compared to Barcarena-PA; The storage systems for bauxite tailings in Paragominas-PA are even more unsafe compared to those applied in Barcarena-PA, which prioritize alternative systems with higher solids contents and, consequently, facilitate control actions.

Keywords - Mineral processing; Bauxite tailings; Amazon

outras substâncias minerais, como principal estado nacional na produção bruta, beneficiada e comercializada de Alumínio (Bauxita) (ANM, 2022).

Contudo, as operações de mineração geram uma considerável quantidade de estéril e rejeito. Os mais volumosos entre eles são os decorrentes das fases de extração (chamados de estéreis) e do processo de beneficiamento (os rejeitos). Os procedimentos de beneficiamento de minério têm como objetivo principal extrair os elementos de valor econômico, ou seja, um produto final. Para Paixão e Wilken (2021), esses procedimentos envolvem a padronização do tamanho das partículas, a remoção de minerais que não têm valor econômico e o aprimoramento da qualidade, pureza ou concentração do produto final.

Segundo o Instituto de Pesquisa Avançada (IPEA, 2012), os métodos empregados variam amplamente, dependendo do tipo e qualidade do minério a ser extraído. A utilização frequente de água nos processos de beneficiamento, especialmente na concentração do minério, resulta na produção de rejeitos úmidos, e a gestão adequada e disposição desses rejeitos no ambiente representam desafios significativos para as empresas responsáveis. Esses resíduos podem ser arma-

zenados de diversas maneiras, incluindo cavas exauridas, minas subterrâneas, pilhas, depósitos ou barragens de rejeitos (MEDEIROS E LIMA, 2021). É importante notar que o armazenamento de rejeitos sempre carrega consigo riscos potenciais. Como exemplo desses riscos, cita-se um dos piores desastres relacionados a barragens de rejeitos de mineração, ocorrido no Brasil, em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) (NORONHA, 2021), esses eventos resultaram em extensos danos ambientais, impactos socioeconômicos significativos e perda de vidas humanas (SÁ *et al.*, 2021; QUEIROZ *et al.*, 2021; FELIZARDO *et al.*, 2021).

Os riscos de desastres no século XXI possuem causas complexas, perpassando por descaso técnico, que conduz à ruptura da barragem de rejeito, bem como pela modificação do ambiente, o uso dos recursos e dos territórios (NOGUEIRA E MOURA, 2022). Em resposta a esses incidentes, o governo tem agido através de medidas legislativas, com o propósito de estabelecer padrões de segurança destinados a reduzir a probabilidade de ocorrência de incidentes, acidentes ou desastres e atenuar seus efeitos, conforme exemplificado no Decreto nº 11.310/2022 (BRASIL, 2022).

Esta análise concentrou-se em dois municípios essenciais na região amazônica do Pará, a saber: Barcarena-PA e Paragominas-PA. A escolha dessas localidades se justifica devido à estreita relação entre elas nos processos de tratamento e armazenamento dos rejeitos de minério de bauxita. Paragominas-PA desempenha um papel crucial na mineração, abrigando a mina de bauxita da empresa Hydro, cujos minerais extraídos são triturados e transportados até Barcarena-PA (HYDRO, 2023a, b). Por sua vez, Barcarena-PA abriga um setor minero-metalúrgico significativo, com empresas renomadas como Alumínio Brasileiro S.A. (Albrás), Alumina do Norte do Brasil S.A. (Hydro Alunorte, a maior refinaria de alumina do mundo) e Alumínios de Barcarena S.A. (Alubar) (RODRIGUES *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2022).

Este estudo parte do pressuposto de que a ocorrência de desastres está, em grande parte, relacionada a deficiências no controle das estruturas de armazenamento de rejeitos de mineração, principalmente devido a lacunas no entendimento do comportamento desses rejeitos, para garantir a segurança durante toda sua vida útil e após seu fe-

chamento. Diante do exposto, esta análise objetiva realizar um levantamento de dados que visam identificar pesquisas que discutam: I) os métodos de tratamento de minérios de bauxita, II) características e variações sobre a granulometria e a mineralogia e III) métodos de disposição de rejeitos de bauxita em áreas estratégicas da região amazônica, visando sintetizar um arcabouço técnico-científico atual para subsidiar ações de gestão e controle de estruturas de contenção de rejeitos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na etapa de revisão sistemática, foram pesquisados dados na plataforma *Scholar Google*, sendo considerados artigos de alta relevância científica, inseridos em periódicos revisados por pares e indexados, cujo recorte temporal correspondeu a um período de 10 anos (2014-2023). De modo complementar, foram considerados arquivos documentais clássicos e, secundariamente, também foram consideradas dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Na estratégia de busca, foram utilizados os seguintes descritores isolados ou combinados, além de seus correspondentes na língua inglesa: Beneficiamento mineral/Mineral processing; Tratamento de minérios/Ore treatment; Beneficiamento de Bauxita/Bauxite processing; Rejeitos de mineração/Mining wastes; Características de rejeitos de mineração/Characteristics of mining wastes; Rejeitos de Bauxita/ Bauxite wastes; Granulometria de rejeitos de bauxita/Grain size of bauxite tailings; Mineralogia de rejeitos de bauxita; Armazenamento de resíduos de mineração/Mining waste storage; Armazenamento de rejeitos de mineração/Mining tailings storage; Barragens de rejeitos de mineração/ Mining tailings dams; Segurança de barragens/Dam safety.

