

Barragens de Rejeito: aspectos construtivos e características gerais

Rafael Dall' Agnol Ecco

Engenheiro Civil, Universid. Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, rafaeldallagnolecco@gmail.com

Naloan Coutinho Sampa

Professor, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, naloan.sampa@ufsc.br

Giovani Jordi Bruschi

Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Pablo Gondim de Oliveira

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, pablo.gondim.oliveira@gmail.com

RESUMO: A crescente geração de rejeitos tem evidenciado a necessidade de ampliação e construção de novas barragens de rejeito. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos no setor mineral e dos desenvolvimentos científicos na engenharia geotécnica, as rupturas dessas barragens continuam a ocorrer. Diante da necessidade crescente de armazenamento seguro de rejeitos em estruturas estáveis e de menor risco, os desafios contemporâneos da engenharia geotécnica tornam-se mais complexos e exigentes. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar aspectos gerais e construtivos das barragens de rejeito, através de uma pesquisa básica que utiliza abordagens qualitativas para os referenciais teóricos e quantitativas para os dados obtidos na literatura. Os tópicos abordados incluem tipos de barragens, métodos construtivos, mecanismos de ruptura, panorama nacional e a distribuição de rupturas no Brasil. O estudo conclui que, embora a maioria das barragens de rejeito brasileiras possua baixa classificação de risco, elas apresentam médio a alto dano potencial associado. Em relação aos métodos construtivos, a literatura não indica uma preferência clara por uma opção específica. Quanto às rupturas, observa-se um desalinhamento conceitual sobre os mecanismos e causas, com maior incidência de rupturas em barragens alteadas pelo método de montante. Além disso, há discrepâncias nas pesquisas estatísticas sobre falhas de barragens de rejeito, destacando a necessidade de mais estudos, especialmente sobre acidentes em barragens nacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de Rejeito, Métodos Construtivos. Ruptura. Mineração. Engenharia Geotécnica.

ABSTRACT: The increasing generation of tailings has highlighted the need for expansion and construction of new tailings dams. However, despite technological advances in mining and scientific developments in geotechnical engineering, failures of these dams continue to occur. With the increasing need to safely store tailings in stable and low-risk structures, the current geotechnical challenges have become more complex and demanding. In this context, this work aims to present general and constructive aspects of tailings dams through basic research using qualitative approaches for theoretical references and quantitative approaches for data obtained from the literature. The topics covered include types of dams, construction methods, failure mechanisms, national overview and distribution of failures in Brazil. The study concludes that, although most Brazilian tailings dams have a low-risk classification, they have a medium to high associated damage potential. Regarding construction methods, the literature does not indicate a clear preference for any particular option. Regarding failures, there is a conceptual misalignment regarding mechanisms and causes, with a higher incidence of failures in dams constructed using the upstream method. In addition, there are inconsistencies in statistical research on tailings dam failures, highlighting the need for further studies, especially on accidents in national dams.

KEYWORDS: Tailings Dams, Construction Methods, Failures, Mining, Geotechnical Engineering.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade essencial para o progresso econômico, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento de vários países. Considerada uma atividade tanto econômica quanto industrial, suas fases englobam a prospecção, exploração, desenvolvimento, exploração e recuperação (Hartman e Mutmansky, 2002).

No Brasil, o setor de mineração registrou uma produção mineral de 1,15 milhões de toneladas e um faturamento de R\$ 339 bilhões em 2021, representando um aumento de 7% na produção e 62% no faturamento em relação ao ano anterior (IBRAM, 2022). Esse crescimento é principalmente atribuído à extração de minério de ferro, ouro e cobre (ANM, 2021).

O beneficiamento dos minérios visa remover os minerais não aproveitáveis e aumentar a concentração dos minerais valiosos, resultando na geração de resíduos (Martins, 2016). Como observado por Nierwinski (2019), a mineração gera grandes volumes de materiais sem valor econômico, os quais, devido ao processo industrializado de produção, possuem propriedades distintas dos materiais naturais. Os resíduos da mineração podem ser classificados em estéreis e rejeitos. A proporção de estéreis ou rejeitos gerados varia de acordo com o tipo de material minerado, não sendo uniforme. Em particular, a mineração de minérios não metálicos tende a gerar mais estéreis, enquanto a mineração de minérios metálicos produz maior quantidade de rejeitos devido ao processo de transformação mineral (IBRAM, 2016).

Apesar do crescimento contínuo da atividade mineral e da consequente geração de rejeitos, avanços tecnológicos nas últimas décadas possibilitaram a exploração de jazidas minerais com teores menores de minério, resultando em uma maior produção de rejeitos (Cavalcante, 2004). Estima-se que a quantidade anual de rejeitos alcançará cerca de 684.000.000t até 2030, o dobro do volume produzido em 2010 (IPEA, 2012).

