

Drenagem como elemento de segurança geotécnica em estruturas de mineração

Drainage as an element of geotechnical safety in mining structures

Mariangela Regina da Silva Sampaio de Souza

RESUMO

A drenagem é reconhecida, na literatura geotécnica e na prática da engenharia de minas, como um dos fatores determinantes da estabilidade de estruturas de terra construídas ou formadas a partir de solos e resíduos de mineração. O presente artigo técnico tem como problema de pesquisa identificar qual a influência dos sistemas de drenagem superficial e profunda na estabilidade e na segurança operacional de estruturas geotécnicas de mineração, notadamente taludes de cava e de pilha, pilhas de estéril e estruturas de disposição de rejeitos (barragens e pilhas de rejeito filtrado ou empilhado a seco). Por meio de revisão narrativa da literatura técnica e normativa, de análise dos princípios da mecânica dos solos aplicados à poropressão e à resistência ao cisalhamento, e da retomada e atualização de um estudo comparativo de alternativas de drenagem profunda — desenvolvido originalmente em trabalho de conclusão de curso —, o artigo discute os principais mecanismos de ruptura associados à saturação e à geração de poropressões positivas, os tipos de dispositivos de drenagem superficial e profunda disponíveis, seus critérios de dimensionamento e as boas práticas de projeto, construção, operação e monitoramento. São comparadas quatro alternativas típicas de drenagem profunda — drenos horizontais profundos, poços de alívio, tapetes drenantes e trincheiras drenantes verticais — segundo os critérios de vazão de projeto, nível de segurança proporcionado, custo de implantação e prazo executivo, evidenciando que a escolha da solução ótima depende do contexto geológico-geotécnico, do estágio da obra e do apetite ao risco do empreendimento. Os resultados indicam que a drenagem eficiente reduz as poropressões, aumenta o fator de segurança ao cisalhamento, diminui a probabilidade de liquefação em rejeitos saturados e constitui, junto à instrumentação geotécnica, um dos pilares dos

sistemas de gestão de segurança de barragens e pilhas de estéril no Brasil, sobretudo após os desastres de Fundão (Mariana/MG, 2015) e da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho/MG, 2019), que reformularam o arcabouço regulatório nacional. Conclui-se que a drenagem não deve ser tratada como elemento acessório de projeto, mas como componente estrutural de segurança, sujeito a dimensionamento formal, redundância, inspeção periódica e monitoramento instrumentado ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento minerário.

Palavras-chave: Drenagem geotécnica. Segurança de barragens. Estabilidade de taludes. Pilhas de estéril. Poropressão.

ABSTRACT

Drainage is widely recognized, both in geotechnical literature and in mining engineering practice, as one of the determining factors for the stability of earth structures built with or composed of mining waste materials. This technical article addresses the research problem of identifying the influence of surface and deep drainage systems on the stability and operational safety of mining geotechnical structures, particularly pit and stack slopes, waste rock piles and tailings disposal structures (dams and dry-stacked or filtered tailings piles). Through a narrative review of technical and regulatory literature, an analysis of soil mechanics principles applied to pore pressure and shear strength, and the update of a comparative study of deep drainage alternatives originally developed in an undergraduate thesis, the article discusses the main failure mechanisms associated with saturation and positive pore pressure generation, the types of surface and deep drainage devices available, their design criteria and good practices for design, construction, operation and monitoring. Four typical deep drainage alternatives — horizontal drains, relief wells, drainage blankets and vertical drainage trenches — are compared according to design flow rate, safety level provided, implementation cost and execution schedule, showing that the optimal solution depends on the geological-geotechnical context, the stage of the work and the risk appetite of the project. Results indicate that efficient drainage reduces pore pressures, increases the factor of safety against shear failure, decreases the probability of liquefaction in saturated tailings, and constitutes, together with geotechnical instrumentation, one of the pillars of dam and waste pile

safety management systems in Brazil, especially after the Fundão (Mariana/MG, 2015) and Córrego do Feijão Mine (Brumadinho/MG, 2019) disasters, which reshaped the national regulatory framework. It is concluded that drainage should not be treated as an accessory design element, but as a structural safety component, subject to formal design, redundancy, periodic inspection and instrumented monitoring throughout the entire life cycle of the mining project.

Keywords: Geotechnical drainage. Dam safety. Slope stability. Waste rock piles. Pore pressure.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A atividade de mineração produz, em praticamente todas as suas etapas, grandes volumes de materiais que precisam ser dispostos de forma segura e duradoura: solo e rocha decapeados na abertura de cavas, estéril proveniente da lavra e rejeitos gerados no beneficiamento do minério. Esses materiais são normalmente organizados em estruturas geotécnicas de grande porte — taludes de cava, pilhas de estéril e barragens ou pilhas de rejeitos — que, embora não sejam obras civis convencionais no sentido de terem finalidade estrutural imediata, precisam obedecer aos mesmos princípios de estabilidade que regem barragens de terra, aterros e taludes rodoviários.

Dentre os fatores que controlam a estabilidade dessas estruturas, a água presente no maciço ocupa posição central. A elevação do nível freático, a saturação de camadas de solo ou rejeito e a geração de poropressões positivas reduzem a resistência ao cisalhamento efetiva do material, aproximando o maciço da condição de ruptura. Por essa razão, os sistemas de drenagem — superficiais e profundos — não constituem um item complementar de projeto, mas sim um componente estrutural de segurança, cuja falha ou ausência figura como causa recorrente, direta ou indireta, de acidentes geotécnicos registrados na mineração brasileira e mundial. (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; PINTO, 2006).

O tema ganhou renovada relevância técnica e social após os rompimentos das barragens de rejeitos do Fundão, em Mariana/MG (2015), e da Barragem I da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG (2019). Os documentos técnicos

incluídos nas referências deste artigo associam esses eventos a mecanismos complexos de instabilidade envolvendo saturação, poropressões e liquefação, entre outros fatores. Nesse contexto, o desempenho da drenagem interna integra a análise das condições hidráulicas das estruturas, sem que sua atuação deva ser tratada isoladamente como explicação única para rupturas de natureza multifatorial. Esses eventos contribuíram para o fortalecimento do arcabouço regulatório brasileiro de segurança de barragens, com destaque para a Lei Federal nº 14.066/2020 e para a Resolução ANM nº 95/2022. (BRASIL, 2020; ANM, 2022; PAINEL DE ESPECIALISTAS, 2019; PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA, 2016).

1.2 Problema de pesquisa

O problema que orienta este artigo pode ser formulado da seguinte maneira: qual a influência dos sistemas de drenagem na estabilidade e na segurança operacional de estruturas geotécnicas de mineração? De forma mais específica, busca-se compreender como a drenagem superficial e a drenagem profunda atuam, isolada e conjuntamente, no controle das poropressões e na manutenção de fatores de segurança adequados em taludes, pilhas de estéril e estruturas de disposição de rejeitos, e quais critérios técnicos e econômicos devem orientar a escolha entre diferentes alternativas de drenagem profunda ao longo do ciclo de vida do empreendimento.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar, de forma técnica e fundamentada na literatura de mecânica dos solos e de geotecnia de mineração, a influência dos sistemas de drenagem sobre a estabilidade e a segurança operacional de estruturas geotécnicas de mineração, com foco em taludes, pilhas de estéril e estruturas de disposição de rejeitos.

São objetivos específicos: (a) sistematizar os principais mecanismos de instabilidade geotécnica relacionados à água intersticial e à poropressão em solos e rejeitos de mineração; (b) descrever e classificar os dispositivos de drenagem superficial e profunda usualmente empregados em taludes, pilhas de estéril e estruturas de rejeitos, incluindo seus princípios de funcionamento e critérios de

dimensionamento; (c) discutir a relação entre drenagem, instrumentação geotécnica e gestão de segurança de barragens no contexto regulatório brasileiro pós-Brumadinho; e (d) retomar e atualizar, à luz da literatura técnica corrente, um estudo comparativo de alternativas de drenagem profunda — drenos horizontais profundos, poços de alívio, tapetes drenantes e trincheiras drenantes verticais — segundo os critérios de vazão, segurança, custo e prazo, originalmente desenvolvido em trabalho de conclusão de curso.

