

3 Controle das águas em projetos de mineração

3.1. Introdução

Existem muitas evidências ao longo da história da civilização em que o homem mostrou ter feito tentativas para efetivar o controle das águas e este processo não é tão simples como parece (Powers *et al.*, 2007). Hoje em dia é de grande importância o entendimento dos diferentes processos utilizados no gerenciamento do controle das águas subterrâneas na mineração, onde mesmo em situações simples, a matemática do fluxo subterrâneo é complexa, e aquíferos naturais estão longe da simplicidade.

A infiltração das águas a partir de estratos circundantes para o interior da cava⁴ ou pedreira⁵ requer da implementação de um sistema de controle para um processo de rebaixamento com o intuito de assegurar que o lugar de trabalho permaneça seco.

Neste tipo de processos, um conceito mal interpretado de uma análise não associada com julgamentos hidrogeológicas faz com que o procedimento de rebaixamento seja afirmado como um processo a ser realizado em qualquer lugar onde há problemas relacionados com a água. Contudo, este processo é mais do que um simples rebaixamento da superfície piezométrica, e vai além do que meramente instalar um poço de bombeamento.

3.2. Conceito de rebaixamento e controle de águas

O processo de rebaixamento e monitoramento do nível do lençol freático é difícil, caro e frequentemente confuso. Este encarecimento significativo incentivou pelos anos 50 o desenvolvimento de técnicas práticas para ensaios e

⁴ É a escavação a céu aberto em forma de um enorme buraco, com bancadas (degraus) descendentes para a extração de bens minerais. O material escavado é composto de mineral estéril.

⁵ Região escavada que pode ter as dimensões de uma cava cujo material extraído é usado na construção de obras civis.

análises em aquíferos, direcionados para o abastecimento de água e irrigação, como as propostas pelos hidrologistas Muskat, Theis, Jacob, Hantush e outros; e esses métodos foram depois adaptados à solução de problemas de rebaixamento do lençol freático.

De acordo com Hall (2003), o “rebaixamento do lençol freático” envolve a remoção de uma quantidade de água da massa rochosa ou perfil de solo, de tal forma que os níveis de água sejam rebaixados para brindar segurança e economia à mina. Fisicamente este processo é definido como uma drenagem dos poros dentro da massa do solo ou rocha, e que resulta no rebaixamento do lençol freático.

Quando aplicado na indústria da mineração, os processos de rebaixamento do lençol freático e controle das águas, por criarem o cone extensivo de depressão, causam benefícios principalmente por reduzirem os custos de explosão, *i.e.*, quando o minério está seco, menos emulsão explosiva é requerida, reduzindo até os custos de transporte (combustível) e o desgaste da máquina e também melhora na trafegabilidade e qualidade do minério (Rowe & Beale, 2007). Porém, a aplicabilidade destes processos deve ser bem conceitualizada, onde uma análise técnico-econômica deva ser amplamente avaliada para que somente o necessário seja executado pela indústria da mineração para um bom funcionamento dos processos de mineração, de tal forma que a natureza não se veja afetada por estas mudanças. Técnicas para o controle das águas devem ser postas em práticas para idealizar um sistema que não seja antieconômico e que ao mesmo tempo não prejudique à natureza.

3.3. Despressurização de taludes

Este mecanismo de despressurização é um problema comum em taludes profundos em projetos de mineração, que requerem reduzir o potencial de pressão excessiva dentro dos taludes da cava. Também, apresenta-se como levantamento do chão da cava sob a presença de sequências de aquíferos embebidos em camadas fracas de aquícludes. Embora a flutuação da poropressão seja um fator importante que contribui ao deslizamento, é muito importante entender as reais interações da poropressão que ocorrem em uma superfície de deslizamento ao

longo da profundidade devido à natureza complexa das condições hidrogeológicas (Tsao *et al.*, 2005).

Em minas a céu aberto, mais de 40% dos riscos de instabilidade de taludes dependem das suas condições de fluxo. Consequentemente, o ângulo que um talude a ser escavado em segurança deve ter é definido em função do campo de poropressões presentes neste. Assim, para prevenir a sua ruptura, um sistema de drenagem deve ser instalado. Para Powers *et al.*, 2007; Atkinson, 2001 e Brown, 1981, a importância do controle das águas superficiais nos taludes é destacada.

Quando um talude é despressurizado ao máximo possível, a inclinação deste pode suportar um acréscimo de 10° a mais do que um talude em condições saturadas, e isto é possível de ser aplicado de maneira vantajosa quando se trabalha com projetos de mineração, devido a que este reduz consideravelmente os volumes de corte. Esta atividade é considerada neste tipo de projetos como uma solução muito efetiva e ainda econômica.

3.4. Técnicas de controle das águas em minas subterrâneas

Métodos de controle consistem na prevenção (limitação da infiltração das águas, ou do bombeamento antes de que estas entrem na mina), ou no bombeamento da água desde a mina.

Existem diversas técnicas de controle, mas só algumas destas são práticas e economicamente aplicáveis para minas subterrâneas. A continuação uma breve descrição das técnicas mais implementadas:

- Impermeabilização da superfície de terreno
- Congelamento do terreno
- *Grouting*
- Drenagem de mina

3.4.1. Impermeabilização da superfície do terreno

Este método consiste na impermeabilização de fontes de águas superficiais (*e.g.*, rios) que descarregam água no aquífero, a qual poderia percolar em direção à mina. Este método foi usado com sucesso em várias minas ao redor do mundo.