Os documentos que não apresentaram o texto completo disponível e aqueles que não dispuseram relação com os objetivos propostos pelo estudo foram excluídos. Posteriormente, os estudos agrupados seguiram etapas de filtragem (Figura 1): 1 - Identificação; 2 - Seleção; 3 - Elegibilidade e 4 - Inclusão, tendo por base o modelo de Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA).



Figura 1. Infográfico representativo das etapas metodológicas seguidas para a revisão sistemática

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A maioria dos minérios naturais precisa passar por algum tipo de processo de melhoria de suas características físicas e químicas. Isso envolve separar os minerais valiosos daqueles que não têm valor econômico, de modo a obter uma parte que contenha a maior quantidade dos minerais valiosos (LUZ E LINS, 2018). Esse processo induz a separação de maneira seletiva e controlada, possibilitando a distinção do concentrado e do rejeito (THOMÉ E PASSINI, 2018). Duas etapas são as responsáveis pelos produtos gerados, a extração/lavra e o beneficiamento/concentração.

Segundo Souza, Moreira e Heineck (2018), a elevada produção de resíduos minerais provenientes do processo de beneficiamento de minério torna viável a construção de diques para dispor esse material, criando assim, as barragens de rejeitos. No entanto, quando construídas ou planejadas de maneira inadequada, essas estruturas

representam um grande risco para a sociedade, o meio ambiente e também a economia.

Nas operações de beneficiamento de minérios são gerados os estéreis e os rejeitos. De acordo com o IPEA (2012), os estéreis referem-se aos materiais escavados durante a extração da mina, não possuindo valor econômico, e geralmente são dispostos em pilhas. Por outro lado, os rejeitos são gerados a partir dos processos de beneficiamento aplicados às substâncias minerais. Os rejeitos não têm aplicação imediata, mas podem ser reutilizados na construção de barragens ou em sistemas alternativos para descarte de rejeitos, além de serem usados para preencher galerias subterrâneas. Somente em uma etapa posterior, é criado o que chamamos de “rejeito de minério” (Figura 2). Esse rejeito é formado principalmente por partículas muito pequenas resultantes do processo de beneficiamento mineral, como areia fina, silte e argila (IPEA, 2012).

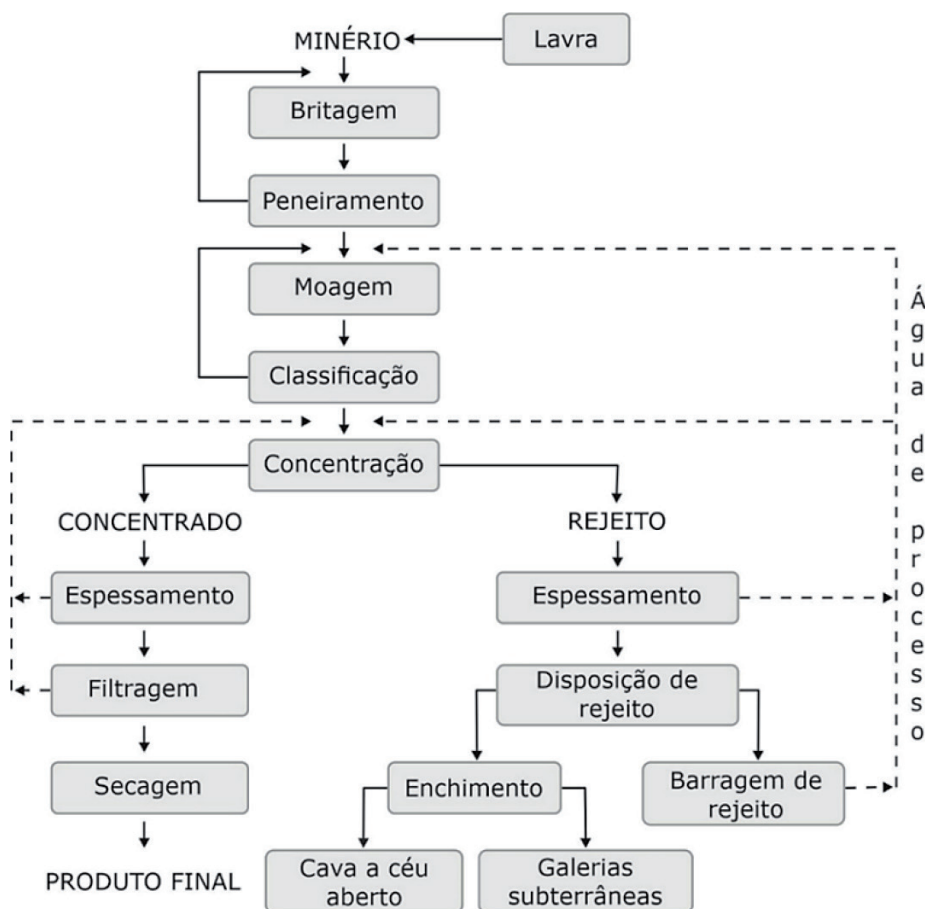


Figura 2. Diagrama representativo das etapas típicas do tratamento de minério

Fonte: Adaptado de Luz e Lins (2018).

É importante destacar que aproximadamente 85% da produção de bauxita é direcionada para a fabricação de alumina, um processo que envolve a lixiviação cáustica química úmida, conhecido como o processo Bayer (Figura 3). Posteriormente, a maior parte da alumina produzida por esse refinamento é utilizada como matéria-prima na

fabricação de alumínio metálico. Isso acontece por meio de um método que envolve a redução eletrolítica da alumina em um banho fundido contendo criolita, que pode ser de origem natural ou sintética (Na_3AlF_6). Esse processo é conhecido como o processo Hall-Héroult (USGS, 2019).

