



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

MICHELLE CINTRA ABUD MARIANO

**SIMULAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DE DRENOS HORIZONTAIS
PROFUNDOS PARA REDUÇÃO DA UMIDADE EM FRENTES DE
LAVRA EM UMA EMPRESA MINERADORA**

ARAXÁ-MG

2017

MICHELLE CINTRA ABUD MARIANO

**SIMULAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DE DRENOS HORIZONTAIS
PROFUNDOS PARA REDUÇÃO DA UMIDADE EM FRENTES DE
LAVRA EM UMA EMPRESA MINERADORA**

Trabalho de Conclusão de Curso 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: Profa. Me Silvânia Alves Braga de Castro

Co-orientador: Marcus Vinícios Andrade Silva.

ARAXÁ-MG

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO
MICHELLE CINTRA ABILIO MARIANO

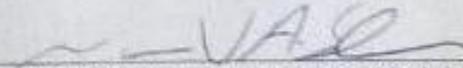
**SIMULAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DE DRENOS HORIZONTAIS
PROFUNDOS PARA REDUÇÃO DA UMIDADE EM FRENTES DE
LAVRA EM UMA EMPRESA MINERADORA**

Trabalho de Conclusão de Curso
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.

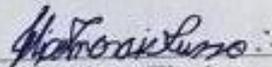
Araxá, 23 de junho de 2017.



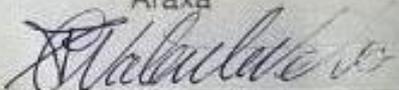
Presidente e Orientador: Profa. Me Silvânia Alves Braga de Castro
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Unidade
Araxá



Co-Orientador: Marcus Vinícios Andrade Silva



Membro Titular: Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Unidade
Araxá

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

*Aos meus pais e ao meu esposo
que sempre me apoiaram na realização deste meu sonho .*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sabedoria e fortaleza para enfrentar e vencer todas as dificuldades. Agradeço aos meus amados pais Abud e Sueli, que me ampararam, eterna gratidão pelo amor e dedicação. Agradeço ao meu amado esposo Antonio Mariano pelo incentivo e companheirismo incondicional.

Agradeço especialmente a todos os professores do CEFET que contribuíram para minha formação profissional, acadêmica e pessoal. À minha orientadora Silvânia Braga e o meu Co-orientador Marcus Vinícios que confiaram em meu trabalho, pelas observações, pela paciência e pelo constante apoio técnico durante todo o trabalho.

Meus sinceros agradecimentos aos que foram e aos atuais gestores e supervisores da Vale Fertilizantes que permitiram a realização deste grande sonho, e me deram conhecimento, confiança e incentivo.

RESUMO

A pergunta problema deste trabalho é: “O que pode ser feito para redução de umidade em frentes de lavra?”, que possui como hipótese para solução deste problema a utilização de um entre vários métodos existentes para rebaixar o nível de água subterrânea de modo eficaz. O objetivo geral deste trabalho será simular a quantidade de material liberado com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos para a redução de umidade em uma empresa mineradora. Os objetivos específicos são definir a provável redução local do nível de água e estimar a economia com a redução de umidade proporcionada pelo sistema de DHP's. A justificativa do trabalho se dá devido à necessidade crescente de aperfeiçoar as drenagens em minas a céu aberto que já atingiram o nível de água subterrânea ou possuem frentes de lavra com excesso de umidade, em especial as que lavram espessos mantos de intemperismo. Além da própria água, que pode se tornar um enorme transtorno operacional para a lavra, existe ainda a questão da umidade dos taludes, que aumenta a instabilidade geotécnica e limita o ângulo de talude, podendo reduzir consideravelmente o volume de minério lavrável, gera enormes desafios ao longo do processamento mineral desde o transporte, britagem, empilhamento até a retomada do minério para a usina de beneficiamento.

Palavras-Chave: Drenos horizontais profundos. Umidade. Lavra.