Diante da considerável quantidade de rejeitos gerados, é imperativo adotar um processo sistemático para seu descarte (Cavalcante, 2004). No Brasil, o método comum de disposição de rejeitos envolve o armazenamento em barragens, com um total de 548 dessas estruturas no país (ANM, 2022b). A norma NBR 13028 (ABNT, 2017) define a barragem de rejeito como a principal estrutura de contenção nos sistemas de disposição de rejeitos, podendo ser construída com rejeitos, solo ou enrocamento.

A crescente necessidade de armazenamento de rejeitos resulta na construção de um maior número de barragens, assim como no alteamento das barragens já existentes. No entanto, apesar dos avanços no setor mineral e na Engenharia Geotécnica, ainda ocorrem rupturas de barragens de rejeito (Roche et al., 2017), que podem afetar extensas áreas, causando prejuízos econômicos e danos significativos às comunidades a jusante e ao meio ambiente (Nierwinski, 2019). Portanto, garantir a estabilidade das barragens de rejeito permanece como um dos principais desafios da engenharia geotécnica contemporânea (Martins, 2016).

Diante do exposto, este artigo apresenta uma visão geral sobre as barragens de rejeito, visando contribuir para a revisão literária. Para isso, o artigo aborda o panorama nacional das barragens de rejeito, as práticas relacionadas à disposição de rejeitos, os métodos construtivos e os principais mecanismos de ruptura. Além disso, são discutidos estudos sobre a distribuição espacial e temporal das rupturas de barragens de rejeito.

2 PANORAMA DAS BARRAGENS DE REJEITO NO BRASIL

O incidente ocorrido em 2003 na Barragem de Cataguases direcionou a atenção do legislador federal para questões de acidentes de barragens, culminando na apresentação do Projeto de Lei 1.181/2003 (Souza e Sampaio, 2017). Mais tarde, esse projeto foi convertido na Lei ordinária 12.334, de 20 de setembro de 2010 (alterada pela Lei federal 14.066/2020), que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A PNSB tem como objetivo principal garantir padrões de segurança, regular ações nesse sentido e promover o monitoramento e acompanhamento dessas atividades. Além disso, busca ampliar o controle das barragens pelo poder público, por meio de fiscalização, orientação e correção das medidas de segurança, bem como compilar informações para auxiliar o gerenciamento da segurança das barragens pelos governos e estabelecer conformidades técnicas. A PNSB visa também promover uma cultura de segurança de barragens e gestão de riscos, determinar procedimentos emergenciais e facilitar a atuação coordenada de empreendedores, fiscais e órgãos de proteção civil em situações de acidente, incidente ou desastre (BRASIL, 2010). A PNSB abrange barragens destinadas ao represamento de água para diversos usos, à disposição final ou temporária de rejeitos, e à acumulação de resíduos industriais, desde que apresentem pelo menos uma das características exigidas (ANM, 2019).

Os instrumentos da PNSB incluem a classificação das barragens de acordo com a Categoria de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA) (BRASIL, 2010). No entanto, devido à falta de conformidade com os critérios estabelecidos, muitas barragens de rejeito não são abrangidas pela PNSB nem são classificadas em relação à Categoria de Risco, Dano Potencial Associado e Classe.

A classificação quanto à CRI avalia as barragens com base nos fatores que podem resultar em acidentes ou desastres, categorizando as barragens em grupos de risco alto, médio e baixo. Nessa avaliação, são considerados aspectos relacionados às características técnicas da barragem, seu estado de conservação e o cumprimento do Plano de Segurança da Barragem (PSB) (ANM, 2022a).

O DPA refere-se às consequências associadas ao rompimento, vazamento, infiltração ou mau funcionamento da barragem, e sua classificação divide as barragens em grupos com DPA alto, médio e baixo (ANM, 2022a). Este processo de avaliação considera o volume total do reservatório, a presença de população a jusante, e os impactos ambiental e socioeconômico. Por meio desses critérios, o DPA busca mensurar o potencial de perdas de vidas humanas, impactos sociais, econômicos e ambientais associados ao rompimento de uma barragem, independentemente da probabilidade de ocorrência desses eventos (ANM, 2022a).

A Classe é atribuída com base na combinação da CRI e do DPA, diferenciando as estruturas quanto à sua abrangência e à periodicidade das ações de segurança (ANM, 2019). A Portaria Nº 70.389 possibilita a classificação das barragens nas classes A, B, C, D e E, sendo que o nível de criticidade diminui gradativamente da classe A até a classe E.

Com relação à Classificação de Nível de Emergência (CNE), a Resolução Nº 95 (ANM, 2022a) estabelece que seu objetivo é graduar potenciais situações de emergência que possam comprometer a segurança das barragens. Essa classificação é realizada sempre que uma Situação de Emergência for declarada pelo empreendedor, classificando a estrutura de acordo com os níveis de emergência 1, 2 e 3. A avaliação conjunta de CRI, DPA e CNE fornece um retrato mais preciso da configuração atual das barragens de rejeito.