1.4 Justificativa

A justificativa para o desenvolvimento deste artigo assenta-se em três pilares. Em primeiro lugar, um pilar técnico: a drenagem é, entre os fatores controláveis de projeto, um dos que produz maior efeito relativo sobre o fator de segurança de taludes e estruturas de disposição de resíduos, sendo ao mesmo tempo um dos mais suscetíveis a falhas por colmatção, subdimensionamento, manutenção deficiente ou obsolescência frente à evolução da geometria da obra. Em segundo lugar, um pilar regulatório e social: a sequência de rupturas de barragens de rejeitos ocorridas no Brasil na última década elevou o tema da segurança geotécnica de estruturas de mineração à condição de prioridade nacional, com reflexos diretos em normas técnicas, legislação e práticas de auditoria e certificação. Em terceiro lugar, um pilar acadêmico-profissional: o presente artigo permite consolidar, atualizar e ampliar um estudo comparativo de alternativas de drenagem profunda desenvolvido anteriormente em trabalho de conclusão de curso, incorporando a ele uma discussão mais ampla sobre drenagem superficial, taludes, pilhas de estéril e estruturas de rejeitos, e alinhando-o ao estado da arte da literatura técnica e normativa vigente. (GERSCOVICH, 2016; VICK, 1990; ICOLD, 2001).

1.5 Metodologia

Trata-se de artigo técnico de natureza qualitativa, com abordagem descritivo-analítica, fundamentado em revisão narrativa de literatura técnica e normativa nacional e internacional sobre mecânica dos solos, geotecnia de barragens e drenagem aplicada à mineração. O corpus de referência reúne livros-texto clássicos de mecânica dos solos e engenharia de barragens, normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), atos normativos da

Agência Nacional de Mineração (ANM), legislação brasileira de segurança de barragens, guias técnicos de organismos internacionais, como a International Commission on Large Dams (ICOLD), e literatura técnica consolidada sobre barragens, pilhas de estéril e estruturas de rejeitos. Por não ter sido adotado protocolo formal de revisão sistemática com estratégia de busca, bases indexadoras e critérios de inclusão e exclusão previamente definidos, os resultados devem ser interpretados como síntese técnico-bibliográfica e não como revisão sistemática. Complementarmente, o artigo retoma e atualiza um estudo comparativo de alternativas técnicas de drenagem profunda desenvolvido anteriormente pela autora, reorganizando os critérios de comparação — vazão de projeto, nível de segurança, custo de implantação e prazo executivo — à luz das referências reunidas. A comparação é qualitativa e tem finalidade de apoio à decisão conceitual; não substitui dimensionamento, modelagem hidrogeológica, análise de estabilidade ou avaliação econômica específica de projeto. A estrutura do texto apresenta, inicialmente, o referencial teórico sobre mecanismos de instabilidade; em seguida, os sistemas de drenagem superficial e profunda; posteriormente, sua aplicação a taludes, pilhas de estéril e estruturas de rejeitos; e, por fim, o estudo comparativo, a discussão e as considerações finais.

2 ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS DE MINERAÇÃO E MECANISMOS DE INSTABILIDADE

Este capítulo apresenta o referencial teórico necessário para a compreensão dos mecanismos pelos quais a água intersticial afeta a estabilidade de estruturas geotécnicas de mineração. Inicialmente, caracterizam-se as três tipologias de estrutura que constituem o foco deste trabalho — taludes, pilhas de estéril e estruturas de disposição de rejeitos —, seguindo-se a discussão dos fundamentos de poropressão e resistência ao cisalhamento e, por fim, uma síntese de casos emblemáticos de ruptura associados à drenagem deficiente.

2.1 Taludes de cava e de pilha

Os taludes de mineração compreendem tanto os taludes de cava, formados pelo desmonte progressivo do maciço rochoso ou do solo durante a lavra a céu

aberto, quanto os taludes de pilhas de estéril e de rejeitos, formados pela deposição controlada de materiais de descarte. Nos taludes de cava, a estabilidade depende de fatores geológico-estruturais — como orientação de descontinuidades, presença de planos de fraqueza e resistência da matriz rochosa — e de fatores hidrogeológicos, associados à percolação de água subterrânea através do maciço rochoso fraturado ou do solo residual. A elevação do nível piezométrico no interior do talude reduz a tensão normal efetiva atuante nos planos potenciais de ruptura, diminuindo a resistência ao cisalhamento mobilizável e, conseqüentemente, o fator de segurança. (GERSCOVICH, 2016).

Nos taludes de pilha — sejam eles de estéril ou de rejeito —, a condição é agravada pelo fato de o próprio material constituinte do talude ser, frequentemente, heterogêneo, mal compactado ou depositado em condição hidráulica, o que favorece a formação de zonas de saturação permanente ou transitória. A geometria desses taludes, em geral definida por ângulos de talude global e de banco estabelecidos em projeto geotécnico, deve ser compatibilizada com a resistência ao cisalhamento do material e com as condições de poropressão esperadas ao longo da vida útil da estrutura, o que reforça a necessidade de sistemas de drenagem eficazes desde as etapas iniciais de implantação. (GERSCOVICH, 2016; SILVEIRA; MACHADO, 2010).

2.2 Pilhas de estéril

As pilhas de estéril, também designadas pilhas de disposição de estéril (waste rock dumps), são estruturas formadas pelo empilhamento de material rochoso ou de solo sem valor econômico, removido durante a lavra para acesso ao minério. Trata-se, em geral, de estruturas de grande volume, construídas por basculamento (end dumping), por avanço frontal (advancing) ou por métodos de construção em camadas compactadas, a depender das condições geotécnicas do material disponível e das exigências de estabilidade e de gestão ambiental. (SILVEIRA; MACHADO, 2010).

Do ponto de vista hidrogeológico, as pilhas de estéril apresentam grande heterogeneidade granulométrica, com blocos de rocha de dimensões variadas segregados ao longo da face de deposição, o que produz zonas de alta permeabilidade convivendo com zonas de menor permeabilidade formadas por material fino segregado na base ou no interior da pilha. Essa heterogeneidade

dificulta a previsão do comportamento hidráulico da pilha e pode favorecer a formação de zonas de acúmulo de água — especialmente na interface entre a pilha e a fundação natural, ou em descontinuidades internas de deposição —, o que exige sistemas de drenagem de fundação, drenos de base e canaletas de captação de águas pluviais de montante como elementos indispensáveis de projeto. (SILVEIRA; MACHADO, 2010).

2.3 Estruturas de disposição de rejeitos

Os rejeitos são a fração do minério lavrado que não apresenta valor econômico após o beneficiamento e que, historicamente, no Brasil, foi majoritariamente disposta sob a forma de polpa (mistura de partículas sólidas finas e água) em barragens de contenção, construídas por métodos de alteamento a montante, a jusante ou por linha de centro. Mais recentemente, em razão do arcabouço regulatório restritivo ao método de alteamento a montante — proibido no Brasil pela Lei nº 23.291/2019 do Estado de Minas Gerais e por dispositivos correlatos em nível federal —, tem crescido a adoção de métodos alternativos de disposição, como o empilhamento de rejeito filtrado (dry stacking) e a disposição de rejeito espessado ou em pasta, que reduzem, mas não eliminam, os riscos associados à saturação. (VICK, 1990; MINAS GERAIS, 2019).

Nas barragens convencionais de rejeitos, a drenagem interna — composta tipicamente por tapetes drenantes, drenos de pé, chaminés drenantes e, quando necessário, poços de alívio — tem a função de controlar a linha freática dentro do maciço, mantendo-a o mais baixa possível e evitando sua emergência na face de jusante, o que poderia desencadear erosão interna (piping) ou instabilização da crista e da praia de rejeitos. Já nas pilhas de rejeito filtrado, embora o material seja disposto com teor de umidade reduzido e, portanto, apresente menor grau de saturação inicial, a infiltração de águas pluviais ao longo do tempo torna igualmente necessária a previsão de sistemas de drenagem de fundação e de drenagem superficial eficientes, sob pena de o material retomar condições de saturação parcial ou total ao longo dos anos de operação. (VICK, 1990; ICOLD, 2001).

2.4 Poropressão, resistência ao cisalhamento e ruptura

O princípio das tensões efetivas, formulado por Terzaghi, estabelece que o comportamento mecânico dos solos — incluindo sua resistência ao cisalhamento e sua deformabilidade — é controlado não pela tensão total aplicada, mas pela tensão efetiva, definida como a diferença entre a tensão total e a poropressão da água presente nos vazios do solo. Em termos simplificados, a tensão efetiva (σ') é dada pela expressão $\sigma' = \sigma - u$, em que σ representa a tensão total e u a poropressão. (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; PINTO, 2006).

