



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE ARAXÁ

ARTHUR ANTUNES FERREIRA MACHADO

**ESTUDO DOS IMPACTOS DE UM POÇO DE REBAIXAMENTO
DE LENÇOL FREÁTICO NAS OPERAÇÕES MINEIRAS**

ARAXÁ/MG

2020

ARTHUR ANTUNES FERREIRA MACHADO

**ESTUDO DOS IMPACTOS DE UM POÇO DE REBAIXAMENTO
DE LENÇOL FREÁTICO NAS OPERAÇÕES MINEIRAS**

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Me. Marcélio Prado Fontes

FOLHA DE APROVAÇÃO

ARTHUR ANTUNES FERREIRA MACHADO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: 11 / 12 / 2020

Banca Examinadora:

Marcílio Prado Fontes

Prof. Me. Marcélio Prado Fontes

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Fernando Brandão

Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Fábio de São José

Prof. Me. Fábio de São José

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Para minha família,
que sempre me apoiaram em minhas decisões e sonhos, e trabalharam muito
para que eu pudesse realiza-los

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, pelo apoio nas horas difíceis quando estava sozinho e longe da família. Aos meus familiares que sempre estavam comigo nessa batalha. A minha mãe Vagneriana da Graça Ferreira, ao meu pai Alex Guimarães Machado, aos meus avós, Joaquim Correia Machado Filho, José Ferreira, Darci Guimarães Machado e Norma da Silva. A minha madrinha Analú Guimarães e meu padrinho Marcos Miranda, e aos demais tios, tias e primos.

Aos meus amigos de CEFET e aos amigos de Patrocínio aqueles que sempre estavam ao meu lado.

A todos os meus professores que me ensinaram nessa caminhada longa, aos colaboradores do CEFET. Meu orientador Marcélio Prado Fontes que foi fundamental nesse projeto.

Aos meus companheiros de república Artur Caixeta, Lucas Bernardes, Pedro Tavares, Guilherme Pedrosa, Ulisses Guimarães, Alexandre Bolina, Tulio Freiria, Leonardo Gomes, Ryan Faria por todos esses anos de convívio e de boas lembranças o qual foi minha segunda família.

A todos sou eternamente grato, e cada um que acreditou e torceu na minha determinação e capacidade.

RESUMO

Com o aprofundamento de lavras a céu aberto, e conseqüentemente interação com o lençol freático, existe uma demanda crescente por estudos hidrogeológicos visando o rebaixamento do nível da água. Em operações mineiras onde o minério tem uma margem de lucro maior a utilização de poços rebaixamento lençol freático permite a viabilização de um minério anteriormente encoberto pela presença de água. É na operação dos poços constantemente que abaixa o nível da água na mina proporcionando um avanço adequado na frente de lavra e facilitando sua exploração. A presente pesquisa, teve como objetivo principal a análise dos impactos de um poço de rebaixamento de lençol freático nas operações mineiras. O estudo do poço 12 resultou-se em um raio de máxima influência de 506,15 metros o qual abrange vários instrumentos de rebaixamento de uma mineração de fosfato.

Palavras-chaves: lençol freático, rebaixamento do nível da água, operações mineiras.

ABSTRACT

With the deepening of open pit mines, and consequently interaction with the water table, there is a growing demand for hydrogeological studies to lower the water level. In mining operations where the ore has higher profit margin, the use of wells lowering the water table allows the viability of an ore previously covered by the presence of water. It is in the operation of the wells that water level in the mine is constantly lowered, providing an adequate advance in front of the mine and facilitating its exploitation. The main objective of this research was to analyse the impacts of a water table lowering well on mining operations. The study of well 12 resulted in a maximum influence radius of 506,15 meters which includes several lowering instruments of a phosphate mining.

Keywords: water table, lowering the water level, mining operations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Lista de Figuras

Figura 1: Representação dos INA's e poços perante o PB12	15
Figura2: Distribuição vertical da água no solo e subsolo (CPRM, 2008).....	18
Figura 3: Tipos de aquíferos de acordo com pressão de suas água e camada de topo e base (CPRM, 2008).....	19
Figura 4: Sistema de bombeamento direto (Alonso, 1999).	23
Figura 5: Rebaixamento por meio de ponteiros filtrantes (Côrrea, 2006).....	24
Figura 6: Rebaixamento através de um poço (Côrrea, 2006).	25
Figura 7: Dreno horizontal profundo (DEBEREINER E VAZ, 1998).	26
Figura 8: Evolução do cone de rebaixamento durante um bombeamento do poço (CPRM,2008)	28
Figura 9: Esquema da metodologia.....	33
Figura 10: Complexo do Salitre no quadro da Província do Alto Paranaíba	35
Figura 11: Mapa do Complexo Alcalino Carbonatítico I, com base em informações registradas em campo por meio de testemunho de sondagens. Adaptado por Barbosa (2009).	36
Figura 12: Perfil do Poço 12.....	38
Figura 13: Mapa do raio de influência do PB 12.....	41

TABELAS

Tabela 1: Valores do Teste de vazão.....	39
Tabela 2: Monitoramento dos NE do PB12, PB 26 e leitura do NA dos INA's .	42
Tabela 3: Monitoramento dos ND do PB12, NE do PB 26 e leitura do NA dos INA's.....	44

ABREVIATURAS E SIGLAS

INA: Indicador de nível de água;

DHP: Dreno horizontal profundo;

NA: Nível da água;

NE: Nível estático;

ND: Nível Dinâmico;

PB4: Poço 4;

PB5: Poço 5;

PB6: Poço 6;

PB8: Poço 8;

PB9: Poço 9;

PB12: Poço 12;

PB13: Poço 13;

PB14: Poço 14;

PB15: Poço 15;

PB16: Poço 16;

PB25: Poço 25;

PB26: Poço 26;

SÍMBOLOS

b: Espessura do aquífero;

C: Constante adimensional;

(H-h): Altura do nível dinâmico do poço

k: Condutividade hidráulica;

Q: Vazão;

T: Trasmisividade;

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO.....	5
RESUMO.....	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Apresentação	14
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Objetivos	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Hidrogeologia	17
2.1.1 Água subterrânea	17
2.1.2 Tipos de aquíferos	18
2.2 Controle das águas em projetos de mineração.....	19
2.2.1 Técnicas de controle das águas em minas subterrâneas.....	20
2.2.2 Técnicas de controle das águas em minas a céu aberto.....	21
2.3 Critério para seleção da técnica de rebaixamento	21
2.4 Métodos usuais de controle de rebaixamento.....	22
2.4.1 Bombeamento Direto.....	22
2.4.2 Ponteiros Filtrantes.....	23
2.4.3 Poços Profundos	24
2.4.4 Drenos horizontais profundos.....	26
2.5 Poços tubulares e recorte de poço.....	27
2.6 Cálculo do raio de influência dos poços de rebaixamento de mina.....	29
3 METODOLOGIA	31
4 ESTUDO DE CASO.....	34
4.1 Introdução do estudo de caso	34

4.1.1	Geologia local.....	34
4.1.2	Compilação dos dados	37
5	RESULTADOS	39
5.1	Resultados do teste de vazão	39
5.2	Cálculo do raio de interferência do PB12.....	39
5.3	Área impactada no raio de influência	40
5.4	Monitoramento dos poços PB 12 e PB 26 em nível estático e INA's ..	41
5.5	Monitoramento dos poços PB 12 em nível dinâmico e PB 26 em nível estático e INA's	42
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
6.1	Conclusão	45
6.2	Propostas para trabalhos futuros	45
7	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Sabe-se que depósitos minerais aflorantes estão cada vez mais escassos, cabendo à indústria de mineração promover uma maior evolução, desenvolvimento e aprofundamento da lavra a céu aberto até atingir a relação estéril/minério limite. Esse aprofundamento culmina, às vezes, na presença de minério bloqueado pelo lençol freático.

Para realizar a lavra desse minério bloqueado, é necessário um planejamento adequado da equipe de hidrogeologia junto com o planejamento de lavra e a operação de mina. Sendo assim para que o minério seja disponibilizado para lavra com menor percentual de umidade efetua-se o rebaixamento do lençol freático, facilitando e desonerando o processo de exploração e etapas subsequentes.

O presente estudo consistiu na análise dos impactos da operação de um poço mediante a compilação de dados dos níveis dinâmicos e estáticos, bem como o comportamento do nível da água no entorno deste. A empresa propôs o estudo do poço 12 (PB 12) de forma aleatória dentro da mina e realizou-se o cálculo do raio de influência. Foi comparado seus dados quando estava inoperante e operante em relação a outro Poço 26 (PB26) e quatro indicadores de nível de água (CMP-SAL-DH0259, CMP-SAL-DH0275, CMP-SAL-DH0264 e o INA42B), o qual esses instrumentos estão adentro da área de influência.

Na Figura 1 é mostrada a localização referente aos INA's e do PB 26 referente ao PB 12. Os INA's estão indicados com a coloração verde e os poços estão mostrados com a cor azul.