Para análise, considerando um total de 584 barragens, observa-se que cerca de 25% delas estão no estado de Minas Gerais, que possui a maior quantidade dessas estruturas. Em seguida, estão os estados do Mato Grosso e da Bahia, com 139 e 77 barragens, respectivamente. Quanto ao volume represado, Minas Gerais concentra cerca de 43% dos 4.051 milhões de metros cúbicos. O Mato Grosso e Goiás, segundo e terceiro estados com maior volume represado, concentram, respectivamente, 15,4% e 14,1% do montante total.

Os estados de Minas Gerais, Pará, Bahia e Goiás, que juntos concentram 80% da produção de commodities minerais no Brasil (Marini, 2016), são responsáveis por 52,2% das barragens, as quais represam 70,2% do volume total de rejeitos. É importante ressaltar que uma maior produção mineral não necessariamente resulta em um maior número de barragens de rejeito e/ou volume represado, uma vez que a disposição dos rejeitos pode ocorrer de outras maneiras, não obrigatoriamente através de barragens de rejeitos.

Das 584 barragens de rejeito no Brasil analisadas, apenas 329 (56,3% do total) são contempladas pela PNSB por atenderem às características determinadas pela Lei nº 12.344. Uma das características é o porte das barragens, que leva em consideração vários critérios, incluindo altura e volume represado. No entanto, não é possível afirmar com precisão a configuração das barragens contempladas pela PNSB. Por outro lado, as 255 barragens não contempladas pela PNSB são de pequeno porte e não armazenam resíduos perigosos.

Por outro lado, das 329 barragens avaliadas, 252 (76,6%) possuem risco baixo quanto à CRI, 46 (14,0%) apresentam risco médio e 31 (9,4%) apresentam risco alto de acidente. Em relação ao DPA, 195 (59,3%) barragens foram avaliadas com DPA alto, 113 (34,3%) com DPA médio e 21 (6,4%) com DPA baixo. Quanto à classificação pela Classe, que engloba o DPA e a CRI, constatou-se que 24 (7,3%) barragens receberam a Classe A (a de maior criticidade). A maioria das barragens está na Classe B, englobando 178 (54,1%) estruturas, enquanto as Classes C, D e E abrangem 106 (32,2%), 4 (1,2%) e 17 (5,2%) barragens, respectivamente.

Por fim, dentre as 584 barragens avaliadas quanto à CNE, 556 (95,2%) não apresentam emergência. As 28 (4,8%) barragens restantes estão classificadas com algum nível de emergência, sendo 17 (2,9%) no Nível 1, 8 (1,4%) no Nível 2 e 3 (0,5%) no Nível 3, o de maior criticidade.

Os indicadores acima alertam o poder público, empresas e especialistas do setor para a necessidade de revisão e controle de diversos aspectos relacionados à segurança de barragens, tanto no âmbito construtivo quanto operacional e de descomissionamento.

3 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITO

O processo de construção das barragens alteáveis geralmente começa com a construção de um dique inicial. Os rejeitos são então retidos dentro dessa estrutura até atingirem uma altura próxima à do dique. Nesse estágio, inicia-se a construção de um segundo dique sobre o primeiro, acompanhando o aumento do nível dos rejeitos. Esse processo é repetido conforme a demanda de represamento adicional (Vick, 1990).

Conforme a NBR 13028 (ABNT, 2017), as barragens alteáveis podem ou não utilizar rejeitos em sua construção. Como materiais que podem ser empregados na construção de barragens, Vick (1990) indica solos de áreas de empréstimo, rejeitos descarregados hidráulicamente ou frações grosseiras de rejeitos provenientes de descargas com ciclomag. Em complemento, Lazarim (2015) destaca que os rejeitos não são os materiais mais

adequados para a construção de estruturas hidráulicas devido à sua susceptibilidade à erosão interna (piping), erosão superficial e liquefação, além de serem desafiadores de compactar. No entanto, devido ao grande volume de rejeitos gerados e sua proximidade com o maciço da barragem, seu uso na construção das barragens torna-se economicamente atrativo para as mineradoras.

Geralmente, os métodos de montante, jusante e da linha de centro são os mais empregados para o alteamento de barragens (Vick, 1990). A nomenclatura desses métodos é atribuída à direção de avanço da crista da barragem durante os processos de alteamento.

