

Compilação de Guias e Melhores Práticas Mundiais Aplicados a Empilhamentos de Rejeitos de Mineração Desaguados

Matheus Wanglon Ferreira

Especialista em Recursos Minerais, ANM, Belo Horizonte, Brasil, matheus.wanglon@anm.gov.br

Pedro Dionelo Lacerda

Especialista em Recursos Minerais, ANM, Belo Horizonte, Brasil, pedro.lacerda@anm.gov.br

Flávio Henrique Carvalho Cardoso

Especialista em Recursos Minerais, ANM, Belo Horizonte, Brasil, flavio.cardoso@anm.gov.br

RESUMO: As discussões no setor mineral brasileiro em relação a métodos alternativos para disposição de rejeitos se intensificaram após os recentes acidentes ocorridos em 2015 e 2019 nas cidades de Mariana/MG e Brumadinho/MG, respectivamente, envolvendo barragens destinadas a tal finalidade. Diante desse panorama, o método de empilhamento de rejeitos desaguados tem sido crescentemente adotado por diversas mineradoras no país. Esta abordagem visa principalmente, no contexto nacional, mitigar os possíveis danos inerentes às estruturas de disposição de rejeitos em caso de ruptura. Contudo, este cenário trouxe à tona a escassez de diretrizes tanto para projetos quanto para procedimentos aplicados à construção, manutenção e operação de tais empilhamentos. Nesse contexto, buscando consolidar as informações publicadas, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica do cenário nacional e global, elencando os principais pontos abordados em recomendações, normas e guias relacionados à prática de disposição de rejeitos desaguados em pilhas. Ao final do estudo, demonstra-se que, no cenário nacional, o setor mineral dispõe, na atualidade, apenas da norma NRM-19 (Brasil, 2001) que apresenta considerações e critérios que devem ser admitidos a toda e qualquer estrutura com a finalidade de dispor rejeitos de mineração, além de seção específica destinada a requisitos para disposição em pilhas. Já no contexto global, constatou-se também uma escassez de documentação associada ao tema, sobretudo no que se refere à legislação e regulação, porém se destacou, ao longo do artigo, os países e instituições que desenvolveram, até o presente momento, os principais estudos, guias e diretrizes relacionados ao assunto.

PALAVRAS-CHAVE: Disposição de Rejeitos, Empilhamentos de Rejeitos Desaguados, Pilhas de Rejeitos, Rejeitos de Mineração, Regulação.

ABSTRACT: Discussions in Brazilian mining sector regarding alternative methods for tailings disposal have intensified following the recent accidents that occurred in 2015 and 2019 in the cities of Mariana/MG and Brumadinho/MG, respectively, involving dams designed for such purposes. Within this context, the dewatered tailings stacking method has been increasingly being adopted by several mining companies in the country. This approach primarily aims to mitigate potential inherent damages associated with tailings disposal structures in case of rupture. However, this scenario has brought to light the lack of guidelines for both projects and procedures applied to the construction, maintenance, and operation of these stacks. In this context, aiming to consolidate published information, the present study provides a literature review of the national and global scenarios, listing the main topics addressed in recommendations, standards, and guides related to the practice of dewatered tailings disposing in piles. At the end of the study, it is demonstrated that, within the national scenario, the mining sector currently has only the standard NRM-19 (Brazil, 2001), which presents considerations and criteria that must be adhered to by any structure intended for mining tailings disposal, as well as a specific section dedicated to requirements for disposal in piles. In the global context, a scarcity of documentation associated with the topic was also observed, particularly regarding legislation and regulation, however, the article highlights the countries and institutions that have developed, up to the present moment, the main studies, guides, and directives related to the subject.

KEYWORDS: Talings disposal, Dewatered Tailings Stacking, Dry Stacking, Mine Tailings, Regulation.

1 INTRODUÇÃO

As discussões no setor mineral brasileiro em relação a métodos alternativos para disposição de rejeitos se intensificaram após os recentes acidentes ocorridos em 2015 e 2019 nas cidades de Mariana/MG e Brumadinho/MG, respectivamente, envolvendo barragens destinadas a tal finalidade. Diante desse panorama, o método de empilhamento de rejeitos desaguados tem sido crescentemente adotado por diversas mineradoras no país. Esta abordagem visa principalmente, no contexto nacional, mitigar os possíveis danos inerentes às estruturas de disposição de rejeitos em caso de ruptura. A mitigação mencionada é obtida, sobretudo, pela redução significativa do teor de água proveniente do processo de beneficiamento mineral, usualmente presente neste material. A redução do teor de água resulta na alteração da consistência dos rejeitos e, conseqüentemente, nos seus parâmetros reológicos, além de aumentar a resistência e reduzir a deformabilidade do material.

