

Uma revisão dos acidentes em barragens de rejeito de mineração da América do Sul e o cenário brasileiro

A review of accidents in mining tailing dams in South America and the Brazilian scenario

Felipe Carlos de Araújo Leal¹; William Vieira Gomes²; Phillipy Johny Lindolfo da Silva³; Pedro Hugo de Freitas Gonçalves⁴; Osvaldo de Freitas Neto⁵; Olavo Francisco dos Santos Júnior⁶

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: felipe.leal.048@ufrn.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7764-0418>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: william.eng.vieira@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0838-7807>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: pjohny.eng@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3214-1786>

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: pedrohugodefraitas@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0140-4934>

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: osvaldocivil@ufrn.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9488-4123>

⁶ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: olavo.santos@ufrn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6646>

Resumo: Este artigo tem por objetivo analisar os acidentes de barragens de rejeito de mineração na América do Sul nos séculos XX e XXI e avaliar o cenário atual das barragens brasileiras. Através de pesquisa na literatura pode-se verificar que existem atualmente 769 barragens de rejeito registradas no Brasil, sendo 425 inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e 344 não inseridas. O método construtivo mais empregado é a execução em etapa única, sem alteamentos, representando 48,0% das barragens inseridas na PNSB e 60,2% das barragens não inseridas na PNSB. A partir da análise dos acidentes na América do Sul, observou-se que o país com maior frequência de acidentes foi o Brasil e a maior parte dos casos ocorreu na década de 2010. Além disso, 72,0% das barragens que sofreram acidentes foram construídas pelo método de alteamento à montante, o que vai de encontro ao que estabelece a literatura técnica, sobre o maior risco de instabilidade em barragens construídas através deste método.

Palavras-chave: Barragens de rejeito, Revisão, Acidentes

Abstract: This article aims to analyze accidents of mining tailings dams in South America in the 20th and 21st centuries and to evaluate the current scenario of Brazilian dams. Through a literature search, it can be seen that there are currently 769 tailings dams registered in Brazil, of which 425 are included in the National Dam Safety Policy (PNSB in Portuguese) and 344 are not inserted. The most used construction method is to execute it in a single step, without elevations, representing 48% of the dams inserted in the PNSB and 60.2% of the dams not inserted in the PNSB. By analyzing accidents in South America, it was observed that the country with the highest

frequency of accidents was Brazil and most cases occurred in the 2010s. In addition, 72% of the dams that suffered accidents were built using the upstream raising method, which is in line with what is established in the technical literature, about the greater risk of instability in dams built using this method.

Keywords: Tailings dams, Review, Accidents.

Recebido: 25/06/2021; Aceito: 14/09/2021; Publicado: 20/01/2021.

1. Introdução

Muitos países do mundo, sejam desenvolvidos ou subdesenvolvidos, necessitam diretamente da atividade de mineração para a manutenção da sua economia. Nesse contexto, observa-se que há um considerável crescimento histórico da produção mineral no mundo. Para se ter uma ideia, em 2012 a produção da mineração foi seis vezes superior ao observado em 2000, conforme destaca o International Council on Mining & Metals - ICMM (2014). O ICMM (2016) estabelece que um dos fatores para o aumento da produção mineral foi o crescimento considerável nos investimentos na América Latina, África e parte da Ásia, aliado ao forte aumento da demanda mundial por produção mineral.

À medida que a atividade da mineração se expande, aumenta-se também a geração de rejeitos, ou seja, substâncias na maioria das vezes sem valor econômico relevante, resultantes dos processos químicos e físicos da produção mineral. Os rejeitos podem ser dispostos separadamente de acordo com a granulometria, características geotécnicas, mineralógicas e periculosidade (IBRAM, 2016).

A disposição final dos rejeitos é justamente uma das grandes preocupações da atividade da mineração, de forma que a intenção é minimizar os impactos ambientais, já que são resíduos que podem apresentar um elevado potencial de contaminação e degradação ao meio ambiente. Uma destinação dos rejeitos comumente adotada no ramo da mineração é realizada através de barragens, construídas com solo natural ou com o próprio rejeito. O propósito de uma barragem de rejeitos é armazenar os resíduos com segurança para proteger o meio ambiente de agressões (INAM *et al.*, 2011; SMUDA *et al.*, 2014; XU e WANG, 2014; NAEINI e AKHTARPOUR, 2018).

Como a produção dos rejeitos de mineração é constante, as barragens geralmente são alteadas de modo a aumentar sua capacidade de armazenamento. Isso pode ser feito através de um método construtivo de alteamento à montante, à jusante ou por de linha de centro, a depender de critérios técnicos e econômicos. O método de montante, geralmente, apresenta menor custo de construção, demanda um menor consumo de material e possibilita maior velocidade de alteamento, porém, apresenta maior risco de ruptura e vulnerabilidade à vibrações e sismos, pelo fato do próprio rejeito (em geral, material de baixa qualidade geotécnica) ser utilizado como fundação da barragem. O método de jusante, por outro lado, apresenta maior segurança contra a ruptura, pelo fato do alteamento da barragem não se apoiar sobre o rejeito, e sim sobre materiais compactados de melhor comportamento geotécnico, no entanto, se constitui como um método de alteamento mais caro, que demanda um maior volume de material e uma maior área de construção. O método de linha de centro é uma alternativa intermediária entre os métodos de montante e jusante.

Conforme destaca Lyu *et al.* (2019), as barragens de rejeitos são umas das maiores estruturas construídas por engenheiros geotécnicos, porém, numa análise global, essas estruturas têm sido alvo de incidentes e rompimentos frequentes. De modo geral, de 2 a 5 das 3.500 barragens de rejeitos no mundo sofrem grandes falhas a cada ano, o que faz com que essas estruturas tenham mais que 10 vezes maior probabilidade de romper do que barragens convencionais de armazenamento e retenção de água (LEMPHERS, 2010; BERGHE *et al.*, 2011).

A grande quantidade de acidentes ocorridos em barragens de rejeitos no mundo traz a necessidade de um desenvolvimento constante nas legislações dos diferentes países, em relação ao processo de construção e monitoramento dessas barragens. No caso do Brasil, por exemplo, em função dos recentes acidentes ocorridos em Mariana, no ano de 2015 e Brumadinho, em 2019, foi instituída a lei 14066/2020 que traz disposições importantes sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. É importante destacar que a evolução histórica dos regulamentos não elimina os riscos de acidentes nas barragens de rejeito. Há riscos de rompimento em decorrência do não cumprimento das normas estabelecidas, falha na manutenção, projeto e construção, diminuição de custos, acúmulo de efluentes tóxicos, fatores meteorológicos, climáticos, falhas na fundação, infiltração e muitos outros (CARDOZO *et al.*, 2016).

Conforme relatado por Pereira (2016), os maiores produtores de rejeito de mineração são Canadá, Estados Unidos, Brasil, Austrália e China. Dos países mencionados, a China é o que mais possui problemas de rompimento, porém as informações inerentes aos acidentes não são tão divulgadas quanto nos demais países. Os países relatados são referência

em controle e em legislações sobre barragens, entretanto, no Brasil, ainda encontra-se falhas na fiscalização e na punição dos responsáveis em casos de rompimento.