O método de alteamento a montante é o mais antigo, simples e econômico. Consiste na construção de um dique inicial, seguido pelo lançamento de rejeitos para formar uma praia de rejeitos que servirá como base para o próximo alteamento. À medida que os rejeitos se consolidam, os alteamentos são repetidos sucessivamente até alcançar a altura desejada (Vick, 1990; Araujo, 2006) destaca que fatores como controle da superfície freática, capacidade de armazenamento de água e suscetibilidade à liquefação sísmica limitam a aplicação do método. Por exemplo, no Chile, esse método é proibido devido às condições sísmicas locais (Araújo, 2019). No Brasil, o alteamento pelo método de montante foi proibido pela Lei nº 14.066/2020. Apesar disso, devido às suas vantagens econômicas, ele foi amplamente utilizado pelas mineradoras na construção de barragens no país.

O método de alteamento a jusante envolve a construção de um dique inicial, geralmente composto por solo ou enrocamento compactado, seguido por alteamentos a jusante do dique (Araújo, 2006; Lazarim, 2015). Esses alteamentos são executados quando a estrutura atinge ou está próxima de sua capacidade de armazenamento (Bjelkevik, 2005). O método de jusante é considerado mais seguro devido ao elevado rigor construtivo. Além disso, ele permite a incorporação de núcleos impermeáveis e drenos internos, visando o controle da superfície freática. Portanto, o método de jusante é apropriado para situações em que rejeito possui grandes volumes de água (Vick, 1990). Um aspecto relevante é o controle adequado da drenagem por meio de filtros, o que reduz a chance de acúmulo de poropressão, que por sua vez diminui a resistência ao cisalhamento dos materiais (EPA, 1994). A implementação dessas medidas construtivas, juntamente com a possibilidade de compactação adequada, torna o alteamento pelo método de jusante viável, apresentando resistência à liquefação em regiões de alta sismicidade (Vick, 1990). No entanto, este método possui um custo significativo devido à necessidade de um grande volume de material (Fernandes, 2017), além de exigir um planejamento cuidadoso para reservar espaço suficiente para o avanço do pé da barragem, o que muitas vezes limita a altura final da barragem (Vick, 1990).

As barragens construídas pelo método de linha de centro são consideradas uma solução intermediária entre os métodos previamente discutidos (Araujo, 2006). Este método compartilha algumas características positivas e negativas dos métodos anteriores (Fernandes, 2017). Ele envolve a criação inicial de um dique de partida, seguido pelo lançamento subsequente dos rejeitos a partir da crista da estrutura. Os alteamentos subsequentes são realizados utilizando a praia de rejeitos, a crista da estrutura e o terreno natural como suportes. Além disso, este método permite a inclusão de um sistema de drenagem dentro da estrutura da barragem, o que reduz a altura da superfície freática e diminui a sensibilidade ao posicionamento da lagoa de decantação (Vick, 1990; EPA, 1994).

No entanto, o método de linha de centro não é adequado para armazenar rejeitos com grandes volumes de água por longos períodos (Vick, 1990; EPA, 1994) devido a sua estrutura, que possui parte dos diques apoiada diretamente sobre o rejeito, o que pode comprometer a estabilidade do maciço (Fernandes, 2017).

Quanto à resistência sísmica, as barragens alteadas com esse método são consideradas aceitáveis devido à possibilidade de compactação do corpo principal do aterro e de controle dos níveis de saturação por meio de drenagem (Vick, 1990). Mesmo que as frações finas de rejeito represadas contra a face montante da estrutura possam sofrer liquefação, as partes central e jusante da barragem podem permanecer estáveis com a compactação e drenagem adequadas (EPA, 1994).

Uma comparação detalhada entre os métodos construtivos em termos de requisitos do rejeito lançado e de descarga, adequação para o represamento de água, resistência sísmica, restrições à taxa de alteamento, requisitos do material do maciço e custo relativo é apresentada por Vick (1990).

4 RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO

As rupturas de barragens de rejeito representam uma séria ameaça, pois podem resultar na liberação de grandes volumes de água e rejeitos, com o potencial de causar devastação às comunidades a jusante e ao meio ambiente. Geralmente, as barragens estão sujeitas a diversos mecanismos de ruptura, sendo os mais comuns: deslizamento, galgamento, ruptura na fundação, erosão externa, piping e liquefação (EPA, 1994).

Os deslizamentos ocorrem principalmente quando as forças aplicadas excedem a resistência do material (Oldecop e Rodriguez, 2007). Como resultado, podem ocorrer desde pequenos desprendimentos ao longo da face da barragem até o colapso completo da estrutura (EPA, 1994). As principais causas incluem alterações no lençol

freático, vibrações induzidas, mudanças na permeabilidade da fundação e assentamento da mesma, etc. (CANMET, 1977).