ABSTRACT

The problem question of the work is: "What can be done to reduce moisture on the mining fronts?", It has a hypothesis to solve this problem the using one of several existing methods to demote the level of underground water effectively. The general objective of this work will be to simulate the amount of released material with the use of deep horizontal drains for moisture reduction in mining fronts in a Mining Company. The specific objectives are to define the probable local reduction of the water level and estimate the economy with the reduction of moisture provided by the DHP's system. The justification for this work is due to the increasing need to improve drainage in open pit mines that have already reached the level of underground water or have excessively humid mining fronts, especially those that mining thick weathering mantles. Besides the to water that can become an operational complication to mining, there is still moisture in the slopes, which increases the geotechnical instability and limits the angle of slope, and can considerably reduce the volume of lavrable ore, generates great challenges throughout the mineral processing from the transport, crushing, stacking to the resumption or ore to the beneficiation plant.

Keywords: Deep Horizontal Drains. Moisture. Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das águas no solo e subsolo, em destaque a zona saturada (porção inferior) e a zona de aeração (porção superior).	17
Figura 2 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos, de acordo com o sistema de pressão de suas águas e com a natureza das camadas que os delimitam no topo e na base.	19
Figura 3 – Tipos de Aquíferos de acordo com a formação rochosa em que está contido.	20
Figura 4 – Exemplo de diminuição de porosidade quando ocupado por grãos menores nos espaços vazios.	21
Figura 5 - Esboço esquemático do dispositivo utilizado por Darcy.....	22
Figura 6 – Nível Estático	26
Figura 7 – Nível Dinâmico.	26
Figura 8 – Terreno natural e o seu respectivo mapa potenciométrico.....	28
Figura 9 – Caminhões com material aderido a caçamba devido umidade do material.	30
Figura 10 – Excesso de umidade em frente de lavra.....	31
Figura 11 – Obstrução da malha das grelhas, que realizam o escalpe antes do britador de mandíbulas, por material fino de alta umidade.	32
Figura 12 – Material fino com alta umidade agregado ocasionando obstrução da malha das peneiras.	32
Figura 13 – Paralisação para desagregação de material no britador de impacto devido alta umidade do minério.....	33
Figura 14 – Acúmulo de material proveniente do retorno da correia transportadora devido à alta umidade do minério ocasionando paradas operacionais.....	33
Figura 15 – Material argilo-micáceo com vários rompimentos em cunha promovido pelo próprio fraturamento do material e contribuído pela percolação de água intersticial.	36
Figura 16 - Fraturamento circular com rompimento em cunha e perpendicular ao talude.....	37
Figura 17 - Fraturamento em cunha com rompimento do talude e ainda rebatimento do piso com quebra do mesmo e colapso devido à percolação de água (material micáceo).....	37
Figura 18 - Rebaixamento através de bombeamento direto em trincheira.....	39
Figura 19 - Rebaixamento através de ponteiras filtrantes instaladas em níveis.	40
Figura 20 - Rebaixamento através de poços profundos.	42

Figura 21 – Demonstração de interferência entre poços profundos.....	43
Figura 22 – Cones de Rebaixamento de poços profundos se sobrepondo acarretando no rebaixamento de NA local.	43
Figura 23 – Indicador de Nível de Água (INA) em uma mina.	44
Figura 24 – Perfuratriz realizando um DHP.	45
Figura 25 – Perfuratriz realizando um DHP, com limpeza de furo.....	46
Figura 26 – Desenho esquemático de um DHP.....	46
Figura 27 – Tubo de PVC Geomecânico.	47
Figura 28 – Injeção de areia selecionada nos DHP's.	48
Figura 29 - DHP instalado na Mina de Tamanduá – Nova Lima (MG).	49
Figura 30 - DHP canalizado.	50
Figura 31 – DHP's instalados em um talude da ferrovia em construção.	51
Figura 32 – Nível de água antes e depois da instalação dos DHP's.	52
Figura 33 – Variação do NA em função dos comprimentos dos DHP's obtidos usando MODFLOW.	53
Figura 34 – Variação do NA em função da elevação dos DHP's obtidos usando MODFLOW.	53
Figura 35 – Variação do NA em função do espaçamento dos DHP's obtidos usando MODFLOW.	54
Figura 36 – Variação do NA em função da condutibilidade hidráulica(K) e da taxa de recarga (R), utilizando DHP's obtidos usando MODFLOW.....	55
Figura 37 – Localização dos DHP's e INAs	56
Figura 38 – Instalação dos drenos, monitoramento do nível de água e precipitação.	56
Figura 39 – Perfuração para instalação de drenos horizontais com perfuratriz na mina em estudo.	57
Figura 40 – Talude antes da perfuração dos drenos, detalhe na altura da mancha de umidade.	58
Figura 41 – Drenos em operação na mina em estudo.....	58
Figura 42 – Talude após 14 dias de operação dos drenos, detalhe na altura da mancha de umidade.....	59
Figura 43 – Fluxograma de geração das superfícies potenciométricas.	64
Figura 44 – Escolha dos dados para geração do mapa potenciométricos no ArcGis.	65
Figura 45 – Mapa potenciométricos da área da mina em estudo.....	66
Figura 46 – Escolha da Ferramenta a ser utilizada para gerar superfície do NA atual.	67
Figura 47 – Passo para geração da superfície do NA atual.	67
Figura 48 – Escolha do arquivo em forma de linhas (<i>string</i>) para geração da superfície do NA atual.	68