No cenário sul-americano, os países mais relevantes no desenvolvimento da mineração são Brasil, Chile e Peru (INFORME FINAL V.4, 2018, Governo do Chile). Consequentemente, tais países, também, apresentam maior probabilidade de acidentes em barragens de rejeito e possuem legislações mais desenvolvidas sobre a temática.

A ruptura de uma barragem de rejeito acarreta grandes impactos socioeconômicos, com perdas financeiras, humanas e ambientais, causando inundações e poluição de corpos hídricos devido ao escoamento da polpa de rejeito por vários quilômetros além do rompimento. De acordo com o IBRAM (2016), a maioria dos casos de rompimento são atribuídos ao aumento da poropressão de forma súbita devido a grandes chuvas que propiciam a diminuição da tensão efetiva do maciço do barramento ou por liquefação causada por tremores de terra ou explosões.

Com base nos fatos citados, o presente trabalho tem por objetivo analisar os acidentes de barragens de rejeito de mineração na América do Sul nos séculos XX e XXI e avaliar o cenário atual das barragens de rejeito brasileiras.

2. Regulamentação brasileira relacionada à segurança de barragens de rejeito de mineração e o cenário sul-americano

No Brasil, cabe à Agência Nacional de Mineração (ANM) a tarefa de fiscalizar a pesquisa de lavra para o aproveitamento, bem como as estruturas decorrentes destas atividades. A Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos e a disposição final ou temporária de rejeitos. Esta lei também criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

Segundo a Lei 12.334, a PNSB tem o objetivo de garantir que padrões de segurança de barragens sejam seguidos, com vistas a reduzir as possibilidades de acidentes e suas consequências. Barragens com altura superior a 15 m e volume de armazenamento superior a 3 milhões de m³ devem ser enquadradas na PNSB. O SNISB, por sua vez, assume a atribuição de fiscalizar a implementação dos planos de segurança das barragens de mineração que devem ser elaborados pelos empreendedores.

Em complemento à lei, a portaria nº 70.389 de 17 de maio de 2017, criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens, a periodicidade da qualificação dos responsáveis técnicos e o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração. Além da legislação federal, há leis estaduais, destacando-se o estado de Minas Gerais que apresenta um significativo conjunto de leis para o licenciamento e segurança de barragens de mineração. Conta-se ainda com a NBR 13.028 (ABNT, 2017), que apresenta os requisitos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e armazenamento de água.

Toda essa política nacional tem a Agência Nacional de Águas (ANA) como peça principal, desempenhando o papel de fiscalizadora da segurança de barragens, promovendo a articulação entre os demais órgãos fiscalizadores, agindo diretamente na implementação da PNSB e gerindo o SNISB.

Devido aos acontecimentos recentes dos anos de 2015 e 2019, houve uma movimentação do setor em busca de melhorias. Foi publicada a Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019, que estabelece medidas regulatórias com vistas a assegurar a estabilidade de barragens de rejeito de mineração. A Resolução fixa prazos para a descaracterização e descomissionamento de barragens à montante e promove a inclusão de mais barragens com monitoramento automático obrigatório em tempo real e integral. Além disso, profbe-se a construção utilizando o método de alteamento à montante em todo Brasil.

Em 30 de setembro de 2020, foi instituída a Lei Federal nº 14.066 que trouxe alterações à Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), especialmente no que diz respeito à classificação de risco e Dano Potencial Associado das barragens; à elaboração e disponibilização do Plano de Segurança de Barragens; à elaboração e disponibilização do Plano de Ação e Emergência; à novas infrações administrativas e suas penalidades, relacionadas ao descumprimento de disposições da PNSB e à exigência de apresentação não cumulativa de caução, seguro, fiança, ou outra garantia real ou financeira para reparação dos danos às vidas humanas, meio ambiente e patrimônio público.

Quando se compara a Política Nacional de Segurança de Barragens do Brasil com legislações internacionais, como a Mining Association of Canada (MAC) e a Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD), que designam as diretrizes técnicas no Canadá e Austrália, respectivamente, pode-se observar que o Brasil tem uma legislação moderna, com um padrão de qualidade internacional, pois, assim como as legislações citadas:

- Se baseia em uma gestão abrangente, com um sistema de cadastro e informatização da situação quanto a segurança das barragens;
- Realiza revisões anuais com vista a melhoria dos processos;
- Elabora relatórios e implementa gestão de riscos com o objetivo de minimizar as possibilidades de impactos ambientais;
- Tem planos de respostas emergenciais para potenciais falhas.

No cenário da América do Sul, a Tabela 1 apresenta comparações de alguns aspectos da Política Nacional de Segurança de Barragens do Brasil com as regulamentações do Chile, Peru, Argentina e Bolívia, que são países relevantes no cenário da produção mineral sul-americana. Pode-se observar semelhanças e diferenças entre as normativas em questão. É interessante destacar que países como Bolívia, Chile e Peru são unitários, ou seja, atendem apenas a legislações a nível nacional, enquanto que Brasil e Argentina, além das legislações nacionais, também apresentam regulamentos específicos em suas unidades federativas.

Pela Tabela 1, observa-se que os regulamentos de todos os países impõem a necessidade de uma Avaliação de Impacto Ambiental prévia para a aprovação dos projetos de barragens de rejeito. O sistema, em geral, possui as mesmas características, ou seja, o interessado apresenta um projeto que deve atender a um determinado formato, padrões e requisitos. O projeto é examinado e, após passar por várias etapas intermediárias em que participam diferentes órgãos setoriais especializados, o projeto pode ser aprovado, contestado ou rejeitado. No Chile, Peru e Argentina, o proprietário de um projeto deve apresentar uma Declaração de Impacto Ambiental (DIA), em casos de projetos cuja execução não gera impactos ambientais negativos significativos, ou um Estudo de Impacto Ambiental (EIA), quando a execução de um projeto pode causar impactos ambientais significativos. No caso do Brasil, a legislação exige que a concessionária de mineração realize um estudo de impacto ambiental no momento do início das atividades de mineração, a fim de obter a licença prévia que é concedida pelo Ministério de Minas e Energia. Os procedimentos de licenciamento abrangem três fases distintas e sucessivas, nas quais é analisada a viabilidade ambiental do empreendimento (licenças preliminares, de instalação e de operação).

Ainda em relação à Tabela 1, percebe-se que cada país tem um órgão específico que autoriza a operação das barragens de rejeito em seu território, com exceção da Argentina, que determina que cada província, no âmbito da sua jurisdição, deve indicar as autoridades para esse fim.

Outro aspecto importante da Tabela 1 é a exigência de garantias financeiras às empresas de exploração mineral para eventual reparação de danos. Observa-se que as normativas de todos os países exige tal garantia às empresas de mineração. É importante destacar que no Brasil não havia tal obrigação até a promulgação da lei 14066/2020, a qual trouxe em seu texto que: “o órgão fiscalizador pode exigir, nos termos do regulamento, a apresentação não cumulativa de caução, seguro, fiança ou outras garantias financeiras ou reais para a reparação dos danos à vida humana, ao meio ambiente e ao patrimônio público, pelo empreendedor de barragem de rejeitos de mineração ou resíduos industriais ou nucleares classificada como de médio e alto risco ou de médio e alto dano potencial associado; e barragem de acumulação de água para fins de aproveitamento hidrelétrico classificada como de alto risco”.

