

1

Introdução

Processos de escavação em uma mina abaixo do lençol freático podem criar uma série de problemas relacionado com a água que afetam a eficiência operacional e viabilidade econômica de operação na mina (Doulati Ardejani *et al.*, 2003). Por outro lado a água é também indispensável para diversos processos mineiros.

Procedimentos de rebaixamento do lençol freático permitem a extração da água das regiões de escavação da mina, deixando-a em condições de trabalhabilidade, e ao mesmo tempo, permitem aproveitar esta água por tecnologias de re-uso em distintas áreas da mineração. Estes processos são conhecidos como técnicas de controle da água, que são continuamente implementadas e monitoradas durante os processos de escavação e ao longo da vida dos projetos de mineração.

Se por um lado um estudo geológico do depósito de minério a ser explorado permite conhecer e calcular a disposição das reservas a explorar, encaminhando, basicamente, à devida escolha do método mais adequado de exploração do minério com o menor custo, por outro lado, um estudo hidrogeológico detalhado do depósito permite valorar os sistemas de controle de água mais adequados, necessários para permitir a atividade mineira. A implementação de um apropriado sistema de controle de água pode facilitar os processos de escavação de uma mina, caracterizada por estratificações complexas de materiais permeáveis abaixo do lençol freático. Um sistema inadequado ou não controlado do fluxo subterrâneo pode, por pressão hidrostática ou exfiltração, causar *piping*¹, levantamento da base da escavação, ou reduzir a estabilidade dos taludes de escavação (no caso de uma mina a céu aberto), ou colapso, subsidência (no caso de uma mina subterrânea).

Modelagens numéricas via elementos finitos ou diferenças finitas são ferramentas versáteis e de grande ajuda quando aplicadas a este tipo de processos

¹ Erosão interna devido a altos gradientes hidráulicos

de escavação e de controle das águas, especialmente quando se lida com aplicações tridimensionais, com heterogeneidade e anisotropia das propriedades dos materiais e de grandes proporções em área e profundidade das estratificações, como normalmente abrangem projetos de mineração, onde as soluções analíticas não podem mais ser aplicadas. Parte da sua capacidade está também em que permite a compreensão, interpretação e o entendimento dos processos que regem esses sistemas reais complexos, bem como a incorporação e otimização das técnicas de controle de água a serem empregadas nos processos de escavação.

Simulações numéricas são empregadas em projetos de hidrogeologia na mineração, permitindo tanto a calibração das propriedades hidráulicas pela incorporação das adequadas condições de contorno, assim como previsões de respostas hidráulicas perante diferentes condições de fluxo que virem a ocorrer, com base em um modelo conceitual bem definido que representem o comportamento hidrogeológico da região em estudo. De acordo com Aryafar *et al.*, 2007, os resultados de tais simulações seriam usados para desenvolver uma estratégia apropriada para o controle das águas, com o intuito de minimizar problemas operacionais abaixo do lençol freático e problemas ambientais na fase de viabilidade no projeto de mineração.

Este trabalho de dissertação de mestrado compreende análises numéricas tridimensionais de fluxo subterrâneo via elementos finitos, com o programa FEFLOW 6.2, para dois casos gerais de exploração realizados na mineração, **mina subterrânea** e **mina a céu aberto**. Análises numéricas hidrogeológicas em condições de fluxo permanente e transiente para as condições de exploração atuais das minas estão sendo avaliadas. Estas análises abrangem a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual, o desenvolvimento de uma sistemática de uso adequado das condições de contorno e de restrição, a calibração do modelo numérico e a verificação das respostas do fluxo subterrâneo gerados pela incorporação de distintas técnicas de controle.

No primeiro caso da **mina subterrânea**, unidade Vazante da empresa Votorantim Metais Zinco S.A., é destinada à lavra em áreas cársticas para o beneficiamento de minério de zinco. Esta mina vem explorando este minério desde 1969 através de processos de lavra a céu aberto, e as atividades subterrâneas tiveram início no ano de 1982. Atualmente, a mina de Vazante consiste em níveis

múltiplos de mineração subterrânea situados abaixo da superfície do lençol freático, onde a remoção da água subterrânea que entra na mina cria um desnível na superfície piezométrica superior ou igual a 180 metros. Este cone de depressão origina altos gradientes hidráulicos na região entre o rio Santa Catarina e as atividades subterrâneas de mineração. O rio Santa Catarina corre do oeste ao leste a aproximadamente 1 km ao sul da mina (Figura 1.1) atravessando superficialmente a região do Dolomito e a área do cone de depressão do lençol freático criado pela remoção da água da mina.