Na mina Neves-Corvo no Portugal, o selamento do curso de um rio foi feito com concreto reforçado e injeção de *shotcrete* nas bancas do rio (Figura 3.1), o que reduziu substancialmente o fluxo de infiltração à mina (Carvalho *et al.*, 1990). Outra impermeabilização com resultados exitosos do curso de um rio que fluía ao redor de uma área impactada por subsidência foi reportada em Konkola Mine na Zambia (Freeman, 1970). Nesta mina foram seladas as trincas geradas por subsidência.

Esta técnica está sendo aplicada neste trabalho de dissertação para o caso da mina subterrânea (Capítulo 4) avaliando a impermeabilização parcial ou total do rio circunjacente à mina de Vazante.

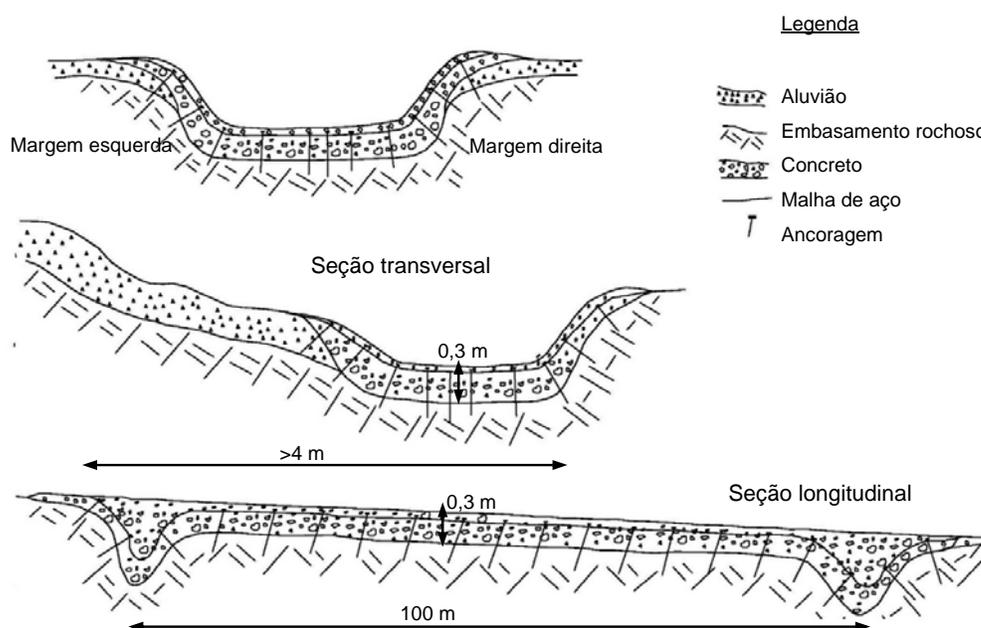


Figura 3.1 - Esquematisação dos trabalhos de concreto no rio Oerias (Carvalho, 1990)

3.4.2. Congelamento do terreno

O princípio deste método é tornar a água do solo em uma parede de gelo, geradas pela circulação de um fluido criogénico dentro de um sistema de tubos verticais, os quais são instalados ao redor do objetivo, gerando, dessa forma, um muro completamente impermeável (*cut-off*). O congelamento pode ser um método muito eficiente em determinadas condições hidrogeológicas, porém, a avaliação

econômica é muito importante devido a que este método é muito custoso não sendo normalmente viável sua aplicação em minas subterrâneas, mas existem muitos registros exitosos do seu uso na impermeabilização dos *shaft*. A diferença de outros métodos de *cut-off*, congelamento do terreno é uma técnica pouco invasiva, já que esta requer menos penetração em comparação com os outros métodos, devido a que sua efetividade propaga-se termicamente. Uma vez instalado este sistema de *piping*, o congelamento do terreno permanece ativo em quanto o sistema esteja operando, uma vez que o sistema parar, o meio subterrâneo volta a seu estado inicial.

3.4.3. Grouting

Embora o *grouting* tenha diversas aplicações, neste caso, o principal objetivo é de eliminar ou de reduzir o fluxo das águas subterrâneas nos trabalhos de mineração subterrânea propostos ou existentes. Seja qual for o problema de infiltração é necessário que as causas sejam estudadas completamente antes de aplicar o método de *grouting* adequado.

Existem 2 fases principais na vida útil de uma mineração subterrânea, onde de alguma forma o *grouting* para o controle das águas é requerida:

- (i) Desenvolvimento e comissionamento – Durante a construção do *shaft* ou superfícies de desvio e desenvolvimentos preliminares da mina subterrânea para ganhar acesso ao corpo mineralizado.
- (ii) Produção/operação – Quando se trata com problemas de águas subterrâneas no avanço da produção ou na construção de novos caminhos subterrâneos.

Tipicamente esta técnica consiste em perfurações em torno de 90 mm de diâmetro, realizadas até as profundidades estabelecidas no projeto. Em terreno seco o furo realizado é lavado e, posteriormente, o cimento de *grout* é injetado e acomodado dentro deste por vibração através de uma tubulação de alta pressão (*standpipe*) de diâmetro nominal 2 polegadas.