Em casos de descumprimentos da lei, observa-se, pela Tabela 1, que todos os países preveem a aplicação de sanções, que podem evoluir de advertências a multas de alto valor pecuniário, sem prejuízo das demais disposições legais.

Por fim, percebe-se que países como Brasil, Chile e Peru proibem a construção das barragens pelo método de alteamento à montante, que apresenta mais suscetibilidade à ruptura. O Chile e o Peru, por serem países sísmicos, proibem tal técnica de construção há muito tempo, em prol da segurança de suas barragens. O Brasil só veio a proibir tal técnica após os acidentes ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), com a instituição da lei 14066/2020. Pela Tabela 1, observa-se que há semelhanças nas normativas dos principais países de exploração mineral da América do Sul e que cada país apresenta suas especificidades, de acordo com sua organização jurídica. No caso do Brasil, percebe-se uma importante evolução recente em sua legislação, muito em decorrência dos impactantes acidentes supramencionados. O documento intitulado Informe Final V.4 (2018), do governo do Chile, apresenta um estudo abrangente sobre as legislações de diversos países do mundo no que tange a projeto, construção e operação de barragens de rejeito de mineração, e pode ser utilizado para consultas mais aprofundadas.

Tabela 1- Aspectos de comparação entre as normativas de países sul-americanos a respeito de barragens de rejeito de mineração

PAÍSES	TÓPICOS DE COMPARAÇÃO					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

Brasil	Constituição Federal (1988); Lei 12334/2010; Portaria 7389/2017; Lei 14066/2020; NBR 13.028/2017.	Sim	Agência Nacional de Mineração	Sim	Sim	Sim
Argentina	Lei 25675/2002; Lei 24585/1995; Lei 24051/1992; Lei 1919/1986	Sim	Não existe uma autoridade específica	Sim	Sim	Não
Bolívia	Decreto Supremo 24782/1997; Lei 1333/1992; Lei 535/2014; Guia Ambiental de Barragens de Rejeitos (2001)	Sim	Secretaria Nacional de Recursos Naturais e Meio Ambiente	Sim	Sim	Não
Chile	Decreto Supremo 248/2007; Decreto Supremo 50/2015; Decreto Supremo 40/2013; Lei 19300/1994; Lei 20551/2011	Sim	Serviço Nacional de Geologia e Mineração	Sim	Sim	Sim
Peru	Resolução 19-97-EM/DGAA (1997); Lei 28090/2003; Decreto Supremo 2003-35-EM/2005; Decreto Supremo 016-93-EM/1993; Decreto Supremo 40/2014; Lei 29968/2012	Sim	Ministério de Minas e Energia	Sim	Sim	Sim

Legenda:

- (1) Principais instrumentos normativos.
 (2) Exige Avaliação de Impacto Ambiental?
 (3) Quem autoriza a operação de barragens de rejeitos?
 (4) Requer garantia financeira para eventual reparação de danos?
 (5) Prevê sanções em casos de descumprimentos?
 (6) Proíbe a construção de barragens pelo método de alteamento à montante?

Fonte: Autores (2021)

2. Metodologia

O procedimento metodológico utilizado neste artigo é mostrado na Figura 1. A partir do objetivo do trabalho, realizou-se pesquisa em duas vertentes: uma relacionada ao conhecimento do cenário atual das barragens de rejeito brasileiras em operação e outra relacionada aos acidentes ocorridos nos séculos XX e XXI nas barragens de rejeito da América do Sul.

Inicialmente, para o conhecimento do cenário das barragens brasileiras, as pesquisas foram realizadas no banco de dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), ligada ao Ministério de Minas e Energia do Governo do Brasil. A Agência tem o controle das barragens brasileiras de rejeito de mineração através do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração. Foram identificadas 769 barragens de rejeito no Brasil, a partir dos dados disponibilizados em fevereiro de 2019. Dessas, 425 estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), enquanto as 344 remanescentes não estão.

A partir de revisão da literatura, foram detectados os acidentes ocorridos em barragens de rejeito de mineração da América do Sul nos séculos XX e XXI. Foram considerados 25 casos de acidentes, com a identificação da localização das barragens, altura, tipo de minério, método construtivo e as causas das falhas ocorridas. Os casos de acidentes ocorreram no Brasil, Peru, Chile e Bolívia.

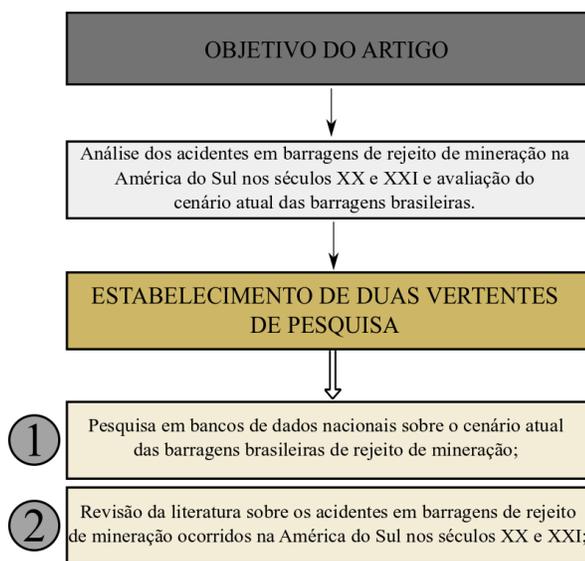


Figura 1 - Procedimento metodológico do artigo.

Fonte: Autores (2021).

3. Resultados e discussão

3.1. Cenário das barragens de rejeito de mineração do Brasil

Até o ano de 2020, foram identificados registros de 769 barragens de rejeito no Brasil, sendo 425 inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (55,3%) e 344 não inseridas (44,7%). A maior parte delas encontra-se no estado de Minas Gerais, seguido pelo Pará, São Paulo, Mato Grosso e Bahia, conforme ilustrado na Figura 2.

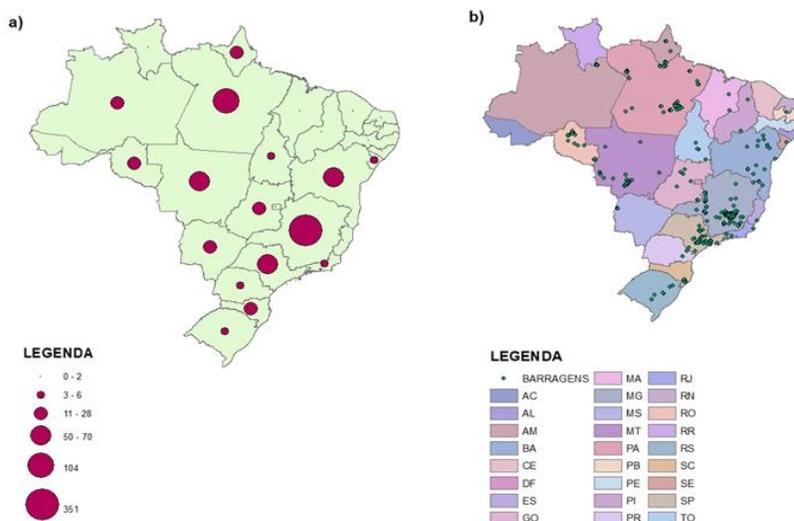


Figura 2 - a) Mapa infográfico das barragens de rejeito nos estados brasileiros; b) Disposição espacial das barragens de rejeito no Brasil.