Figura 49 – Vista da superfície interpolada do NA atual - superfície.....	68
Figura 50 – Vista da superfície topográfica e NA em 3D com os DHP's locados na mina.....	69
Figura 51 – Seção com o NA atual e a proposta do DHP.	69
Figura 52 – Seção com litologias e modelo de blocos.....	70
Figura 53 – Seção com o NA atual e previsto pós-operação do DHP's.	71
Figura 54 – Vista superior em forma normal e em 3D da superfície do NA inferido pós-operação dos DHP's	71
Figura 55 – Tela de interface do <i>script</i> para cubagem entre superfícies.....	72
Figura 56 – Seção com a cubagem do material só entre as superfícies desejadas.	73

LISTA DE ABREVIATURAS

DHP's – Drenos Horizontais Profundos.....	13
NA – Nível de água.....	13
INA's – Indicadores de nível de água.....	25
PZ's – Piezômetros.....	25
NE – Nível estático.....	25
ND – Nível dinâmico.....	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Hidrogeologia e Geotecnia	14
2.2	Água Subterrânea	15
2.2.1	Ciclo Hidrológico	16
2.2.2	Distribuição da água subterrânea	16
2.2.3	Tipos de aquíferos	18
2.3	Propriedades físicas dos aquíferos	20
2.3.1	Porosidade	20
2.3.2	Coeficiente de Armazenamento	21
2.3.3	Vazão específica	22
2.3.4	Condutibilidade Hidráulica	22
2.3.5	Transmissividade	23
2.4	Movimento da Água Subterrânea	24
2.4.1	Teorema de Bernoulli e Potencial Hidráulico	24
2.4.2	Mapa potenciométrico e linhas de Fluxo	26
2.5	Rebaixamento do Nível d'água em Minerações	28
2.5.1	Impactos operacionais	29
2.5.2	Estabilidade de Taludes	34
2.5.3	Métodos para rebaixamento do nível d'água	38
2.6	Dreno Horizontal Profundo	44
2.7	SOFTWARES PARA SIMULAÇÃO	60
2.7.1	ArcGIS	60
2.7.2	Datamine	60
3	METODOLOGIA	62
3.1	Geração do mapa potenciométricos com o NA atual - ArcGis	63
3.2	Geração de superfície do NA atual e NA previsto no Datamine	66
3.3	Cubagem entre superfícies	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO

O tema deste do trabalho de conclusão de curso é intitulado de “Utilização de Drenos Horizontais Profundos (DHP’s) para redução da umidade em frentes de lavra – Estudo de caso em uma empresa mineradora”.

Este trabalho parte do seguinte questionamento de pesquisa: “O que pode ser feito para reduzir a umidade em frentes de lavra?”.

Propõe-se como método para solução deste problema a utilização de drenos horizontais profundos (DHP’s), que é um entre vários métodos existentes para rebaixar o nível de água subterrâneo de modo eficaz.

O objetivo geral deste trabalho será simular a quantidade de material liberado com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos para a redução de umidade em uma empresa mineradora. Os objetivos específicos são definir o provável rebaixamento local do nível de água (NA) e estimar a economia com a redução de umidade proporcionada pelo sistema de DHP’s.