Contudo, este cenário trouxe à tona a escassez de diretrizes tanto para projetos quanto para procedimentos aplicados à construção, manutenção e operação dos empilhamentos de rejeitos. Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica do cenário nacional e global, elencando e consolidando os principais pontos abordados em recomendações, normas e guias relacionados à prática de disposição de rejeitos desaguados em pilhas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida a partir do levantamento e revisão de materiais publicados que trouxessem considerações de âmbito técnico para a fase do projeto, manutenção e operação, aplicáveis a empilhamento de rejeito desaguado. Esses materiais foram subdivididos em três categorias: (1) literatura técnica especializada; (2) guias nacionais e internacionais da indústria de mineração; e (3) legislação e regulação nacional e internacional.

A revisão da literatura técnica especializada contempla dois livros amplamente utilizados como referências sobre a disposição de resíduos de mineração em geral, além de diversos artigos publicados, tanto em anais de congressos como em periódicos científicos, específicos para pilhas de rejeitos desaguados, tratando-se, na sua ampla maioria, sobre rejeitos filtrados.

Com relação aos guias da indústria, foram estudados três guias (ICMM, 2021, MAC, 2021 e IBRAM, 2019) aplicáveis a empilhamentos de rejeito desaguado. Dentre eles, em dois (ICMM, 2021 e IBRAM, 2019) foram identificados aspectos técnicos de projeto que serão citados neste trabalho.

No que tange a documentos de teor legislativo ou regulatório, foram estudadas diversas normativas que regulam a construção ou operação de estruturas ou instalações de disposição e armazenamento de rejeitos, principalmente as associadas a países onde a atividade mineral e sua regulação são presentes. Foram descritos e destacados, em especial, trechos que se aplicam especificamente à metodologia de disposição de rejeito de mineração desaguados em pilhas

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item, os documentos analisados são organizados em três categorias distintas, conforme mencionado anteriormente. Cabe ressaltar que este artigo não pretende abordar toda a literatura disponível sobre o assunto. No entanto, através da consolidação apresentada, faz-se possível entender o estado atual do conhecimento no campo dos empilhamentos de rejeitos desaguados e identificar possíveis lacunas tecnológicas a serem preenchidas.

3.1 Literatura técnica especializada

Embora não se tenha encontrado livros específicos sobre a metodologia de empilhamento de rejeitos de mineração desaguados, existem importantes referências sobre a disposição de resíduos de mineração em geral. Nesse contexto, destacam-se os livros elaborados por Blight (2010) e Hawley & Cuning (2017) que, apesar de tratarem o assunto de forma ampla, os conceitos e as metodologias apresentadas são de extrema relevância para a conjuntura das estruturas de interesse neste estudo.

Ambos os autores abordam primeiramente questões relacionadas a estudos iniciais, como avaliação locacional para instalação das estruturas, mapeamentos geológicos e investigações geológico-geotécnicas

preliminares. Evidentemente, à medida que as fases do projeto avançam, as informações devem ser detalhadas e o autor apresenta metodologias para tal. Além disso, são discutidos os conceitos e apresentadas sugestões de parâmetros que podem ser utilizados como balizadores iniciais pela comunidade técnica, incluindo critérios de projeto no que tange a parâmetros geométricos, inclinações e alturas usuais de taludes e largura mínima de bermas, espessuras de camadas de compactação, controle de percolação e sistema de drenagem interna e superficial, além do monitoramento da bacia hidrológica e o impacto advindo da implantação da estrutura.

Blight (2010) também aborda taxas de erosão aceitáveis e problemáticas associadas ao vento, dedicando atenção especial à possibilidade de geração de poeiras e seus impactos, que não devem ser negligenciados, especialmente em um raio de 10 km na direção do vento predominante.