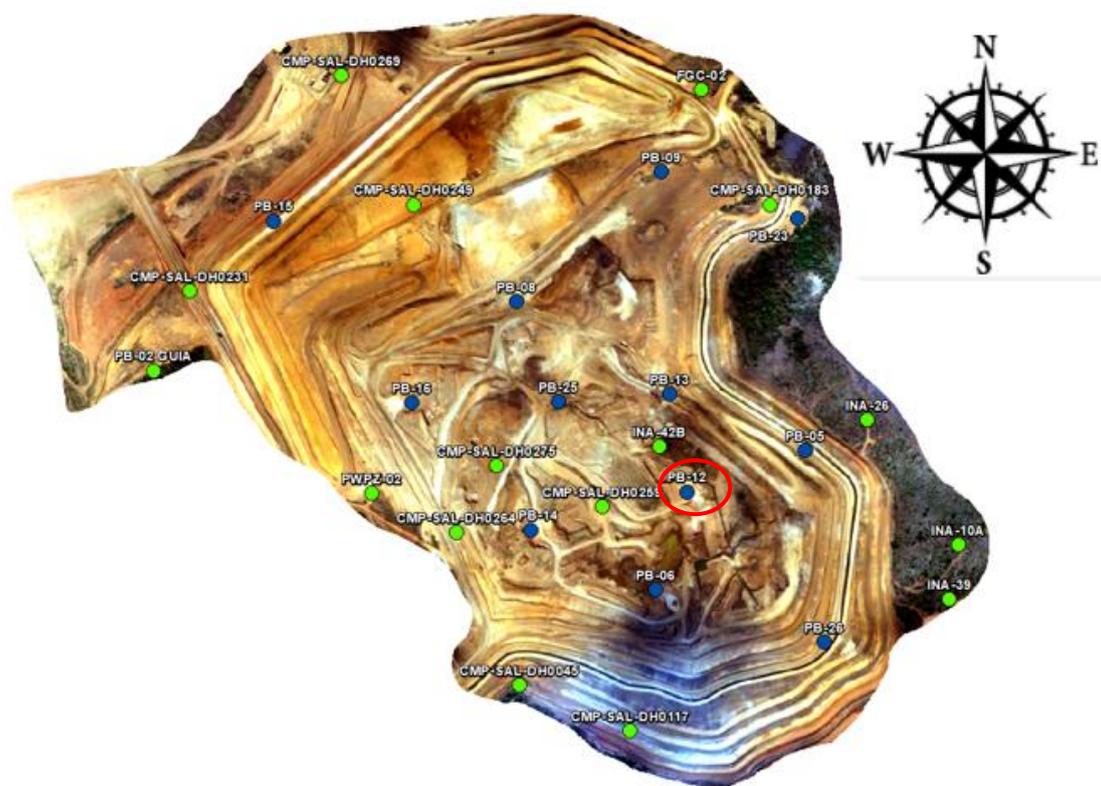


Figura 1: Representação dos INA's e poços perante o PB12

1.2 Justificativa

A operação de poços de rebaixamento do lençol freático são atividades constantes no desenvolvimento da lavra. É no trabalho desses instrumentos, em que as minas que tem ocorrência de surgências ou até mesmo afloramento de água na superfície possui uma grande importância.

A presença do nível da água acima da cota da superfície de uma área de lavra dificulta ou até mesmo impede as operações mineiras. No entanto, o poço em atividade possui uma grande relevância para um avanço de lavra adequado e permite que estenda a vida útil da mina.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o estudo do poço 12 através da análise da influência dos níveis dinâmicos, níveis estáticos em relação a outro poço e INA's (indicador de nível de água) na circunvizinhança.

Os objetivos específicos são:

- Conhecer o raio de máxima influência do poço 12;
- Analisar um suposto recorte de poço.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Hidrogeologia

“Hidrogeologia é a ciência que estuda as águas subterrâneas (aquíferos), seu movimento, ocorrência, propriedades, interações com o meio físico e biológico, bem como os impactos das ações dos seres humanos na qualidade e quantidade nessas águas” (Águas subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido, 2007).

2.1.1 *Água subterrânea*

Conceitua-se água subterrânea aquela que sucede abaixo do nível de saturação ou nível freático. Expostos nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas (CPRM, 2008).

A água subterrânea é essencial ao ambiente natural, e tem como parte do ciclo hidrológico. Realiza-se influência principalmente nos problemas geotécnicos como estabilidade de taludes na área da mineração (CPRM,2008).

De acordo com Feitosa (2008), a distribuição vertical da água no subsolo é dividida por dois conceitos: zona saturada e zona não saturada como pode ser visto na Figura 2. A zona de saturação fica localizada abaixo da superfície freática e nela todos os vazios são preenchidos por água, e é uma superfície real em que sua pressão de referência é igual a zero.

A zona não saturada ou zona de aeração encontra-se entre a superfície freática e a superfície de terreno e nela os poros são relativamente preenchidos por gases e divididos por zonas: capilar, intermediária e água do solo. A Capilar é a mais próxima da zona de saturação, na parte inferior os poros são mais saturados na parte superior os poros menores estão preenchidos por água possuindo uma forma irregular (CPRM, 2008).

De acordo com Feitosa (2008), a parte intermediária situa-se entre o limite da zona capilar e o limite das raízes das plantas, e a umidade presente é originada da água capilar isolada fora da área das raízes. Na primeira camada, água do solo, também entendida como zona de evapotranspiração, é posicionada entre os extremos das raízes da vegetação e a superfície do solo.

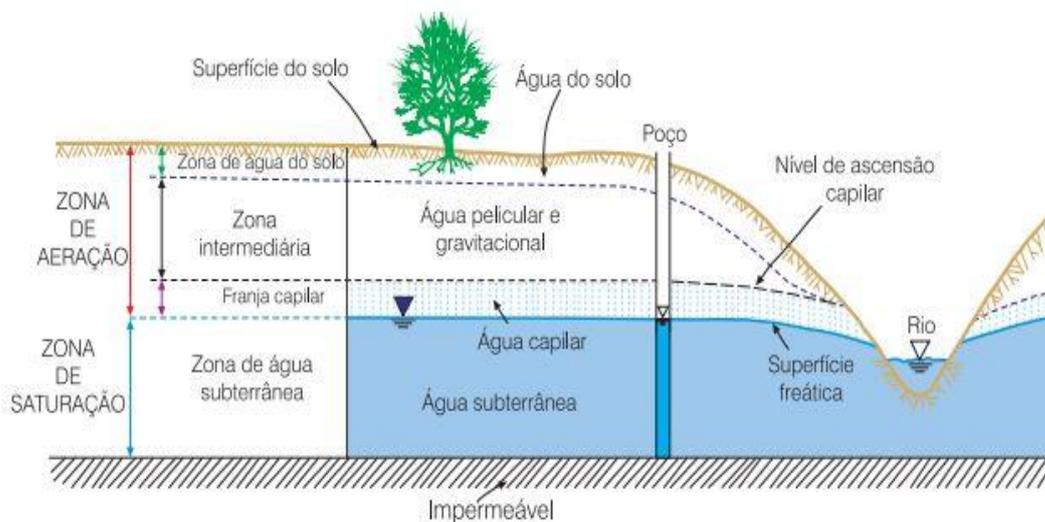


Figura2: Distribuição vertical da água no solo e subsolo (CPRM, 2008).

2.1.2 Tipos de aquíferos

Aquífero é uma formação geológica que engloba água, permitindo-se sua movimentação no seu interior em condições naturais. Podem ser classificados por meio da pressão nas superfícies limites, e também capacidade de transmissão de água nas camadas limites, são categorizados como: confinados e livres (CPRM, 2008).

De acordo com Feitosa (2008), os aquíferos confinados são aqueles que a pressão de água em seu topo é maior do que a pressão atmosférica a são divididos em confinados não drenantes e confinados drenantes.

Aquíferos confinados não drenantes são aqueles em que as camadas limites superior e inferior são impermeáveis, onde na penetração de um poço o nível da água subterrânea situa-se acima da base confinante superior. Um

exemplo é o aquífero B perfurado pelos poços 1, 2 e 4 e o aquífero C perfurado o poço 3 na Figura 3 (CPRM, 2008).

Os aquíferos drenantes são aqueles em que uma camada limite é semipermeável, liberando a entrada e saída de fluxos de água pelo topo ou base. Já os aquíferos livres são aqueles em que todos os pontos se encontram em pressão atmosférica, e também pode ser classificado como drenantes (base semipermeável) e não drenantes (base impermeável) (CPRM, 2008).

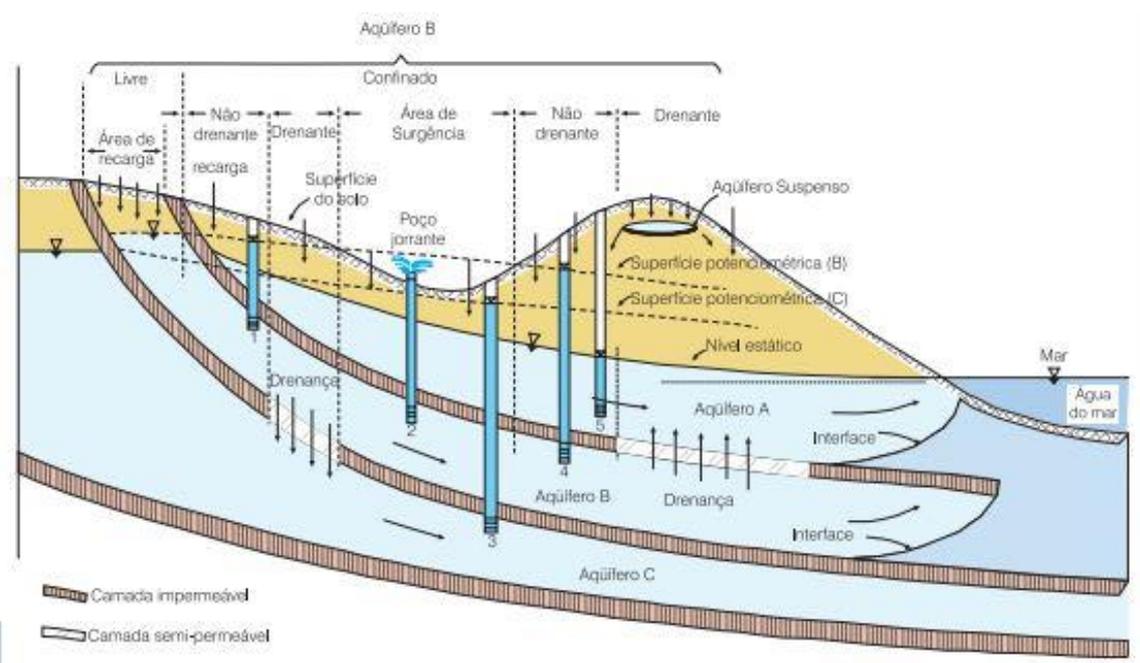


Figura 3: Tipos de aquíferos de acordo com pressão de suas água e camada de topo e base (CPRM, 2008).