A ocorrência de galgamento é caracterizada pelo escoamento da água sobre a crista da barragem, resultando na erosão da estrutura e no aumento do risco de ruptura (Roche et al., 2017). O galgamento pode ser desencadeado por fatores como precipitação excessiva, desvio inadequado de águas superficiais ou gestão deficiente da descarga de resíduos (EPA, 1994; Roche et al., 2017). Este fenômeno pode ser delineado em três estágios: i) instabilidade inicial da barragem devido ao impacto do fluxo hídrico; ii) incremento dos rejeitos no fluxo, intensificando sua energia; iii) deslocamento vigoroso do material retido e da água para jusante (Lyu et al., 2019). Todavia, os principais determinantes do impacto do galgamento incluem a taxa de escoamento sobre a crista, a duração do fluxo e a erodibilidade do material constituinte da estrutura (CANMET, 1977).

Além do galgamento, a erosão externa também provoca a erosão da face da barragem devido ao escoamento de águas pluviais ou ações de vento (particularmente em regiões áridas) em taludes íngremes (Roche et al., 2017; Yaya et al., 2017; Haeri et al., 2020; Bjelkevik, 2005; Sodré, 2021). Estratégias para prevenir ou mitigar os efeitos da erosão externa incluem a implementação de sistemas adequados de drenagem pluvial (EPA, 1994), a aplicação de cobertura vegetal (Bjelkevik, 2005) ou a aplicação de técnicas de impermeabilização.

A ruptura na fundação ocorre quando a estrutura de represamento é construída sobre solos com baixa capacidade de carga (Roche et al., 2017). Uma investigação geotécnica apropriada pode antecipar a presença de camadas com baixa resistência ao cisalhamento e identificar fissuras na rocha, possibilitando intervenções necessárias (Clarkson e Williamns, 2021). No entanto, Icold (2001) alerta para a possibilidade de ocorrência desse tipo de ruptura devido às interpretações equivocadas dos resultados de investigações geotécnicas adequadamente conduzidas.

Piping refere-se à erosão interna ao longo de um trajeto de infiltração, ocorrendo dentro ou abaixo da estrutura da barragem, resultando na formação de um fluxo concentrado (EPA, 1994; Clarkson e Williamns, 2021). Tipicamente, a infiltração se concentra em áreas mais permeáveis da estrutura, e quando o gradiente hidráulico crítico é excedido, partículas sólidas da barragem ou da fundação começam a ser carregadas, resultando na formação de um buraco ou ravina no ponto de saída da infiltração (CANMET, 1977; Knight, 2015). Este fenômeno pode ser atribuído a problemas no funcionamento ou dimensionamento do sistema de drenagem interno, compactação inadequada ou rachaduras decorrentes de assentamentos (ICOLD, 1996; Knight, 2015). No entanto, identificar precocemente esse mecanismo é desafiador. Apesar disso, a observação constante dos fluxos de infiltração em direção ao sistema de drenagem pode fornecer alguns indícios, como mudanças na coloração ou na intensidade do fluxo (ICOLD, 1996).

A liquefação é um fenômeno decorrente da diminuição significativa da resistência ao cisalhamento do material, causada pelo aumento do excesso de poropressão com a aplicação de um carregamento rápido sob condições não drenadas (Silva, 2010). Nos rejeitos de mineração, a coesão é praticamente inexistente, sendo a resistência ao cisalhamento dependente exclusivamente da parcela friccional (Nierwinski, 2019). Assim, a diminuição significativa da resistência do solo pode resultar em rupturas potencialmente catastróficas, caracterizadas por impactos extensos e deslocamentos rápidos dos materiais (Silva, 2010).

A liquefação pode ser desencadeada por carregamentos estáticos ou dinâmicos. A liquefação estática pode ocorrer devido a carregamentos estáticos, como a construção de diques de alteamento, enquanto a liquefação dinâmica pode ser causada por eventos dinâmicos, como terremotos (Penna et al., 2010). Além disso, a suscetibilidade à liquefação depende do tipo de solo, densidade relativa e da localização da linha freática (EPA, 1994).

Nierwinski (2019) enfatiza a necessidade de realizar mais estudos para compreender o comportamento dos materiais de rejeito, visando à identificação de padrões de comportamento de materiais suscetíveis à liquefação. A autora destaca que os ensaios triaxiais e de cone sísmico (SCPTu) podem ser empregados para avaliar a suscetibilidade à liquefação por meio do parâmetro de estado (ψ). Um valor positivo desse parâmetro indica uma tendência contrativa do material, sinalizando a suscetibilidade ao fluxo por liquefação. Por outro lado, um valor negativo indica uma tendência à dilatação, o que sinaliza não susceptibilidade à liquefação.

Robertson (2010) enfatiza a necessidade de cautela nos projetos de barragens de rejeitos, recomendando uma avaliação cuidadosa da suscetibilidade à liquefação da estrutura. Medidas preventivas, como o monitoramento contínuo das obras, a instalação adequada de instrumentação e a implementação de elementos filtrantes verticais, são essenciais para a construção segura de estruturas em materiais suscetíveis à liquefação (Penna et al., 2010).