No que tange à literatura técnica, também foram pesquisados e estudados artigos publicados em anais de congressos e periódicos científicos desenvolvidos especificamente para pilhas de rejeitos, tratando-se, na sua ampla maioria, de rejeitos filtrados. A partir, em especial, do início dos anos 2000, observa-se a existência de trabalhos discutindo alternativas aos procedimentos convencionais para a gestão de rejeitos (Davies & Rice, 2001), o que se intensificou após 2010, com diversos autores expondo tendências emergentes na concepção de projetos. Davies et al. (2010) apontam Chile, Canadá e Austrália como referências na prática de rejeitos desaguados e já indicavam que o incremento da produtividade em plantas de filtragem poderia deixar de ser um fator limitante havendo interesse do setor e avanço da tecnologia disponível.

Posteriormente, Davies (2011) propõe um guia prático para projetos e desenvolvimento de pilhas de rejeitos, apontando questões relacionadas, entre outras, ao teor de umidade alvo, aos ensaios necessários em diferentes fases do projeto, às análises locais, às condicionantes geotécnicas e à gestão das águas que, por sua vez, deve compreender dois sistemas em projeto, atentando para a qualidade ambiental da água que entrou em contato com o rejeito. Assim como em Blight (2010), Davies (2011) menciona a possibilidade de formação de poeira em demasia como uma consideração chave de projeto, especialmente em termos ambientais, fator este também abordado mais recentemente por Cacciuttolo & Pérez (2022) que indicam a necessidade de se adotar medidas para mitigação.

Subsequentemente, o termo “teor de umidade alvo” ganha destaque em outros trabalhos, como Lara et al. (2013), Crystal & Hore (2018) e Ulrich (2019), consistindo em um critério de suma importância para os empilhamentos de rejeito. A possibilidade de prever o zoneamento das pilhas de rejeito é discutida em Davies (2011), admitindo-se uma zona estruturante, cujas especificações de projeto devem ser atendidas, e uma zona não estruturante, visando flexibilizar a produção e condicionar o material que, por algum motivo, venha a apresentar algum desvio não tolerado em projeto durante a operação. Nesse aspecto, Lara et al. (2013) sugerem que essa abordagem seja considerada em áreas que não apresentem taludes altos e acidentados (>20%) e alta sismicidade (>0,25g).

Lupo & Hall (2010) discutem taxa de empilhamento, altura da estrutura, percolação e infiltração, resistência e compressibilidade. Segundo os autores, a altura da pilha está diretamente relacionada com a compressibilidade do solo, pois, dependendo da combinação entre níveis de tensões, alteração da porosidade e, conseqüentemente, saturação do material, podem surgir problemas com a estabilidade da estrutura. De acordo com o exposto pelos autores, torna-se importante que os ensaios de laboratório sejam realizados admitindo a variabilidade do peso específico aparente seco e do teor de umidade, buscando refletir as ocorrências de campo. Outro ponto relevante do estudo é a indicação de projetos que obtiveram sucesso ainda que envolvendo rejeitos filtrados com alto teor de finos (15% a 35% do total de partículas com granulometria inferior a 0,06 mm, limítrofe estabelecido entre silte e areia fina, segundo a ABNT NBR 6502:2022). Cabe mencionar que, conforme pontuado por Lara et al. (2013), outras características, além do teor de finos, são relevantes para a filtrabilidade, como, por exemplo, a mineralogia e a densidade específica.

Entre outros aspectos, recomenda-se em Lara et al. (2013) que a compactação dos rejeitos ocorra no ramo seco, visando a obtenção de materiais mais resistentes e a flexibilização da operação frente à ocorrência de precipitações moderadas. Além disso, um dos principais diferenciais do trabalho de Lara et al. (2013) é a indicação dos parâmetros a serem monitorados na estrutura e no entorno, inclusive indicando valores usuais. Outra recomendação importante é de que o rejeito advindo da planta de filtragem apresente um teor de umidade inferior ao limite de liquidez (LL) para evitar que ocorra mudança de estado durante o transporte ou disposição.

Em Caldwell & Crystal (2015) e Crystal & Hore (2018), tem-se contribuições em forma de guias para projetos, construção e operação dessas estruturas, fundamentadas em suas experiências profissionais. Esses trabalhos apresentam questões que vão além do que já foi exposto no presente item. Por exemplo, em relação ao ajuste do teor de umidade para compactação, os autores propõem, além de procedimentos mecânicos, a

adição de cal e cimento em quantidades que variam de 0,5% a 1,5%. Quanto à taxa de construção, os autores mencionam que a recomendação de limitar o alteamento em 2,0 m por ano segue sendo uma boa prática. No que diz respeito ao controle das poropressões no maciço, indicam a instalação de drenos verticais pré-fabricados (*wick drains*) para auxiliar na dissipação, caso seja necessário. Além disso, esses autores identificam diversos riscos associados à pilha de rejeitos, como a instabilidade de taludes naturais no entorno da estrutura, erosões decorrentes de eventos pluviais significativos, desenvolvimento de excesso de poropressão, infiltração excessiva de água subterrânea, eventos sísmicos, entre outros.