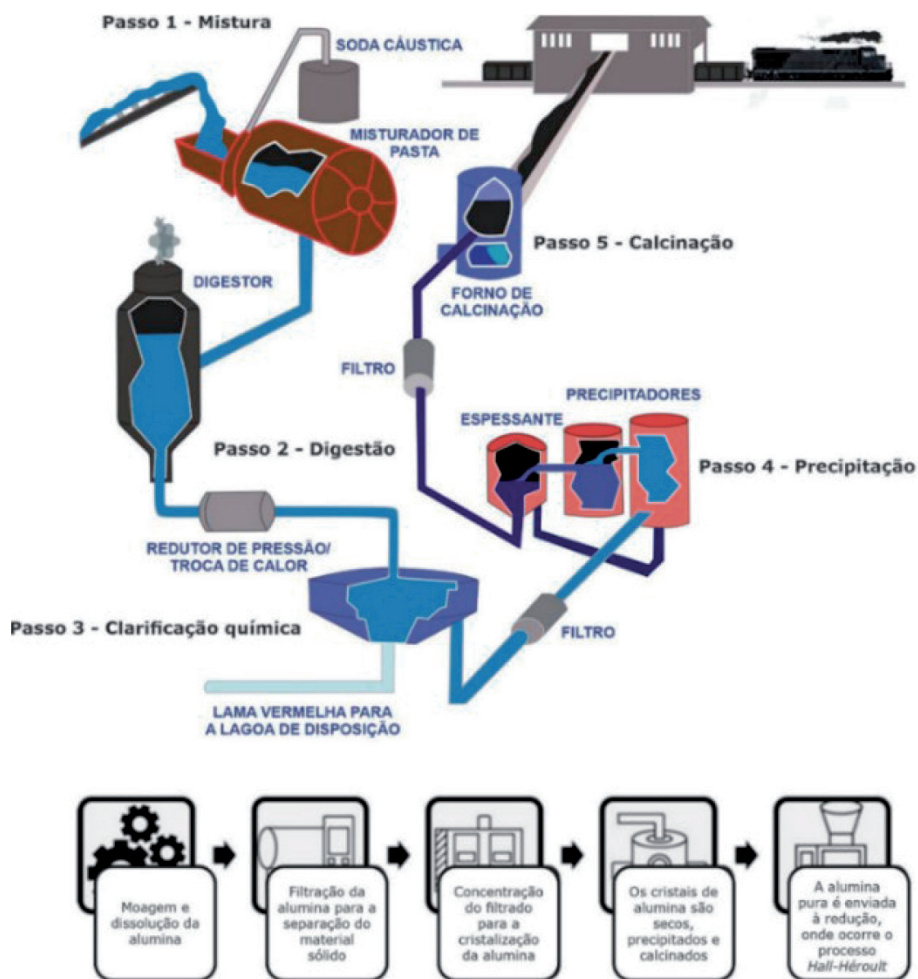


Figura 3. Diagrama simplificado de beneficiamento de caulim (via úmida)

Fonte: Adaptado de Tabereaux (2012); ABAL (2020).

O rejeito do minério de bauxita apresenta uma distribuição granulométrica totalmente dependente e relacionada com: a origem da rocha-mãe (a rocha exposta às intempéries da subsuperfície), ao processo de extração e beneficiamento do minério, ao processamento e ao modo de deposição e armazenamento (VILLAR, 2002). Em relação

a isso, Oboni e Oboni (2020) constataram a faixa de variação granulométrica, resumando um apanhado de ensaios de caracterização granulométrica realizados ao longo dos anos em rejeitos de bauxita de mineradoras distintas nos Estados Unidos (Figura 4).

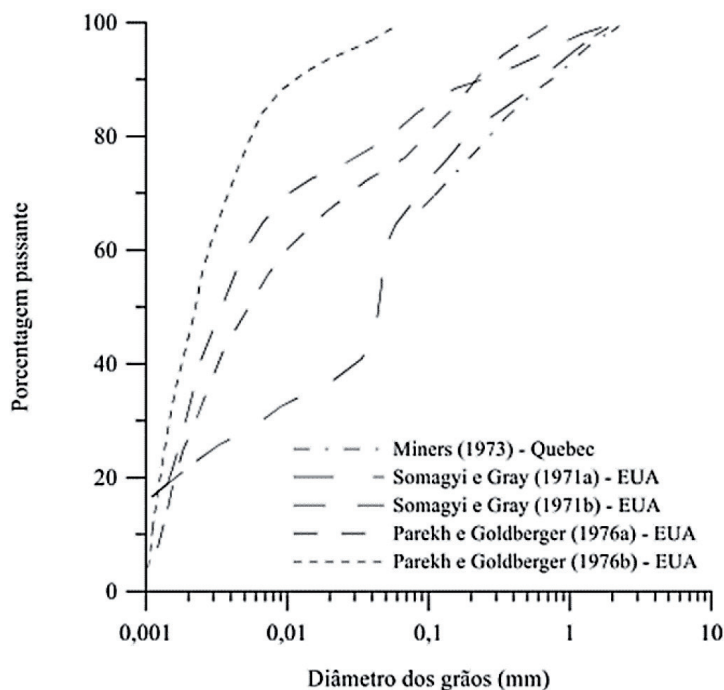


Figura 4. Variação granulométrica considerando distintos rejeitos de mineração de bauxita

Fonte: Oboni e Oboni (2020).