5 DISTRIBUIÇÃO DAS RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO

Esta seção aborda a distribuição temporal e espacial das rupturas em barragens de rejeito, considerando as causas, os mecanismos de ruptura e os métodos construtivos. Estudos conduzidos por autores como ICOLD (2001),

Azam e Li (2010), Lyu et al. (2019) e Piciullo et al. (2022) analisaram essa distribuição temporal, resultando em conclusões similares. No entanto, diferenças observadas podem ser atribuídas à utilização de bases de dados distintas.

Quanto às causas e aos mecanismos de ruptura, é importante destacar que não existe consenso na literatura quanto à definição e abrangência de cada termo. Por exemplo, enquanto a EPA (1994) classifica o galgamento como um mecanismo de ruptura, o ICOLD (2001) o considera uma causa de ruptura.

Em relação à evolução do número de rupturas ao longo das décadas, Lyu et al. (2019) relataram que houve 2 rupturas na década de 1910, 1 em 1920, 2 em 1930, 7 em 1940, 8 em 1950, 56 em 1960, 57 em 1970, 48 em 1980, 54 em 1990, 35 em 2000 e 45 em 2010. Observa-se um aumento expressivo na quantidade de rupturas após a década de 50, seguido por uma redução nos números de falhas a partir da década de 90. Esse padrão é explicado pela conjunção de vários fatores, incluindo a grande demanda mundial por produção mineral após a reconstrução de áreas afetadas pela Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento de países recém-independentes na África e Ásia, e práticas deficientes de inspeção e manutenção das estruturas (Azam e Li, 2010; Lyu et al., 2019). A subsequente redução no número de falhas nas décadas posteriores está associada à implementação de critérios de segurança mais rigorosos e ao aprimoramento das tecnologias construtivas (Azam e Li, 2010).

A distribuição espacial de acidentes em barragens de rejeito foi investigada por Rico et al. (2008), Azam e Li (2010) e Lyu et al. (2019), os quais obtiveram resultados relativamente similares. No entanto, eventuais discrepâncias nos resultados são atribuíveis às diferenças entre as bases de dados utilizadas e aos períodos de publicação das pesquisas. Por exemplo, Liu et al. (2019) relatou que 43,49% das rupturas ocorreram na América do Norte, 19,37% na América do Sul, 15,56% na Ásia, 13,65% na Europa, 4,44% na África e 3,49% na Oceania. Em contrapartida, Azam e Li (2010), em um universo de 218 rupturas, reportaram que 35,32% ocorreram na América do Norte, 18,35% na América do Sul, 26,61% na Europa, 10,55% na Ásia, 5,96% na África e 3,21% na Austrália. Lyu et al. (2019) e Azam e Li (2010) destacaram ainda que os dados utilizados estão incompletos, não abrangendo todas as rupturas ocorridas. Vários autores alegam que essa limitação decorre, em parte, devido a não divulgação de muitas rupturas por causa da sensibilidade ou implicações legais.

Em relação à distribuição de rupturas por país no período de 1910 a 1999, Lyu et al. (2019) indicaram os seguintes números de ocorrências: Estados Unidos (95), Chile (28), Canadá (14), Reino Unido (12), Filipinas (11), Peru (11), África do Sul (8), China (7), Japão (6), Austrália (6), entre outros. Já no período de 2000 a 2018, número de ocorrências por país segue: Estados Unidos (14), Chile (10), Brasil (8), China (7), Canadá (6), Reino Unido (6), Filipinas (4), México (4), Peru (2), Austrália (2).

A análise da distribuição das rupturas sugere uma tendência de deslocamento da concentração de ocorrências de países desenvolvidos para países em desenvolvimento (Azam e Li, 2010). A maioria das rupturas em países desenvolvidos ocorreu no século XX, um período de rápido crescimento econômico para esses países. Em contrapartida, nos países em desenvolvimento, como o Brasil, a maior parte das rupturas concentra-se no século atual (Lyu et al., 2019).

Essa tendência é compatível com o desenvolvimento econômico e o nível de conhecimento em termos construtivos, de dimensionamento e de monitoramento. Isso reforça a necessidade de países em desenvolvimento darem maior atenção à segurança e estabilidade dessas estruturas à medida que suas economias crescem. Além disso, esses países podem aprender com a experiência acumulada pelos países desenvolvidos que já sofreram com rupturas de barragens (Azam e Li, 2010; Lyu et al., 2019).

A distribuição do número de rupturas em função de suas causas e mecanismos é fundamental para o desenvolvimento da engenharia e a análise de previsão de desempenho, visando a prevenção de novas rupturas de barragens de rejeito. Roche et al. (2017) identificaram que 24,9% das rupturas têm causas desconhecidas, enquanto o galgamento é responsável por 21,1% das rupturas, a instabilidade de taludes por 14,4%, terremotos por 12,9%, infiltração por 8,1%, estruturas inadequadas por 7,7%, ruptura da fundação por 7,2%, erosão externa por 3,3% e subsidência da mina por 0,5%.