O trabalho apresentado por Cacciuttolo & Pérez (2022) se torna especialmente relevante para a discussão por expor, além de uma consolidação de diversos aspectos já sugeridos em estudos anteriores, um conjunto expressivo de informações relacionadas a pilhas de rejeitos em operação. Ao todo, os autores apresentaram 17 (dezesete) casos de pilhas de rejeitos situadas no Chile e no Peru, contemplando rejeitos oriundos do beneficiamento de diferentes minérios, diversos *layouts* de plantas para atendimento de taxas variadas de produtividade (de 700 a 20.000 toneladas por dia), além de exibir concepções distintas de estruturas. Dentre as informações apresentadas é possível observar uma tendência relacionada a aspectos operacionais, configuração da estrutura e parâmetros de projeto como, por exemplo, o teor de umidade ideal para compactação, o grau de compactação usualmente requerido, a espessura de camadas tipicamente adotada para compactação, a altura entre bermas e a largura de bermas, inclinação dos taludes, entre outros.

Contudo, cabe salientar que as tendências indicadas com base nas estruturas apresentadas por Cacciuttolo & Pérez (2022) se referem apenas a indicadores elucidativos, sendo importante ressaltar que cada estrutura requer avaliações e análises específicas. Nesse sentido, estudos mais recentes como Vizcarra (2021) e Sanchez et al. (2023), por exemplo, sugerem a utilização da modelagem numérica com base no método dos elementos finitos para verificação da segurança geotécnica inerente a cada estrutura.

Apesar do método de equilíbrio limite ser amplamente utilizado para avaliar a segurança das pilhas de rejeito na prática da engenharia geotécnica, Vizcarra (2021) apresenta fatores de segurança utilizando o método SSR (*shear strength reduction*) no qual se obtém um fator admitido como equivalente ao fator de segurança usual, porém definido através de uma análise tensão-deformação. Dentre as principais vantagens desse tipo de análise, tem-se o fato ser possível avaliar o comportamento dos materiais e os efeitos de sua deformabilidade durante as etapas do processo construtivo. Vizcarra (2021) indica que o fator de segurança usualmente calculado pode ser superestimado, uma vez que não considera a velocidade de empilhamento, destacando a importância desse tipo de análise para definição dos procedimentos operacionais e demais questões de projetos.

Por fim, Sanchez et al. (2023) direciona o estudo ao comportamento da percolação durante o processo construtivo da pilha considerando, inclusive, as flutuações sazonais do regime de chuvas durante o ano. Através de uma análise acoplada de percolação e deformação, os autores demonstram a possibilidade de visualizar a influência de variáveis como a densidade inicial e a densificação dos rejeitos devido ao peso próprio, o grau de saturação, a permeabilidade e o próprio processo de disposição dos rejeitos, além do já mencionado efeito das precipitações. Apesar de trabalhos anteriores, como Davis (2011), indicar que a saturação é extremamente difícil de acontecer após o material ser devidamente compactado, pelas conclusões de Sanchez et al. (2023), faz-se possível perceber que espessuras significativas do empilhamento podem apresentar elevados graus de saturação ocasionados durante o processo construtivo, resultando em regiões heterogêneas quanto à resistência. Com isso, os autores explicam, entre outros, a importância de prover coberturas para a pilha de rejeito durante o período chuvoso, mitigando a elevação do grau de saturação em regiões da estrutura.

3.2 Guias da Indústria de Mineração

Em resposta aos recentes acidentes envolvendo estruturas de disposição de rejeitos ao longo dos últimos anos, diversas entidades do setor mineral lançaram padrões, protocolos e guias com o objetivo de orientar as mineradoras sobre as melhores práticas de disposição de rejeitos, visando, sobretudo, minimizar acidentes e eliminar fatalidades, bem como danos ambientais e sociais. Dentre os guias de gestão de rejeito atualmente existentes, destacam-se, em âmbito internacional, o publicado pelo International Council on Mining and Metals (ICMM, 2021) e o publicado pela Mining Association of Canada (MAC, 2021), além, em âmbito nacional, do publicado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2019).