De acordo com essa faixa de variação, é possível constatar uma tendência na ocorrência de partículas majoritariamente com diâmetros de siltes, embora ainda seja possível verificar partículas do tamanho de argilas e areias finas em menor quantidade. Apesar disso, é válido ressaltar que a maioria dos estudos realizados em rejeitos de bauxita são direcionados a materiais geológicos submetidos ao processo Bayer, logo, ao considerar outros métodos existentes, a literatura ainda é incipiente (BRUSCHI, 2020).

De acordo com a classificação proposta por Oliveira e Rubio (2011), de uma forma geral, observamos que a polpa de bauxita contém partícu-

las de tamanho fino, com menos de 100 μm , sendo mais prevalentes na amostra de polpa. Além disso, há também partículas muito finas e ultrafinas, embora em menor quantidade. No entanto, é importante levar em conta que as condições climáticas, geológicas, pedológicas e regionais específicas da região amazônica exercem influência sobre as características das diferentes bauxitas que passam pelo processo de tratamento mineral, afetando a granulometria e a mineralogia de seus rejeitos. A tabela 1 apresenta alguns dos resultados encontrados em estudos realizados com bauxitas na região amazônica.

Tabela 1 - Variação granulométrica em rejeitos de bauxita da Amazônia

Autor (es)	Localidade	Faixa de variação
Reis (2015)	Paragominas - PA	50% das partículas é de aproximadamente 86 μm
Pinheiro <i>et al.</i> (2016)	Barcarena - PA	(Ponto 1: 98,47% < 100 μm) (Ponto 2: 94,57% < 100 μm)
Pinheiro <i>et al.</i> (2017)	Barcarena - PA	Predominância de partículas entre 2 e 60 μm (silte)
Santiago (2018)	Paragominas - PA	98% < 1 μm e 2% em torno de 0,6 μm
Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	Paragominas - PA	90% < 500 μm e 10% < 5 μm
Santos <i>et al.</i> (2020)	Paragominas - PA	90% < 48,6 μm
Silva <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	90% < 22,5 μm 50% < 6,04 μm 10% < 1,65 μm
Araújo <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	80% < 38 μm

Em relação à mineralogia, de acordo com estudos de Sampaio *et al.* (2005), a bauxita é composta principalmente pela Gibbsita [$\text{Al}(\text{OH})_3$] e, dificilmente para climas tropicais, Boehmita [$\text{vAlO}(\text{OH})$] e/ou Diásporo [$\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$], apresentando como principais impurezas a Caulinita

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, óxi-hidróxidos de ferro, a exemplo da Hematita [Fe_2O_3] e Goethita [$\text{FeO}(\text{OH})$], além de óxidos de titânio (Rutilo e Anatásio - estrutura cristalina tetragonal) [TiO_2]. A Tabela 2 exhibe os resultados de análises mineralógicas realizadas em bauxitas da Amazônia.

Tabela 2 - Análises mineralógicas em rejeitos de bauxita da Amazônia

Autor (es)	Localidade	Resultados obtidos
Reis (2015)	Paragominas - PA	Gibbsita, Goethita, Caulinita, Hematita, Anatásio.
Pinheiro <i>et al.</i> (2016)	Barcarena - PA	Gibbsita, Hematita, Anatásio, Goethita, Sodalita e Quartzo.
Pinheiro <i>et al.</i> (2017)	Barcarena - PA	Hematita, Sodalita, Goethita, Gibbsita e Anatásio.
Santiago (2018)	Paragominas-PA	Gibbsita, Hematita, Quartzo, Anatásio e Caulinita.
Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	Paragominas-PA	Gibbsita, Goethita, Hematita, Caulinita e Anatásio.
Melo <i>et al.</i> (2019)	Paragominas - PA	Gibbsita, Caulinita, Hematita, Goethita e Anatásio
Santos <i>et al.</i> (2020)	Paragominas - PA	Gibbsita, Caulinita, Goethita e Hematita
Silva <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	Hematita, Anatásio, Sodalita, Gibbsita, Quartzo, Goethita
Araújo <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	Hematita, Goethita, Gibbsita, Sodalita, Anatásio, Quartzo e Calcita

Uma grande preocupação em relação às indústrias minerais diz respeito à produção da elevada quantidade de rejeitos, os quais podem ser dispostos em diferentes tipos de estruturas (PAIXÃO, WILKEN, 2021; MEDEIROS E LIMA, 2021). A escolha do método de armazenamento depende de fatores como: a natureza do processo minerário, as condições geológicas e topográficas do local, as propriedades mecânicas dos materiais, o impacto ambiental dos contaminantes dos rejeitos e a climatologia da região (IBRAM, 2016).

De acordo com Thomé e Passini (2018), o método mais comumente aplicado para o armazenamento dos rejeitos da indústria mineral é a sua disposição em lagoas de decantação, que são represados por barragens de rejeitos. A Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio da Resolução ANM nº 95/2022 (ANM, 2022), define as barragens de mineração, conceituando-as da seguinte maneira:

Art. 2º

IV – Barragem de Mineração:

a) barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais; b) estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação (ANM, 2022, p. 2).