Fonte: Autores (2021).

A Figura 3 apresenta a distribuição das alturas das barragens de rejeito no Brasil. Dentre as barragens inseridas na PNSB, a maior parte (36%) tem altura entre 10 e 20 m, enquanto apenas 1% apresenta altura superior a 100 m (Figura 3a).

Por outro lado, na Figura 3b, percebe-se que, para as barragens não inseridas na PNSB, 80% possuem altura inferior a 10 m, enquanto 20% apresentam altura entre 10 e 15 m.

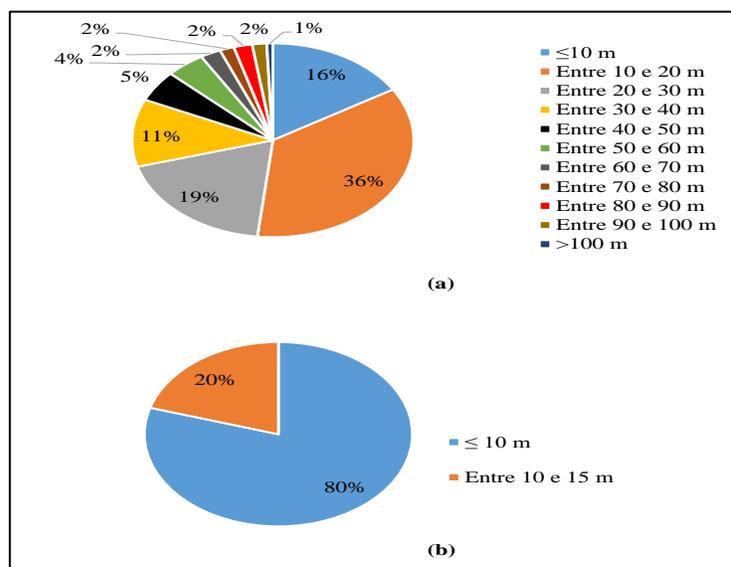


Figura 3 – Distribuição de alturas das barragens a) inseridas na PNSB; b) não inseridas na PNSB.
Fonte: Autores (2021).

Em relação aos volumes de rejeito armazenados, a Figura 4a apresenta a distribuição de volumes para as barragens inseridas na PNSB. Observa-se que a maior parte das barragens (35,8%) armazenam entre 100 mil e 1 milhão de m³ de rejeito. Para as barragens não inseridas na PNSB (Figura 4b), percebe-se que a maioria (71,8%) armazena menos que 100 mil m³ de rejeito e o maior armazenamento não passa da faixa de 3 milhões de m³.

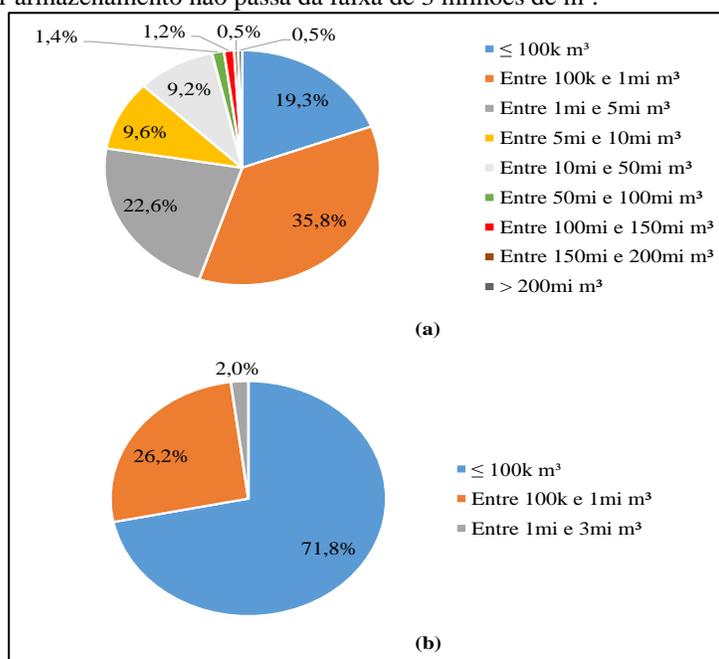


Figura 3 - Distribuição de volumes de armazenamento das barragens a) inseridas na PNSB; b) não inseridas na PNSB.
Fonte: Autores (2021).

Observa-se que as barragens inseridas na PNSB possuem tanto altura quanto volume superior às não inseridas. Isso é esperado e ocorre pelo fato da legislação brasileira tornar obrigatório o enquadramento de barragens de maior porte (altura superior a 15 m e volume acima de 3 milhões de m³) na PNSB.

A Figura 5 apresenta a quantidade de barragens em função do rejeito acumulado. Observa-se que o rejeito do minério de ferro é o mais acumulado tanto nas barragens inseridas na PNSB (Figura 5a) quanto nas não inseridas (Figura 5b). No primeiro caso há um total de 145 barragens que armazenam rejeito de minério de ferro e no segundo, 81 barragens.

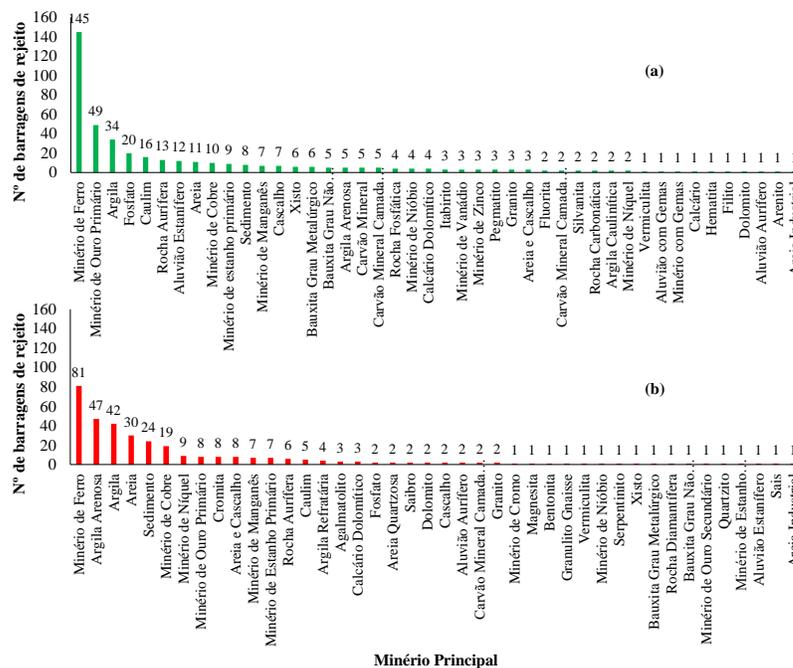
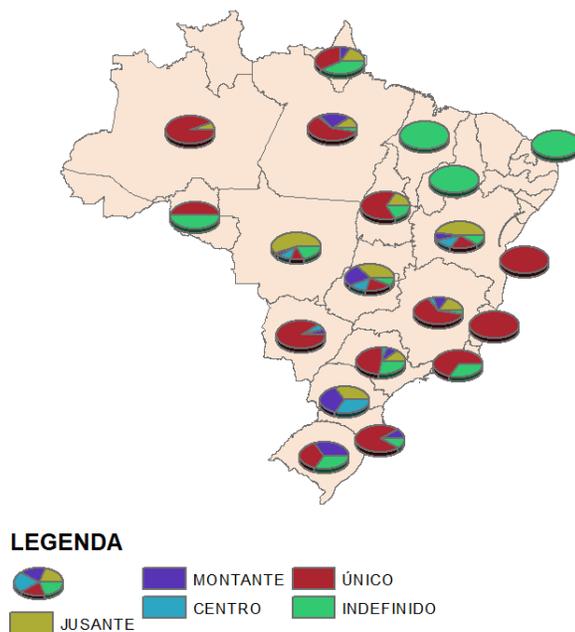


Figura 4 - Número de barragens versus rejeito acumulado (a) inseridas na PNSB (b) não inseridas na PNSB.