A resistência ao cisalhamento de um solo, segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, é expressa em termos de tensões efetivas pela equação $\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\varphi')$, em que τ é a tensão cisalhante resistente, c' é o intercepto de coesão efetiva e φ' é o ângulo de atrito interno efetivo. Observa-se, dessa relação, que qualquer elevação da poropressão u reduz diretamente a tensão normal efetiva σ' e, conseqüentemente, a parcela de resistência associada ao atrito interno ($\sigma' \cdot \tan \varphi'$), sem alterar a coesão efetiva. Esse mecanismo explica por que a saturação de um talude — seja por infiltração de água de chuva, seja por elevação do nível freático, seja por ascensão capilar — é um dos gatilhos mais recorrentes de instabilização de taludes de solo e de estruturas de disposição de resíduos de mineração. (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; PINTO, 2006).

Em materiais granulares fofos e saturados, como rejeitos arenosos dispostos hidraulicamente, um mecanismo adicional e particularmente severo é a liquefação estática. Quando um material desse tipo é submetido a um carregamento — por exemplo, o avanço da crista de um alteamento — em condição não drenada, ou seja, sem tempo suficiente para dissipação das poropressões geradas, pode ocorrer aumento acentuado da poropressão e colapso da estrutura de contato entre partículas, levando à perda quase total de resistência ao cisalhamento e a uma ruptura de caráter frágil e catastrófico, com grandes deslocamentos e fluxo do material a jusante. A literatura técnica sobre os desastres de Fundão e de Brumadinho converge na identificação da liquefação estática, desencadeada por rejeitos saturados e por sistemas de drenagem interna insuficientes ou ineficazes, como mecanismo determinante das rupturas. (VICK, 1990; ICOLD, 2001).

Sob o ponto de vista de projeto, o controle das poropressões é usualmente expresso por meio da razão de poropressão ru , definida como a relação entre a

poropressão atuante em um ponto do maciço e a tensão vertical total no mesmo ponto ($ru = u / \sigma_v$). Valores elevados de ru indicam maior proximidade da condição de ruptura, e os sistemas de drenagem — superficiais e profundos — são, precisamente, os dispositivos de engenharia destinados a manter ru em níveis compatíveis com os fatores de segurança exigidos em projeto, tanto em condições operacionais normais quanto em condições excepcionais, como eventos pluviométricos extremos ou sismos. (GERSCOVICH, 2016; PINTO, 2006).

2.5 Rupturas emblemáticas associadas à drenagem deficiente

A recorrência de acidentes geotécnicos em estruturas de mineração relacionados, direta ou indiretamente, a deficiências de drenagem justifica breve retrospectiva de casos emblemáticos, cuja análise técnica consolidou parte relevante do conhecimento atual sobre o tema.

O rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, em Mariana/MG, em 2015, produziu graves consequências humanas, ambientais e socioeconômicas. Para os fins deste artigo, o caso é utilizado como referência para discutir a importância do controle das condições hidráulicas e do acompanhamento do desempenho de estruturas de rejeitos. A interpretação de suas causas deve considerar a interação entre condições geotécnicas, hidráulicas, construtivas e operacionais, evitando atribuir o evento a um único componente de projeto. (PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA, 2016).

O rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG, em 2019, foi analisado por um painel de especialistas que identificou a liquefação como mecanismo de ruptura. No escopo deste trabalho, o caso reforça a necessidade de avaliar conjuntamente estado de saturação, poropressões, propriedades dos rejeitos, histórico construtivo, instrumentação e desempenho dos sistemas de controle hidráulico. Assim, a drenagem é tratada como uma barreira relevante de segurança, mas inserida em um sistema geotécnico mais amplo e multifatorial. (PAINEL DE ESPECIALISTAS, 2019).

Casos internacionais são igualmente utilizados na literatura para demonstrar que rupturas de barragens de rejeitos podem decorrer da interação de fatores de fundação, projeto, construção, operação e controle hidráulico. Essa experiência acumulada reforça a necessidade de sistemas de drenagem formalmente

dimensionados, verificáveis por instrumentação e submetidos a inspeção e manutenção ao longo do ciclo de vida da estrutura. (ICOLD, 2001; VICK, 1990).

3 SISTEMAS DE DRENAGEM EM ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Os sistemas de drenagem aplicados a estruturas geotécnicas de mineração podem ser classificados, de forma didática, em dois grandes grupos: a drenagem superficial, destinada a captar e conduzir para fora da estrutura as águas pluviais incidentes antes que infiltrem no maciço, e a drenagem profunda ou interna, destinada a captar e dissipar a água que já se encontra no interior do maciço, controlando o nível freático e as poropressões. Este capítulo descreve os principais dispositivos de cada grupo, seus princípios de funcionamento, critérios de dimensionamento e requisitos de projeto, além de tratar dos critérios de filtro e da instrumentação geotécnica associada. (CRUZ, 1996; VICK, 1990).

3.1 Drenagem superficial

A drenagem superficial tem como objetivo primário evitar que as águas de precipitação pluviométrica incidentes sobre a bacia de contribuição de uma estrutura geotécnica — talude, pilha de estéril ou estrutura de rejeitos — infiltrem no maciço ou provoquem erosão em suas faces. Trata-se da primeira linha de defesa contra a saturação, e sua eficácia reduz significativamente a demanda sobre os sistemas de drenagem profunda. (GERSCOVICH, 2016).

3.1.1 Canaletas e valetas de drenagem

As canaletas de crista, de berma e de pé de talude são dispositivos lineares, em geral revestidos em concreto, geomembrana ou material rígido, destinados a interceptar o escoamento superficial e conduzi-lo, de forma controlada, até dissipadores de energia e, em seguida, para os corpos hídricos receptores ou bacias de contenção de sedimentos. O dimensionamento hidráulico dessas canaletas é realizado por meio de métodos consagrados na engenharia hidrológica — como o método racional, para bacias de pequena área de contribuição, ou métodos de hidrograma unitário para bacias maiores —, adotando-se período de retorno compatível com a classe de risco e a categoria de dano potencial associado à

estrutura, conforme critérios estabelecidos pela Agência Nacional de Mineração. Em barragens de rejeitos classificadas com dano potencial associado alto, é usual a adoção de períodos de retorno de 1.000 anos ou da precipitação máxima provável (PMP) para o dimensionamento do vertedouro e dos dispositivos de drenagem superficial associados.

3.1.2 Bermas, banquetas e sistemas de captação escalonados

Em taludes de grande altura, como os de cavas de mineração e de pilhas de estéril, a drenagem superficial é organizada de forma escalonada, com canaletas de berma captando o escoamento de cada bancada e conduzindo-o lateralmente até canaletas de descida, dispostas ao longo de rampas ou de trechos específicos do talude, revestidas ou providas de dissipadores de energia (degraus, bacias de amortecimento) para evitar velocidades erosivas. A ausência ou a subdimensão desses sistemas é causa frequente de ravinamento e de erosão regressiva nas faces de taludes e pilhas, que pode evoluir para instabilizações localizadas e, em casos extremos, comprometer a estabilidade global da estrutura.

3.1.3 Dissipadores de energia e proteção de taludes

A energia cinética das águas captadas pelas canaletas deve ser dissipada antes do lançamento em cursos d'água naturais ou em bacias de sedimentação, de modo a evitar erosão e carreamento de sólidos. Empregam-se, para tanto, bacias de dissipação, degraus em cascata, enrocamentos e estruturas de queda. Complementarmente, a proteção das faces de taludes e pilhas contra a ação erosiva direta da chuva é realizada por meio de revegetação (hidrossemeadura, gramíneas de cobertura), mantas de controle de erosão biodegradáveis, ou, em situações de maior exposição, por revestimentos rígidos ou enrocamentos de proteção.

3.2 Drenagem profunda ou interna

A drenagem profunda, também chamada de drenagem interna ou subterrânea, tem por objetivo captar a água presente no interior do maciço — proveniente de infiltração, de fluxo subterrâneo natural ou da própria água intersticial de deposição hidráulica de rejeitos — e conduzi-la para fora da estrutura, reduzindo

o nível piezométrico e as poropressões atuantes. Os principais dispositivos de drenagem profunda empregados em estruturas de mineração são descritos a seguir. (CRUZ, 1996; VICK, 1990).