Por outro lado, Rico et al. (2008) constataram que, em uma amostra de 146 rupturas, 24,66% foram atribuídas a chuvas não usuais, 14,38% a liquefação, 14,38% a causas desconhecidas, 10,13% a má gestão, 8,90% a falhas estruturais, 6,85% a *piping*, 6,16% a galgamento, 6,16% a ruptura da fundação e 4,79% a instabilidade de taludes. Além disso, Gildeh et al. (2020) observaram que entre os 61 eventos de rupturas analisados, as principais causas foram a liquefação sísmica, galgamento, instabilidade de taludes e infiltração. É importante destacar que chuvas excessivas e terremotos podem desencadear galgamento e liquefação sísmica, respectivamente. Gildeh et al. (2020) também observaram que a altura máxima das barragens rompidas devido à maioria dos mecanismos está no intervalo entre 40 e 70 metros.

Com relação à influência do método construtivo na ruptura de barragens, diversos estudos indicaram que a maioria das rupturas ocorreu em barragens alteadas pelo método de montante, seguido pelo método de jusante e, por último, pelo método de linha de centro. Piciullo et al. (2022) relataram que, dos casos de rupturas analisados,

não foram identificados os métodos construtivos em 49% dos casos, enquanto 32% foram atribuídos ao método de montante, 6% ao método de jusante e 2% ao método de linha de centro. Lyu et al. (2019) analisaram 169 casos de ruptura e observaram que 99 casos se referem ao método montante, 26 ao método jusante, 14 relacionados à linha de centro, e os casos restantes estão relacionados ao tipo de retenção de água.

É importante ressaltar que, conforme explicado por ICOLD (2001), maior número de rupturas em barragens alteadas pelo método de montante e de jusante pode ser reflexo da maior quantidade dessas estruturas em comparação às da linha de centro. Em termos percentuais, Piciullo et al. (2022) demonstraram maior frequência de rompimentos em barragens alteadas pelo método de montante (13%). A frequência de ocorrência de rupturas em barragens alteadas pelo método de jusante (7%) é menor do que a observada em barragens alteadas pelo método de linha de centro (11%). Esses resultados corroboram com a pesquisa de Franks et al. (2021), cujas análises concluíram que o método de montante é mais propenso a apresentar problemas de instabilidade, seguido pelo método de linha de centro e, por fim, o método de jusante.

6 CONCLUSÕES

O artigo abordou de forma geral o panorama das barragens de rejeito no Brasil, métodos construtivos, rupturas e a distribuição espacial e temporal das rupturas. Conclui que as consequências das rupturas reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e de um melhor entendimento do comportamento do rejeito, dos mecanismos e causas das rupturas de barragens. Esse entendimento permitirá maior segurança, prevenção de futuras rupturas, aprimoramento nos métodos de dimensionamento e nas técnicas construtivas. No entanto, a escassez de dados sólidos sobre históricos de rupturas dificulta análises estatísticas e o aprendizado com erros passados em métodos construtivos, investigação geotécnica, dimensionamento e monitoramento do desempenho. Por fim, destaca-se a necessidade de promover discussões e análises contínuas sobre a segurança das barragens, com a participação do poder público, mineradoras, projetistas, executores e comunidades, de modo a garantir que o progresso da engenharia atenda ao interesse comum no presente e no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANM. (2019) *Relatório anual de segurança de barragens de mineração 2019*. Brasília, 2019.
- ANM. (2021) *Anuário mineral brasileiro principais substâncias metálicas 2021*. Brasília.
- ANM. (2022a) *Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022*. Brasília.
- ANM (2022b). **Barragens**. [S.l.].
- Araujo, C.B. (2006) *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Dissertação - Programa de Pós-Graduação de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Azam, S., Li, Q. (2010) Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Geotechnical News*, [S.l.], v. 28(4), p. 50-53.
- Bjelkevick, A. (2005) *Water Cover Closure Design for Tailings Dams*. Luleå: Luleå University of Technology.
- BRASIL. (2010) *Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010*.
- Cavalcante, A.L.B. (2004) *Modelagem e simulação do transporte por arraste de sedimentos heterogêneos acoplado ao mecanismo de tensão-deformação-poropressão aplicado a barragens de rejeitos*. Tese - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- CANMET – Canadian Centre for Mineral and Energy Technology. (1977) *Pit slope manual*. Ottawa: Supply and Services Canada.
- Clarkson, L., Williams, D. (2021) An Overview of Conventional Tailings Dam Geotechnical Failure Mechanisms. *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 38(3), p. 1305-1328.
- EPA - Environmental Protection Agency. (1994) *Technical Report design and evaluation of tailings dams*. Washington.
- Fernandes, R.B. (2017) *Metodologia para unificação do sistema de classificação de barragens de rejeito*. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- Franks, D.M., Stringer, M., Torres-Cruz, L.A., Baker, E., Valenta, R., Thygesen, K., Matthews, A., Howchin, J., Barbie, S. (2021) Tailings facility disclosures reveal stability risks. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 11, p. 7.
- Gildeg, H.K., Halliday, A., Arenas, A., Zhang, H. (2021) Tailings Dam Breach Analysis: A Review of Methods, Practices, and Uncertainties. *Mine Water and the Environment*, [S.l.], v. 40(1), p. 128-150.
- Haeri, S.M., Motlagh, A.M., Gholami, R., Soleimani, S. (2020) Tailings Dam Failure Modes; *Recognitions and Preventions*. In: NATIONAL CONGRESS ON CIVIL ENGINEERING, Tabriz. **Proceedings....**, Tabriz: [s.n.], p. 8.