Fonte: Autores (2021).

Em relação ao método construtivo, a Figura 6 mostra como ocorre a distribuição entre as diferentes metodologias construtivas de barragens de rejeito no território brasileiro. É visivelmente notório que o método construtivo mais empregado é a realização de barragens sem alteamento, isto é, a construção em etapa única. No entanto, observa-se que em estados com grande produção de rejeitos, como Minas Gerais, Pará e São Paulo é comum a execução do alteamento das barragens.



*Figura 5 - Distribuição das metodologias construtivas de barragens de rejeito empregadas no território brasileiro.
Fonte: Autores (2021).*

A Figura 7 mostra, em termos percentuais, a quantidade de barragens em função do método construtivo. Para as barragens de rejeito inseridas na PNSB (Figura 7a), observa-se que o método mais empregado é a execução das barragens em uma única etapa (48% das barragens), conforme já previamente apresentado na Figura 6. Quando realizado o alteamento, o método mais empregado foi o de jusante (25,2%), seguido do de montante (19,5%) e por linha de centro (7,1%). Em relação às barragens não inseridas na PNSB (Figura 7b), o método utilizando de uma única etapa construtiva também é mais comum, ocorrendo em 60,2% das barragens, e o alteamento à montante é o menos comum (1,2%). Vale destacar que para as barragens que demandam alteamento, o método construtivo que requer o maior investimento e, de acordo com a literatura, o mais seguro, é o método de jusante, e, dentre as barragens inseridas na PNSB, foi o método mais recorrentemente utilizado. Quanto às barragens não inseridas na PNSB, o método de jusante também foi o mais utilizado nos casos de alteamento, entretanto, vale destacar que aproximadamente $\frac{1}{4}$ das barragens (23,3%) tem seu método construtivo indefinido, o que pode incorrer em riscos potenciais desconhecidos.

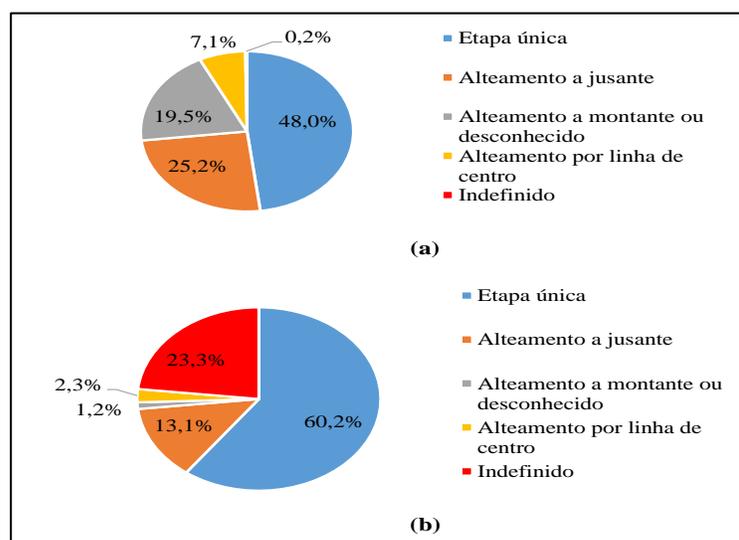


Figura 6 - Métodos construtivos empregados nas barragens (a) inseridas na PNSB; b) não inseridas na PNSB.

Fonte: Autores (2021).

Em relação às categorias de risco, apenas as barragens de rejeito inseridas na PNSB apresentam essa informação. Pela Figura 8, nota-se que a maior parte das barragens (85,2%) está em situação de baixo risco, enquanto que cerca de 15% dessas estruturas está em situação de médio e alto risco.

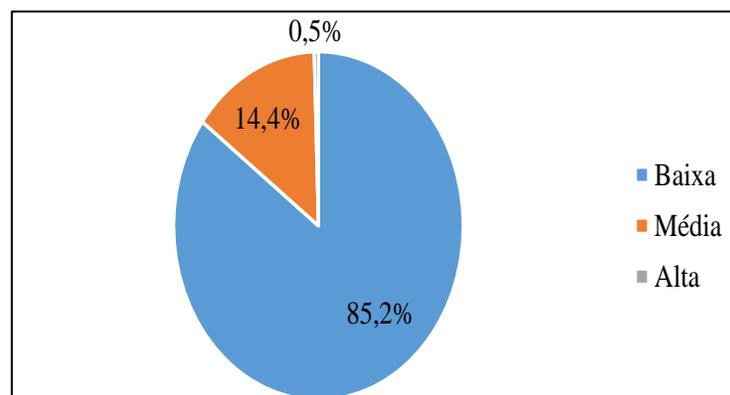


Figura 7 - Categorias de risco para as barragens inseridas na PNSB

Fonte: Autores (2021).

A Figura 9 apresenta as categorias de risco das barragens de rejeito em função do método construtivo empregado. Ratifica-se que a maior parte das barragens está numa situação de baixo risco. Apenas duas barragens foram identificadas numa categoria de alto risco, sendo ambas construídas por etapa única. Observa-se que, dentre as barragens construídas por etapa única, 27 (cerca de 13%) apresentam categoria de risco média e alta, logo cerca de 87% das barragens construídas por etapa única apresenta categoria de risco baixa. Para as barragens executadas por alçamento à jusante, 21 (cerca de 20%) se enquadram na categoria de risco média e as 80% restantes, na categoria de risco baixa. Em relação às barragens de montante, 13 (cerca de 16%) estão na categoria de risco média, logo 84% das barragens de montante estão na categoria de risco baixa. Por fim, observa-se que de todas as barragens executadas por linha de centro, apenas 2 (cerca de 7%) estão na categoria de risco média, logo 93% das barragens executadas por linha de centro estão na categoria de risco baixa.

É importante destacar que a categoria de risco de uma barragem, conforme a Política Nacional de Segurança de Barragens, não depende apenas do método executivo da estrutura, mas é função também das características técnicas, do estado de conservação e da idade do empreendimento, bem como de demais critérios definidos pelo órgão fiscalizador.

Logo, por mais que, de uma forma geral, as barragens construídas pelo método de alteamento à montante apresentem maior suscetibilidade a ocorrências de acidentes, os resultados mostram que esse não foi o fator crucial que determinou a definição da categoria de risco das barragens.