2.2 Controle das águas em projetos de mineração

A presença de água dentro de uma área de mineração, seja ela uma cava ou pedreira, gera a necessidade da execução de um sistema de controle para um trabalho de rebaixamento com o objetivo de viabilizar a lavra em termos operacionais. Um estudo mal elaborado de rebaixamento, pode ocasionar problemas para a própria infraestrutura dentro da mina e operações auxiliares (MULLER, 2004).

O rebaixamento é proporcionado pela retirada da quantidade de água no perfil do solo ou no maciço rochoso, para um nível adequado para a operação de mina. É determinado como uma drenagem dos poros dentro da rocha ou solo, e que ocasiona o rebaixamento do lençol freático (ALONSO, 1999).

2.2.1 Técnicas de controle das águas em minas subterrâneas

De acordo com La Cruz (2014), as técnicas de controle das águas em minas subterrâneas são procedimentos que controlam a infiltração da água no terreno, e no bombeamento. Possuem vários métodos, mas só alguns são economicamente viáveis de serem implementados, os mais comuns são:

- Impermeabilização da superfície do terreno: o método baseia na impermeabilização de águas superficiais (rios, lagos, riachos e córregos) que descarrega a água no aquífero, que seria capaz de percolar em direção à mina. Uma forma de prática dessa estratégia é mudar o curso do rio;
- Congelamento do terreno: este princípio consiste em fazer com que a água do solo se torne uma parede de gelo, produzida pela circulação de um fluido congelante dentro de um sistema de tubos verticais, que gera um muro completamente impermeável (*cut-off*). É um método usado para quaisquer condições hidrogeológicas, porém a custo econômico alto;
- Grouting: a finalidade deste método é eliminar ou reduzir o fluxo das águas em minas subterrâneas, selando as zonas de maior permeabilidade. Compreende uma perfuração de 90 milímetros de diâmetro, injetando-se o cimento *grout*, que mistura-se parcialmente, ocorrendo uma troca do maciço natural com um fluido cimentício, com o objetivo de criar um material mais resistente. É uma técnica de alto custo, possui incertezas na sua aplicação e tem como objetivo principal controlar fluxo de águas nas construções de poços verticais (*shaft*);
- Drenagem de mina: este método é o mais empregado para o controle de águas na mineração. É realizado para vários fatores, tanto para desvios

de águas infiltradas na mina quanto para processos mais complexos como a instalação de poços de rebaixamento.

2.2.2 Técnicas de controle das águas em minas a céu aberto

As técnicas podem ser caracterizadas em duas classes. As técnicas ativas, que podem ser compreendidas como as técnicas de rebaixamento avançado, e as técnicas passivas também renomeadas de técnicas de rebaixamento a tempo real (LA CRUZ, 2014).

As ativas podem ser caracterizadas por poços de bombeamento, galerias subterrâneas, drenos horizontais, ponteiras filtrantes, valas, e estações de bombeamento. Já as passivas são subdivididas em paredes *cut-off* e congelamento de terreno (LA CRUZ, 2014).

Na lavra a céu aberto existem pontos onde o lençol freático é interceptado pela superfície do terreno, ou seja, a água subterrânea brota na superfície, chamada de surgências. Os pontos de surgências influenciam na estabilidade dos taludes dentro da mina pelas condições das pressões neutras. Em caso de ocorrência do afloramento da água são necessárias as construções de drenagens para minimizar suas ações.

2.3 Critério para seleção da técnica de rebaixamento

A seleção do principal sistema de desaguamento deve consistir nos estudos comparativos de muitas variáveis. Sabe-se que o processo hidrogeológico é complexo, no qual diversos fatores precisam ser considerados, e os resultados deve ser verificados em tempo hábil de projeto (Libicki, 1993).

Libicki (1993) indicou os seguintes critérios:

- Condições hidrogeológicas;

- Ociosidade dos arranjos de rebaixamento e experiências já construídas;
- Proteção ambiental;
- Valor capital e custos operacionais;
- Pretensão de segurança;
- Tecnologia proposta perante a operação de mina e tipos de máquinas a serem utilizadas;

2.4 Métodos usuais de controle de rebaixamento

De acordo com Alonso (1999), quando se trata de rebaixamento do nível freático, seja em uma mina ou até mesmo para uma obra provisória, são necessários um planejamento e um controle específico da influência do rebaixamento. É preciso instalar medidores de nível de água, como por exemplo: INA's, piezômetros, vertedouros e outros medidores de vazões.

Muller (2004) exemplificou a existência de vários processos para o rebaixamento do lençol freático, como por exemplo: bombeamento direto (ou esgotamento de vala), ponteiros filtrantes (*weel-points*), drenos, galeria de drenagem, poços profundos.

2.4.1 Bombeamento Direto

O bombeamento direto é o procedimento mais simples para o rebaixamento do nível da água, e tem como função recalcar a água para a área externa de trabalho, tendo como direção valetas construídas no fundo da escavação, conforme exemplificado na Figura 4. Quando a água atinge um volume considerável é necessário o uso de bombas para utilizar o recalque. É o esquema de fácil construção e de baixo custo tendo sua utilização em obras de menor porte.

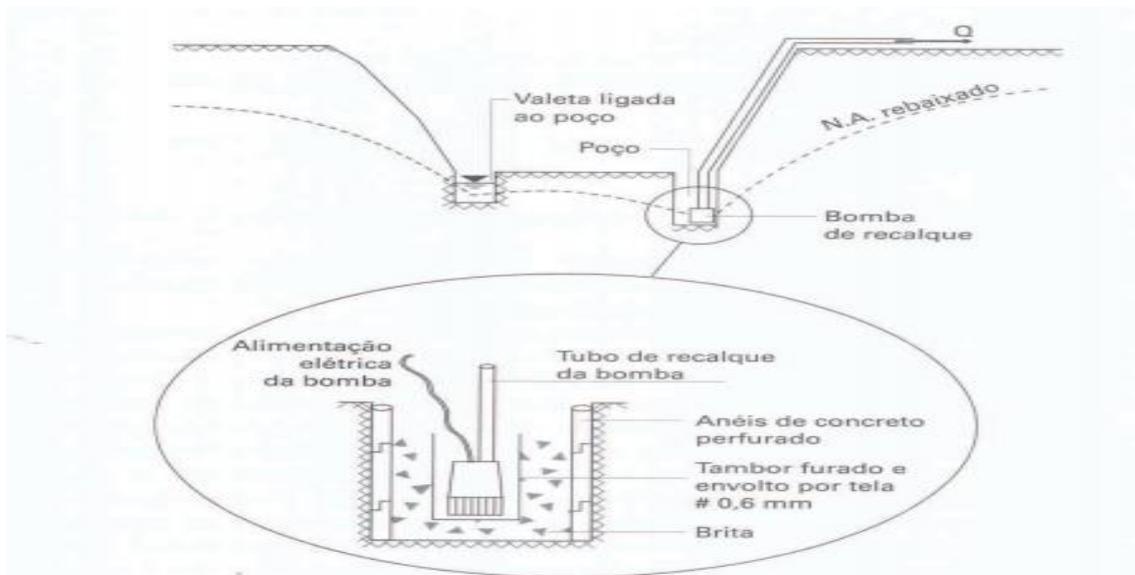


Figura 4: Sistema de bombeamento direto (Alonso, 1999).

2.4.2 Ponteiras Filtrantes

O sistema de ponteiras filtrantes consiste no rebaixamento por meio de ponteiras, que é um material de um tubo coletor, constituído por PVC ou aço com um diâmetro aproximado de 4" ligados a uma bomba a vácuo. As ponteiras são instaladas no próprio solo próximo ao tubo coletor com um espaçamento de 0.5 a 3 metros. Este tubo pode ser conectado com até duas ponteiras e juntamente com a câmara de vácuo o qual circula a água nas ponteiras, por meio da sucção causada pelo vácuo no sistema. A Figura 5 expressa o rebaixamento por meio de ponteiras filtrantes que possui três estágios consecuintes (ALONSO,1999).

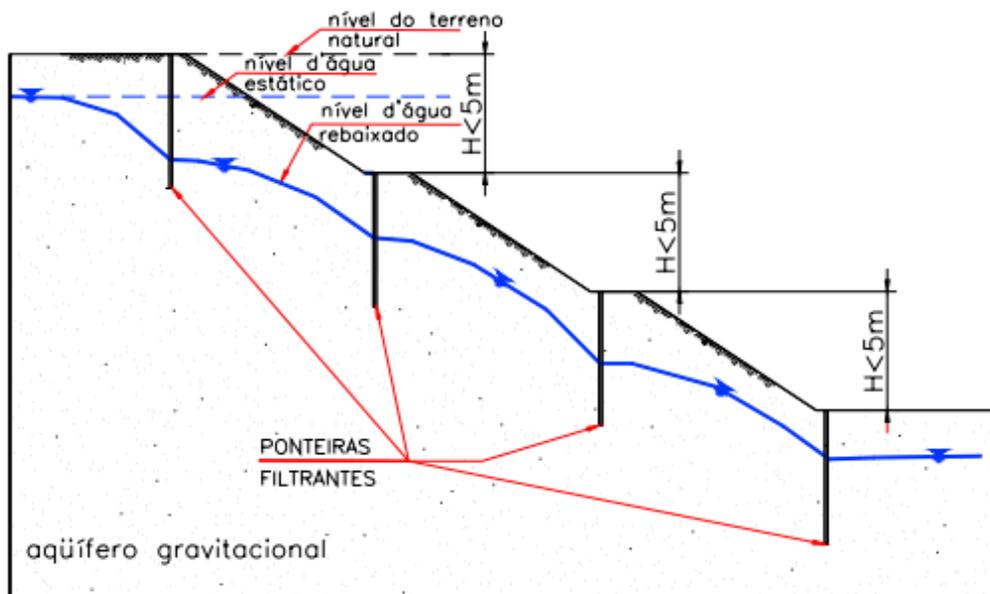


Figura 5: Rebaixamento por meio de ponteiros filtrantes (Côrrea, 2006).