Esta técnica além de ser muito cara, gera muitas incertezas durante sua aplicação devido a que não se conhece ao certo as formações do meio poroso a grandes profundidades e, também, porque o monitoramento para testar a eficácia

desta técnica é limitado por não proporcionar valores realísticos das condutividades hidráulicas das zonas com e sem *grout*. Portanto, seu uso é normalmente dirigido apenas para controlar o fluxo de águas na construção do *shaft*, onde a barreira de *grout* funcionará só para um período de tempo limitado.

3.4.4. Drenagem de mina

Drenagem de mina é o método mais comumente usado para o controle das águas na mineração subterrânea, e pode variar desde uma simples coleção de águas infiltradas na mina (por meio das fraturas ou através do próprio meio poroso), até procedimentos mais complexos que envolvem a instalação de poços de rebaixamento a partir da superfície do terreno, perfurações de drenagem situada dentro da mina ou por meio de galerias de drenagem.

A técnica de desaguamento pelo uso de poços verticais perfurados é prática comum em minas a céu aberto, porém, este método também é empregado em minas subterrâneas sempre que a análise econômica seja viável. Uma das vantagens desta técnica é que esta é executada normalmente à frente dos trabalhos e não causa interferências com as operações mineiras, fora de que consegue extrair a água limpa. Dentro das desvantagens encontram-se os custos de perfuração e bombeamento assim como as limitações em profundidades atingidas no rebaixamento, devido a que estes sistemas dificilmente podem atingir as profundidades da mina subterrânea. Normalmente estes métodos são usados em combinação com perfurações de drenagem instalados no interior da mina.

Perfurações profundas de poços de bombeamento a partir da superfície do terreno são capazes de bombear grandes volumes de água e têm sido prática comum nos últimos anos nos Estados Unidos. Existem ao menos três minas subterrâneas de ouro no oeste dos Estados Unidos onde poços profundos de bombeamento são o principal sistema de desaguamento. Estas minas, localizadas na Nevada (Meikle, West Leeville, e Turquoise Ridge), usam grandes diâmetros de poços (25 – 40 cm) e bombas submersíveis capazes de bombear até 360 m³/h (8640 m³/d).

O primeiro estudo de caso apresentado nesta dissertação, referente à mina subterrânea de Vazante (Capítulo 4), usa este sistema de drenagem como o principal método de desaguamento empregado na mina.

3.5. Técnicas de controle das águas em minas a céu aberto

Estas técnicas podem ser agrupadas em duas categorias principais: As técnicas ativas ou também chamadas de técnicas de rebaixamento avançadas, e as técnicas passivas também conhecidas como técnicas de rebaixamento a tempo real.

Embora exista uma variedade de técnicas possíveis a serem aplicadas em projetos de mineração a céu aberto, somente algumas destas estão sendo verificadas e discutidas no estudo de caso desta dissertação (Capítulo 5).

3.5.1. Técnicas ativas

3.5.1.1. Poços de bombeamento

Os poços de bombeamento podem ser localizados dentro e fora do perímetro da cava da mina. Quando projetados circundando as paredes da cava (Figura 3.2), estes trabalham como barreiras externas para evitar a entrada de fluxo de água ao interior da cava ou para aproveitar situações de evidentes gradientes hidráulicos. Esta configuração é considerada de rebaixamento avançado primário. Assim, é favorável localizar estes poços nos gradientes hidráulicos superiores (a partir da base da cava em desenvolvimento), pois isso funciona tanto para rebaixar a superfície piezométrica quanto para cortar a contínua fonte de recarga para a cava. (Cividini & Gioda, 2007; Rowe & Beale, 2007).

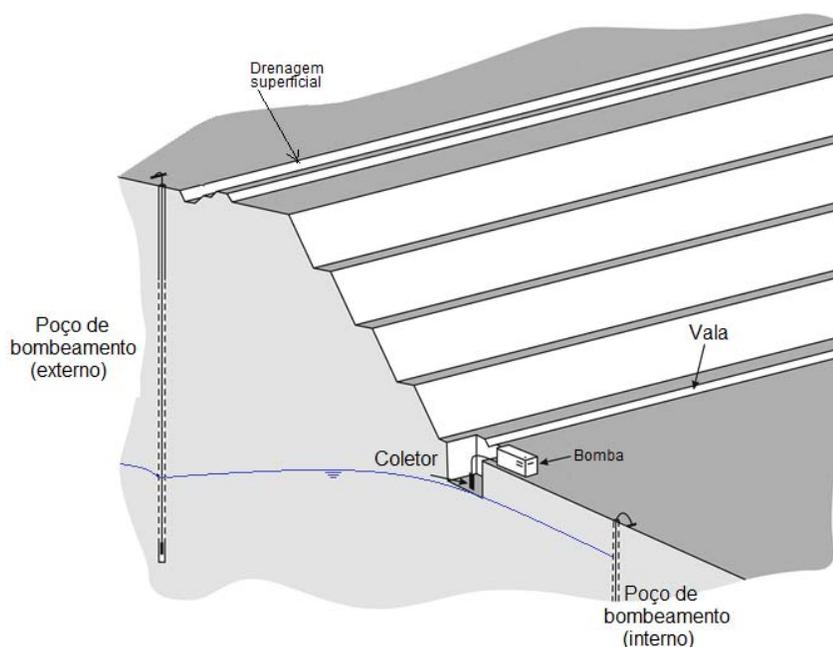


Figura 3.2 – Representação esquemática dos poços de bombeamento (exterior e interior) na cava com seu respectivo sistema de drenagem superficial (Preene, 2014)

A água dos poços de bombeamento é usualmente extraída diretamente da zona de descarga sem oportunidade de contaminação. Se a contaminação acontecer, um processo de tratamento é necessário para o reuso adequado (Brown, 1981).