De modo geral, os três guias (ICMM, 2021; MAC, 2021; e IBRAM, 2019) focam em aspectos de governança da gestão de rejeitos, dentre os quais cita-se o provimento políticas corporativas, a estruturação de um sistema de gestão de rejeitos (TMS), a definição formal dos papéis e responsabilidades, a elaboração e implementação de manuais de operação, manutenção e monitoramento (OMS), de processos de gestão da informação, gestão de riscos e gestão de mudanças, revisões independentes e elaboração de um plano de preparação e resposta a emergências. Também é descrita uma estrutura organizacional mínima com os diversos atores envolvidos na gestão da segurança da estrutura ao longo de seu ciclo de vida (projetistas, construtores, revisores independentes, engenheiros de registros - EdR, executivo responsável etc.).

Voltando a atenção aos aspectos técnicos, com relação ao comportamento geotécnico dos rejeitos e à estabilidade das estruturas, IBRAM (2019) destaca como intenções de projeto a promoção de condições não-saturadas nos rejeitos por meio de provisões de drenagem e a obtenção de comportamento dilatante em todo o depósito, estabelecido através do adequado controle de compactação. Ainda a esse respeito, o guia ICMM (2021) orienta que, no caso da existência de materiais frágeis, o projeto deve ser baseado na resistência residual/liquefeita assumindo que haverá gatilho, ou devem ser projetadas soluções robustas para evitar perdas de resistência. Além disso, quando rejeitos são utilizados como material de construção ou estão presentes na fundação, as condições de poropressão devem ser modeladas na fase de projeto e monitoradas e interpretadas durante a construção. Também é citado que, dependendo da abordagem de projeto, devem ser conduzidas análises sísmicas considerando métodos apropriados para avaliar tanto as deformações sísmicas quanto a estabilidade pós-sismo, sendo que se deve garantir na avaliação que não haverá perda de confinamento e ocorrência de modos de falha secundários (trincamento, cisalhamento de filtros, interrupção de drenos, entre outros) que possam levar ao colapso. Ainda de acordo com o guia do ICMM (2021), as avaliações de estabilidade devem considerar os eventuais efeitos de alterações geoquímicas geradas pela percolação, como redução de permeabilidade de elementos de drenagem ou de resistência dos materiais.

Com referência a práticas de engenharia concernentes ao modo de falha por erosão interna, ICMM (2021) menciona que a razão capacidade/demanda dos elementos de drenagem interna deve ser suficiente para acomodar as incertezas na estimativa de fluxo. Além disso, o projeto deve considerar a facilidade de construção, evitar o uso de materiais degradáveis nos elementos de controle de percolação e considerar as deformações da estrutura, incluindo as geradas por eventuais sismos. Em relação a monitoramento, o guia também sugere a necessidade de, além de piezometria e medição de vazão, incorporar métodos para identificação de zonas de fluxo excessivo, como métodos indiretos de medição de potencial espontâneo e medições diferenciais de temperatura. Acerca dos materiais a serem utilizados, quando a disponibilidade de recursos naturais for limitada, IBRAM (2019) apresenta a possibilidade de utilização de geossintéticos e recomenda que estruturas enterradas, como galerias e tubulações, sejam evitadas ou projetadas com medidas redundantes de proteção para evitar caminhos preferenciais de percolação.

Em relação ao gerenciamento de água nessas estruturas, IBRAM (2019) elenca como uma das intenções de projeto a eliminação ou redução das águas superficiais e armazenadas no reservatório. O guia também destaca que devem ser considerados dados climáticos e hidrológicos confiáveis e atualizados, obtidos a partir de estações locais ou próximas à obra podendo ser necessária a realização de campanhas de medição de vazão durante a estiagem e período chuvoso. Em relação ao uso da água, o guia menciona que o projeto deve considerar a separação da água da bacia caso o rejeito tenha potencial de afetar sua qualidade, em concordância com o indicado pelos estudos apresentados no item anterior. O projeto também deve considerar a caracterização química dos rejeitos para avaliar a necessidade de sistemas de impermeabilização ou de mitigação de geração de drenagem ácida. De forma similar, ICMM (2021) orienta que, quando praticável, deve-se desviar as águas afluentes para evitar que tenham contato com o rejeito e, para as águas que tiverem contato, devem ser estabelecidos controles de engenharia para mitigar os riscos geotécnicos e geoquímicos. A referência aponta também que os balanços hídricos necessários para projetar o gerenciamento de água devem considerar projeções de mudanças climáticas tanto para médias anuais como para períodos de retorno e intensidade de eventos extremos.