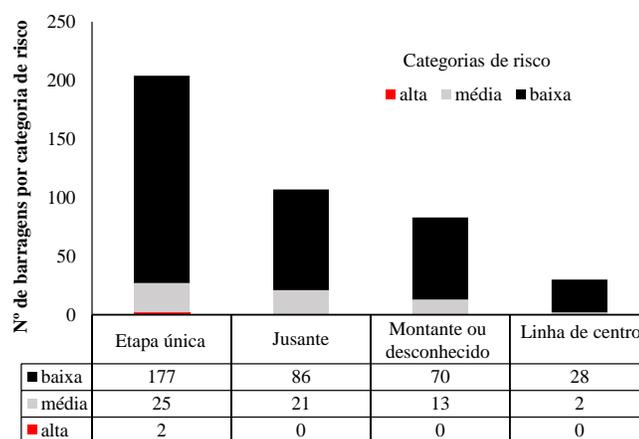


Figura 8 - Categorias de risco das barragens em função do método construtivo
Fonte: Autores (2021).

4.2. Análise dos acidentes em barragens de rejeito ocorridos na América do Sul nos séculos XX e XXI

Através de pesquisa na literatura, foram encontrados 25 casos de acidentes em barragens de rejeito de mineração na América do Sul ocorridos nos séculos XX e XXI. A Tabela 2 apresenta os casos, com a localização das barragens, altura, tipo de minério, método construtivo e as causas das falhas ocorridas. A Figura 10 mostra a localização dos acidentes, que ocorreram no Brasil, Peru, Chile e Bolívia.

Tabela 2: Acidentes ocorridos nas barragens de rejeito da América do Sul nos séculos XX e XXI.

Ano	Localização	Altura (m)	Tipo de minério	Método Construtivo	Causa do acidente
1962	Almivirca, Peru	N	N	N	Terremoto
1965	Bellavista, Chile	20	Cobre	Montante	Terremoto
1965	Cerro Negro No. 3, Chile	20	Cobre	Montante	Terremoto
1965	El Cobre New Dam, Chile	19	Cobre	Jusante	Terremoto
1965	El Cobre Old Dam, Chile	35	Cobre	Montante	Terremoto
1965	La Patagua New Dam, Chile	15	Cobre	Montante	Terremoto
1965	Los Maquis, Chile	15	Cobre	Montante	Terremoto
1985	Veta de Agua No. 1, Chile	24	Cobre	Montante	Terremoto
1985	Cerro Negro No. 4, Chile	40	Cobre	Montante	Terremoto
1986	Itabirito, Brasil	30	N	Gravidade	Estrutural
1993	Marsa, Peru	N	Ouro	Montante	Galgamento
1996	Amatista, Peru	N	N	Montante	Terremoto
1996	El Porco, Bolívia	N	Zinco, chumbo e prata	Montante	Galgamento
2001	Nova Lima, Brasil	N	Ferro	Montante	N
2007	Miraí, Brasil	35	Alumínio	N	Fortes chuvas
2009	Barcarena, Brasil	N	Alumínio	Montante	Fortes chuvas
2010	Huancavelica, Peru	N	Cobre	Montante	N

2014	Mina Herculano, Itabirito, Brasil	N	Ferro	Montante	N
2015	Mariana, Brasil	90	Ouro	Montante	Fortes chuvas
2018	Huancapatí, Peru	N	N	N	Fortes chuvas
2018	Barcarena, Brasil	N	Alumínio	Montante	Fortes chuvas
2019	N ^ª Sr ^a Livramento, Brasil	15	Ouro	Jusante	N
2019	Mina Cobriza, Huacavélica, Peru	N	Cobre	Montante	N
2019	Machadinho d'Oeste, Brasil	N	Estanho	N	Fortes chuvas
2019	Brumadinho, Brasil	86	Ferro	Montante	<i>Creep</i>

Nota: N - Informações não obtidas.

Fonte: Autores (2021).



Figura 9 - Mapa de localização dos acidentes nas barragens de rejeito da América do Sul nos séculos XX e XXI.

Fonte: Autores (2021).

A Figura 11 apresenta a evolução temporal dos acidentes nas barragens de rejeito. Percebe-se que o maior número de acidentes ocorreu na década de 2010 (9 casos). É interessante observar que a partir da década de 1960 o número de acidentes reduziu e se manteve estabilizado, apresentando um aumento substancial na década de 2010. A Figura 12 mostra os números de acidentes por país e observa-se que o Brasil é o país onde mais ocorreram acidentes na América do Sul (10 casos), seguido de Chile, Peru e Bolívia. A Figura 13 mostra os tipos de minérios armazenados nas barragens que sofreram acidentes. Percebe-se que em 40% dos casos as barragens armazenavam rejeitos de cobre.

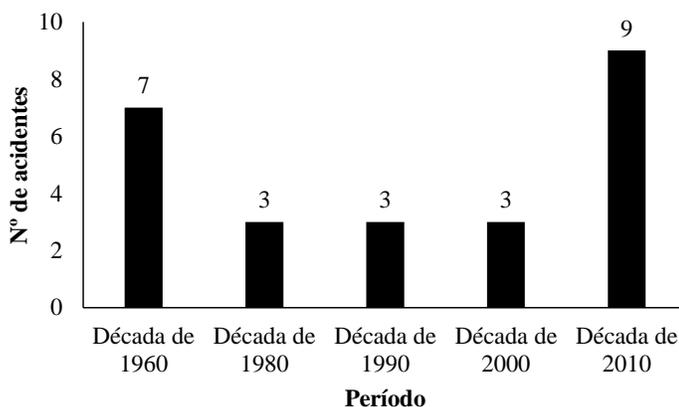


Figura 10 - Evolução temporal dos acidentes nas barragens de rejeito.
Fonte: Autores (2021).

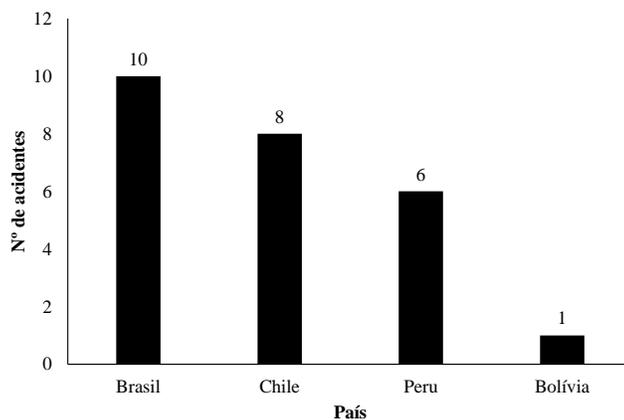


Figura 11 - Número de acidentes nas barragens de rejeito por país.
Fonte: Autores (2021).

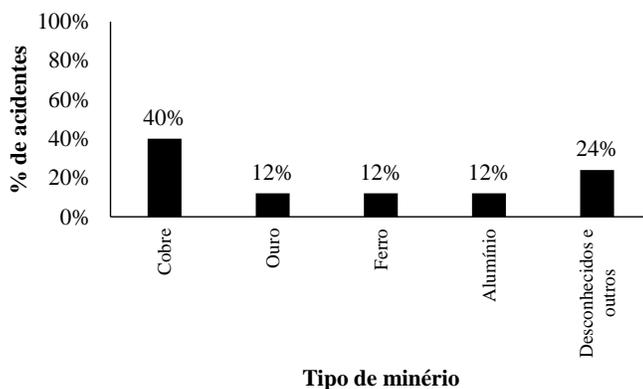


Figura 12 - Quantidade percentual de acidentes em função do tipo de minério armazenado.
Fonte: Autores (2021).