2.4.3 Poços Profundos

O método por poços profundos elimina as dificuldades de profundidade referentes aos artificios de ponteiros filtrantes e bombeamento. Este sistema possui duas formas de trabalho: na forma de injetores e de bombas de recalque submersas ao eixo vertical.

De acordo com Muller (2004), os injetores possuem uma aplicabilidade com poços entre 200 a 400 milímetros com profundidade de aproximadamente 40 metros. Possui duas variações, a primeira com o uso de tubos paralelos e a segunda de tubos concêntricos. Seu funcionamento possui uma pressão de 7kgf/cm², com uma pressão de retorno na faixa de 10%. A perfuração do poço injetor nas duas alternativas tem sua instalação por tubos metálicos de revestimento, o qual proíbe a utilização de lama de bentonita para a estabilização das paredes (ALONSO,1999).

O rebaixamento por bombas de recalque submersas ao eixo vertical, utiliza bombas submersas que são instaladas no tubo filtro, semelhante aos

injetores, é a forma mais utilizadas em lavras a céu aberto. Seu funcionamento é feito por sistemas elétricos. É ligado em um painel de controle elétrico, que vem acoplado juntamente com geradores, proteção do motor elétrico, eletrodos, dispositivos de controle e desempenho das bombas, e são considerados equipamentos de alto-custo. (ALONSO, 1999). O rebaixamento desse método é utilizado para qualquer tipo de rocha ou solo, onde os poços são construídos com espaçamentos pré-determinados, sendo posicionados de forma individual, de acordo com o regime de trabalho e do tipo e condições do solo, de tal forma a atender o objetivo proposto (DEBEREINER E VAZ, 1998). Um exemplo do método de poços profundos pode ser visto na Figura 6.

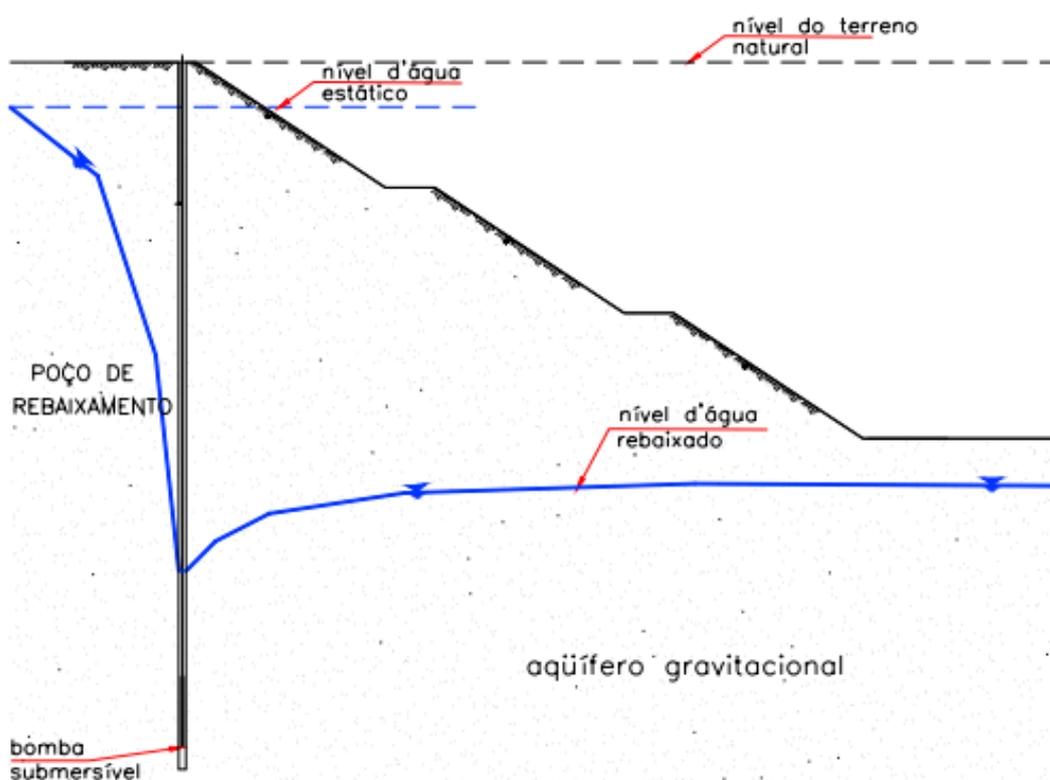


Figura 6: Rebaixamento através de um poço (Côrrea, 2006).

O dimensionamento proposto em poços profundos se inicia pela determinação da vazão a ser bombeada para resultar os níveis de rebaixamento esperados. Cada fórmula ou meio empregado no processo de rebaixamento leva em conta o tipo de aquífero do local e as fontes de alimentação (CORRÊA, 2006).

2.4.4 Drenos horizontais profundos

Os drenos horizontais profundos mais conhecido como DHPs, são utilizados para drenagens de camadas no maciço rochoso. Tais drenos são posicionados geralmente de forma individual, podendo ser dispostos em arranjos com espaçamento variável (DEBEREINER E VAZ, 1998).

De acordo com Mariano (2017), o objetivo do DHP é ocasionar o rebaixamento do nível da água dentro do maciço rochoso de forma a evitar surgências de água na face do talude, garantindo-se sua estabilidade. Este método é eficiente quando a saturação do maciço rochoso é atingida e indicada por um INA.

O DHP é realizado por meio de uma perfuração sub-horizontal seja rotativa ou rotopercursiva com diâmetro de 100 milímetros, e inclinação de 5° a 10° de modo que sua saída seja gravitacional, conforme apresentado na Figura 7. Pode ser trabalhado em maciços de aquíferos confinados ou não confinados, tendo uma variação de profundidade de 10 a 100 metros (MULLER, 2004)

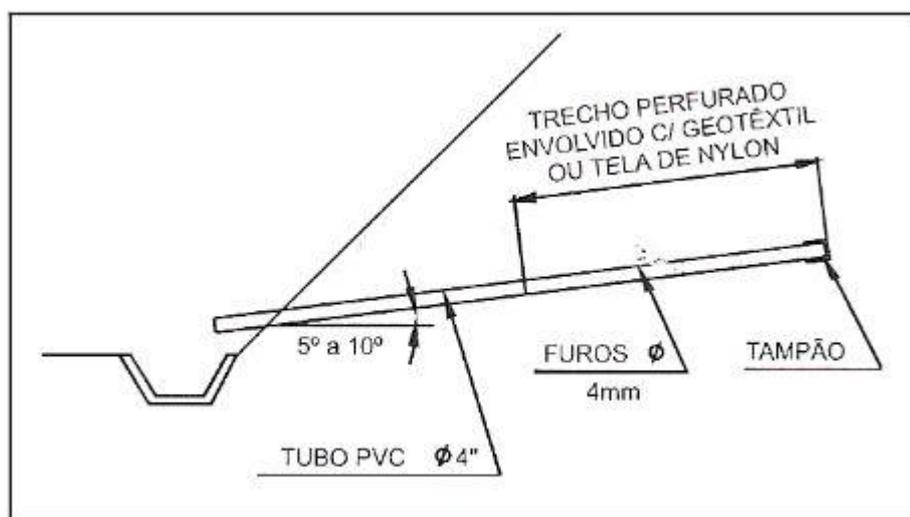


Figura 7: Dreno horizontal profundo (DEBEREINER E VAZ, 1998).

2.5 Poços tubulares e recorte de poço

De acordo com Feitosa (2008), para um bom dimensionamento de poços tubulares é preciso conhecer bem a hidrogeologia do local, do qual possa conseguir os benefícios para o rebaixamento. Para efetuar de forma correta, o projeto de poço tubular, algumas premissas devem ser adotadas:

- O poço deverá ter a maior descarga possível, para o maior rebaixamento dinâmico, possuindo uma maior eficiência;
- Baixo custo operacional;
- Preservar a boa qualidade da água, evitando as contaminações;
- Apresentar uma boa vida útil do poço.

Os testes de bombeamentos de um poço podem ser classificados de duas formas: teste de produção e o teste de aquífero. O primeiro pode ser dito como um rápido bombeamento que tem como objetivo definir a capacidade produtiva de um poço, de forma a dimensionar a vazão. Já o teste de aquífero visa a caracterização do meio físico da subsuperfície, e também obter os parâmetros hidrodinâmicos porosos, como por exemplo: transmissividade (T), condutividade hidráulica (K), coeficiente de armazenamento (S) e porosidade efetiva (η_e) (CPRM, 2008).

As variáveis envolvidas em um bombeamento de poço são: vazão de bombeamento (Q), rebaixamento do nível da água dentro do poço (s), e o tempo (t). A vazão de um bombeamento é o volume de água por unidade de tempo que é retirado de um poço, sabendo que o rebaixamento se dá pela distância do nível estático (NE) para o nível dinâmico (ND). O nível estativo é a altura referente do nível da água antes de acontecer o bombeamento até a superfície, e o nível dinâmico é a altura do nível da água durante o bombeamento até o terreno (CPRM, 1998).