Por fim, em relação aos eventos extremos a serem considerados em projeto, ainda que o Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos - GISTM - (ICMM, UNEP, PRI, 2020) indique que os critérios de projeto possam ser obtidos de acordo com a classificação de consequências da estrutura, ICMM (2021) propõe que o projeto considere carregamentos extremos, independentemente dessa classificação. No entanto, o guia reconhece a possibilidade de adoção do GISTM e prevê flexibilidade para que o EdR recomende critérios alternativos. Tanto para cheia de projeto quanto para o terremoto de projeto é sugerido um período de retorno

de 10.000 anos para todas as fases da estrutura. O guia ainda propõe que o terremoto de projeto seja obtido a partir de análise probabilística de perigo sísmico (PSHA) ou, de forma alternativa, em função da configuração sismológica, a partir de uma abordagem determinística do Máximo Terremoto Crível (MCE). Ainda sobre eventos extremos, apesar de não indicar valores de período de retorno, IBRAM (2019) menciona que na fase de fechamento as estruturas devem estar preparadas para enfrentar eventos extremos, dando exemplo da Máxima Precipitação Provável (PMP) no caso de cheias e MCE no caso de eventos sísmicos.

3.3 Legislação e Regulação

Em âmbito nacional, faz-se importante destacar a Norma Reguladora de Mineração (NRM) nº 19 de 2001 que discorre sobre: “Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos”. A NRM-19 foi publicada junto a diversas outras NRMs, pela Portaria nº 237/2001 (Brasil, 2001) e sofreu alterações textuais através da Portaria nº 12/2002 (Brasil, 2002). As citadas portarias foram elaboradas pelo extinto Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), autarquia responsável por regular e fiscalizar a atividade mineral no Brasil, atividades atualmente exercidas pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

A norma citada possui considerações e critérios que devem ser considerados a toda e qualquer estrutura com a finalidade de dispor tais materiais, além de seção específica destinada a requisitos para disposição em pilhas. Na referida seção é descrito que a construção de uma pilha de rejeito deve ser precedida por projeto técnico, contemplando diversos aspectos usualmente presentes em um projeto de engenharia, destacando os seguintes: caracterização do material; monitoramento dos efluentes; erosão hídrica e eólica; decomposição química e dissolução parcial do material; impermeabilização da base da pilha, quando necessário; implantação de sistema de drenagem na base na base e interior da pilha; e disposição do material em camadas. Outro fator relevante mencionado na norma é a proibição da construção de bacias de decantação sobre as pilhas, salvo se existente autorização prévia do órgão.

Outro país de relevância nesse contexto é o Canadá, no qual a regulação das atividades de mineração é competência, em parte, das províncias. Um documento de destaque é o Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia (BC MEM, 2022), o qual, em sua Parte 10, expõe diversas obrigações aos empreendedores no que tange a instalações de armazenamento de rejeitos (TSF), como por exemplo a necessidade de tais estruturas contarem com Engenharia de Registro. Outro elemento relevante é a definição dos critérios de projeto para análises sísmicas que, assim como indicado no GISTM (ICMM, UNEP, PRI, 2020) citado no item anterior, devem ser realizadas com base em classificações de consequência, respeitando o período de retorno mínimo de 975 anos para estruturas que não foram projetadas para conter rejeitos saturados. O documento citado traz também a obrigação de que seja estabelecido um comitê internacional independente, além de enviar, anualmente, relatórios de inspeção.

No Chile, país também referência no assunto conforme indicado no item 3.1, a principal normativa que regula o projeto, construção, gestão e fechamento de depósitos de rejeitos de mineração é o Decreto Supremo nº 248 (DS 248, 2007), indicando que é competência do Servicio Nacional de Geología y Minería a aplicação e fiscalização do regramento. O documento descreve, entre outros, que rejeitos filtrados seriam aqueles que passam por um processo de filtração, de forma que seja assegurado que o material, antes de ser depositado, alcance uma umidade menor de 20%.