Em geral os poços são equipados com bombas submersíveis e características selecionadas de forma adequada. Dependendo dos requerimentos, os poços podem ser perfurados desde a superfície (base da cava) ou desde as bermas dos taludes, até profundidades entre 20 a 400m. Os diâmetros perfurados dependem da profundidade e da capacidade prevista, podendo variar entre 350 a 1200 mm. O rendimento dos poços varia (dependendo da transmissibilidade) entre 12 m³/h e 90 m³/h.

Um caso de aplicação de poços de bombeamento é a mina de carvão Belchatów na Polônia, considerada a segunda maior mina a céu aberto no mundo. Neste caso, um sistema era constituído de 400 poços perfurados equipados com bombas submersíveis com uma capacidade total de 400 m³/min. Os poços, com profundidades entre 120 e 350m, e diâmetros entre 500 a 1200 mm permitiram o rebaixamento da linha freática de 200m em uma área de 8 Km² em um período de 11 anos. Esta mina envolvia 3 aquíferos não conectados que também foram

drenados para fornecer estabilidade dos taludes na mina onde 110 milhões de m³ de *overburden*⁶ e 38 milhões de toneladas de carvão foram explorados por ano.

3.5.1.2.

Galerias subterrâneas

As galerias subterrâneas são implementadas em conjunto com filtros de gravidade nos *overburden* complementados com poços de bombeamento na base da cava para a drenagem de aquíferos subjacentes. Os sistemas de galerias são efetivos em casos de aquíferos descontínuos e perturbados, ou no caso de poços de baixo rendimento.

Este método foi muito usado na década dos 50 ou 60, porém seu uso foi decaindo devido à ameaça na mineração, segurança laboral e altos custos. Entretanto, o seu uso pode ser ainda considerado no caso específico em que exista uma mina subterrânea ativa (ou mesmo uma mina abandonada que possa ser colocada em operação) em conjunto com uma equipe técnica especialista em minas subterrâneas e que sobre esta mina exista um depósito a ser drenado e operado com um método superficial. Vazão de infiltração de aquíferos por meio das galerias subterrâneas é comum em torno de 2400 m³/h por cava.

3.5.1.3.

Drenos horizontais

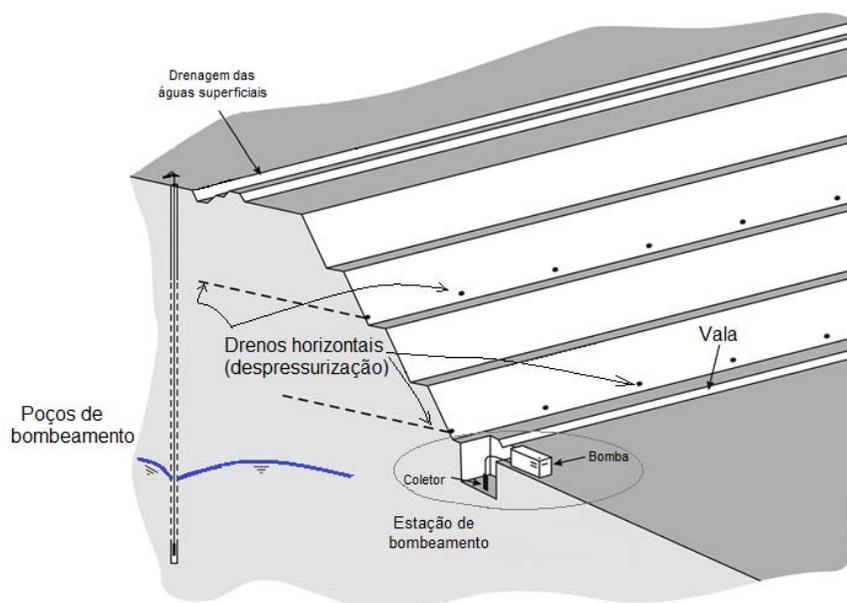
Drenos horizontais são particularmente usados para despressurizar taludes, mas a sua efetividade depende muito da sua condutividade hidráulica que está sendo adicionada. Os drenos são especialmente efetivos por reduzir as cargas de fluxo acumulados em períodos de fortes precipitações que causa grandes infiltrações de fluxo nos taludes (Cornforth, 2005). Em rochas uma quantia significativa de fluxo ocorre como um resultado da permeabilidade secundária através de juntas abertas, falhas ou outras discontinuidades. Portanto, estes drenos horizontais são furados em bermas em direção dos taludes da cava onde há ou já houve ocorrência de fluxo de águas, seja devido a precipitações ou exfiltrações de águas.

⁶ Material estéril (que não contém minério) a ser escavado.