A justificativa do trabalho se dá devido à necessidade crescente de aperfeiçoar as drenagens em minas a céu aberto que já atingiram o nível de água subterrânea ou possuem frentes de lavra com excesso de umidade, em especial as que lavram em espessos mantos de intemperismo. Além da própria água, que pode se tornar um enorme transtorno operacional para a lavra, existe ainda a questão da umidade dos taludes, que aumenta a instabilidade geotécnica e limita o ângulo de talude, podendo reduzir consideravelmente o volume de minério lavrável, gera enormes desafios ao longo do processamento mineral desde o transporte, britagem, empilhamento até a retomada para a usina de beneficiamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos de hidrogeologia e geotecnia, posteriormente aborda-se o rebaixamento do nível d'água em minerações, e por fim detalha-se o método proposto para o estudo de caso que são os drenos horizontais profundos.

2.1 Hidrogeologia e Geotecnia

O foco principal neste trabalho está intimamente ligado às áreas de Hidrogeologia e Geotecnia de mina.

O termo hidrogeologia foi criado pelo francês Jean-Baptiste de Lamarck em 1802, foi usado para descrever o papel da água na morfologia da superfície terrestre. Porém em 1877 o inglês Joseph Lucas introduziu o conceito de hidrogeologia como ramo da geologia que estuda a água subterrânea. Contudo durante muito tempo muitos estudiosos usaram o termo de hidrologia subterrânea para se referir a este mesmo conceito (FILHO, 2008).

A Hidrogeologia é considerada como uma das ciências da Terra, mas tem forte ligação com a Engenharia. Aborda as condições hidrológicas e geológicas com base nas leis da Física e da Química, que regem a origem, a distribuição e as interações das águas subterrâneas com o ambiente (solos, rochas) em que transitam. O engenheiro francês Henry Darcy, estabeleceu a conhecida lei de Darcy, mais detalhada adiante, esta fundamenta como ciência o estudo da água subterrânea e base para outros estudos de propriedades físicas (WREGGE, 2016).

A Hidrogeologia subsidiará informações da distribuição e comportamento da água subterrânea na área da mina, bem como as propriedades do aquífero em cada região para a Geotecnia de mina.

A Geotecnia é uma das áreas da Engenharia Civil que aplica os conceitos e princípios fundamentais da Geologia, da Mecânica dos Solos e da Mecânica das Rochas. Tem papel fundamental no projeto e construção de fundações, estruturas de terra, escavações, dentre vários outros que estão sujeitos a algum comportamento dos solos ou rochas (KRYNINE e JUDD, 2014).

Este trabalho aborda também alguns tópicos da geotecnia principalmente os que estão relacionados ao comportamento do solo e rocha em escavações, que é o ambiente de aplicação deste estudo de caso. Dentre as diversas atuações da Geotecnia na mineração pode-se citar a determinação das condições ideais para a estabilidade de taludes em cada local da mina, com base em informações geológicas, estruturais, hidrológicas e hidrogeológicas, conforme a necessidade do planejamento de lavra.

2.2 Água Subterrânea

Água subterrânea é toda aquela que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas. O estudo da água subterrânea é importante devido os seus efeitos nos processos de dinâmica superficial e na estabilidade das obras de engenharia, tal como a mineração que é o ambiente do estudo de caso deste trabalho. Nos processos geológicos a água subterrânea desempenha evidente influência, dentre outros, nos problemas geotécnicos como a estabilidade de taludes (FILHO, 2008).

Segundo Azedo e Filho (1998), a Hidrogeologia estuda a água subterrânea em macroescala e o escoamento conforme características geológicas e estruturais, formas de ocorrência e de exploração, usos, preservação e da qualidade da água. Já a Geotecnia preocupa-se com o efeito mecânico da água, direta (subpressões, forças de percolação) ou indiretamente (alterações) nos maciços naturais. Embora com enfoques distintos, estes dois campos se complementam e superpõem sendo necessários a Geotecnia os conhecimentos básicos da Hidrogeologia.

Os próximos subitens farão uma breve abordagem do ciclo hidrológico, da distribuição das águas subterrâneas e dos tipos de aquíferos.