3.2.1 Drenos horizontais profundos (DHP)

Os drenos horizontais profundos consistem em tubos perfurados, providos de filtro geotêxtil ou de pré-filtro granular, instalados por perfuração sub-horizontal — em geral com inclinação ascendente de 3° a 5° em relação à horizontal, no sentido do interior para o exterior do talude — que atravessam o maciço e captam a água por gravidade, conduzindo-a até a face do talude, de onde é encaminhada aos sistemas de drenagem superficial. São dispositivos amplamente empregados em taludes de corte, taludes de cava e taludes de pilhas de estéril, sendo particularmente eficazes para rebaixamento localizado do nível freático em zonas críticas de instabilidade, com custo relativamente baixo e execução rápida quando comparados a soluções mais complexas.

3.2.2 Poços de alívio

Os poços de alívio são perfurações verticais, providas de filtro de areia ou de tela filtrante ao longo do trecho em contato com a camada permeável a ser drenada, que permitem o alívio de poropressões artesianas em camadas confinadas de fundação, situação típica em barragens assentes sobre depósitos aluvionares estratificados, com camadas de areia confinadas entre camadas de menor permeabilidade. A água captada pelos poços de alívio é conduzida, por gravidade ou por bombeamento, até sistemas de coleta superficial. Trata-se de solução amplamente empregada no controle de subpressões em fundações de barragens, sendo tradicionalmente aplicada tanto em barragens de terra convencionais quanto em barragens de rejeitos assentes sobre fundações aluvionares. (CRUZ, 1996; SILVEIRA, 2006).

3.2.3 Tapetes e colchões drenantes

Os tapetes drenantes são camadas horizontais de material granular de alta permeabilidade — areia e brita selecionadas segundo critérios de filtro — dispostas na base de aterros, barragens ou pilhas, com a função de captar a água percolante

ao longo de toda a extensão da estrutura e conduzi-la, por gravidade, até drenos coletores dispostos nas bordas ou no pé da estrutura. São particularmente eficazes no controle da linha freática em barragens de rejeitos alteadas para montante ou por linha de centro, onde a manutenção de um tapete drenante contínuo e eficiente é condição essencial para impedir a emergência da linha freática na face de jusante e a consequente geração de poropressões elevadas na região de maior risco de ruptura. (CRUZ, 1996; VICK, 1990).

3.2.4 Chaminés e trincheiras drenantes

As chaminés drenantes (chimney drains) são elementos verticais ou subverticais de material granular filtrante, dispostos no interior do maciço de barragens de terra ou de rejeitos, com a função de interceptar o fluxo de percolação antes que ele atinja a face de jusante, conduzindo a água captada até tapetes drenantes horizontais de base. As trincheiras drenantes, por sua vez, são valas preenchidas com material granular filtrante, escavadas ao longo do pé de taludes ou de pilhas, com a função de interceptar e captar o fluxo de água subsuperficial proveniente do maciço ou de sua fundação, antes que essa água aflore na face do talude. (CRUZ, 1996; VICK, 1990).

3.2.5 Drenos de pé e drenos de sanduíche

Os drenos de pé (toe drains) são estruturas drenantes dispostas na região de jusante de barragens e pilhas, cuja função é captar toda a água conduzida pelo sistema de drenagem interna — tapetes, chaminés e trincheiras — antes de sua saída da estrutura, evitando a emergência da linha freática na face de jusante e o consequente risco de erosão interna (piping) e de instabilização por saturação da região do pé do talude, tipicamente a mais crítica em termos de fator de segurança. (CRUZ, 1996).

3.2.6 Drenagem de fundação em pilhas de estéril e de rejeito filtrado

Nas pilhas de estéril e nas pilhas de rejeito filtrado, a drenagem de fundação assume papel central, uma vez que a interface entre o material depositado e o terreno natural constitui, com frequência, superfície potencial de ruptura, especialmente quando associada a solos de fundação de baixa permeabilidade ou a

linhas de drenagem natural preexistentes no terreno. O projeto geotécnico dessas estruturas deve prever a implantação de tapetes drenantes de fundação, drenos de fundo de vale (quando a pilha é implantada sobre talvegues) e sistemas de captação de nascentes e de água subterrânea aflorante, de modo a evitar a formação de zonas de poropressão elevada na base da estrutura. (SILVEIRA; MACHADO, 2010).

3.3 Filtros e critérios granulométricos

A eficácia de qualquer sistema de drenagem profunda depende diretamente da adequação granulométrica entre o material filtrante e o material a ser drenado. Um filtro deve, simultaneamente, (i) apresentar permeabilidade suficientemente superior à do material protegido, de modo a não constituir barreira ao fluxo, e (ii) apresentar granulometria suficientemente fina para reter as partículas do material protegido, evitando a migração de finos (fenômeno conhecido como piping ou erosão interna regressiva). Os critérios de filtro clássicos, desenvolvidos a partir dos trabalhos de Terzaghi e posteriormente refinados por diversos autores e incorporados a normas técnicas, estabelecem relações entre os diâmetros característicos (D15, D50, D85) da curva granulométrica do filtro e do material protegido, sendo usualmente expressos por relações do tipo $D_{15}(\text{filtro}) / D_{85}(\text{base}) \leq 5$ (critério de retenção) e $D_{15}(\text{filtro}) / D_{15}(\text{base}) \geq 4$ (critério de permeabilidade). (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; CRUZ, 1996).

No contexto de rejeitos de mineração, cuja granulometria pode ser predominantemente siltica ou argilosa, a aplicação desses critérios exige atenção especial, dado que filtros convencionais projetados para solos naturais podem não ser adequados à retenção de partículas finas de rejeito, tornando necessário o emprego de geotêxteis não tecidos com abertura de filtração (O95) compatível com a curva granulométrica específica do rejeito, complementados, quando necessário, por camadas de transição granular.

3.4 Instrumentação e monitoramento geotécnico

A eficácia dos sistemas de drenagem não pode ser assumida apenas com base no projeto: é imprescindível o monitoramento contínuo, por meio de instrumentação geotécnica, das poropressões e da vazão efetivamente drenada, de modo a verificar se o desempenho real da estrutura corresponde às premissas de

projeto e a detectar precocemente sinais de colmatção, obstrução ou perda de eficiência dos dispositivos de drenagem. (SILVEIRA, 2006; ANM, 2022).

3.4.1 Piezômetros

Os piezômetros — de tubo aberto (Casagrande), pneumáticos, de corda vibrante ou elétricos — são os instrumentos fundamentais para o monitoramento de poropressões no interior de maciços de barragens, pilhas e taludes. A instalação de piezômetros em seções de instrumentação representativas, alinhadas com os drenos internos e com as regiões críticas identificadas em projeto, permite o acompanhamento da linha freática e da razão de poropressão ru ao longo do tempo, servindo de base para a verificação periódica dos fatores de segurança e para a emissão de alertas em caso de tendências de elevação anormal de poropressão. (SILVEIRA, 2006).

3.4.2 Medidores de vazão

Os medidores de vazão instalados nas saídas dos sistemas de drenagem interna — calhas Parshall, vertedores triangulares ou retangulares, e medidores eletromagnéticos — permitem quantificar o volume de água efetivamente captado pelo sistema de drenagem ao longo do tempo. Reduções abruptas ou tendências decrescentes de vazão, sem correspondência com a sazonalidade pluviométrica, constituem indício relevante de colmatção ou obstrução dos drenos, exigindo investigação e manutenção corretiva. (SILVEIRA, 2006).

3.4.3 Inclinômetros, marcos superficiais e demais instrumentos

Complementarmente à instrumentação hidráulica, o monitoramento geotécnico de estruturas de mineração inclui inclinômetros para acompanhamento de deslocamentos horizontais em profundidade, marcos superficiais e sistemas de topografia por GNSS ou por radar interferométrico (InSAR e radares terrestres) para monitoramento de deslocamentos superficiais, e, em estruturas de maior criticidade, sistemas de auscultação acústica para detecção de atividade sísmica interna associada a rupturas incipientes. A integração desses dados com os registros de poropressão e vazão de drenagem compõe o que a literatura técnica denomina painel de segurança da estrutura, sendo hoje amplamente incorporada aos sistemas

de gestão de segurança de barragens exigidos pela legislação brasileira, com o uso crescente de sistemas de monitoramento em tempo real e de alertas automatizados. (SILVEIRA, 2006; ANM, 2022).