Além disso, a regulamentação também leva em conta dois critérios para determinar se uma barragem está sob a jurisdição nacional: o Critério de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA). O CRI é uma forma de classificar a barragem com base em fatores que possam afetar a probabilidade de ocorrência de acidentes ou desastres. Ele leva em consideração aspectos técnicos e outros elementos (ANM, 2022, p. 3). Por outro lado, o Dano Potencial Associado (DPA) se refere ao dano que poderia ocorrer devido a um rompimento, vazamento ou mau funcionamento

de uma barragem, independentemente de quão provável seja que isso aconteça. Esse dano pode ter diversos tipos de impactos (ANM, 2022, p. 4). De qualquer forma, ambos os critérios mencionados ajudam os empreendedores e as autoridades nacionais a determinar a frequência de monitoramento e, acima de tudo, a garantir a conformidade com as leis, regulamentos e padrões de segurança (ANM, 2022).

Sob outra perspectiva, os sistemas alternativos de disposição de sedimentos e rejeitos de mineração têm ocupado mais espaço no setor minerário e elucidam soluções para melhoria no nível de segurança estrutural, redução do potencial de dano ao meio ambiente e aplicação de soluções tecnológicas (GUEDES E SCHNEIDER, 2018). Nesse sentido, destaca-se o empilhamento a seco, ou *dry stacking/tailling dry backfill*, que consiste em um método responsável pelo empilhamento do rejeito de mineração após a separação do sólido da água, através de um sistema de filtragem, em uma pilha de rejeitos (OLIVEIRA-FILHO E ABRÃO, 2015). No Brasil, alguns empreendimentos já aplicam esse método, no qual o rejeito perpassa pelas seguintes etapas: desaguamento por peneiras de alta frequência e filtragem em filtro prensa horizontal ou outro tipo, resultando na produção de rejeitos com menor teor de umidade, o que possibilita seu empilhamento, evitando a necessidade da disposição em barragens (BRANDÃO, TOMI E SANTOS, 2016; BERGER, 2017).

Do ponto de vista estrutural, existem diferenças fundamentais entre as barragens de rejeitos da mineração e as pilhas de rejeitos. As barragens são projetadas para conter água e partículas sólidas, tanto em suspensão quanto em estado livre, resultantes do processamento do minério. A escala e o tamanho das barragens variam dependendo da topografia da região. Por outro lado, as pilhas de rejeitos podem ter diversas origens e formatos. Eles são delimitados por zonas de contenção ou localizados em áreas abertas. A forma como os rejeitos são tratados pode envolver a filtragem com posterior empilhamento, espessamento para a criação de uma pasta mais densa, ou até mesmo a co-disposição com o material estéril da mina. Isso pode ser realizado em cavas exauridas ou áreas de mineração já encerradas (STELA, DUARTE E PEREIRA, 2020).

No município de Paragominas-PA, a empresa Hydro realiza a disposição de rejeitos ainda em polpa, em quatro barragens de mineração devidamente cadastradas na Agência Nacional de

Mineração (ANM), sendo elas a B1, RP1, B6 e B5 (HYDRO, 2023c; ANM, 2023), cujas características encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 - Características técnicas das barragens de mineração (Norsk Hydro, Paragominas-PA)

Barragem de mineração	Categoria de Risco - CRI	Dano Potencial Associado - DPA	Área do reservatório	Comprimento da crista
B1	Baixa	Alto	1.528.111,00m ²	1.580,00m
RP1	Baixa	Alto	3.063.663,00m ²	8.534,50m
B6	Baixa	Alto	402.289,00m ²	568,00m
B5	Baixa	Baixo	2.519.612,00m ²	1.359,00m

Fonte: ANM (2023).

Já em Barcarena-PA, a empresa Hydro utiliza a metodologia *tailing dry backfill* para realizar empilhamento de resíduos secos com 78% de teor de sólidos, permitindo o empilhamento a seco por

meio da disposição e compactação desses materiais (HYDRO, 2023d). Atualmente, o empreendimento possui dois Depósitos de Rejeitos (DRS-1 e DRS-2), conforme expõe a tabela 4.

Tabela 4 - Características técnicas dos Depósitos de Resíduos Sólidos (Norsk Hydro, Barcarena-PA)

Depósito	Capacidade de armazenamento	Volume armazenado	Altura da crista
DRS-1	51,70Mm ³	47,90Mm ³	Até 27m ^a
DRS-2	27Mm ³	0,6Mm ³	Até 80m ^b

^aConsiderando a estrutura com a maior elevação máxima (célula sul) dentre as outras (célula leste 1 - CL1, célula leste 2 - CL2, célula leste 3 - CL3, reservatórios, canais de contorno e outras).

^bConsiderando a estrutura com a maior elevação máxima (pilha de resíduo) dentre as outras (célula de emergência, bacias de controle, canal de controle interno, canal de controle externo, diques e fingers).

Fonte: HYDRO (2022a,b).

Apesar da disposição de rejeitos secos em pilhas ser mais eficiente e produtiva, tal como ocorre em Barcarena, Faria *et al.* (2021) atentam para o fato de que este método de disposição gera uma maior quantidade de volumes de rejeitos, que necessitam de uma destinação para se evitar seu acúmulo a longo prazo, necessitando a inerteização ou futuras atribuições. Ainda de acordo com estes autores, substâncias como o Alumínio (Bauxita) ainda são pouco aproveitadas na forma de rejeito, cuja justificativa pode estar atrelada a

questões econômicas, como valor agregado e o produto a ser beneficiado. Segundo Carmo, Lanchotti e Kamino (2021), ainda há relativa escassez sobre o aproveitamento de rejeitos minerais, o que pode dificultar a execução de projetos viáveis e aplicáveis.