2.2.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é o ciclo de água na Terra, que consiste na contínua circulação de umidade e da água no Planeta. A irradiação solar faz com que a água saia do oceano e lagos para a atmosfera através processo de evaporação. O vapor da água sobe e acumula-se formando as nuvens. A água contida nas nuvens se precipita em forma de chuva nos oceanos e solos, parte escorre superficialmente e parte infiltra alcançando reservatórios de água subterrânea, reiniciando o ciclo hidrológico (EDWARD E. JOHNSON, 1978).

2.2.2 Distribuição da água subterrânea

A água que infiltra no solo é chamada de subsuperficial. Três fenômenos podem ocorrer após a infiltração. O primeiro seria a água por capilaridade e evaporação que retorna à atmosfera. Já o segundo seria ser absorvido pelas raízes de plantas e retornar à atmosfera pela transpiração vegetal. E o terceiro seria a água penetrar por gravidade até atingir o nível da zona de saturação, que é o reservatório de água subterrânea. A chamada água subsuperficial inclui a água subterrânea e também a água de retenção (EDWARD E. JOHNSON, 1978).

O solo que está nesta região de infiltração pode ser dividido em duas zonas, de acordo com o seu teor de umidade: saturada e não saturado, a Figura 1 demonstra a separação destas zonas. A primeira zona fica imediatamente abaixo da superfície do terreno, é a não saturada conhecida também como zona de aeração, denominada assim pelo fato que uma parte dos espaços intergranulares estão preenchidos com água e a outra parte com o ar. Outra denominação que esta zona recebe é de zona vadosa. Já o segundo compartimento ocorre logo abaixo, e todos os espaços intergranulares neste estão preenchidos com água, por isto denominado zona saturada (AZEVEDO e FILHO, 1998).

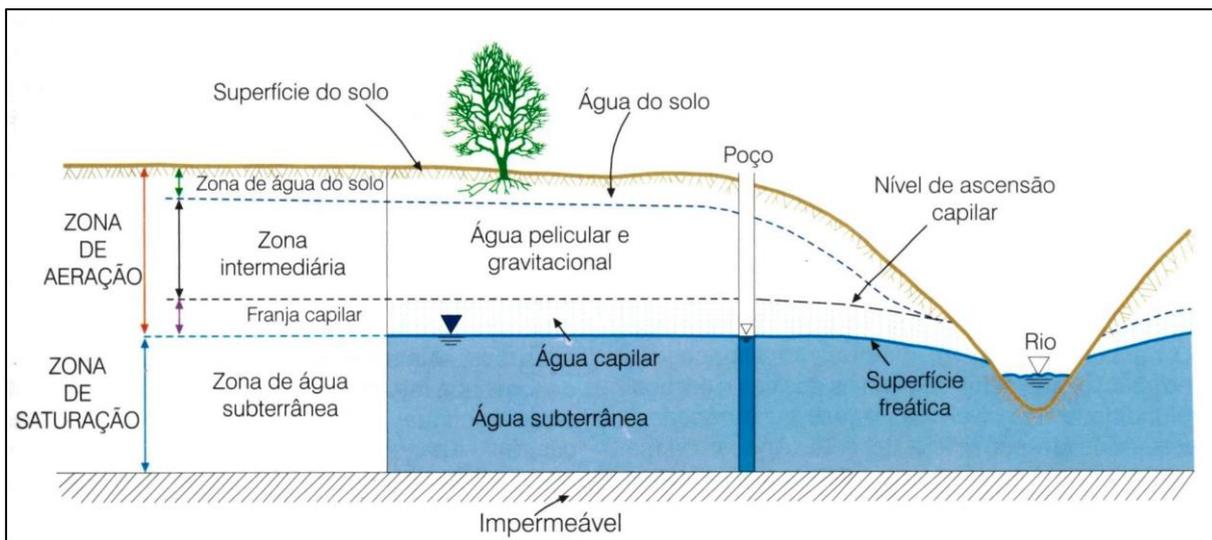


Figura 1 – Distribuição das águas no solo e subsolo, em destaque a zona saturada (porção inferior) e a zona de aeração (porção superior).

Fonte: Bear & Verruit, 1987, modificado por Filho, João Manoel (2008, p.58).