4 DRENAGEM APLICADA A TALUDES DE MINERAÇÃO

Nos taludes de cava, o projeto de drenagem profunda decorre, em regra, de estudos hidrogeológicos específicos, que caracterizam a geometria e as propriedades hidráulicas das unidades aquíferas interceptadas pela escavação. O rebaixamento do nível freático no interior do talude é usualmente promovido por meio de sistemas combinados de poços de bombeamento profundo, dispostos ao longo do perímetro ou no interior da cava, e de drenos horizontais profundos, instalados em bancadas específicas para rebaixamento localizado em zonas de maior criticidade estrutural, como taludes com descontinuidades desfavoravelmente orientadas ou setores próximos a zonas de cisalhamento.

A análise de estabilidade de taludes de cava é normalmente conduzida por métodos de equilíbrio limite (Bishop simplificado, Spencer, Morgenstern-Price, entre outros) ou por métodos numéricos de elementos finitos ou diferenças finitas, considerando explicitamente a distribuição de poropressões estimada a partir de modelos de fluxo subterrâneo, calibrados com dados de instrumentação piezométrica de campo. A sensibilidade do fator de segurança à posição da linha freática é, em geral, elevada: reduções da ordem de poucos metros na posição do nível piezométrico podem representar variações significativas no fator de segurança calculado, o que evidencia a relevância da drenagem eficiente como estratégia de gestão de risco geotécnico em cavas de mineração, sobretudo em cavas profundas e taludes de grande altura. (GERSCOVICH, 2016).

Nos taludes de pilhas — de estéril ou de rejeito filtrado —, o projeto de drenagem deve considerar não apenas a drenagem interna do próprio corpo da pilha, mas também a interceptação de águas de contribuição externa, provenientes de bacias hidrográficas de montante, por meio de canaletas de desvio perimetrais, que evitam o lançamento de escoamento superficial adicional sobre a face do talude. A combinação de drenagem superficial eficiente — que reduz a infiltração — com drenagem interna adequada — que dissipa rapidamente a água que eventualmente

infiltra — constitui a estratégia de engenharia recomendada pela literatura técnica para a manutenção de fatores de segurança adequados ao longo de toda a vida útil da estrutura, incluindo as fases de operação, fechamento e pós-fechamento. (GERSCOVICH, 2016; SILVEIRA; MACHADO, 2010).

Merece destaque, ainda, a interação entre drenagem e condições climáticas extremas. Eventos pluviométricos intensos e concentrados, cuja frequência e magnitude têm sido objeto de crescente atenção em estudos de mudança climática, podem superar a capacidade de projeto dos sistemas de drenagem superficial, gerando infiltração adicional não prevista e elevação transitória de poropressões. Por essa razão, a prática técnica recomenda a adoção de margens de segurança adequadas no dimensionamento hidrológico, a revisão periódica dos períodos de retorno de projeto à luz de séries históricas atualizadas, e a manutenção preventiva contínua dos dispositivos de drenagem superficial, cuja obstrução por sedimentos, vegetação ou material erodido reduz significativamente sua capacidade efetiva de escoamento.

5 DRENAGEM EM PILHAS DE ESTÉRIL

As pilhas de estéril apresentam desafios de drenagem específicos, decorrentes de sua construção por lançamento de grandes blocos de rocha, muitas vezes sem controle granulométrico rigoroso, e de sua exposição direta às condições climáticas ao longo de toda a vida útil da mina, que pode se estender por décadas. O projeto de drenagem dessas estruturas deve ser concebido de forma integrada, contemplando drenagem de fundação, drenagem interna e drenagem superficial. (SILVEIRA; MACHADO, 2010).

5.1 Drenagem de fundação

Previamente ao início da disposição de estéril, é prática recomendada a caracterização detalhada da hidrogeologia local, incluindo identificação de nascentes, cursos d'água intermitentes e zonas de maior permeabilidade no terreno de fundação. Quando a pilha é implantada sobre talvegues ou vales, torna-se necessária a implantação de sistemas de drenagem de fundo de vale, compostos por tubulações de grande diâmetro envoltas em material filtrante granular,

dimensionadas para captar e conduzir tanto o fluxo de base (base flow) quanto eventuais vazões de cheia associadas à bacia de contribuição interceptada pela pilha, sob pena de acúmulo de água na base da estrutura e desenvolvimento de poropressões elevadas na interface pilha-fundação, região frequentemente identificada como superfície potencial de ruptura em análises de estabilidade de pilhas de estéril. (SILVEIRA; MACHADO, 2010).

5.2 Drenagem interna e segregação granulométrica

A segregação granulométrica natural que ocorre durante a construção de pilhas de estéril por basculamento — com blocos de maior dimensão rolando até a base do talude e material fino concentrando-se na porção superior — pode ser aproveitada, quando adequadamente compreendida e controlada, como mecanismo de drenagem interna natural, uma vez que a zona de blocos grossos na base da pilha apresenta, em geral, elevada permeabilidade. Entretanto, essa mesma segregação pode gerar zonas de baixa permeabilidade em camadas intermediárias, formadas pelo acúmulo de material fino carreado durante sucessivos ciclos de deposição, criando barreiras hidráulicas internas que favorecem a formação de zonas de saturação e de poropressão elevada em pontos específicos do maciço, exigindo, portanto, caracterização geotécnica cuidadosa e, quando necessário, a complementação com drenos horizontais profundos ou trincheiras drenantes internas. (SILVEIRA; MACHADO, 2010).

5.3 Drenagem superficial e controle de erosão

A drenagem superficial em pilhas de estéril deve contemplar a interceptação de águas de contribuição externa, por meio de canaletas de desvio de montante, e a captação e condução controlada das águas incidentes diretamente sobre a face e o platô da pilha, por meio de canaletas de crista, de berma e de descida, revestidas ou providas de dissipadores de energia. A erosão superficial não controlada, além de comprometer a integridade da face do talude, pode gerar sedimentos que colmatam os sistemas de drenagem a jusante, incluindo bacias de contenção de sedimentos, com potencial de comprometimento ambiental adicional. A recuperação ambiental progressiva das faces já concluídas — por meio de reconformação geométrica, cobertura com solo vegetal e revegetação — constitui, adicionalmente, importante

medida de controle de infiltração e de erosão de longo prazo. (SILVEIRA; MACHADO, 2010).

5.4 Encerramento e drenagem de longo prazo

Um aspecto frequentemente subestimado no projeto de pilhas de estéril é a necessidade de garantir a funcionalidade dos sistemas de drenagem ao longo do período pós-fechamento, que pode se estender por dezenas ou centenas de anos. Dispositivos de drenagem construídos em materiais suscetíveis à colmatção química — por exemplo, precipitação de óxidos de ferro em drenos expostos a drenagem ácida de mina — exigem previsão de manutenção de longo prazo ou adoção de soluções de drenagem passiva de maior robustez, como camadas de cobertura multicamadas (covers) projetadas para minimizar a infiltração de água de chuva no corpo da pilha após o encerramento das operações, reduzindo a demanda futura sobre os sistemas de drenagem interna.

6 DRENAGEM EM ESTRUTURAS DE REJEITOS

As estruturas de disposição de rejeitos constituem, dentre as estruturas geotécnicas de mineração, aquelas em que a drenagem desempenha o papel mais crítico para a segurança, em razão da natureza predominantemente saturada ou parcialmente saturada do material disposto e da suscetibilidade de determinados rejeitos — sobretudo os arenosos, fofos e saturados — ao fenômeno de liquefação estática. (VICK, 1990; ICOLD, 2001).

6.1 Barragens de rejeitos alteadas

Nas barragens de rejeitos construídas por alteamentos sucessivos — a montante, a jusante ou por linha de centro —, o sistema de drenagem interna deve ser projetado para acompanhar o crescimento da estrutura ao longo do tempo, mantendo a linha freática em posição segura, tipicamente rebaixada, no interior do maciço a cada novo alteamento. No método de alteamento a jusante e por linha de centro — atualmente os únicos admitidos para novas estruturas no Brasil, em razão da proibição legal do método a montante —, a implantação de tapetes drenantes contínuos de base, complementados por chaminés drenantes verticais ou inclinadas

posicionadas no núcleo de cada novo alteamento, constitui prática de projeto consolidada para o controle das poropressões internas. (VICK, 1990; ANM, 2022).