Ao realizar o bombeamento de um poço, ocorre um rebaixamento progressivo do nível de água ou do nível de pressões do aquífero, originando uma superfície de influência no entorno do poço que está sendo bombeado, que se chama de cone de rebaixamento. Esta superfície progride no espaço em

função do tempo, ou seja, para cada tempo (t_n), encaixa-se a um rebaixamento (S_{pn}), no poço bombeado, e para cada ponto de distância (r), reflete uma superfície (S_n), como mostra a Figura 8 (CPRM, 2008).

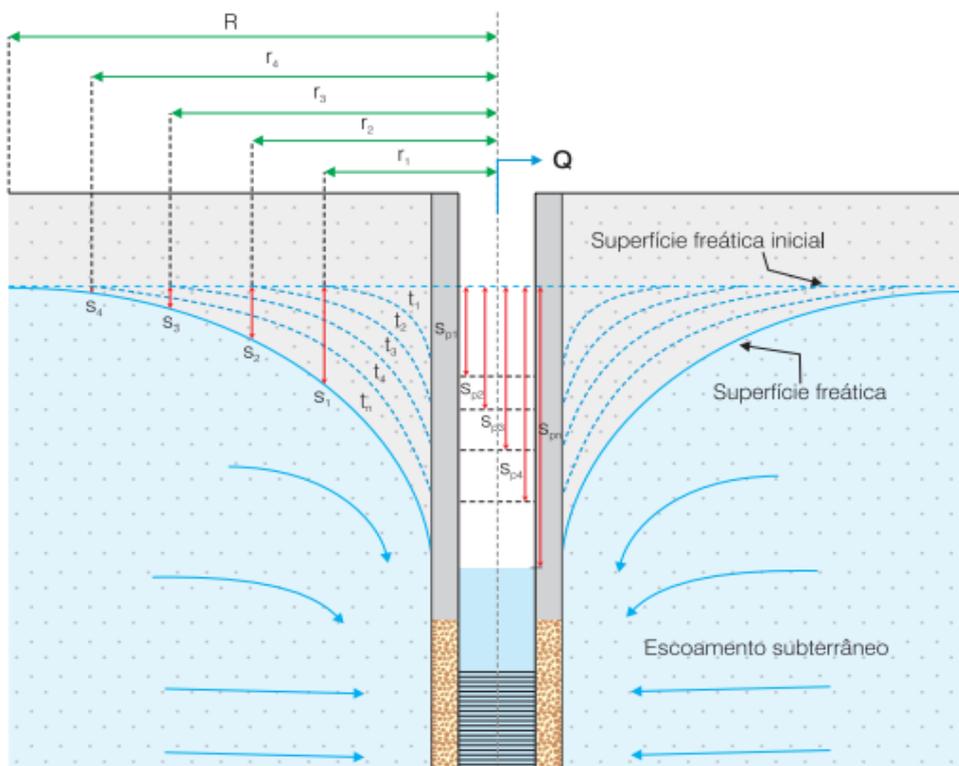


Figura 8: Evolução do cone de rebaixamento durante um bombeamento do poço (CPRM,2008)

De acordo com Abud *et al.* (2014), o monitoramento e o controle operacional dos poços englobam-se os aspectos hidráulicos, qualidade da água e o desempenho do funcionamento dos equipamentos de bombeamento. Os parâmetros hidráulicos monitoram o nível da água, vazão instantânea, tempo de funcionamento e o volume de água extraído.

A supervisão da qualidade de água é feita através do pelo teor de sólidos em suspensão, os parâmetros físico-químicos, atividade microbiológicas e o desempenho hidráulico do poço e do aquífero. Já quanto ao funcionamento dos equipamentos de bombeamento é monitorado os controles operacionais, nos quais avalia-se o rendimento eletromecânico, disponibilidade do poço e a previsão dos serviços de manutenção e reparo (JORBA e ROCHA, 2007).

As manutenções corretivas e preditivas devem impor sempre uma inspeção regular dos sistemas de rebaixamento, através da identificação do problema, recuperação do mesmo e conseqüentemente, obter um bom funcionamento. Uma boa operação de manutenção traz benefícios para a operação, adequando o nível do lençol freático, custos racionalizados, padronização e otimização de equipamentos (JORBA e ROCHA, 2007).

Segundo Abud *et al.* (2014), o recorte e rebaixamento dos poços devem ser realizados de forma mais eficiente e rápida possível, pois com o andamento e desenvolvimento da lavra, que conseqüentemente vai adquirindo mais profundidade e deve-se realizar este processo sempre que viável. É preciso um apoio das operações auxiliares (guindastes, caminhão munck, eletricitas, mecânicos e instrumentistas) para tirar toda infraestrutura do poço: rede elétrica, adutora, equipamento de bombeamento, painel, fiações, entre outros.

Ao desligar o poço para fazer o recorte, por conseqüência, o nível do lençol freático aumenta, passando do nível dinâmico para o nível estático. Automaticamente a umidade referente ao solo no torno do poço aumenta, trazendo malefícios para operação de mina (ABUD *et al.*, 2014). Por exemplo: a umidade elevada altera a reologia dos solos. Essa condição associada ao tráfego de equipamentos de mina ocasiona os chamados “borrachudos” nas vias de transporte, no qual o solo do subleito da via se comporta de forma plástica, promovendo sua deformação. Em dado momento a deformação do subleito da via pode ser acentuado ao ponto de modificar o centro da massa do caminhão, podendo acarretar em tombamento do mesmo.

2.6 Cálculo do raio de influência dos poços de rebaixamento de mina

De acordo com Silva *et al.* (2014) o raio de influência de um poço pode ser explicado como a distância na qual a ação do bombeamento é nula, ou seja, o espaço do limite do cone e da área de rebaixamento do poço, que demonstra (R) na Figura 8. O raio de influência pode alterar de acordo com alguns aspectos,

tais como: fatores geológicos, transmissividade, condutividade hidráulica, tempo de bombeamento.

O raio de influência de um poço tem o intuito de indicar até onde este poço pode interferir em relação aos demais poços, INA's e piezômetros, ou até mesmo em corpos hídricos na circunvizinhança do poço. Caso ocorra a interferência com o outro poço próximo pode levar à redução da produção de ambas as partes.

De acordo com Feitosa (2008) a transmissividade corresponde a quantidade de fluxo de água que pode ser transmitida horizontalmente por unidade da largura do aquífero. Pode-se definir como a taxa de escoamento de água por meio de uma faixa vertical com largura unitária submetido a um gradiente hidráulico.

A condutividade hidráulica corresponde o quão o aquífero exerce a função de ser um condutor hidráulico. Pode ser entendida como sendo a vazão que atravessa uma área unitária submetida a um gradiente hidráulico. A condutividade hidráulica leva em conta as características a porosidade e propriedades do fluído (FEITOSA, 2008).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho buscou avaliar os impactos de um poço de rebaixamento dentro de uma mina. Para tal, foi selecionado um poço para estudo, posteriormente, por meio dos resultados de um teste de vazão foi possível calcular a transmissividade e a condutividade hidráulica.

Com auxílio da equação 1 pode ser calculada a transmissividade do maciço rochoso em função do teste de vazão, ou seja, a variação do nível da água considerando o tempo (SILVA *et al*, 2014).

$$T = \frac{Q}{4\pi(d_2-d_1)\ln\frac{t_2}{t_1}} \text{ (Equação 1)}$$

T: Transmissividade (m²/s)

Q: Vazão (m³/s);

t1: Tempo 1 do teste de vazão;

t2: Tempo 2 do teste de vazão;

d1: nível da água no tempo 1 (m);

A equação 2 dá o resultado de “k” que pode ser apresentada pela aproximação de Dupuit & Forchheimer (1914). A condutividade hidráulica é a função da transmissividade calculada na equação 1 sobre a largura do aquífero. (SILVA *et al*, 2014).

$$k = \frac{T}{b} \text{ (Equação 2)}$$

k: Condutividade hidráulica (m/s);

T: Transmissividade (m²/s);

b: Espessura do aquífero (m);

Em seguida é possível calcular o raio de máxima influência do poço. O método matematicamente mais utilizado para o cálculo do raio influência é a equação empírica de Sichardt (1962). A equação 3 estabelece a condutividade hidráulica com a variação do nível da água do teste de vazão (SILVA *et al*, 2014).

$$r = C * (H - h) * \sqrt{k} \quad (\text{Equação 3})$$

r: Raio de Influência (m);

C: Constante Adimensional o qual adota-se 3000;

(H-h): Altura do nível dinâmico do poço(m);

Na etapa seguinte, dentro do raio de influência, foi selecionado os instrumentos de monitoramentos e poço para averiguar o aumento do nível de água e umidade em torno do poço em estudo quando estava parado e operando. Na Figura 9 pode ser visto um desenho esquemático da metodologia.