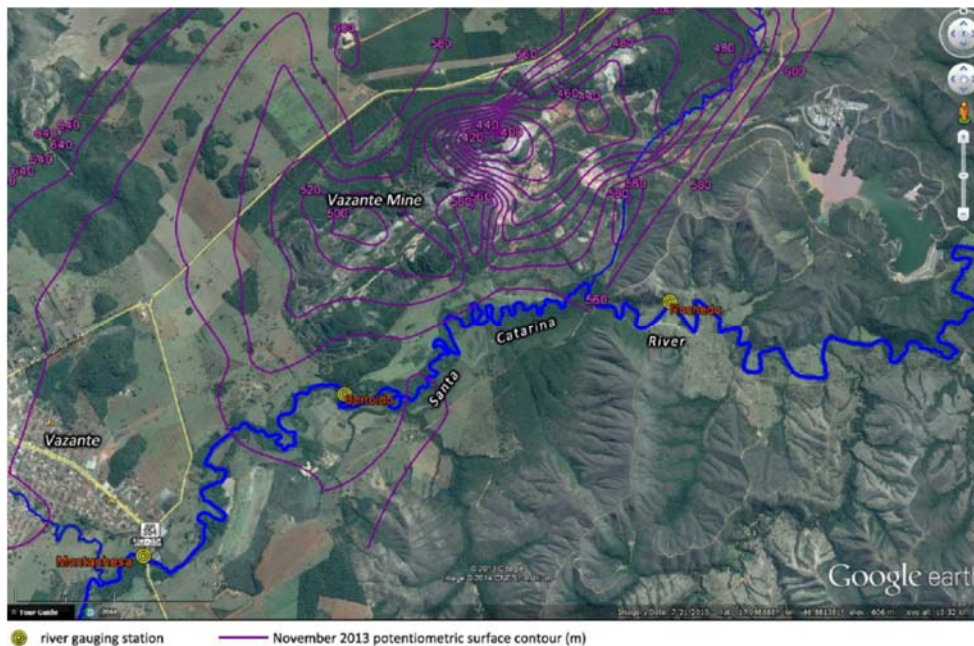


Figura 1.1 - Localização da mina subterrânea de Vazante em relação ao rio Santa Catarina e às estações de medição (Votorantim, 2013)

Devido à necessidade de conhecer as trajetórias de fluxo subterrâneo e os mecanismos de infiltração na mina (Figura 1.2), testes de rastreamento através de traçadores foram realizados pela empresa DHI no ano de 2013 para ajudar na identificação de caminhos preferenciais geradas pelas feições cársticas, que não tinham sido antes consideradas. Um modelo hidrogeológico mais completo foi considerado neste trabalho em parceria com a DHI para um conhecimento mais realista do comportamento do fluxo que envolve à mina.

Portanto, modelagens numéricas das águas subterrâneas são utilizadas para simular esses sistemas de fluxos, e neste caso particular, para a simulação das características do fluxo nos condutos identificados pelos testes de rastreamento. A

identificação das possíveis trajetórias de fluxo entre pontos à montante da mina de Vazante, as várzeas e margens do rio Santa Catarina e o interior da mina subterrânea permitirão a quantificação de uma eventual contribuição das águas superficiais para a mina subterrânea por meio destas feições cársticas. Neste contexto, uma recalibração do modelo hidrogeológico foi realizada para servir como plataforma na avaliação do efeito de estratégias atenuantes, tais como o reposicionamento ou o revestimento do rio nos locais em que forem registradas perdas ou em que sua existência seja presumida; ou, por último, o fechamento dos condutos formados por dissolução. O modelo proposto nesta dissertação também permite a previsão do efeito da redução das perdas da água do rio sobre a área e sobre a profundidade do cone de depressão existente.