No que se refere às causas que provocaram os acidentes nas barragens, pela Figura 14, observa-se que a causa mais frequente foi a ocorrência de terremotos (40% dos acidentes), os quais ocorrem principalmente no Chile. Acidentes após fortes chuvas também foram frequentes, representando 24% dos casos e ocorreram principalmente no Brasil.

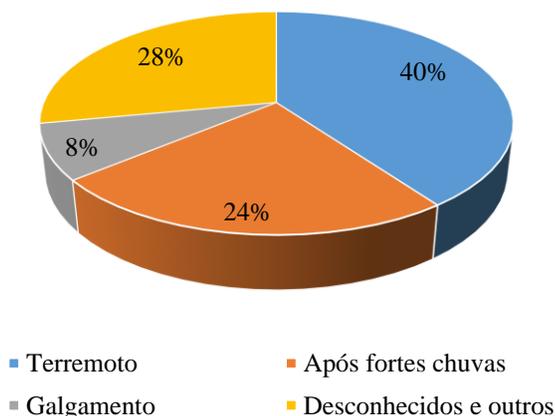


Figura 13 - Causas dos acidentes nas barragens de rejeito.
Fonte: Autores (2021).

A Figura 15 apresenta a quantidade percentual de acidentes nas barragens de rejeito em função do método construtivo. Percebe-se que 72% das barragens que romperam apresentavam o método construtivo de alteamento à montante, o que vai de encontro ao observado por Lyu et al. (2019), que mostraram que quase 60% das barragens que sofreram acidentes no mundo nos séculos XX e XXI possuíam esse método construtivo. Isso confirma o que a literatura técnica estabelece a respeito do método de alteamento à montante, que, apesar de trazer mais economia, é mais susceptível à instabilidade

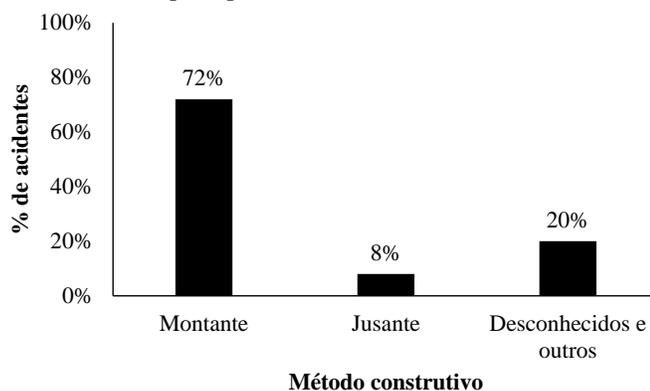


Figura 14 - Quantidade percentual de acidentes nas barragens de rejeito em função do método construtivo
Fonte: Autores (2021).

Na análise das principais causas dos acidentes nas barragens de rejeito na América do Sul (terremotos e fortes chuvas), a Figura 16(a) mostra que dentre todas as barragens que sofreram acidentes devido a terremotos, 80% apresentavam método de construção por alteamento à montante. Tal constatação corrobora com as indicações da literatura, que apontam para o alto risco de instabilidade de barragens de montante frente à ações sísmicas. É por essa situação que países sísmicos, como o Chile e o Peru, proibem a técnica de construção de barragens por alteamento à montante. O Informe Final V.4 (2018), do governo do Chile, destaca que Chile e Peru, por serem países com sismicidade ativa, não implementam o método de construção de montante, por representar um alto risco de colapso e informa que quase todos os acidentes e rompimentos de barragens de rejeitos ocorridos no mundo foram em estruturas construídas pelo método de montante.

Em relação à Figura 16(b), observa-se que dentre as barragens que romperam após fortes chuvas, o que ocorreu principalmente no Brasil, 50% eram construídas pelo método de alteamento à montante. Isso demonstra mais uma vez a elevada vulnerabilidade desse tipo de barragem frente a acontecimentos naturais instabilizantes.

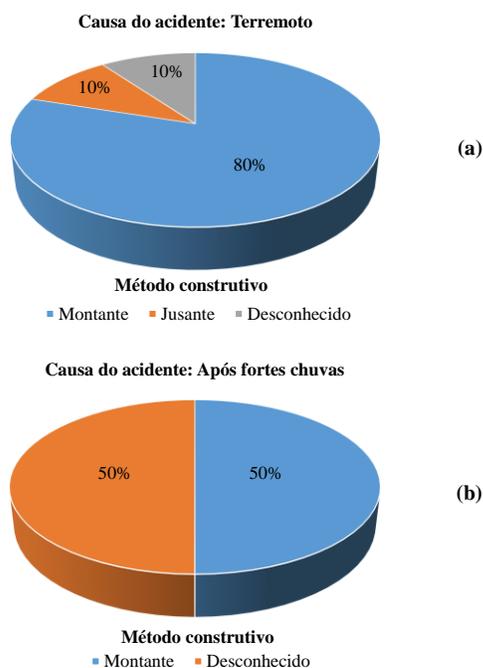


Figura 15 - Relação entre o método construtivo das barragens de rejeito e as causas de acidentes por: (a) Terremoto; (b) Após fortes chuvas
Fonte: Autores (2021).

Tratando especificamente dos acidentes que ocorreram no Brasil, a Figura 17 apresenta a relação entre as causas dos acidentes e os métodos construtivos empregados nas barragens. A principal causa de acidentes em barragens de rejeito no Brasil está relacionada a ocorrência de fortes chuvas, com 5 casos, sendo 3 destes em barragens construídas pelo método de montante. O próprio estudo do governo do Chile (Informe Final V.4, 2018), destaca que enquanto o Chile e o Peru observam mais o risco sísmico, no Brasil a preocupação especial está relacionada à implantação de sistemas de drenagem para evitar inundações, além de medidas para evitar a erosão hídrica das barragens.

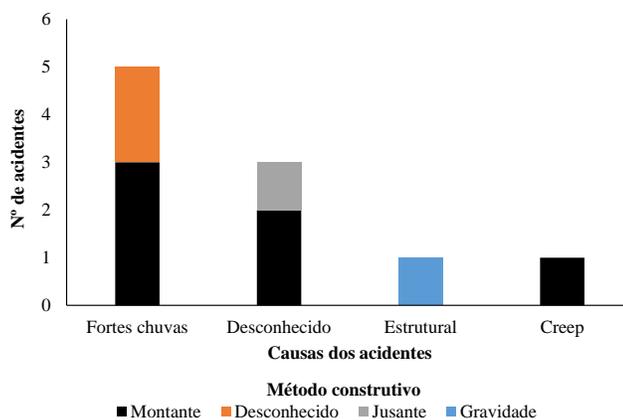


Figura 16 - Relação entre as causas de acidentes em barragens de rejeito no Brasil e seu método construtivo
Fonte: Autores (2021)

A Figura 18 sintetiza que dentre os 10 acidentes constatados nas barragens de rejeito brasileiras nos séculos XX e XXI, seis ocorreram em barragens construídas pelo método de montante, atestando mais uma vez para o elevado risco desse tipo

de construção, corroborando com o que estabelece a literatura. Tal situação mostra a necessidade de uma legislação nacional mais rigorosa quanto à execução de barragens por alteamento à montante. De fato, os acidentes recentes em barragens de montante em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) impulsionaram uma atualização na Política Nacional de Segurança de Barragens no Brasil. A instituição da lei 14066/2020 proíbe a construção ou alteamento de barragens pelo método de montante no Brasil. Tal situação representa um avanço que era necessário na regulamentação nacional, conforme mostram os dados obtidos neste trabalho.