A eficácia da drenagem interna nessas estruturas depende criticamente da continuidade hidráulica entre os sistemas de drenagem de diferentes etapas construtivas, sendo prática recomendada a interligação física e a verificação, por meio de instrumentação, da efetiva comunicação hidráulica entre drenos de diferentes alteamentos, de modo a evitar a formação de compartimentos hidraulicamente isolados no interior do maciço, que poderiam reter poropressões elevadas não detectadas pela instrumentação instalada em outras regiões da estrutura.

6.2 Rejeito filtrado (empilhamento a seco)

O empilhamento de rejeito filtrado, também conhecido como disposição em pilha ou dry stacking, consiste na desidratação mecânica do rejeito — por meio de filtros-prensa ou filtros a vácuo — até um teor de umidade próximo ao ótimo de compactação, seguida de sua disposição e compactação em camadas, de forma análoga à construção de um aterro compactado convencional. Essa técnica reduz significativamente o grau de saturação inicial do material e, conseqüentemente, o risco de liquefação estática, sendo amplamente recomendada pela literatura técnica recente e pelo arcabouço regulatório brasileiro como alternativa de maior segurança relativa em comparação às barragens convencionais de rejeitos em polpa. (ANM, 2022; ABNT, 2017).

Ainda assim, as pilhas de rejeito filtrado não estão isentas de riscos associados à água: a infiltração de águas pluviais ao longo dos anos de operação e, especialmente, após o encerramento da disposição, pode elevar progressivamente o grau de saturação do material, sobretudo em climas de elevada pluviosidade, tornando indispensável a previsão de sistemas de drenagem de fundação — tapetes drenantes basais — e de drenagem superficial eficiente, incluindo a compactação adequada e a conformação de taludes com declividades que favoreçam o escoamento superficial e minimizem a infiltração. (ABNT, 2017).

6.3 Rejeito espessado e em pasta

A disposição de rejeitos espessados ou em pasta — obtidos por espessamento em espessadores de alta densidade, sem a etapa adicional de filtragem mecânica — representa solução intermediária entre a disposição convencional em polpa e o empilhamento filtrado, reduzindo o teor de água livre do material e, conseqüentemente, a demanda sobre os sistemas de drenagem, ainda que em grau inferior ao alcançado pela filtragem. O projeto de pilhas de rejeito espessado ou em pasta deve igualmente prever sistemas de drenagem de fundação e de drenagem superficial, dimensionados a partir de estudos específicos de comportamento reológico e de consolidação do material, que apresenta propriedades hidráulicas e mecânicas intermediárias entre um fluido viscoso e um solo de baixa consistência nas fases iniciais de deposição.

6.4 Regulamentação brasileira pós-Brumadinho

A partir de 2019, o arcabouço regulatório brasileiro de segurança de barragens de mineração foi substancialmente reformulado. A Lei Federal nº 14.066/2020 alterou a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), e a Agência Nacional de Mineração editou a Resolução ANM nº 95/2022, que consolidou requisitos técnicos para elaboração de projetos, construção, operação e descomissionamento de barragens de mineração, incluindo exigências específicas relativas a sistemas de drenagem interna e de superfície, à instrumentação geotécnica mínima exigida, à elaboração de Planos de Segurança de Barragem, à realização de Revisões Periódicas de Segurança de Barragem (RPSB) por profissional legalmente habilitado, e à Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), que deve atestar, entre outros aspectos, a adequação dos sistemas de drenagem e o controle das poropressões da estrutura. Essas exigências normativas consolidam, no plano regulatório, o entendimento técnico de que a drenagem constitui elemento estrutural de segurança, sujeito à verificação formal e periódica ao longo de todo o ciclo de vida da barragem ou pilha de rejeitos. (BRASIL, 2020; ANM, 2022).

7 ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE DRENAGEM PROFUNDA

Este capítulo retoma e atualiza, à luz da revisão bibliográfica desenvolvida neste artigo, um estudo comparativo de alternativas técnicas de drenagem profunda originalmente elaborado em trabalho de conclusão de curso, cujo objetivo foi subsidiar a escolha da solução de drenagem profunda mais adequada para uma situação típica de rebaixamento de nível freático em talude de mineração, considerando simultaneamente critérios de vazão de projeto, nível de segurança proporcionado, custo de implantação e prazo executivo. São comparadas quatro alternativas: drenos horizontais profundos (DHP), poços de alívio, tapetes drenantes e trincheiras drenantes verticais.

7.1 Critérios de comparação

A escolha da solução de drenagem profunda mais adequada a um determinado contexto geotécnico não pode ser realizada exclusivamente com base em um único critério técnico ou econômico, mas deve resultar de análise multicritério que pondere, de forma integrada, quatro dimensões fundamentais, detalhadas a seguir.

O critério de vazão refere-se à capacidade de captação e condução de água de cada alternativa, expressa em litros por segundo ou metros cúbicos por hora, e deve ser compatibilizado com a vazão de percolação estimada para o maciço em análise, obtida a partir de modelos de fluxo subterrâneo calibrados com ensaios de campo (permeabilidade *in situ*, ensaios de bombeamento) e de laboratório.

O critério de segurança refere-se à magnitude do rebaixamento do nível freático ou da redução de poropressão proporcionada pela alternativa, à sua confiabilidade ao longo do tempo — incluindo suscetibilidade à colmatção e facilidade de manutenção — e a sua capacidade de gerar redundância no sistema global de drenagem, de modo que a falha eventual de um dispositivo isolado não comprometa a segurança geral da estrutura.

O critério de custo compreende os custos diretos de implantação — mobilização, perfuração ou escavação, materiais filtrantes e tubulação, mão de obra

especializada — e os custos indiretos associados à operação e manutenção ao longo da vida útil do dispositivo.

O critério de prazo refere-se ao tempo necessário para a mobilização, execução e entrada em operação de cada alternativa, fator especialmente relevante em situações de resposta emergencial a sinais de instabilidade, nas quais a rapidez de implantação pode ser determinante para a mitigação tempestiva do risco identificado.

7.2 Drenos horizontais profundos (DHP)

Os drenos horizontais profundos apresentam, como principal vantagem, a rapidez de execução e o custo relativamente reduzido por unidade de comprimento, uma vez que sua instalação demanda equipamentos de perfuração rotativa de médio porte, mobilizáveis mesmo em frentes de talude de acesso restrito, e prescinde de escavações de grande volume. A vazão captada por dreno individual é, em geral, moderada, variando tipicamente entre frações de litro por segundo e poucos litros por segundo por dreno, a depender da permeabilidade do maciço e do comprimento executado, o que torna necessária a instalação de múltiplos drenos em leque, a partir de uma mesma plataforma ou de plataformas escalonadas ao longo do talude, para se atingir a vazão total de projeto requerida em situações de maior demanda.

Em termos de segurança, os DHP são particularmente eficazes para o rebaixamento localizado do nível freático em zonas específicas de maior criticidade geotécnica, sendo amplamente utilizados como medida corretiva em taludes que apresentam sinais de instabilidade incipiente, dada a possibilidade de execução relativamente rápida mesmo em condições operacionais adversas. Sua principal limitação de segurança reside na suscetibilidade à colmatação ao longo do tempo — por precipitação química, por migração de finos ou por crescimento biológico no interior do filtro —, o que exige monitoramento periódico da vazão individual de cada dreno e, quando necessário, operações de limpeza (jateamento de alta pressão) ou reperfuração.

Quanto ao prazo, os DHP figuram entre as alternativas de drenagem profunda de mais rápida implantação, com execução de cada dreno individual usualmente

concluída em poucos dias, o que os torna particularmente adequados para situações de resposta emergencial a alertas de instrumentação geotécnica.

7.3 Poços de alívio

Os poços de alívio apresentam vazão individual tipicamente superior à dos drenos horizontais profundos, sobretudo quando instalados em camadas de fundação de elevada permeabilidade e de espessura significativa, sendo particularmente adequados ao controle de subpressões artesianas em camadas confinadas de fundação. Sua execução, entretanto, demanda equipamentos de perfuração vertical de maior porte e maior tempo de mobilização e execução em comparação aos DHP, especialmente quando é necessária a instalação de filtro de areia calibrado ao longo de todo o trecho ativo do poço.