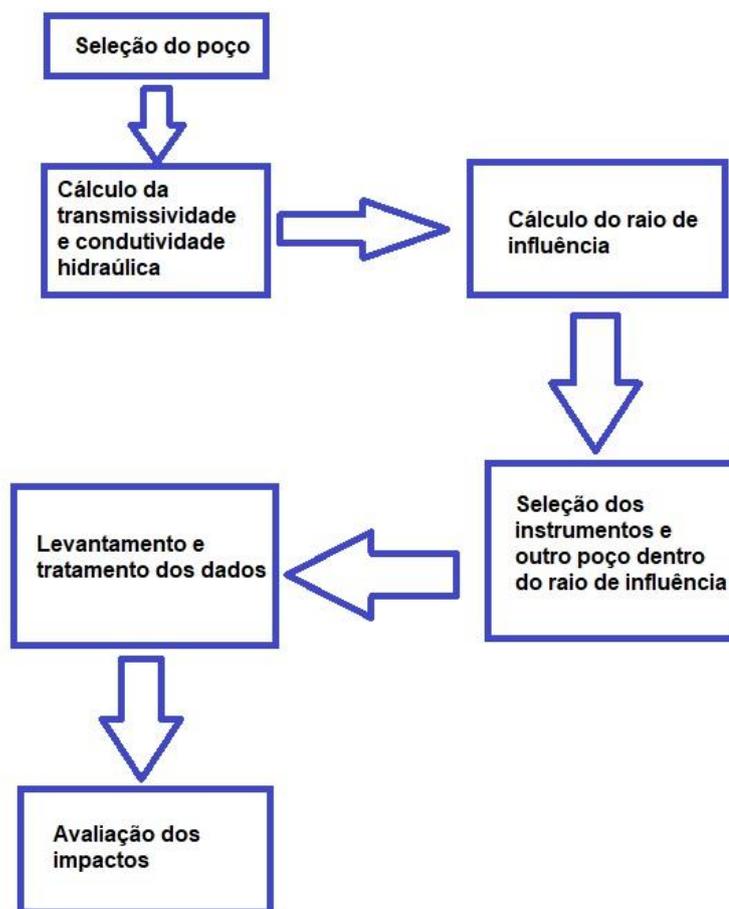


Figura 9: Esquema da metodologia.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Introdução do estudo de caso

O mineral extraído nesta mina é a apatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$, que possui uma composição de: 41,8% P_2O_5 ; 55,0% CaO ; 1,2% F; 2,3% Cl ; 0,6% H_2O . Tendo uma dureza 5 na escala de mols, densidade relativa de 3,1 a 3,2 g/cm^3 , um brilho vítreo, sendo um material friável, fratura conchoidal, com cores branco, azul, rosa e com um hábito maciço.

De acordo com Peixoto (2016) a apatita ocorre como mineral pertencente às rochas ígneas, sedimentares, metamórficas e em veios hidrotermais. Nas rochas sedimentares é encontrado como clastos ou minerais secundários, também pode ser identificado em pegmatitos e outros tipos de veios. É usado para fazer fertilizantes como a fonte de fosfato.

4.1.1 Geologia local

A mineradora em estudo fica localizada na Província Alcalina do Alto Paranaíba (Figura 10), que foi originada no contexto de desenvolvimento de plumas mantélicas (material quente que ascendem no manto até a superfície da terra) na base da litosfera continental na borda da Bacia do Paraná entre o Cretáceo Inferior e Eoceno. Os corpos ígneos intrusivos e extrusivos foram gerados por meio do magmatismo alcalino e ultrapotássico. O complexo alcalino Carbonatítico do Salitre relaciona-se com as intrusões ultramáficas-carbonatíticas que atravessam a sequência metamórfica neoproterozóica composta por litotipos do Grupo Caraça e Grupo Bambuí (BROD *et al*, 2004).

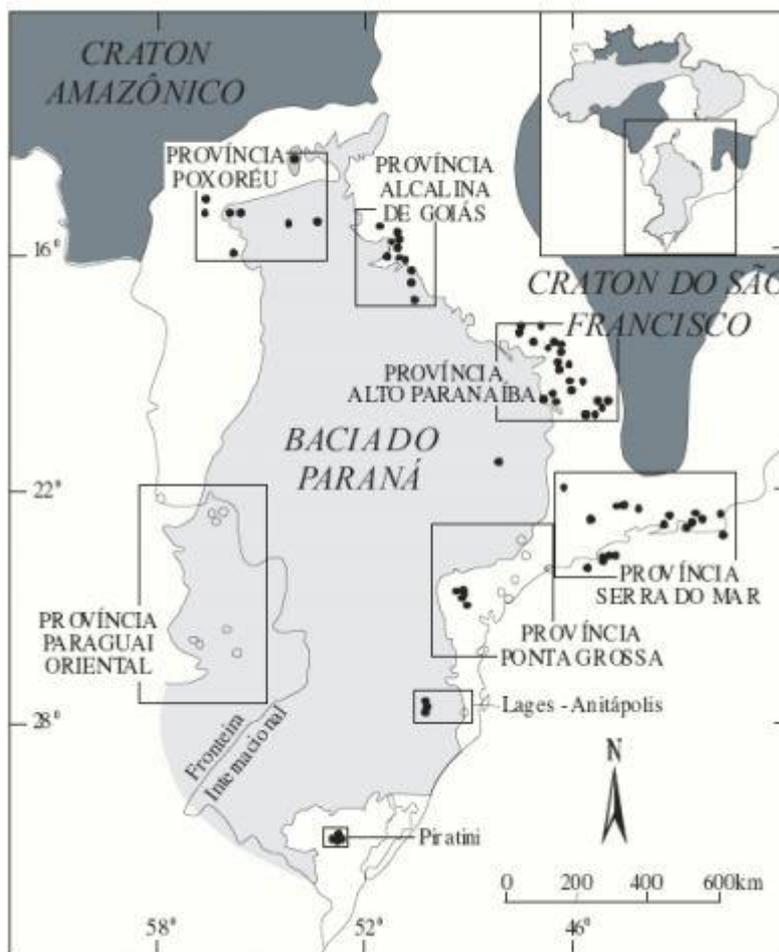


Figura 10: Complexo do Salitre no quadro da Província do Alto Paranaíba

Fonte : Brod *et al.* (2004).

Este Complexo é formado por três intrusões, tendo como a de maior expressão mineral e onde se situa a área de estudo, o “Complexo Alcalino Carbonatítico Salitre I” (CACSI), que possui uma dimensão de 9 km de norte ao sul e 5 km de leste a oeste. A região tem como característica poucos afloramentos, pelo fato do alto grau de intemperismo do clima tropical úmido, por um espesso manto de alteração que beneficiou o incremento residual de nióbio, fosfato e titânio.

A área em estudo que é representada pelo esboço da geologia do Salitre 1, por meio de informações geofísicas apresentadas Figura 11. O depósito mineral foi constituído pelo enriquecimento supergênico dessas rochas gerando um manto intempérico espesso, constituído basicamente, por meio uma seção

vertical dos litotipos presentes, topo para a base, formado por: aloteritos, isalteritos, zona de transição e rocha sã.

Em seu topo possui uma espessura de 5 a 20 metros, tendo um material areno-argiloso avermelhado com a presença de canga. Na segunda faixa é formado por bebedorito e fosfocorito bem alterados tendo a cor alaranjado e granulometria areno-argiloso. Já na terceira faixa possui uma estrutura bem fraturada, formado por blocos. A sua base é estruturada por carbonatitos, fosfocoritos, e bebedoritos, com uma forma maciça e com baixo índice de faturamento (BROD *et al*, 2004).

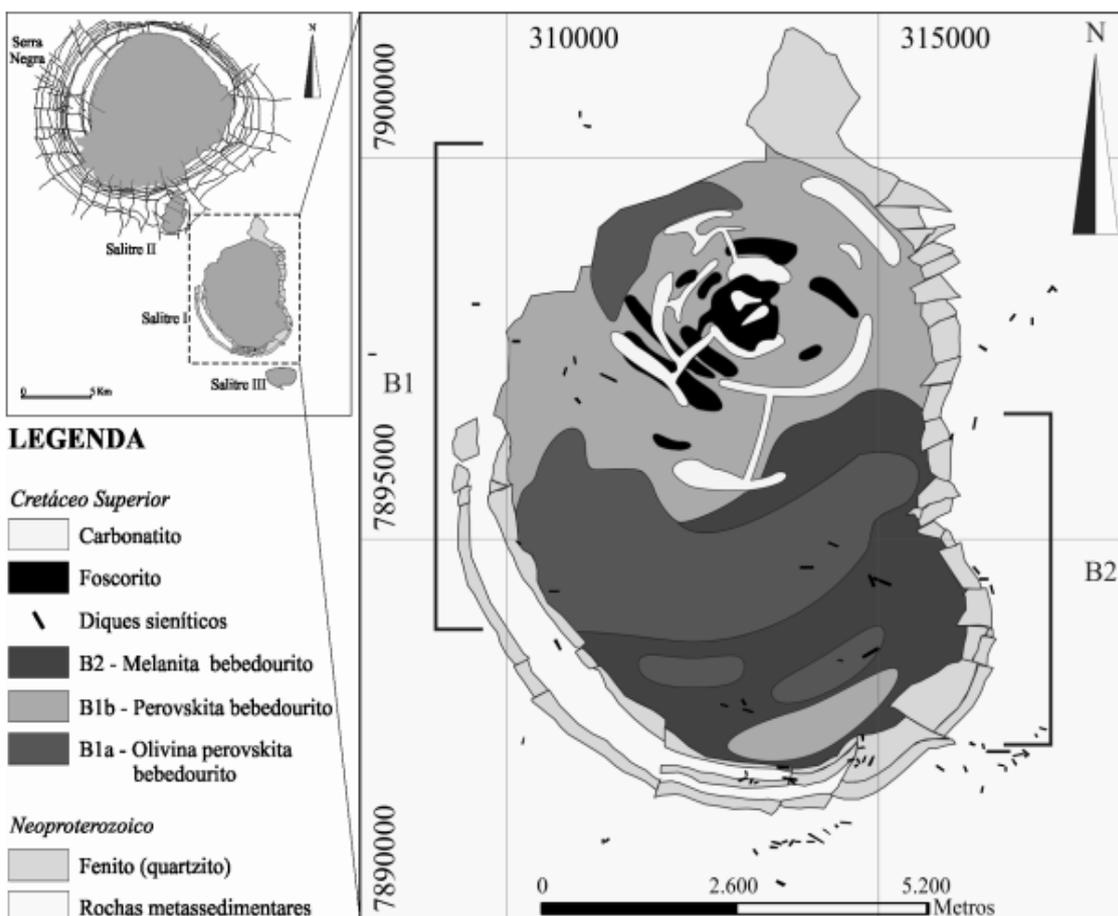


Figura 11: Mapa do Complexo Alcalino Carbonatítico I, com base em informações registradas em campo por meio de testemunho de sondagens. Adaptado por Barbosa (2009).