A zona de aeração é subdividida em três subzonas (FILHO, 2008):

- Subzona de água do solo: mais superior, chamada também de zona de evapotranspiração, a sua espessura pode variar de centímetros a metros, dependendo da presença de vegetação, quanto mais abundante esta for maior será a espessura da subzona. Esta zona é de muito importante para agricultura.
- Subzona intermediária: fica no limite de ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas. A umidade presente nesta faixa origina-se de água capilar isolada, fora do alcance das raízes das plantas, e a água de retenção por forças não capilares.
- Subzona da Franja: a mais inferior fica compreendida entre o nível das águas subterrâneas e limite de ascensão capilar das águas. A sua espessura depende, principalmente, da distribuição de tamanho dos poros e da homogeneidade do terreno.

A zona de saturação corresponde à zona de ocorrência das águas subterrâneas, propriamente dita. É a zona de maior interesse a hidrogeologia, conhecida como aquíferos.

2.2.3 Tipos de aquíferos

Segundo Filho (2008) de acordo com a posição relativa das camadas geológicas existem os seguintes tipos de aquífero (**Figura 2**):

- Aquífero confinados não drenantes: é um aquífero que é limitado no topo e na base por camadas impermeáveis. As águas em geral estão sob uma pressão maior que a atmosférica, devido à pressão litostática exercida pelas camadas superiores. Caso um poço perfure um aquífero deste tipo, a água fica acima da base da camada confinante superior, que pode ficar abaixo do solo ou acima, que neste último caso é conhecido como poço jorrante.
- Aquífero confinado drenante: é um aquífero que uma das camadas é semi-permeável, permitindo a entrada e saída de fluxos através da drenança vertical, ou seja, é possível um movimento das águas ascendente ou descendente, o poço será não jorrante.
- Aquífero livre: também conhecido com freático ou não confinados, o limite superior é a superfície de saturação ou freática, cuja superfície das águas está sob pressão atmosférica. Estes podem também ser classificado como drenante (base semipermeável) e não drenante (base impermeável). É um aquífero que é recarregado diretamente pelo volume de chuvas infiltradas no subsolo, sem pressão de camadas geológicas no topo. Há um tipo especial de aquífero livre, chamado de aquífero suspenso, Figura 2 b, que é aquele que é formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável de extensão limitada. Podem ter um caráter temporário, à medida que drenam para o nível freático subjacente.

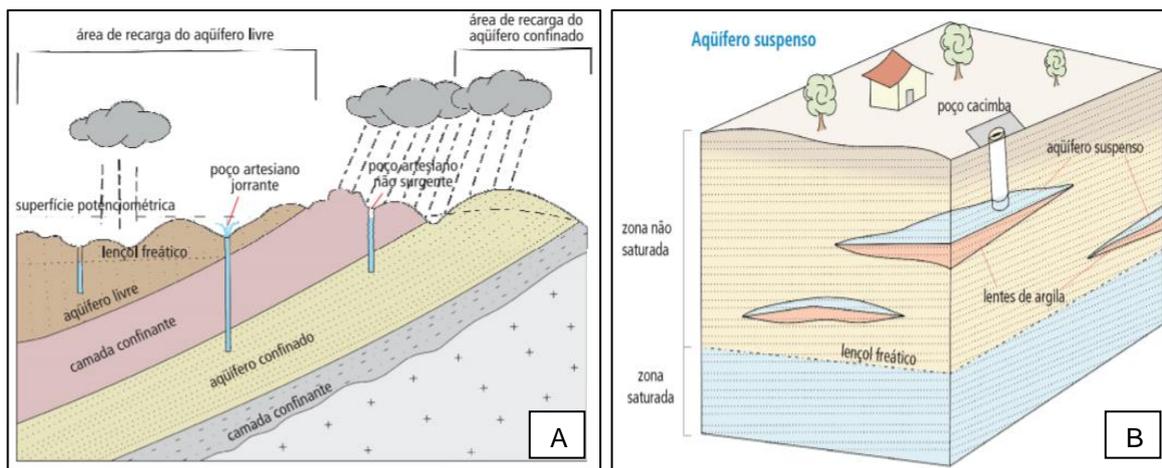


Figura 2 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos, de acordo com o sistema de pressão de suas águas e com a natureza das camadas que os delimitam no topo e na base.

Fonte: IRITANI e EZAKI, 2009, p. 21.