Ainda assim, a disposição de rejeitos de bauxita permite um importante viés sustentável e em crescimento no setor da mineração nacional, sobretudo pelas diversas formas de aproveitamento em várias áreas e setores como, por exemplo, na

construção civil (cimento e materiais cerâmicos), na indústria química (catalisadores, reagentes fotodegradadores), na metalurgia (extração de óxidos para a produção de tintas, corantes, cosméticos), na indústria aeroespacial (ligas de titânio), na indústria nuclear (imobilizador de rejeitos nucleares), conforme enfatiza Shinomiya, Gomes e Alves (2019).

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram abordados aspectos cruciais relativos à gestão e ao controle das instalações de descarte e armazenamento de resíduos de mineração de bauxita. Exploramos temas como o processamento da bauxita, as variações em sua granulometria e mineralogia em regiões essenciais para o crescimento socioeconômico da Amazônia. Isso ganha maior relevância, considerando os recentes desastres em barragens de mineração no Brasil e as atuais mudanças na legislação visando a prevenção de tais acidentes.

O processo de beneficiamento da bauxita compreende duas etapas fundamentais: a primeira etapa converte a bauxita em alumina, seguindo o Processo Bayer, enquanto a segunda transforma a alumina em alumínio metálico, por meio do Processo Hall-Héroult.

A granulometria demonstrou ampla faixa de variação em Paragominas-PA, com variações de 90% entre <48,6 μm e <500 μm , e uma ocorrência de 98% < 1 μm , indicando que tais intervalos permitem correspondem a grãos de distintos tamanhos, como argila, silte e areia. Já em Barcarena-PA, há uma predominância de partículas de silte, com baixas variações granulométricas, verificadas em 80% <38 μm e 90% <22,5 μm .

A mineralogia em Paragominas-PA demonstrou-se amplamente uniforme, com predominância absoluta em Gibbsita e, secundariamente em Hematita, Goethita, Caulinita, Anatásio e Quartzo, evidenciando a predominância de hidróxidos de alumínio. Em Barcarena-PA, apesar de grandes variações quanto à predominância de alguns minerais, notou-se uma predominância de Hematita e, secundariamente, de Gibbsita, Sodalita, Anatásio, Goethita, Calcita e Quartzo o que permite inferir um teor muito maior de óxidos de ferro e

titânio em relação aos hidróxidos ricos em alumínio e silicatos.

Os métodos de disposição de rejeitos de mineração de bauxita em Paragominas possuem grande relação com o histórico método de contenção de rejeitos em forma de polpa em barragens de mineração e, apesar de apresentarem categoria de risco baixa, ainda requerem cuidados periódicos devido a altos danos potenciais associados em três delas. Por outro lado, a preocupação da empresa Norsk Hydro com o monitoramento de tais estruturas fica evidente ao considerar os altos investimentos para disposição de rejeitos de mineração filtrados, em pilhas, demonstrando aderência às formas alternativas e mais seguras de disposição de rejeitos da mineração, que podem ainda ser aproveitados futuramente.

Posto isso, enfatiza-se ainda, como sugestão aos estudos futuros, a necessidade de estudos de revisão que integralizem os conhecimentos desta análise ao comportamento geotécnico e geomecânico dos rejeitos de bauxita, considerando também as especificidades climáticas da região amazônica e suas peculiaridades pluviométricas, fazendo-se valer de medidas legislativas e embasamentos técnico-científicos, a fim de assegurar a segurança das estruturas de contenção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pará - UFPA, ao Núcleo de Desenvolvimento da Amazônica em Engenharia - NDAE e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental - PEBGA, que possibilitaram a realização da presente pesquisa. Agradecem ainda ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação PIBIC - PRO-PESP/PIBIC, pela oportunidade de bolsa na categoria: PIBIC/UFPA - INTERIOR (edital nº 13/2023 - PROPESP) e à A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP), em parceria com a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), pela concessão de bolsa na categoria Bolsas de Mestrado para Cursos Profissionais (edital nº 20/2023 - PROPESP/edital nº 005/2023 - FAPESPA).