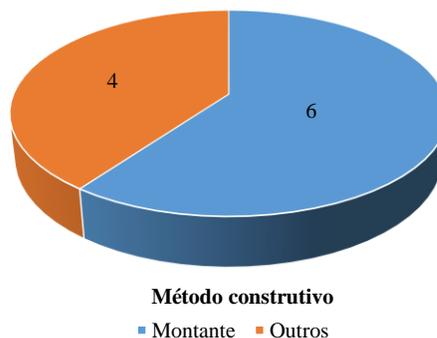


Figura 17 - Número de acidentes em barragens de rejeito no Brasil em função do método construtivo
Fonte: Autores (2021).

4. Considerações finais

De acordo com o que foi apresentado nesse artigo, a respeito do cenário brasileiro de barragens de rejeito de mineração, pode-se concluir que:

- A maior parte das barragens encontra-se no estado de Minas Gerais, seguido pelo Pará, São Paulo, Mato Grosso e Bahia.
- O rejeito do minério de ferro é o mais acumulado nas barragens brasileiras.
- O método construtivo mais empregado é a execução de barragens em etapa única, sem alteamento, representando 48% das barragens inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e 60,2% das barragens não inseridas na PNSB.
- Pode-se concluir que a técnica mais empregada para o alteamento das barragens de rejeito é a técnica de jusante, a qual se caracteriza pelo maior nível de investimento demandado e que proporciona a maior segurança no tocante à sua estabilidade;
- Em relação à categoria de risco para as barragens de rejeito inseridas na PNSB, nota-se que a maior parte delas (85,2%) encontra-se em situação de baixo risco;
- Dentre as 769 barragens de rejeito registradas no Brasil, 344 barragens (44,7%) não estão inseridas na PNSB e destas, cerca de 23,3% não apresentam qualquer informação a respeito do método construtivo utilizado. A falta de controle e informações básicas dessas barragens de rejeito pode ser entendida como um fator que pode potencializar o risco associado a essas estruturas.

No que se refere aos acidentes envolvendo barragens de rejeito de mineração na América do Sul nos séculos XX e XXI, pode-se concluir que:

- A maior parte dos acidentes ocorreu na década de 2010 e o país com maior frequência de acidentes foi o Brasil, seguido de Chile, Peru e Bolívia.
- A causa mais comum para o rompimento das barragens analisadas foi a ocorrência de terremotos (40% dos casos).
- 72% das barragens que sofreram acidentes foram construídas pelo método de alteamento à montante.
- A principal causa de acidentes em barragens de rejeito no Brasil está relacionada a ocorrência de fortes chuvas.
- Dentre os 10 acidentes constatados nas barragens de rejeito brasileiras nos séculos XX e XXI, seis ocorreram em barragens construídas pelo método de montante.

Por fim, pode-se concluir que o Brasil necessitava de uma atualização na sua Política Nacional de Segurança de Barragens, sobretudo na questão da proibição da execução e alteamento de barragens pelo método de montante, o que ocorreu com a instituição da lei 14066/2020. Portanto, em comparação com os principais países da América do Sul e países de referência mundial, como Austrália e Canadá, o Brasil tem uma legislação de qualidade no que se refere à segurança de barragens de rejeito de mineração. O grande número de acidentes observado no país nos últimos anos mostra que, no momento, talvez seja necessário a intensificação da fiscalização e monitoramento das barragens de rejeito pelas autoridades competentes.

Referências

- ANCOLD. *Guidelines on Tailings Dams – Planning, Design, Construction, Operation and Closure – Revision 1 (July 2019)*. Disponível em: <https://www.ancold.org.au/>.
- ANM. *Resolução nº 13, de 8 de Agosto de 2019*. Disponível em: <https://www.in.gov.br>.
- ANM. *Classificação das barragens de mineração brasileiras*. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/>.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). *NBR 13.028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2017.
- Berghe, J. F. V.; Ballard, J. C.; Pirson, M.; Reh, U. *Risks of tailings dams failure*. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Risk and Safety (ISGSR)*, v. 2, n. 3, 6, Munich, Germany, June 2011.
- Cardozo, F. A. C.; Pimenta, M. M.; Zingano, A. C. *Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão*. *Holos*, v. 8, n. 32, 77-85, 2016.
- Chronology of major tailings dam failures*. Disponível em: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
- DNPM. *Portaria do Diretor Geral do DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017*. Disponível em: <https://www.gov.br>.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração*; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. Brasília, BR: IBRAM, 2016. 128p.
- ICMM. *The role of mining in national economies (2nd edition)*. *Mining's contribution to sustainable development*. London, UK: ICMM, 2014. 56p.
- ICMM. *Role of mining in national economies - third edition*. London, UK: ICMM, 2016. 68p.
- Inam, E.; Khantotong, S; Kim, K. W.; Tumendemberel, B; Erdenetsetseg, S.; Puntsag, T. *Geochemical distribution of trace element concentrations in the vicinity of Boroo gold mine, Selenge Province, Mongolia*. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 33, n. 1, 57–69, 2011.
- Informe Final V.4. Estudios de Normativas Internacionales de Diseño, Construcción, Operación, Cierre y Post Cierre de Depósitos de Relaves*. SERNAGEOMIN, Ministerio de Minería, Chile, 2018.
- Lempfers, N. *Could the Hungarian tailings dam tragedy happen in Alberta?*, 2010. Disponível em: <http://www.pembina.org>.
- Lyu, Z.; Chai, J.; Xu, Z.; Qin, Y.; Cao, J. *A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History*. *Advances In Civil Engineering*, v. 2019, 1-18, 2019.
- Naeini, M.; Akhtarpour, A. *Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 107, 179–194, 2018.
- PEREIRA, O. F M. *Análise da Classificação de Barragens de Contenção de Rejeitos no Brasil, quanto ao Critério de Categoria de Risco*. 55f. *Dissertação (Mestrado) - Curso de Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais*, Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável, Belém, PA, 2016.

Planalto. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Portaria 70. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>.

Planalto. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Portaria 70. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>.

Smuda, J.; Dold, B.; Spangenberg, J. E.; Friese, k.; Kobek, M. R.; Bustos, C. A.; Pfeifer, H. R. Element cycling during the transition from alkaline to acidic environment in an active porphyry copper tailings impoundment, Chuquicamata, Chile. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 140, 23–40, 2014.

Pfeifer, H.R. Element cycling during the transition from alkaline to acidic environment in an active porphyry copper tailings impoundment, Chuquicamata, Chile. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 140, p. 23–40, 2014.

Tailings info, Tailings Related Accidents-Failures, Breaches and Mudflows, 2018. Disponível em: <http://www.tailings.info/knowledge/accidents.htm>.

TSM Guiding Principles (2019). Disponível em: <https://mining.ca/towards-sustainable-mining/tsm-guiding-principles/>

The Mining Association of Canada (MAC). **A Guide to the Management of Tailings Facilities**. version 3.1, Canadá, 2019. Disponível em: <https://mining.ca/>.

Xu, B.; Wang, Y. Stability analysis of the Lingshan gold mine tailings dam under conditions of a raised dam height. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 74, n. 1, 151–161, 2015