4.1.2 Compilação dos dados

A empresa cedeu os dados do Poços 12 e 26 e dos quatro INA's (CMP-SAL-DH0259, CMP-SAL-DH0275, CMP-SAL-DH0264 e o INA42B). No arquivo do Poço 12 tem informações sobre a vazão, nível dinâmico, nível estático e perfil do poço. Já do Poço 26, tem-se apenas dados do nível estático pelo fato do poço não estar em operação e os valores de nível do lençol freático dos INA's.

Na Figura 12 demonstra o perfil construtivo do Poço 12 (PB12), tendo sido perfurado uma profundidade total de 110 metros em 14 ¾", mas o poço tem seu revestimento limitado na profundidade de 98,80 metros em 8", composto por tubos lisos de aço galvanizado e filtro espiralado. O espaço anelar foi preenchido por pré-filtro. O tubo de boca foi revestido em aço de 18" cimentado para isolamento e preservação do aquífero.

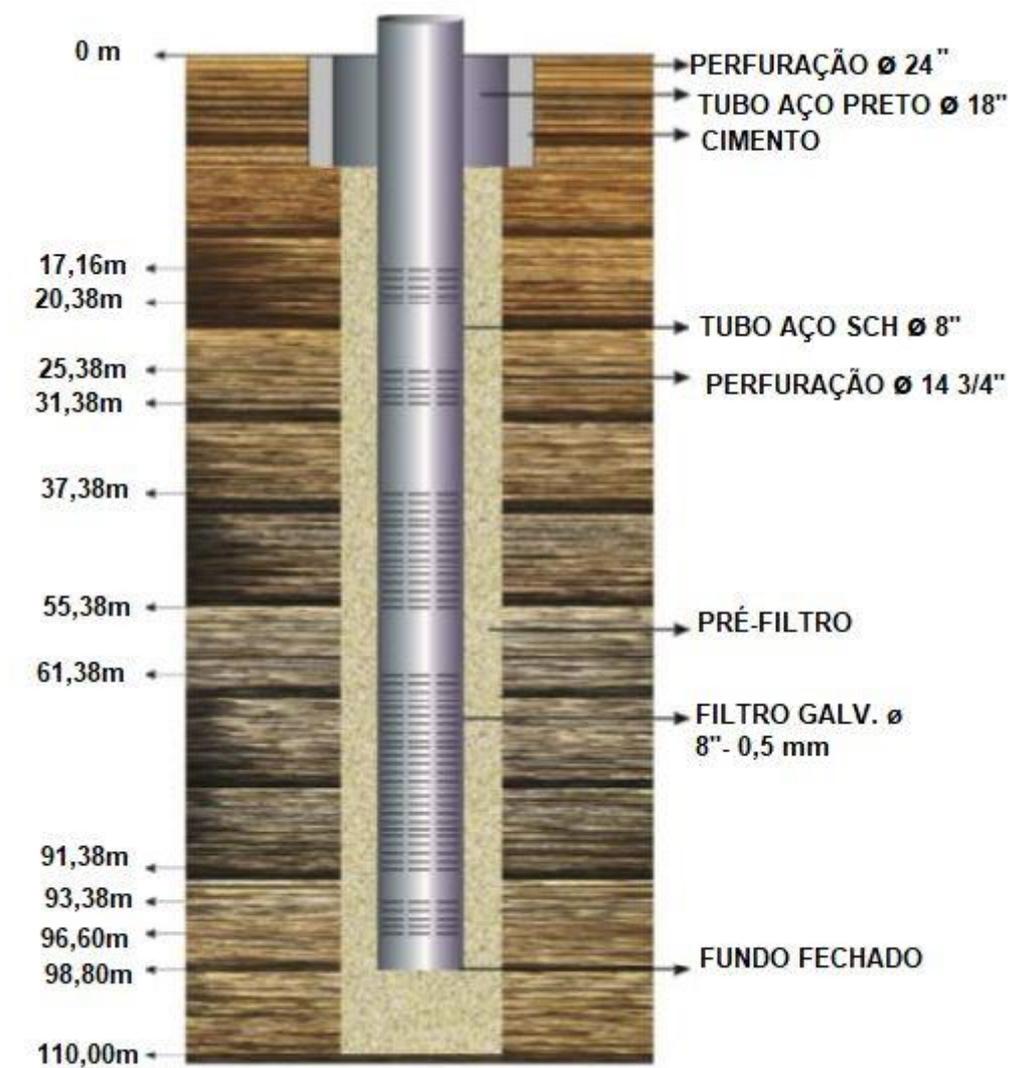


Figura 12: Perfil do Poço 12.

O Poço 12 possui uma cota atual de 1006,50 metros. A vazão de exploração neste poço é de aproximadamente 209,40 m³/h. Sendo um poço tubular profundo com um nível estático jorrante, e um nível dinâmico de 31,33 metros de acordo com os resultados do teste de vazão.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados do teste de vazão

Para encontrar o raio de interferência do PB12, foi necessário descobrir qual é a condutividade hidráulica e sua transmissividade. Para a obtenção desses valores foi realizado um teste de vazão, onde foi possível determinar duração do processo, nível dinâmico e nível estático. Nesse teste foi possível extrair os dados para o cálculo de transmissividade. A Tabela 1 mostra os valores que foram usados nas fórmulas (vazão, distâncias e tempo).

Tabela 1: Valores do Teste de vazão

Vazão (m ³ /s)	Nível estático(m)	Distância1(m)	Tempo1 (min)	Distância2(m)	Tempo2(min)
0,060	26,17	30,42	5	31,33	60

5.2 Cálculo do raio de interferência do PB12

De acordo com os valores propostos na tabela 1 foi possível determinar a transmissividade (T) pela equação 1:

$$T = \frac{0,060}{4\pi(31,33 - 30,42)ln \frac{60}{5}}$$

$$T = 2,11 \times 10^{-3} m^2 / s$$

Após ter encontrado o resultado da transmissividade, foi determinado o valor da condutividade hidráulica (equação 2), que é a razão entre transmissividade e a espessura do aquífero que possui o valor de 72,63 metros. Este valor se dá pela diferença do fundo do poço com o nível estático do teste de vazão.

$$k = \frac{2,11 \times 10^{-3}}{(98,80 - 26,17)}$$

$$k = 2,90 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Sendo assim, foi possível calcular o raio de influência do PB12 pela seguinte fórmula (equação 3):

$$r = 3000 \times 31,33 \times \sqrt{2,90 \times 10^{-5}}$$

$$r = 506,15 \text{ metros}$$

5.3 Área impactada no raio de influência

Na Figura 13 é possível identificar a área impactada pelo raio de influência do PB12. Nota-se que vários poços estão localizados dentro dessa área de impacto. Sendo assim todos os poços e equipamentos no interior dessa circunferência vermelha sofrem efeitos de nível e vazão quando o poço 12 está desligado, em uma manutenção ou até mesmo em um recorte de poço.

É importante frisar que esse raio pode ser dito como o raio de máxima influência. Ou seja, os poços e INA's mais próximos do PB 12 sofreram maiores alterações. Por exemplo o PB13 sofreu um grande impacto quando ocorreu uma paralisação no PB12. O PB26 apresentou uma mudança significativa, porém menor que o PB 13, já os PB's fora do círculo - (PB4, PB9, PB15) não variaram em relação ao poço estudado.

Vale ressaltar que nem todas as informações de todos os instrumentos dentro do raio de influência foram fornecidas pela empresa. Sendo assim, foram utilizadas apenas as informações cedidas, limitando um pouco a análise.

Mapa do raio de influência no Poço 12

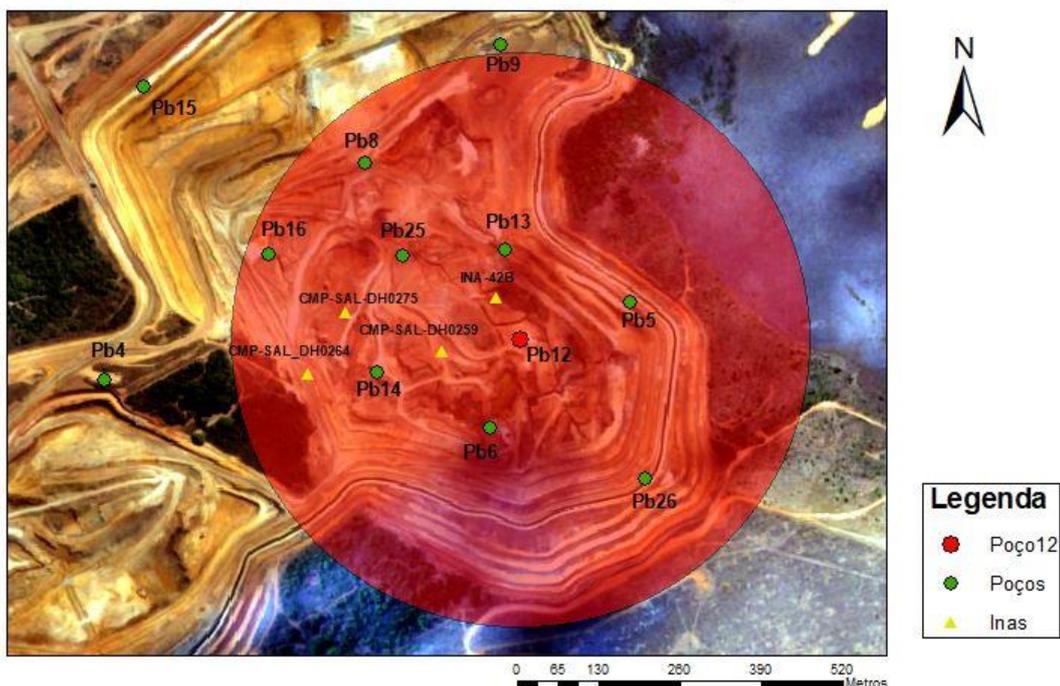


Figura 13: Mapa do raio de influência do PB 12

5.4 Monitoramento dos poços PB 12 e PB 26 em nível estático e INA's

A Tabela 2 mostra os valores de nível estáticos (NE) do PB 12, ou seja, o poço estava inoperante, o NE do PB 26, e a leitura do nível de água de três INA's em um determinado período de tempo (07/05/2019 até 28/05/2019). A coleta dos valores dos poços é realizada diariamente. Já os INA's o recebimento de dados tem a frequência semanalmente. Estes dados relacionam-se após o primeiro recorte, o qual explica o nível estático do PB 12 diferente do teste de vazão.