Em termos de segurança, os poços de alívio oferecem elevada confiabilidade para o controle de poropressões de fundação, sendo tecnologia consolidada e amplamente empregada em barragens convencionais há décadas, com histórico extenso de desempenho documentado na literatura técnica. Sua principal limitação está associada à necessidade de manutenção periódica dos filtros, sujeitos a colmatagem por precipitação química de óxidos e carbonatos, especialmente em ambientes com águas subterrâneas ricas em ferro e manganês, fenômeno que pode reduzir progressivamente a eficiência hidráulica do dispositivo ao longo dos anos, exigindo monitoramento contínuo de vazão e, eventualmente, substituição ou reperfuração.

Quanto ao custo, os poços de alívio apresentam, em geral, custo unitário de implantação superior ao dos drenos horizontais profundos, em razão da maior complexidade executiva, ainda que sua maior capacidade de vazão individual possa resultar em custo total comparável ou inferior quando se busca atingir uma vazão de projeto elevada, dado que se necessita de menor número de dispositivos.

7.4 Tapetes drenantes

Os tapetes drenantes distinguem-se das duas alternativas anteriores por constituírem solução de drenagem distribuída ao longo de toda a área de base da estrutura, e não pontual ou linear, o que lhes confere elevada capacidade de captação

de vazão quando adequadamente dimensionados, sendo a alternativa tipicamente mais eficaz para o controle da linha freática em barragens de rejeitos e aterros de grande extensão em planta. Por serem implantados durante a fase de construção da estrutura — como parte do preparo de fundação —, os tapetes drenantes não constituem, em regra, alternativa aplicável como medida corretiva em estruturas já construídas, ao contrário dos DHP e dos poços de alívio.

Do ponto de vista de segurança, os tapetes drenantes, quando corretamente projetados e executados com material filtrante compatível com o material sobrejacente, oferecem elevado nível de confiabilidade de longo prazo, por não dependerem de elementos mecânicos ou de perfurações individuais sujeitas a colmatção pontual, mas sim de uma camada contínua de grande área, cuja eventual colmatção parcial em determinados pontos não compromete necessariamente a função global do sistema, conferindo-lhe caráter de maior redundância intrínseca.

Quanto ao custo e ao prazo, os tapetes drenantes demandam grande volume de material granular selecionado e mão de obra para sua execução, o que se traduz em custo total elevado quando comparado, em termos absolutos, aos DHP e aos poços de alívio, ainda que o custo por unidade de área possa ser competitivo em obras de grande porte. O prazo de execução é, em geral, o mais longo entre as quatro alternativas comparadas, uma vez que sua implantação está vinculada ao cronograma geral de construção da estrutura, não sendo aplicável como solução de resposta rápida a situações emergenciais.

7.5 Trincheiras drenantes verticais

As trincheiras drenantes verticais, escavadas ao longo do pé de taludes ou de pilhas e preenchidas com material granular filtrante, apresentam vazão de captação intermediária entre os DHP e os tapetes drenantes, sendo particularmente eficazes para a interceptação de fluxos subsuperficiais concentrados, como os provenientes de camadas permeáveis específicas identificadas em investigação geotécnica, ou de nascentes e ressurgências localizadas na base de taludes e pilhas.

Em termos de segurança, as trincheiras drenantes combinam parte das vantagens dos tapetes — por constituírem elemento contínuo ao longo de sua extensão — com maior flexibilidade de implantação, podendo ser executadas tanto

na fase de construção quanto como medida corretiva em estruturas já implantadas, desde que haja acesso adequado para os equipamentos de escavação. Sua principal limitação de segurança está associada à profundidade máxima executável por métodos convencionais de escavação — em geral limitada a poucos metros, salvo o emprego de técnicas especiais como escavação com lama bentonítica ou cortina de estacas —, o que restringe sua aplicabilidade a situações em que a zona de interesse hidráulico se encontra em profundidade relativamente rasa.

Quanto ao custo e ao prazo, as trincheiras drenantes apresentam, em geral, custo intermediário entre os DHP e os tapetes drenantes, com prazo de execução também intermediário, dependente principalmente da extensão linear necessária e das condições de escavabilidade do material a ser removido.

7.6 Análise comparativa integrada

O Quadro 1 sintetiza a comparação qualitativa das quatro alternativas de drenagem profunda analisadas, segundo os critérios de vazão, segurança, custo e prazo, com base na revisão bibliográfica e na atualização do estudo comparativo desenvolvido originalmente em trabalho de conclusão de curso. As categorias apresentadas são relativas e qualitativas, devendo ser interpretadas no contexto das condições de aplicabilidade descritas, e não como notas universais de desempenho.

Critério	Drenos horizontais profundos (DHP)	Poços de alívio	Tapetes drenantes	Trincheiras drenantes verticais
Vazão por dispositivo	Baixa a moderada, em termos relativos; pode requerer múltiplos drenos em leque	Moderada a alta, conforme permeabilidade da camada	Alta, distribuída em toda a área de base	Moderada, concentrada ao longo da linha da trincheira
Nível de segurança	Bom para rebaixamento localizado; sensível a colmatação	Elevado para subpressões de fundação confinada; sensível a colmatação química	Potencialmente elevado e redundante para controle global da linha freática, conforme projeto	Bom para interceptação de fluxos concentrados rasos
Custo relativo	Baixo a moderado por unidade	Moderado a alto por unidade, competitivo em vazões elevadas	Alto em termos absolutos; competitivo por área em grandes obras	Moderado, intermediário entre DHP e tapete
Prazo de execução	Curto (dias); ideal para resposta emergencial	Moderado; maior mobilização de equipamento	Longo; vinculado ao cronograma construtivo geral	Moderado; depende da extensão e da escavabilidade
Aplicabilidade típica	Correção e prevenção em taludes já implantados	Controle de subpressão em fundações aluvionares estratificadas	Barragens e aterros de grande extensão em planta, fase de projeto/construção	Interceptação de nascentes e camadas permeáveis rasas

Quadro 1 — Comparação qualitativa entre alternativas de drenagem profunda. Fonte: elaborado pela autora, com base em revisão bibliográfica e atualização de estudo comparativo originalmente desenvolvido em trabalho de conclusão de curso. As classificações sintetizam tendências descritas nas referências técnicas e no estudo comparativo anterior, sem representar orçamento, produtividade ou capacidade hidráulica aplicáveis indistintamente a qualquer empreendimento.

A análise integrada do quadro comparativo evidencia que não existe alternativa universalmente superior entre as quatro soluções analisadas: a escolha ótima depende do contexto geológico-geotécnico específico, do estágio do ciclo de vida da obra — projeto, construção, operação ou resposta emergencial — e do balanço entre urgência, orçamento disponível e nível de segurança requerido pela

classificação de risco e categoria de dano potencial associado à estrutura. Em termos gerais, observa-se que os drenos horizontais profundos podem constituir alternativa particularmente adequada para respostas rápidas a sinais de instabilidade em estruturas já implantadas, dado seu curto prazo de execução e custo relativamente reduzido; os poços de alívio são indicados sobretudo para o controle de subpressões em fundações aluvionares confinadas, situação para a qual os DHP e as trincheiras não constituem solução tecnicamente adequada; os tapetes drenantes podem oferecer elevada robustez e redundância quando corretamente projetados e executados para o controle da linha freática em barragens e aterros de grande porte, devendo ser previstos já na fase de projeto e construção; e as trincheiras drenantes verticais ocupam posição intermediária, sendo particularmente úteis para a interceptação de fluxos concentrados rasos, tanto em fase de projeto quanto como medida corretiva.

Cabe destacar, por fim, que essas alternativas não são mutuamente excludentes, sendo frequente e tecnicamente recomendável, na prática de engenharia, a combinação de duas ou mais soluções em um mesmo projeto de drenagem — por exemplo, tapetes drenantes de base complementados por drenos horizontais profundos em zonas críticas específicas, ou poços de alívio de fundação combinados com trincheiras drenantes de interceptação superficial —, de modo a conferir ao sistema global de drenagem a redundância necessária para garantir a segurança da estrutura mesmo em caso de falha ou perda de eficiência localizada de um de seus componentes.

8 DISCUSSÃO

A revisão desenvolvida ao longo deste artigo permite retomar, de forma integrada, o problema de pesquisa proposto: qual a influência dos sistemas de drenagem na estabilidade e na segurança operacional de estruturas geotécnicas de mineração? A análise dos fundamentos de mecânica dos solos — em especial do princípio das tensões efetivas e do critério de ruptura de Mohr-Coulomb — demonstra, de forma inequívoca, que a poropressão constitui variável de controle direto da resistência ao cisalhamento mobilizável em solos e rejeitos, e que os sistemas de drenagem, superficiais e profundos, são os principais instrumentos de

engenharia disponíveis para o controle ativo dessa variável ao longo da vida útil de taludes, pilhas de estéril e estruturas de disposição de rejeitos.