Particularmente, esta técnica pode por si trabalhar de forma independente e conseguir captar as águas, principalmente as vindas das paredes dos taludes em processo de percolação que diminuem a eficiência operacional da cava (Brown, 1981). Porém, é importante que estas águas percoladas, que são liberadas incontrolavelmente⁷ para a base da cava por meio de um dreno coletor, sejam direcionadas para o poço coletor e consequentemente bombeadas para fora da cava. Deve se ter cuidado em que estas águas não sejam perdidas e que o processo de desaguamento não seja danificado durante as operações de detonação da mina.

Em geral este sistema de drenos horizontais vai acompanhando o sistema principal de rebaixamento (poços de bombeamento ou paredes *cut-off*), que rebaixe o lençol freático, e em taludes específicos os despressurize para uma melhor estabilidade (Figura 3.3).

O comprimento dos drenos horizontais pode alcançar comprimentos de 150 m e diâmetros pequenos (150 a 300 mm) perfurados dentro dos taludes a uma orientação de aproximadamente 5 graus a partir da horizontal. Essa inclinação permite que os furos tenham livre drenagem e estejam predominantemente em gravidade. Complementariamente, estes podem ser filtrados por um duto de PVC perfurado, recomendado em camadas arenosas.



⁷ Sendo considerado este processo como a maior desvantagem da técnica.

Figura 3.3 – Representação esquemática do sistema poços de bombeamento e drenos horizontais, com seu respectivo sistema de drenagem e de bombeamento para fora da cava (Preene, 2014)

O espaçamento entre drenos é comumente entre 25 e 100m horizontalmente, com espaçamentos verticais dependentes dos avanços da base da cava (Brown, 1981). A instalação de tais drenos deve ser o mais adequado para atingir dois objetivos primários: (a) diminuir os níveis de água (superfície freática) geralmente dentro de um talude; e (b) atingir e liberar aquíferos que estão alimentando o talude por trás.

Estudos paramétricos e de campo conduzidos por Rahardjo *et al.*, 2003 sugerem que para garantir a máxima eficiência e leveza do dreno estes precisam ser instalados no ponto mais baixo possível em um talude para poder conseguir o máximo rebaixamento, cujo arranjo pode resultar mais efetivo do que uma disposição maior de drenos instalados com espaçamento uniforme em um talude.

3.5.1.4. Ponteiras filtrantes

Rebaixamento com ponteiras filtrantes são amplamente usados para escavações superficiais. Este sistema consiste de uma série de poços de pequeno diâmetro, geralmente de 3 a 4 polegadas, conectadas a um tubo coletor até a câmara de vácuo, onde é feita a separação da água e do ar, de forma a impedir a entrada de ar e reduzir a eficiência do sistema. A vantagem do emprego do sistema de ponteiras é a sua simplicidade, baixo custo e rapidez de instalação, sendo eficazes quando instalados em solos de baixa permeabilidade. Sua desvantagem é a limitação na altura do rebaixamento (Figura 3.4), por causa do curto comprimento destes poços (aprox., 10-12 metros).

O sistema de ponteiras pode consistir, por exemplo, em um número de 20 a 30 peças espaçadas de 3 a 5m, conectados a uma bomba centrífuga que faz possível rebaixar o nível do lençol freático até 6m. Arranjos desse tipo são usados onde um rebaixamento adicional especial é requerido.

3.5.1.5. Valas

As valas são projetadas na cava para captar as águas pluviais e residuais escoando dos taludes (Figura 3.4). Este sistema adequadamente projetado pode ser

vantajoso no rebaixamento do lençol freático gerando estabilidade aos taludes circunjacentes à cava, principalmente quando o material consistir de areias uniformemente graduadas.

Estas valas podem ser estruturas estacionárias quando construídas entre taludes e bermas ao longo prazo e como estruturas temporárias (menos elaboradas) sobre as bermas. Com a ajuda das bermas, a água é alimentada para a seção de bombeamento. Este método é usado com efeitos satisfatórios preferentemente em cavas de material arenoso onde o lençol freático pode ser rebaixado até 30m.

3.5.1.6. Estações de bombeamento

Esta técnica é equipada para remover a água das chuvas e o fluxo das águas subterrâneas penetrando a cava. Estas estações estão equipadas com poços coletores e bombas centrífugas localizadas nos pontos mais baixos da cava (Figura 3.3, Figura 3.4). Estas estações de bombeamento têm a capacidade de suportar chuvas de 10% de probabilidade (uma vez cada 10 anos) e um poço coletor capaz de suportar 4 horas de chuva se todas as bombas não estiverem operando.