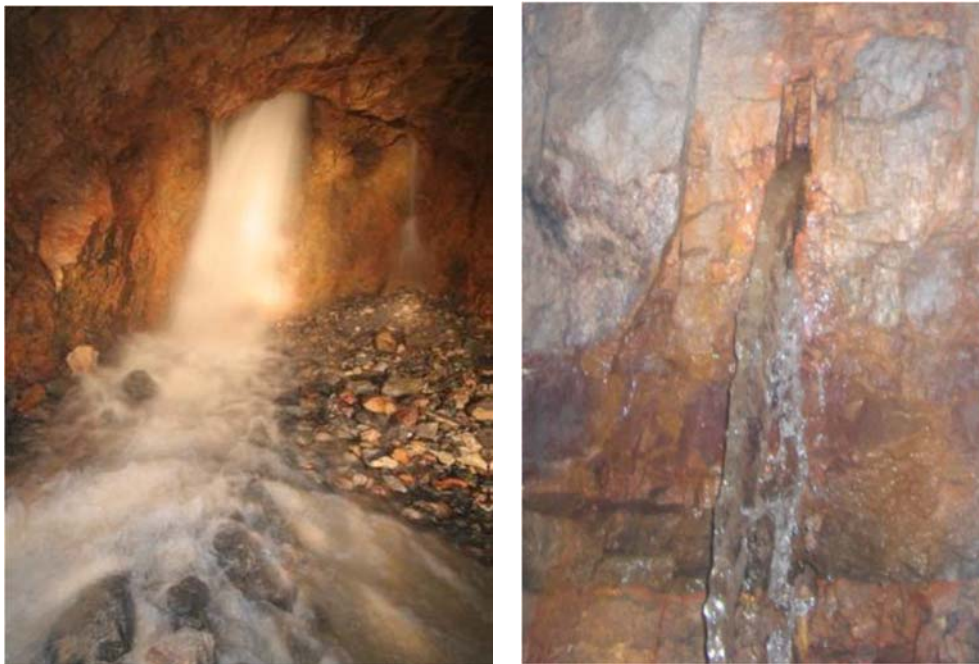


Figura 1.2 - Possíveis mecanismos de infiltração desenvolvidos: Infiltração sazonal em resposta a alta precipitação (ex. 205 mm em 5 dias), “fluxo em conduto” ao longo de cársticos interconectados, e Infiltração através de fraturas e permeabilidade do maciço rochoso (Schlumberger Water Services, 2008)

No segundo estudo de caso tem-se a **mina a céu aberto**, localizada no continente Europeu. A exploração desta mina é de rocha industrial que começou sua atividade pelos anos 50 e que atualmente ainda está em processos de operação. Os trabalhos foram realizados por perfuração e detonação em bancos e bermas descendentes em profundidade e avanço na direção sudoeste. Atualmente, a pedreira tem uma superfície de terreno de mais de 84 hectares. Esta mina se

situa no interior de uma bacia, formada por quatro arroios, como mostrado na Figura 1.3. O arroio principal discorre bordeando a exploração por seu flanco oeste com direção nordeste para o mar, onde verte suas águas. Esta bacia coincide com a estrutura geológica de um sinclinal e sua extensão aproximada é de 12,4 Km².

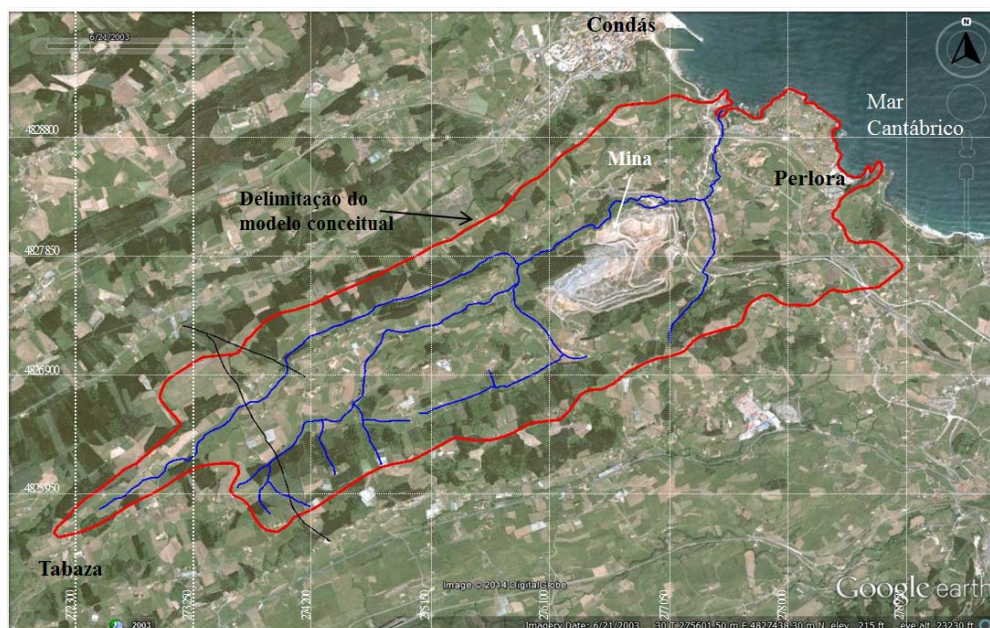


Figura 1.3 – Localização e traçado do limite físico (línea cheia em vermelho) da mina a céu aberto (Fonte: Google Earth, 2014).