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Mineração - ANM. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. 2021. Brasília - DF. Disponível Em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-contenido/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>. Acesso em: 10 Jan. 2023.
- Agência Nacional de Mineração - ANM. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. 2022. Brasília-DF. Disponível Em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-contenido/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/previaamb2022.pdf>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Agência Nacional de Mineração - ANM. Resolução Nº 95, De 07 De Fevereiro De 2022. Consolida Os Atos Normativos Que Dispõem Sobre Segurança De Barragens De Mineração. Disponível Em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 16 De Jun. De 2023.
- Agência Nacional de Mineração - ANM. Sistema Integrado De Gestão De Barragens De Mineração - SIGBM. Disponível Em: <https://app.anm.gov.br/sigbm/publico/gerenciarpublico>. Acesso em: 20 De Fev. 2023.
- Araújo, P.F.M. et al. Bayer Process Towards the Circular Economy – Metal Recovery from Bauxite Residue. In: *Light Metals 2020*. In *Light Metals 2020* (P. 98-106). Springer, Cham., 2020.
- Associação Brasileira de Alumínio - ABAL. Trabalho da CBA de Restauração Florestal em Áreas Mineradas é Destaque Internacional. 2020. Disponível em: [Abal.Org.Br](http://abal.org.br). Acesso em: 10 Jan. 2020.
- Berger. K. C. Study of Tailings Management Technologies. Mine Environment Neutral Drainage (Mend) Project, 2017.
- Brandão, R.; Tomi, G. de; Santos, P. Iron Ore Tailings Dry Stacking in Pau Branco Mine, Brazil. *Integrative Medicine Research*, V. 5, N. 4, P. 339–344, 2016.
- Brasil. Decreto Nº 11.310, De 26 de Dezembro de 2022. Regulamenta dispositivos da Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010, Para Dispor Sobre as Atividades de Fiscalização e a Governança Federal da Política Nacional de Segurança de Barragens, Institui o Comitê Interministerial de Segurança de Barragens e altera o Decreto Nº 10.000, de 3 de Setembro de 2019. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.310-de-26-de-dezembro-de-2022-453739170>. Acesso em: 07 de Jan. de 2023.
- Bruschi, G.J. Estabilização de Rejeitos de Mineração de Bauxita por Meio de um Sistema Ligante Álcali-Ativado de Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar e Cal de Carbureto. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre – RS., 185p., 2020.
- Carmo, F.F., Lanchotti, A.O., Kamino, L.H.Y. Mining Waste Challenges: Environmental Risks of Gigatons of Mud, Dust and Sediment in Megadiverse Regions in Brazil. *Sustainability*, v. 12, n. 20, p. 8466, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/su12208466>.>. Acesso em: 12 mar. 2021
- Costa, I.J.L., Et Al. Atividade Portuária em Barcaena (Pará): Caracterização e Análise Ambiental de Seus Efeitos no Desenvolvimento Local da Vila de Itupanema. *Revista Brasileira de Geografia Física*, V.15, N. 03, P. 1639-1653, 2022.
- Faria, G. H. C., Teixeira, R. L. P., Shitsuka, R., Gouveia, L. L. A. Potencial de atuação da engenharia nos rejeitos sólidos de mineração no Brasil. *Revista de Casos e Consultoria*, 12(1), e24041-e24041, 2021.
- Felizardo, J. P. Et Al. Sources of Sedimentary Organic Matter And Assessment of Heavy-Metal Levels in Estuarine Sediments after Fundão Dam Breach. *Estuarine, Coastal And Shelf Science*, V. 261, P. 107507, 2021.

- Guedes, G. B.; Schneider, C. L. Disposição de Rejeitos de Mineração: as Opções Tecnológicas para a Redução dos Riscos em Barragens. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Rio de Janeiro – RJ., 28p., 2018.
- Hydro. Barragens. 2023c. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/mineracao-paragominas/barragens/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Depósitos de Resíduos Sólidos. 2023d. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/north-america/brasil/iptera/iptera/deposito-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Mineração Paragominas. 2023a. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/mineracao-paragominas/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Paragominas. 2023b. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Plano de Ação de Emergência (PAE) – Estruturas Geotécnicas do Depósito de Resíduos Sólidos 1 – Drs1. 2022a. Disponível em: <https://www.hydro.com/document/doc/pae%20drs%201.pdf?docid=583296>. Acesso em: 05 de Outubro de 2022.
- Hydro. Plano de Ação de Emergência (PAE) – Estruturas Geotécnicas do Depósito de Resíduos Sólidos 2 – Drs2 Fase 1. 2022b. Disponível em: <https://www.hydro.com/document/doc/pae%20drs%202.pdf?docid=583297>. Acesso em: 05 de Outubro de 2022.
- Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração. Brasília, P. 128. 2016. Acesso em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-E-Manejo-De-Rejeitos-Da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. Relatório Anual Atividades - Julho 2018 a Junho 2019. 2019. Disponível: <https://ibram.org.br/relatorios-de-atividades/2018-2019.pdf>. Acesso em: 12/10/2023.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Brasília: IPEA, 2012. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/Rp_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf. Acesso em: 23 Set. 2022.
- Luz, A.B; Lins, F.F. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: Luz, A.B.; Sampaio, J.A.; França, S.C.A (Org.). Tratamento de Minérios. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 6ª Ed., V. 1, P. 3-6. Rio de Janeiro – RJ, 2018.
- Medeiros, L. T. B.; Lima, A. M. M. Método de Dimensionamento Espacial Aplicado para Vazamentos Hipotéticos de Depósitos de Rejeitos de Mineração. Research, Society And Development, V. 10, N. 9, P.11210917606 – 11210917606, 2021.
- Melo, C. C. A. et al. Gibbsite-Kaolinite Waste From Bauxite Beneficiation To Obtain Fauzeolite: Synthesis Optimization Using A Factorial Design Of Experiments And Response Surface Methodology. Applied Clay Science, V. 170, P. 125-134, 2019.
- Nogueira, F.R., Moura, R.B. Gestão de riscos e desastres: um campo de conhecimento em contínua evolução e a Geologia de Engenharia e Ambiental. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v.12, n.1, 2022.
- Noronha, F. D. L. Suscetibilidade geológica das barragens de mineração no estado de Minas Gerais: um panorama preliminar a partir de modelagem estatística e morfométrica. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v.11, n.2, 2021.
- Oboni, L.F.; Oboni, C. Tailings Dam Management For The Twenty-First Century. Cham: Springer International Publishing, 2020.