Por último, cabe mencionar que em outras províncias do Canadá (Alberta, Quebec), estados dos Estados Unidos como Alasca e Montana, estados da Austrália como a Nova Gales do Sul e a Austrália Ocidental), e Peru foram encontrados documentos de caráter legislativo ou regulatório, porém, em sua maioria, associados a instalações de armazenamento e disposição de rejeitos de forma genérica ou especificamente aplicadas a barragens.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A literatura técnica revisada e apresentada no artigo esclarece a evolução das discussões publicadas desde o início dos anos 2000. Inicialmente, são abordadas alternativas aos métodos convencionais de disposição de rejeitos de mineração. Em seguida, observa-se uma tendência crescente em novos estudos que apresentam diretrizes de projeto, principalmente baseadas na experiência dos autores. Nas publicações mais recentes, ocorre a consolidação de informações relacionadas a estruturas em operação bem-sucedidas, as quais

podem auxiliar na tomada de decisões sobre a avaliação da segurança e desempenho das estruturas. Além disso, aspectos relacionados à modelagem numérica também são destacados como importantes neste contexto.

Com relação aos guias da indústria, as três referências estudadas (ICMM, 2021; MAC, 2021; e IBRAM, 2019) tratam de boas práticas aplicáveis a Instalações de Armazenamento de Rejeitos (TSM) de forma abrangente, portanto, contemplando, dentre outros métodos, o empilhamento de rejeitos. No entanto, apesar de terem sido identificados alguns aspectos técnicos relevantes à fase de projeto de empilhamentos de rejeito desaguados no guia do IBRAM (2019) e, principalmente, no guia do ICMM (2021), o foco dos três guias recai sobre aspectos de governança e gestão. Nos três casos é sugerida a consulta a outros documentos para a obtenção de orientação técnica detalhada para projetos. Dentre esses documentos complementares, são citados os boletins publicados pelo International Commission on Large Dams (ICOLD) e pela Canadian Dam Association (CDA), além das normas técnicas brasileiras ABNT NBR 13.028/2017 e ABNT NBR 13.029/2017. No entanto, nota-se que, à exceção da norma ABNT NBR 13.029/2017 que é aplicável para pilhas de estéril, as diretrizes publicadas nesses documentos são aplicáveis apenas a barragens, portanto, não abrangendo as pilhas de rejeito desaguado. Essa constatação evidencia a necessidade de elaboração, tanto em âmbito nacional quanto internacional, de padrões e normas técnicas específicas a essa temática.

No que tange à existência de instrumentos de regulação pública, a pesquisa evidenciou uma significativa escassez de legislação específica aplicada a pilhas de rejeito, ainda que em países de relevância no setor a metodologia já tenha se estabelecido como uma prática relativamente comum. Em geral, constatou-se que quando os documentos não são específicos para barragens, englobam toda e qualquer estrutura para disposição ou armazenamento de rejeitos, abordando e descrevendo critérios técnicos gerais e comuns a diversos tipos de estruturas geotécnicas. Ademais, demonstra-se que, no cenário nacional, o setor mineral dispõe, na atualidade, da NRM-19, publicada em 2001 pelo extinto Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), atualmente Agência Nacional de Mineração (ANM). Apesar de se mostrar expressivamente aquém do arcabouço legal vigente no país para a regulação de barragens, a referida norma apresenta importantes considerações e critérios que devem ser admitidos a toda e qualquer estrutura com a finalidade de dispor rejeitos de mineração, além de seção específica destinada a requisitos para disposição em pilhas.

Considerando a tendência destacada neste artigo, as preocupações globais sobre a gestão dos recursos naturais, a segurança das estruturas para disposição de rejeito e a redução do dano potencial associado a elas, bem como a crescente demanda no setor, pode-se prever que as metodologias para empilhamento de rejeitos desaguados continuarão a evoluir e a ser objeto de novas pesquisas, almejando desenvolver soluções que permitam a operação segura de pilhas de rejeitos em diversos ambientes, adaptando-as às condições locais e às altas taxas de produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2017) 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.
- ABNT (2017) NBR 13.029. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2022) NBR 6.502. *Solos e rochas Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Blight, G. (2010) *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*, 1st ed., CRC Press, Leiden, LDN, NL, 652 p.
- Brasil. Portaria DNPM nº 237, de 18 de outubro de 2001. Aprova as Normas Reguladoras de Mineração - NRM, de que trata o Art. 97 do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2001. . <[Portaria 237/2001 DNPM/MME - ANMlegis \(datalegis.net\)](#)>
- Brasil. Portaria DNPM nº 12, de 22 de janeiro de 2002. Altera dispositivos do ANEXO I da Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, publicada no DOU de 29 de janeiro de 2002. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2001. . <[Portaria 12/2002 DNPM/MME - ANMlegis \(datalegis.net\)](#)>
- British Columbia Ministry of Energy, Mines and Low Carbon Innovation (MEM). Audit of Code Requirements for Tailings Storage Facilities. Mine Audits and Effectiveness Unit. Victoria, BC, Canada, 2021.