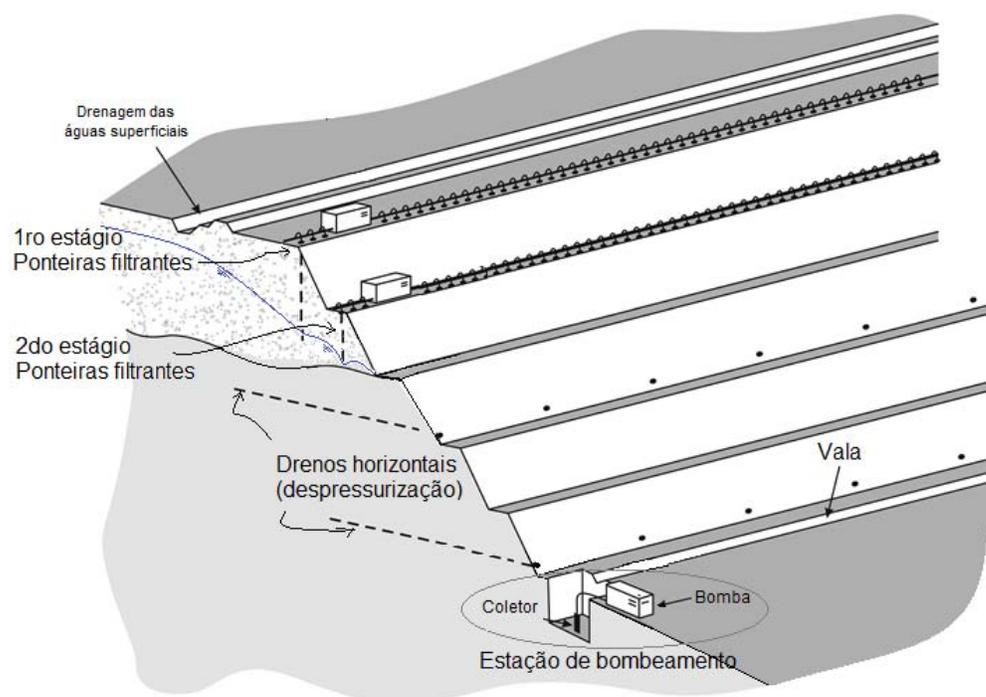


Figura 3.4 – Representação esquemática das técnicas ativas que incluem ponteiros filtrantes, drenos horizontais, sistema de drenagem e estação de bombeamento. (Preene, 2014)

3.5.2. Técnicas passivas

3.5.2.1. Paredes *cut-off*

É uma das melhores técnicas de proteção contra a infiltração das águas subterrâneas, particularmente, dos *overburden*. Paredes *cut-off* de diferentes tipos podem ser usadas.

As chamadas paredes escavadas (*dug*) são as mais fáceis de construir. Estas paredes são construídas como uma trincheira estreita (0,4 a 0,7 m) por uma escavadeira especial. Esta trincheira vai sendo imediatamente preenchida com uma suspensão tixotrópica para evitar a queda da parede. Logo, esta é preenchida com uma substância selante para refinar a suspensão tixotrópica. Este tipo de paredes *cut-off* são as melhores e, conseqüentemente, as mais confiáveis, mas a profundidade de aplicação está limitada à capacidade da máquina escavadora que no máximo chega até 70 m de profundidade, a partir da superfície.

Outro tipo de paredes impermeáveis (*cut-off*) são aquelas feitas por injeção de *grouting*, muito usada em minas subterrâneas (item 3.4.3). Uma vantagem deste método é que pode ser usado até grandes profundidades (em média de 300 m) mas, com a desvantagem que este método é extremadamente complicado particularmente quando se apresentam condições hidrogeológicas variáveis e difíceis, acompanhado da falta de certeza para sua precisa execução em grandes áreas.

Esta técnica de isolamento é muito usada para aquíferos *overburden*, mas somente quando a parede *cut-off* é feita inteiramente desde a base até o topo da camada impermeável, fechando completamente o fluxo através do aquífero ativo (Figura 3.5). Quando a execução da parede *cut-off* é feita parcialmente, esta perde muitas vantagens ou sua eficiência, porque pode causar obstrução das águas subterrâneas incrementando ao mesmo tempo a velocidade do fluxo nas regiões seladas.

O uso de paredes *cut-off* é recomendado particularmente em aquíferos de alta permeabilidade que estão em contato próximo com as águas superficiais e sendo recarregado quando próximo a rios ou lagos. Uma vantagem adicional importante do funcionamento desta técnica é que evita o desenvolvimento do cone de depressão gerado pelos poços de bombeamento, desta forma, prevê-se que fontes de águas superficiais sejam menos afetadas.

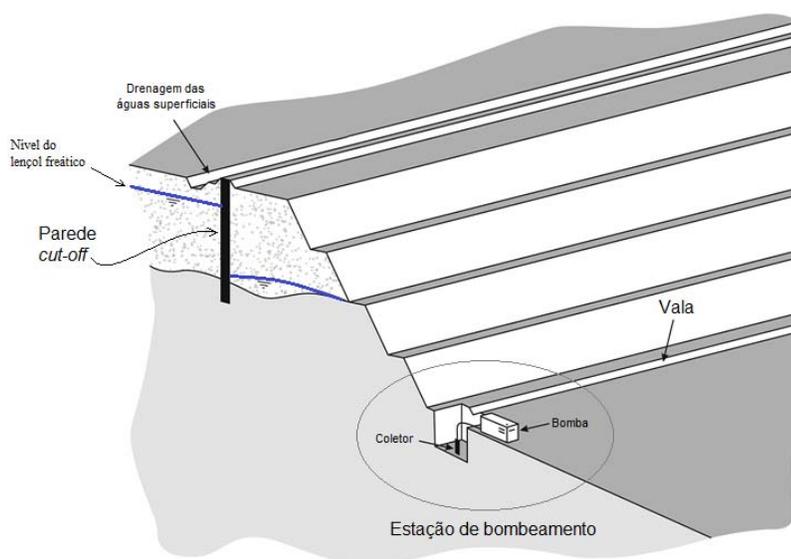


Figura 3.5 – Representação esquemática da técnica passiva Parede *cut-off* aplicada a taludes para o bloqueio do fluxo das águas (Preene, 2014)

3.5.2.2. Congelamento do terreno

Esta técnica de congelamento das águas subterrâneas é também aplicada para minas subterrâneas, e em minas a céu aberto seguem os mesmos critérios e procedimentos. Ver item 3.4.2.