A discussão dos casos de Fundão e de Brumadinho reforça, sob perspectiva empírica, que o estado hidráulico do maciço e o controle de poropressões são componentes relevantes da segurança de estruturas de rejeitos. Os documentos técnicos referenciados descrevem mecanismos complexos de ruptura, nos quais saturação, comportamento dos rejeitos, condições construtivas e operacionais e outros fatores interagem. Por essa razão, o presente artigo não atribui causalidade exclusiva à drenagem; utiliza esses casos para evidenciar a necessidade de que sistemas de controle hidráulico sejam projetados, monitorados e reavaliados como parte de um sistema integrado de gestão de segurança. (PAINEL DE ESPECIALISTAS, 2019; PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA, 2016).

O estudo comparativo de alternativas de drenagem profunda, retomado e atualizado a partir de trabalho de conclusão de curso anterior, contribui para essa discussão ao evidenciar que a decisão técnica sobre qual dispositivo de drenagem empregar não pode ser reduzida a um único critério — seja ele exclusivamente técnico (vazão) ou exclusivamente econômico (custo) —, devendo resultar de análise multicritério que pondere também a confiabilidade de longo prazo de cada alternativa e o prazo necessário para sua implantação, especialmente relevante em cenários de resposta a sinais de instabilidade identificados pela instrumentação geotécnica.

Um ponto de convergência entre a literatura técnica revisada e o estudo comparativo atualizado é a constatação de que a drenagem eficaz não decorre exclusivamente da escolha de um dispositivo tecnicamente adequado, mas depende igualmente da qualidade da execução — em especial da compatibilidade granulométrica entre filtros e materiais protegidos — e da manutenção contínua ao longo da vida útil da estrutura, incluindo monitoramento periódico de vazões e poropressões, limpeza preventiva de dispositivos sujeitos a colmatção, e revisão dos projetos de drenagem sempre que houver alteração relevante na geometria da estrutura, como ocorre nos sucessivos alteamentos de barragens de rejeitos ou no avanço progressivo de pilhas de estéril. (CRUZ, 1996; SILVEIRA, 2006).

Outro aspecto que emerge da discussão é a relação de complementaridade entre drenagem e instrumentação geotécnica: os sistemas de drenagem reduzem as

poropressões e, portanto, o risco de instabilização, mas é a instrumentação — piezômetros, medidores de vazão, inclinômetros e demais sensores — que permite verificar, ao longo do tempo, se essa redução está de fato ocorrendo conforme previsto em projeto, constituindo-se em mecanismo essencial de verificação e de alerta precoce. A integração entre projeto de drenagem, plano de instrumentação e sistema de gestão de segurança de barragens, hoje formalmente exigida pelo arcabouço regulatório brasileiro pós-Brumadinho, representa, portanto, não apenas uma exigência legal, mas uma consequência lógica dos fundamentos técnicos discutidos ao longo deste artigo. (SILVEIRA, 2006; ANM, 2022).

Por fim, cabe reconhecer como limitação deste trabalho o fato de se tratar de estudo predominantemente bibliográfico e qualitativo, sem a aplicação de modelagem numérica de fluxo subterrâneo ou de análises de estabilidade específicas para um caso real, o que poderia aprofundar quantitativamente a comparação entre as alternativas de drenagem profunda discutidas no Capítulo 7. Recomenda-se, como direção para trabalhos futuros, a aplicação do referencial teórico e do estudo comparativo aqui desenvolvidos a um caso real de estrutura geotécnica de mineração, com a modelagem numérica de fluxo e de estabilidade sob diferentes cenários de drenagem, de modo a quantificar, para um contexto específico, os ganhos de fator de segurança associados a cada alternativa analisada.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo analisar a influência dos sistemas de drenagem sobre a estabilidade e a segurança operacional de estruturas geotécnicas de mineração, com foco em taludes, pilhas de estéril e estruturas de disposição de rejeitos. A partir da revisão dos fundamentos de mecânica dos solos aplicados à poropressão e à resistência ao cisalhamento, da caracterização dos principais dispositivos de drenagem superficial e profunda, da discussão de casos emblemáticos de ruptura associados à drenagem deficiente e da atualização de um estudo comparativo de alternativas de drenagem profunda originalmente desenvolvido em trabalho de conclusão de curso, foi possível concluir que a drenagem constitui elemento estrutural de segurança geotécnica, e não item acessório de projeto.

A síntese bibliográfica desenvolvida sustenta a conclusão de que os sistemas de drenagem exercem influência direta e determinante sobre a estabilidade e a segurança operacional de estruturas geotécnicas de mineração, ao controlar a poropressão atuante no maciço e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento mobilizável nas superfícies potenciais de ruptura. Essa influência se manifesta tanto de forma preventiva — pela manutenção de fatores de segurança adequados ao longo da operação normal da estrutura — quanto de forma corretiva — pela possibilidade de emprego de dispositivos de drenagem profunda, como os drenos horizontais profundos, como resposta rápida a sinais de instabilidade identificados pela instrumentação geotécnica.

O estudo comparativo apresentado no Capítulo 7 indica que a escolha entre drenos horizontais profundos, poços de alívio, tapetes drenantes e trincheiras drenantes verticais deve resultar de análise multicritério, que pondere vazão de projeto, nível de segurança, custo de implantação e prazo executivo em função do contexto geológico-geotécnico específico e do estágio do ciclo de vida da obra, sendo frequentemente recomendável a combinação de duas ou mais alternativas em um mesmo sistema de drenagem, de modo a conferir a redundância necessária à segurança da estrutura.

Do ponto de vista prático, os resultados deste artigo reforçam a importância de que projetos de drenagem de estruturas geotécnicas de mineração sejam elaborados por profissionais habilitados, com base em investigação geotécnica e hidrogeológica adequada, sejam submetidos a verificação periódica de desempenho por meio de instrumentação geotécnica integrada, e sejam objeto de manutenção contínua ao longo de todo o ciclo de vida da estrutura, incluindo as fases de operação, fechamento e pós-fechamento, em conformidade com as exigências do atual arcabouço regulatório brasileiro de segurança de barragens. (ANM, 2022; ABNT, 2017).

Como direções para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do referencial teórico e do estudo comparativo desenvolvidos neste artigo a estudos de caso reais, com emprego de modelagem numérica de fluxo subterrâneo e de análises de estabilidade sob diferentes cenários de drenagem, de modo a quantificar, para contextos geotécnicos específicos, os ganhos de fator de segurança associados a cada alternativa de drenagem profunda analisada, bem como a investigação aprofundada

de soluções de drenagem de longo prazo para estruturas em fase de encerramento e pós-fechamento, tema de crescente relevância diante do número crescente de estruturas de mineração brasileiras que se encontram, atualmente, nessas fases do ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que regulamentam a política de segurança de barragens de mineração. Brasília, DF: ANM, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos, barramentos, pilhas de estéril e depósitos de rejeitos filtrados nas atividades de mineração – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2020.

CRUZ, Pedro Teixeira da. 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

GERSCOVICH, Denise M. S. Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Tailings dams: risk of dangerous occurrences – lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. Paris: ICOLD, 2001.

MINAS GERAIS. Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019. Dispõe sobre a Política Estadual de Segurança de Barragens e cria o Cadastro Estadual de Barragens de Mineração. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2019.

PAINEL DE ESPECIALISTAS (EXPERT PANEL). Relatório final do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem I da Mina Córrego do Feijão. Brumadinho: Vale S.A., 2019.

PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA. Relatório de auditoria técnica de segurança de barragem – Fundão. Mariana: Samarco Mineração S.A., 2016.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVEIRA, João Francisco Alves. Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de terra e enrocamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVEIRA, José Fernando A.; MACHADO, Sandro Lemos. Pilhas de estéril e de rejeitos: aspectos geotécnicos de projeto e construção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, Gramado. Anais [...]. Gramado: ABMS, 2010.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. Soil mechanics in engineering practice. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

VICK, Steven G. Planning, design, and analysis of tailings dams. Vancouver: BiTech Publishers, 1990.