- Hartman, H., Mutmanský J. (2002) *Introductory Mining Engineering*. 2nd. ed. Reino Unido: John Wiley & Sons.
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. (2016) *Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração*. IBRAM.
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. (2022) *Setor Mineral 2021*. IBRAM.
- ICOLD. (1996) *A guide to tailings dams and impoundments*. Paris: ICOLD.
- ICOLD. (2001) *Tailings dams risk of dangerous occurrences*. Paris: ICOLD.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2012) *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas*. Brasília.
- Knight, Z. (2015) *Slope stability analysis of tailings dam embankments*. TCC – Charles Darwin University, [S.l.].
- Lazarim, T.P. (2015) *Espalhamento de rejeitos em cenários de ruptura de barragens - simulações em modelo reduzido e proposta de método para avaliação de área atingida*. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Li, Q., Chen, Z., Zhang, B., Li, B., Lu, K., Lu, L., Guo, H. (2020) Detection of Tailings Dams Using High-Resolution Satellite Imagery and a Single Shot Multibox Detector in the Jing-Jin-Ji Region, China. *Remote Sensing*. Basel, Switzerland, v. 12(16).
- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., Cao, J. A. (2019) Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering*, [S.l.], p. 18.
- MARINI, O.J. (2016) Potencial Mineral do Brasil. In: Melfi, A. J.; Misi, A.; Campos, D. A.; Cordani, U. G. (Org.). *Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. cap. 1. p. 18-31.
- Martins, Luís Fernando. (2016) *Barragens de rejeito de mineração no Brasil: principais tipos de barragens, instrumentação e monitoramento*. Especialização – Programa de Pós-Graduação Lato Sensu à distância, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém.
- Nierwinski, H. (2019) *Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração*. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Oldecop, L., Rodríguez, R. (2007) Estabilidad y seguridad de depósitos de residuos mineros. In: Rodríguez, R.; García-Cortés, A. (Ed.). *Los residuos minero metalúrgicos en el medio ambiente*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, cap. 3. p. 197-244.
- Pacheco, R.L.R. (2018) *Static liquefaction in tailings dam and flow failure*. In: *Seminario Riesgos geotécnicos*. Madrid.
- Penna, L.R., Filho, W.L.O., Araújo, L.G., Almeida, F.E. (2010) Liquefação Estática em Depósitos de Rejeitos de Mineração. In: COBRAMSEG, 2010, Gramado. *Anais....* [S.l.]: ABMS, p. 7.
- Piciullo, L., Storrøsten, E. B., Liu, Z., Nadim, F., Lacasse, S. (2022) A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, [S.l.], v. 303, p. 15.
- Rico, B., Benito, G., Salgueiro, A.R., Díez-Herrero, A., Pereira, H.G. (2008) Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, v. 152(2), p. 846-852.
- Robertson, P.K. (2010) Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [S.l.], v. 136(6), p. 12.
- Roche, C., Thygesen, K., Baker, E. (2017) *Mine tailings storage: safety is no accident*. [S.l.]: United Nations Environment Programm.
- Silva, W.P. (2010) *Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001)*. Dissertação – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- Sodré, W.W.B. (2021) Estudo da utilização da berma de equilíbrio – reforço em barragens de rejeitos: revisão bibliográfica. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 7, p. 121-140.
- Souza, L.M.C.G., Sampaio, J.A.L. (2017) Licenciamento ambiental e concessão minerária: perspectivas da política nacional de segurança de barragem. *Nomos*, Fortaleza, v. 37.1(1), p. 93-115.
- Vick, S. G. (1990) *Planning, design, and analysis of tailings dams*. 2nd ed. Vancouver: BiTech Publishers Ltd.
- Yaya, C., Tikou, B., Lizhen, C. (2017) Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine. *Inter. Jour. of Mining Scie. and Tech.*, [S.l.], v. 2(4), p. 701-710.