3.6. Critérios para a seleção da técnica de rebaixamento

Para qualquer caso de método de exploração do mineiro (a céu aberto ou subterrâneo), a escolha da técnica apropriada para levar a cabo um processo de rebaixamento do lençol freático e do controle das águas é um passo crítico no desenvolvimento de um sistema economicamente viável e efetivo em mineração.

Os critérios propostos para a escolha da técnica ou arranjo devem ser baseados, principalmente, em estudos comparativos multivariantes das condições

hidrogeológicas, muitas vezes complexas, onde um número de fatores necessita ser considerado, e cujos resultados desejados da aplicação do processo de rebaixamento possam ser verificados em um tempo válido disponível.

Libicki, 1993; Halls, 2003; e Powers *et al.*, 2007 indicaram os principais critérios e aspectos, descritos a continuação:

- Condições hidrogeológicas,
- Projeto tecnológico de operação da mina e tipo de maquinaria usada,
- Disponibilidade dos arranjos de rebaixamento e experiências já ganhas,
- Proteção ambiental,
- Requerimentos de segurança laboral,
- Custos operacionais e capitais.

a) Condições hidrogeológicas

As condições hidrogeológicas (e geomecânicas) baseadas em investigações geológicas prévias com a maior quantidade de registros de campo devem ser verificadas para determinar a magnitude do rebaixamento requerido.

Qualquer que for o método de controle de águas escolhido é importante confirmar o método de drenagem / extração de água ideal, bem como o plano de bombeamento e o sistema de reticulação de descarga para remoção da água.

Algumas recomendações práticas tiradas da aplicação de casos reais são descritas a seguir:

- 1) Em casos em que depósitos e o *overburden* sejam formados por rochas rígidas preenchidas com água nas fissuras, uma medida de rebaixamento é a combinação de poços de bombeamento em conjunto com estações de bombeamento localizados na parte mais baixa da cava.
- 2) Em aquíferos espessos e permeáveis, *i.e.*, permeabilidades maiores a $1,15E-05$ m/s (1m/dia), e quando houver contatos entre aquíferos particulares, é recomendável usar poços com bombas submersíveis, e para os taludes, drenos horizontais e valas nas bermas com estações de bombeamento.

- 3) Em caso de existir fluxo preferencial, como ocorre em zonas com altas permeabilidades ou em zonas próximas a rios e lagos, é preferível usar paredes *cut-off* impermeáveis para cortar o fluxo das águas.
- 4) No caso particular de regiões de *overburden* saturadas conterem numerosas estruturas fechadas de contenção de água⁸, ou de existir perturbações no comportamento regular dos aquíferos (*e.g.* dobras), assim como regiões de baixas e variáveis permeabilidades, uma técnica efetiva seria usar um sistema de galerias subterrâneas que conectasse filtros com poços ou valas de bombeamento das águas. Contudo, é necessário ter características geomecânicas favoráveis da rocha para a construção das galerias e seu isolamento quando conectada com os aquíferos, com a finalidade de proteger a mina contra a infiltração subterrânea do fluxo não controlada.
- 5) Sistema de valas conectadas a estações de bombeamento podem ser usadas em rocha rígida, e excepcionalmente para rebaixamentos do lençol freático na região da cava em minas superficiais. Isto porque camadas de areia são de grão uniforme e os fatores de segurança dos taludes são altos.
- 6) No caso específico de fluxo em taludes, Atkinson (2001) tem delineado algumas considerações básicas:
 - Quando a massa de rocha que compõe o talude não tenha a permeabilidade adequada para implementar uso de poços de bombeamento pode desenvolver-se uma poropressão elevada no talude porque a rocha não é capaz de drenar adequadamente com o avanço da exploração da mina. Uma solução necessária e muito usada é a implementação de um sistema de despressurização. Esta abordagem envolve drenos horizontais e verticais instalados diretamente nas seções dos taludes que são solicitados. Em grandes minas a céu aberto, análises custo-benefício podem justificar a criação de um túnel ou galerias de acesso de despressurização, onde a instalação de galerias de drenagem dentro da área contribuirá à drenagem profunda dentro do talude.

⁸ *Water bearing structures* são estruturas que contém água capturada por rochas, praticamente, impermeáveis.

➤ Em casos em que seja possível a implementação de poços de bombeamento, mas que os materiais que conformam a massa rochosa (de solo) tenham intrinsicamente baixa permeabilidade, aproximadamente $\leq 1,15E-07$ m/s (0,01 m/d), o nível do rebaixamento a partir de qualquer número razoável de poços de bombeamento se desenvolve lentamente. Portanto, uma quantia significativa de tempo de espera é requerida. Da mesma maneira é recomendável a instalação de drenos apenas como complementação do sistema de rebaixamento devido a que um projeto de controle das águas não seria efetivo neste tipo de material apenas com drenos horizontais ou verticais, já que estes podem ficar ineficazes em termos de escoamento das águas quanto por bloqueios dos poros não revestidos. Este sistema é usado se as condições hidrogeológicas criarem ameaças de deslizamento dos taludes.