Devido às características hidrogeológicas e a própria configuração espacial da pedreira no seu interior, *i.e.*, na cava, há no lugar um fenômeno de afloramento e acumulação de água em volumes importantes, que em alguns momentos sobrepõem as possibilidades de drenagem e provocam inundações. O problema hídrico é devido em grande parte a que a rocha calcária explorada pela pedreira é o sustento de um aquífero livre, cujo nível freático intersecta a superfície da cava e dá lugar a superfícies de infiltração e afloramentos pontuais em forma de mananciais.

Para solucionar estes problemas de inundação, atualmente a mina tem incorporado valas perimetrais, valas de distribuição e bombas, por meio dos quais controlam a evacuação e os níveis de água nos frentes explorados, permitindo a continuidade dos trabalhos em condições secas. Contudo, na zona mais profunda da exploração, os trabalhos são paralisados durante as épocas mais chuvosas do ano devido à excessiva acumulação da água (Figura 1.4).



Figura 1.4 - Fotografia da frente a menor cota da pedreira em condições inundadas no ano de 2010 (Díaz, 2012).

Devido à situação atual do espaço mineiro e sua evolução temporal, onde a ocorrência da exfiltração das águas subterrâneas afeta a pedreira, um estudo numérico do fluxo subterrâneo é requerido para este estudo de caso, o qual consistiu primeiramente na conceitualização e calibração do modelo hidrogeológico. Desta forma, as análises de fluxo são realizadas para avaliar as características do sistema de fluxo da mina e na cava bem como de obter uma estimativa numérica de resposta da implementação de diferentes técnicas de controle das águas nas regiões de exfiltração, como o intuito de não apenas extrair a água exfiltrada na região senão também de rebaixar o lençol freático o suficiente para garantir um fator de segurança nas operações mineiras.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a utilidade de se aplicar modelos numéricos para se fazer em previsões de níveis de água e pressões em atividades de mineração. Para isso foram utilizados os dois casos reais mencionados acima, onde se tentou representar numericamente um conjunto de condutividades hidráulicas como solução singular do sistema hidrogeológico das águas subterrânea para uma determinada região, baseados em dados de monitoramento no campo e no modelo hidrogeológico conceitual, complementados por análises de sensibilidade quando necessário. Esta abordagem é realizada para os dois casos de exploração de minas mais empregados: subterrânea e a céu aberto.

Distinguir o uso adequado das condições de contorno presentes em projetos de hidrogeologia na mineração, para uma representação do comportamento ou dinâmica do fluxo mais realista em um modelo matemático.

Conhecer as respostas do sistema de fluxo subterrâneo, pela impermeabilização de um rio adjacente à mina, como técnica do controle das águas para o caso da mina subterrânea.

Avaliar a eficiência das diferentes técnicas de controle de água comumente usadas em casos de mineração superficial, com a finalidade de solucionar tanto os problemas de exfiltração, que podem levar a inundação e na paralização de trabalhos por longos períodos de tempo, quanto garantir condições seguras de trabalho.

Escopo da dissertação

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos.

O capítulo 1 corresponde à Introdução deste trabalho de dissertação, que inclui objetivos e escopo da dissertação.

O capítulo 2 descreve rapidamente os conceitos fundamentais de fluxo bem como as equações governantes em águas subterrâneas, e ao mesmo tempo é feita a descrição da formulação em elementos finitos para sua solução.

O capítulo 3 descreve as técnicas para controle das águas, seus principais aspectos e critérios de projeto, a serem aplicadas em um projeto de mineração subterrânea e a céu aberto.

O capítulo 4 compreende a aplicação prática de um caso real de uma mina subterrânea onde se avaliou a importância de representar explicitamente feições cársticas no modelo bem como alternativas de redução de vazão na mina tais como impermeabilização da calha de um rio próximo. Quatro cenários foram avaliados para determinar a solução mais efetiva e econômica.

O capítulo 5 apresenta outro estudo de caso, mas, desta vez, aplicado para um projeto de mina a céu aberto, onde as diferentes técnicas de controle de água, descritas no capítulo 3, foram implementadas e seus resultados verificados para a avaliação da eficiência e validade no presente projeto.

O capítulo 6 compreende as conclusões deste trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

Esta dissertação também inclui as referências bibliográficas empregadas nesta pesquisa.

Alguns anexos estão sendo incluídos, como os mapas geológicos, que auxiliam ao entendimento das condicionantes geológicas que incluem os estudos de casos desta dissertação.