- British Columbia Ministry of Energy, Mines and Low Carbon Innovation (MEM). Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia. Mining and Minerals Division. Victoria, BC, Canada, 2022.
- Cacciuttolo C., Pérez G.C. (2022) Practical experience of filter-tailings technology in Chile and Peru: an environmentally friendly solution. *Minerals*, 12 (7), p.1-64.
- Caldwell, J.A., Crystal, C. (2015) *Filter-pressed tailings facility design, construction, and operating guidelines*. In: Tailings and Mine Waste – TMW’15, Vancouver. *Proceedings*, p. 120-128.
- Crystal, C., Hore, C. (2018) *Filter-pressed Dry Stacking: Design Considerations Based on Practical Experience*. In: Tailings and Mine Waste – TMW’18, Colorado. *Proceedings*, p. 209-219.
- Davies, M.P., Rice, S. (2001) *An alternative to conventional tailing management – “dry stack” filter tailings*. In: Tailings and Mine Waste – TMW’01, Rotterdam. *Proceedings*, p. 411-420.
- Davies, M.P., Lupo, J., Martin, T., McRobertis, E., Musse, M., Ritchie, D. (2010) *Dewatered Tailings Practice – Trends and Observations*. In: Tailings and Mine Waste – TMW’10, Colorado. *Proceedings*, p. 133-142.
- Davies, M.P. (2011) *Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals*. In: Tailings and Mine Waste – TMW’11, Vancouver. *Proceedings*, p. 1-10.
- Ministerio de Minería de Chile. Decreto Supremo No 248: Reglamento para la aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves, 159–182. Chile, 2007.
- Hawley, M., Cuning, J. (2017) *Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design*, 1st ed., CSIRO Publishing, Melbourne, MELB, AU, 385 p.
- IBRAM (2019) Guia de Boas Práticas: Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/web_manual-ibram.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- ICMM (2021) *Tailings Management – Good Practice Guide*. Disponível em: <https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2021/guidance_tailings-management.pdf?cb=60002>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- ICMM, UNEP, PRI (2020) Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos. Disponível em: <https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2020/global-tailings-standard_pt.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- Lara, J.L., Pornillos, E. U., Muñoz, H. E. (2013) *Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application of dry stacking tailings deposits – state-of-the-art*. In: 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings – Paste’16, Belo Horizonte. *Proceedings*, p. 251-262.
- Lupo, J., Hall, J. (2010) *Dry stack tailings – design considerations*. In: Tailings and Mine Waste – TMW’10, Colorado. *Proceedings*, p. 327-334.
- Lara, J.L., Pornillos, E. U., Muñoz, H. E. (2013) *Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application of dry stacking tailings deposits – state-of-the-art*. In: 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings – Paste’16, Belo Horizonte. *Proceedings*, p. 251-262.
- MAC (2021) *A Guide to the Management of Tailings Facilities*. v.3.2. Disponível em: <https://mining.ca/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/06/MAC-Tailings-Guide-Version-3-2-March-2021.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- Sanchez, B., Sutta, M., Soto, J., Benites, I. (2023) *Dry stacked filtered tailings: seepage behaviour during the construction process*. In: 25th International Seminar on Paste, Thickened and Filtered Tailings – Paste’25, Banff. *Proceedings*, p. 620-628.
- Ulrich, B. (2019) *Practical thoughts regarding filtered tailings*. In: 22nd International Seminar on Paste, Thickened and Filtered Tailings – Paste’22, Cape Town. *Proceedings*, p. 71-80.
- Vizcarra, G. C. (2021) *Numerical modelling of dry stacking tailings heaps*. In: 24th International Seminar on Paste, Thickened and Filtered Tailings – Paste’24, Perth. *Proceedings*, p. 231-238.