- Oliveira, P.; Rubio, F. Mecanismos, Técnicas e Aplicações da Agregação no Tratamento Mineral e Ambiental. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Série Tecnologia Ambiental, 60. Rio De Janeiro – RJ., 69p., 2011.
- Oliveira-Filho, W. L.; Abrão, P. Disposição De Rejeitos De Mineração. Geotecnia Ambiental. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.
- Paixão, M. D.; Wilken, A. A. P. Alternativas de Disposição de Rejeitos de Mineração na Avaliação de Impacto Ambiental no Estado de Minas Gerais. Revista Geográfica Acadêmica, 15(1), P. 33-56, 2021.
- Pinheiro, E. R.; Fernandez, O. J. C.; Costa, J. C. Química-Mineral das Camadas Inertizadas em Lama Vermelha da Hydro Alunorte. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – RN, 9p., 2016.
- Pinheiro, E. R.; Fernandez, O. J. C.; Costa, J. C.; Valente, E. M.; Carvalho, P. J. Variações Granulométricas, Mineralógicas e Alcalinas em Resíduos Inertizados da Hydro Alunort. Holos, Vol. 6, P. 50-59, 2017.
- Queiroz, H. M.; Ying, S. C.; Abernathy, M.; Barcellos, D.; Gabriel, F. A.; Otero, X. L.; Nóbrega, G.N.; Bernardino, A.F.; Ferreira, T. O. Manganese: The Overlooked Contaminant In The World Largest Mine Tailings Dam Collapse. Environment International, 146, 106284, 2021.
- Reis, I.N.S.F. Influência da Granulometria nas Propriedades Reológicas da Polpa de Bauxita Pós Beneficiamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará. Belém – PA., 77p., 2015.
- Rodrigues, A.C.V.L.; Felipe, A.M.P.F.; Souza, J.A.S. Simulação de Condição de Fluxo em Duto Circular Transportando Polpa de Bauxita de Paragominas (PA) Na Presença de Aditivo Modificador de Viscosidade. Matéria (Rio de Janeiro), V. 24, P. 1-9, 2019.
- Rodrigues, J.C.; Hazeu, M.T.; Nascimento, S.M. Como se Produz Desastres?: O Processo de Licenciamento da Barragem de Rejeitos da Hydro Alunorte, em Barcarena, Pará. Nucleus, V. 16, N. 2, P. 151-159, 2019.
- Sá, F.; Longhini, C. M.; Costa, E. S.; Silva, C. A.; Cagnin, R. C.; G. L. E.O.; Lima, A.T.; Bernardino, A.F.; Neto, R. R. Time-Sequence Development of Metal (Loid) S Following The 2015 Dam Failure in the Doce River Estuary, Brazil. Science of the Total Environment, 769, 144532, 2021.
- Sampaio, J.A.; Andrade, M.C.; Dutra, A.J.B. Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Rio De Janeiro – RJ., P. 279-304, 2005.
- Santiago, E.N. Argamassas Cimentícias Mistas a Partir de Rejeitos de Beneficiamento da Bauxita da Amazônia. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Belém – PA. 81p., 2018.
- Santos, L.G.S.; Paz, S.P.A.; Cunha, E.J.S.; Souza, J.A.S. Non-Halogenated Flame-Retardant Additive From Amazon Mineral Waste. Journal of Materials Research And Technology, 9(5), P. 11531-11544, 2020.
- Shinomiya, L. D., Gomes, J. O., Alves, J. O. Análises de cenários para reaproveitamento do resíduo de bauxita no Pará. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 16(1), 75-81, 2019.
- Silva, P. M. P.; Carmo, A. L. V. D.; Holanda, R. B.; Gomes, F. G.; Nogueira, E.; Costa, R. V. D.; Melo, C.C.A.; Lucheta, A.R.; Montini, M. Brazilian Bauxite Residue Physical-Chemical Characterization And Acidic Neutralization Potential. In Light Metals 2020 (P. 115-123). Springer, Cham., 2020.
- Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará - SIMINERAL. 8º Anuário Mineral do Pará. 2019. Belém: Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará. Acesso em: https://www.simineral.org.br/pdf/Anuarios/8-Mobile_Pt-Br.Pdf. Acesso em: 14 Jul. 2023.
- Souza Junior, Tennison Freire De; Moreira, Eclesielter Batista; Heineck, Karla Salvagni. Barragens

de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil. *Holos [Recurso Eletrônico]*. Natal, RN. Vol. 5 (2018), P. 1-39, 2018.

Stela, L. H. P.; Duarte, J. C.; Pereira, C. O. Métodos de Disposição dos Rejeitos de Minério de Ferro Alternativos ao Método de Barragens: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Processos Químicos*, 1 (1), 1-58, 2020.

Tabereaux, A. The Discovery, Commercialization, And Development Of The Aluminum Industry In France. *Light Metal Age*, V. 70, N. 2, P. 28, 2012.

Thomé, R.; Passini, M. L. Barragens de Rejeitos de Mineração: Características do Método de Al-
teamento para Montante que Fundamentaram a

Suspensão de sua Utilização em Minas Gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, V. 18, N. 34, P. 49-65, 2018.

United States Geological Survey – USGS. Mineral Commodity Summaries. Reston, Virginia: 2019. Disponível em: https://D9-Wret.S3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/mcs2019_all.pdf. Acesso em: 28 de Setembro de 2022.

Villar, L. F. S. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universitária Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 50p., 2002.