- 7) O grau de anisotropia decorrente das fraturas presentes na maioria das rochas ajuda no rebaixamento. Neste caso é recomendável que a instalação dos drenos seja orientada a fim de atravessar ortogonalmente o maior número de fraturas com o intuito de promover o maior nível de escoamento de drenagem.

A análise de seleção de medidas de controle de água leva frequentemente à escolha final de métodos combinados, como, por exemplo: paredes *cut-off* impermeáveis e drenos horizontais; ou, poços de bombeamento com galerias subterrâneas; ou poços de bombeamento com drenos horizontais e ponteiras filtrantes, etc. Uma vez mais, a base para a tomada de decisões é o conhecimento das condições hidrogeológicas decorrentes de investigações prévias.

b) Operação da mina

As operações da mina requerem de segurança nos taludes, conseqüentemente, os efeitos dos processos de rebaixamento realizados devem ser considerados nas análises de estabilidade dos taludes. Os seguintes aspectos devem ser verificados:

- 1) Seleção da maquinaria básica, altura dos cortes nos taludes, largura das bermas e tempo disponível para a execução do processo de rebaixamento (a operação do rebaixamento deverá ir à frente da introdução da maquinaria

básica por um lapso de 1 a 2 anos em caso de aquíferos permeáveis), frente de avanço da cava, possível reconstrução de poços nas bermas dos taludes e a quantidade de poços necessária para a realização do rebaixamento.

Porém, se o material da cava for constituído de materiais de baixa resistência em condições saturadas, este processo descrito acima não poderia ser aplicado devido a que, as bermas não poderiam ser construídas nas partes mais altas sem gerar instabilidade, tornando-se difícil a implementação dos poços nas bermas e isto poderia comprometer o início dos trabalhos da próxima fase programada. Este tempo poderia resultar curto para realizar todas essas operações e até comprometer a operação eficiente dos poços. Neste caso, poços “como barreiras externas” com bombas submersíveis ao redor da cava e drenos horizontais, operacionalmente, trabalham melhor.

- 2) A cava deve apresentar condições de suportar a maquinaria específica necessária para executar o rebaixamento (como rodovias, planos inclinado para transportadoras, etc.), especialmente quando um controle completo é requerido em algumas partes importantes da cava. Assim, arranjos adicionais, como por exemplo, ponteiros filtrantes podem ser usados.

Esses critérios operacionais devem ser levados em consideração tanto para a seleção do método de controle das águas quanto na determinação do número e área de distribuição de arranjos particulares. Como dito anteriormente, o sistema de operação das minas deve ser planejado à frente, *i.e.*, o tipo de maquinaria, sua distribuição na área da cava para desta forma otimizar o avanço dos trabalhos de exploração.

c) **Disponibilidade de arranjos e experiência**

Este critério é essencial. A disponibilidade de equipamentos no mercado local de trabalho e a experiência na aplicação da técnica devem ser discutidos. Por exemplo, para o caso em que paredes *cut-off* de *grouting* nunca tenham sido feitas, onde dispositivos e substâncias precisem ser importadas, mas por outro lado exista uma base técnica e experiência na perfuração de poços, a aplicação poços prevaleceria sobre a técnica de *grouting*, mesmo que esta última fosse mais efetiva. Da mesma forma, se aparecer uma mina subterrânea abandonada com um

equipo técnico de mineiros apenas especialistas em minas a céu aberto, esta equipe poderia prejudicar na escolha do sistema de galerias subterrâneas.

d) Requerimentos de proteção ambiental

Este é um critério básico a ser tomado em consideração, e deve ser analisado em detalhe. Dois aspectos jogam aqui um papel principal. O primeiro deles é a influência da depressão do lençol freático na vizinhança, o segundo ponto é a poluição das águas da mina.

Desde um primeiro ponto de vista, o rebaixamento do lençol freático que, irrespectivamente do método de controle das águas usado, afeta o ambiente da mesma maneira. Somente o uso de barreiras impermeáveis pode evitar esse efeito ou reduzi-los consideravelmente. Desde outro ponto de vista, a água mais limpa é aquela obtida a partir de poços de bombeamento com bombas submersíveis, e as mais poluídas são aquelas que fluem sobre a superfície, assim, estas águas das minas têm que ser purificadas antes do seu aproveitamento.

e) Segurança laboral

Os sistemas de galerias subterrâneas são considerados os mais desvantajosos e produzem dificuldade de execução e frequentemente condições de trabalho perigosas. Enquanto que todos os outros sistemas não são forçados a levar gente à região subterrânea, por conseguinte são menos perigosas.

f) Custos operacionais e capitais

Além dos critérios técnicos e ambientais, custos operacionais e de capitais das alternativas sugeridas devem ser comparados. Este último critério é decisivo, principalmente, quando os outros critérios considerados não dão uma resposta compatível. Desde o ponto de vista de custos de capitais, as paredes impermeáveis *cut-off* e as galerias subterrâneas são as técnicas de controle de água mais caras. Desde o ponto de vista de operação, os poços de bombeamento com bombas submersíveis são as mais caras, atingindo altas taxas de consumo de energia para o bombeamento das águas. Finalmente, o custo total do projeto e quaisquer implicações ambientais indispensáveis precisam ser planejados para a concepção das estratégias de controle e operações mineiras.