Percebe-se que quando os valores do nível estático do PB 12 decaem, os valores do PB 26 e os INA's também sofrem alteração diminuindo o nível do lençol freático, pelo fato de tais instrumentos estarem dentro do raio de máxima influência. Em algumas exceções o nível estático do PB 12 pode diminuir e do PB 26 pode aumentar ou ficar constante por exemplo dia 09/05 e 10/05, isto é

explicado pelo fato que este poço se agrega em outras áreas de influências, por exemplo: PB 5 e PB 6.

Tabela 2: Monitoramento dos NE do PB12, PB 26 e leitura do NA dos INA's

Dia	NE do PB12(m)	NE do PB26(m)	CMP-SAL-DH0259 (m)	CMP-SAL-DH0275 (m)	CMP-SAL-DH0264 (m)
07/05/2019	2,29	26,94	-	-	-
08/05/2019	2,45	26,94	2,49	3,28	10,72
09/05/2019	2,46	27,00	-	-	-
10/05/2019	2,30	27,00	-	-	-
13/05/2019	2,45	27,09	-	-	-
14/05/2019	2,45	27,00	-	-	-
15/05/2019	2,45	27,04	2,47	3,32	10,88
16/05/2019	2,17	26,82	-	-	-
17/05/2019	2,16	26,82	-	-	-
20/05/2019	2,04	26,87	2,28	3,26	10,67
21/05/2019	2,32	26,93	-	-	-
22/05/2019	2,39	26,97	-	-	-
23/05/2019	2,24	26,85	-	-	-
27/05/2019	2,35	26,84	2,00	3,08	10,49
28/05/2019	2,42	27,00	-	-	-

5.5 Monitoramento dos poços PB 12 em nível dinâmico e PB 26 em nível estático e INA's

Na Tabela 3 apresenta-se outro cenário, refere-se a dados do nível dinâmico do PB12, nível estático do PB 26 e dados de quatro INA's, o INA-42B teve sua origem na metade de junho de 2019. Observa-se que quando o PB 12

está operando, automaticamente o nível do lençol freático dos demais instrumentos abaixam.

Pode-se interpretar pelas tabelas 2 e 3, que quando o PB 12 trabalha, o PB 26 aumenta seu NA na faixa de 1 metros e aos demais INA's ganha aproximadamente 1 metro a mais. O INA-42B possui o NA mais próximo da superfície, em análise de campo é possível identificar que esta área apresentou um maior número de surgências.

Levando em consideração os resultados das Tabelas 2 e 3, para realizar um segundo recorte do poço 12 será necessário um trabalho bem planejado, pois ao paralisar o bombeamento, automaticamente o nível da água subirá rapidamente. Sendo assim, o lençol freático poder emergir na superfície, proporcionando uma alta umidade sensível em torno do poço em análise evidenciado pelo INA INA-42B.

Tabela 3: Monitoramento dos ND do PB12, NE do PB 26 e leitura do NA dos INA's

Dia	ND do PB12(m)	NE do PB26(m)	CMP-SAL-DH0259 (m)	CMP-SAL-DH0275 (m)	CMP-SAL-DH0264 (m)	INA-42B (m)
03/06/2019	41,65	27,51	2,80	3,57	11,08	-
04/06/2019	43,00	27,50	-	-	-	-
05/06/2019	42,00	26,90	-	-	-	-
06/06/2019	46,76	27,50	-	-	-	-
07/06/2019	47,73	27,59	-	-	-	-
12/06/2019	49,16	27,74	-	-	-	-
18/06/2019	50,34	27,88	-	-	-	-
19/06/2019	49,29	27,85	-	-	-	-
21/06/2019	48,88	27,53	-	-	-	0,67
24/06/2019	51,83	28,00	3,20	4,17	11,65	0,89
25/06/2019	51,60	28,00	-	-	-	-
26/06/2019	51,20	27,80	-	-	-	-
27/06/2019	51,15	27,77	-	-	-	-
01/06/2019	51,20	27,85	-	-	-	-
02/06/2019	51,70	28,05	3,23	4,61	12,17	0,86

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusão

O trabalho teve como objetivo analisar o impacto de um poço de rebaixamento de lençol freático em relação ao outro poço e aos demais instrumentos. Assim como, o cálculo do raio de máxima influência do poço e previsão de próximo recorte do poço estudado.

O poço PB12 tem um raio de influência de 506 metros, abrangendo vários poços e INA's. Ao comparar os dados do PB26 e quatro INA's (DH0259, DH0264, DH0275 e o INA-42B) ficou evidenciada a correlação entre eles, assim como prevista pelo cálculo do raio de influência.

Pela observação dos aspectos analisados, que na região do poço estudado ocorre grandes ocorrências de surgências, drenos localizados, e umidades elevadas como foi notado nas Tabelas 2 e 3. Nesta mina é possível perceber que o trabalho da hidrogeologia é primordial para a produção, sendo necessário um alinhamento correto com a geotecnia, planejamento de lavra e operação de mina para que a empresa seja competitiva no mercado.

6.2 Propostas para trabalhos futuros

Para trabalhos posteriores pode-se realizar alguns estudos:

- a) Analisar os demais poços desta área, observando os raios de influência de cada um e localizar onde haverá maior domínio do fluxo de água e umidade dentro da mina;
- b) Abordar em projetos a comparação dos níveis estáticos e dinâmicos de vários poços, para a percepção do nível do lençol freático em toda a mina;
- c) Analisar a evolução dos raios de influência com relação aos recortes dos poços, identificando efeitos da geometria da mina e evolução do rebaixamento no raio de máxima influência.

7 REFERÊNCIAS

- ALONSO, U. R., **Rebaixamento Temporário de Aquíferos**, São Paulo, 1999.
- **Águas Subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido.** Ministério do Meio Ambiente Secretária de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, Brasília, 2007.
- JORBA, A. F.; ROCHA, G. A. **Manual de operação e manutenção de poços.** 3. ed. São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2007.
- BROD J. A.; RIBEIRO C. C.; GASPAR J. C.; JUNQUEIRA-BROD T. C.; RIFFEL B. F.; SILVA J. F.; CHABAN N.; A. J. D. FERRARI. **Excursão 1: Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino- Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba.**In: Congresso brasileiro de geologia, 42., 2004, Araxá.
- FEITOSA, A.C. F.;FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.;DEMETRIO J. G. A. **CPRM/UFPE, Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações**, 3ª edição, 2008.
- ABUD, M. C.; SILVA, M. V. A.; VITORIO, J. A.; MACEDO, L, G, M. **Operação e Manutenção dos poços de rebaixamento em mina a céu aberto, um estudo de caso do complexo mineroquímico de Araxá da Vale.** 2014
- FEITOSA, A.C. F.;FILHO, J. M.**Execução de testes de bombeamento em poços tubulares manual prático de orientação.** CPRM, 1999.
- PEIXOTO, A. ; FERREIRA, D.; PROF. MATTOS, I. **Catálogo de minerais do laboratório de mineralogia.** Fortaleza - CE, 2016
- MULLER, MARIA CRISTINA NAKANO. **Rebaixamento de lençol freático: indicações, métodos e impactos decorrentes.** São Paulo, 2004.
- MARIANO, MICHELLE CINTRA ABUD. **Simulação de utilização de drenos horizontais profundos para a redução da umidade em frentes de lavra em uma empresa mineradora.** Araxá – MG, 2017.

- BARBOSA, E. S. R.; BROD, J. A.; CORDEIRO, P. F. DE O. BROD, T. C. J.; **Variações composicionais de olivinas do complexo alcalino-carbonatítico de Salitre, MG.** Revista Brasileira de Geociências, 2012.
- Libicki, J. **Proposal of criteria for selection of dewatering methods in surface mining.** International Mine Water Association Symposium Zambia, 1993. IMWA 2009.
- CORREA, RONALDO ADRIANO. **Estudo de rebaixamento do lençol freático d'água em arenito para implantação de estruturas de PCH's.** Rio de Janeiro, Setembro de 2006.
- LA CRUZ, HUGO DAVID NINANYA DE. **Modelagem numérica para avaliação do controle das águas na mineração.** Rio de Janeiro, Agosto de 2014.
- SILVA, M. V. A.; MACEDO, L. G. M.; ABUD, M. C.; MACIEL, V. M. **Estimativa do raio de influência dos poços de rebaixamento da mina F4 e sua área de interferência, complexo mineroquímico de Araxá, Vale Fertilizantes.** 2014.