Outra classificação para os aquíferos utilizada é dada de acordo a formação rochosa em que está contido. A Figura 3 ilustra cada um dos tipos (EDWARD E. JOHNSON, 1978):

- Aquíferos porosos granulares: são aqueles que ocorrem em rochas sedimentares, sedimentos inconsolidados e solos arenosos decompostos *in situ*. Exemplo: Arenitos e aluviões. Representa os aquíferos de maior importância, devido a grande área que ocupa e ao grande volume de água que armazenam.
- Aquíferos fraturados ou fissurais: são aqueles que ocorrem em rochas ígneas e metamórficas. A água está presente nas fraturas e fendas das rochas cristalinas. Exemplo: granitos e gnaisses. A capacidade destas rochas em acumular água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação;
- Aquíferos cársticos ou cavernosos: são aqueles formados por rochas carbonáticas (calcários e dolomitos) com zonas de dissolução, condutos e cavernas, que são os poros da rocha. Aqueles nos quais a água se faz presente em cavidades produzidas pela dissolução causada pela águas.

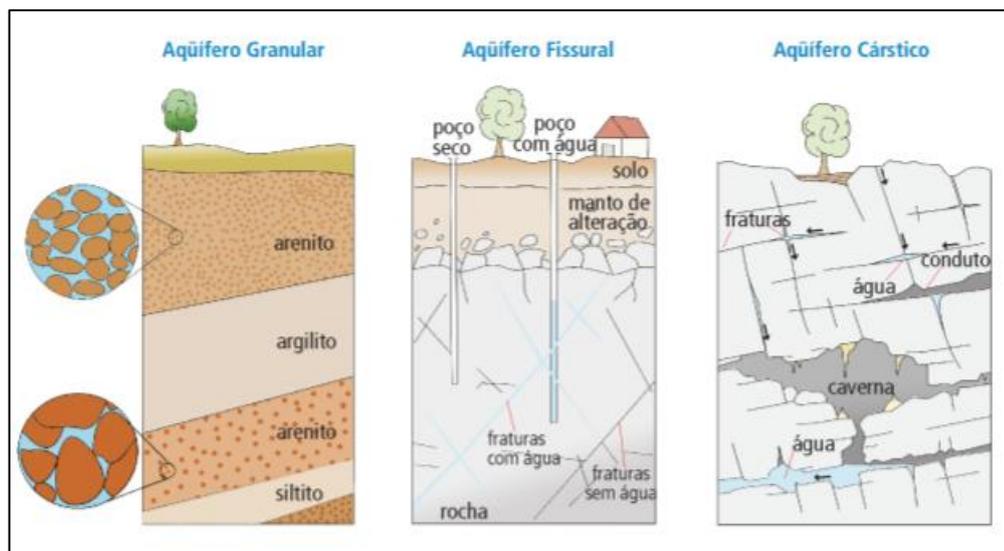


Figura 3 – Tipos de Aquíferos de acordo com a formação rochosa em que está contido.

Fonte: IRITANI e EZAKI, 2009, p. 19.

2.3 Propriedades físicas dos aquíferos

Os aquíferos desempenham duas importantes funções que é a de armazenamento e transmissão. Compreender as propriedades físicas dos aquíferos permite entender a forma com que cada camada geológica armazena e transmite a água subterrânea. Neste item, apresentaremos as propriedades de porosidade, coeficiente de armazenamento, vazão específica, condutibilidade hidráulica (permeabilidade) e transmissividade.

2.3.1 Porosidade

A porosidade é considerada como percentagem de vazios contidos em relação à rocha ou sólidos. Porém ao se extrair a água do aquífero, nem toda a água que satura os poros de uma rocha pode ser extraída totalmente devido às forças contrárias a ação da gravidade, que são as forças capilares e as forças de tensão superficial resultado da coesão e adesão. Desta forma é necessário definir o conceito de porosidade efetiva (FETTER, 2001).

A porosidade efetiva é a relação entre o volume total de espaços vazios interconectados e por onde um fluido possa transitar e o volume total da rocha ou sedimento, equação 1. A porosidade depende do tamanho dos grãos, forma e seleção. A heterogeneidade dos grãos diminui a porosidade, pois os grãos menores ocupam os espaços vazios entre os maiores dificultando o escoamento dos fluidos, portanto, diminuindo a porosidade, vide Figura 4 (FETTER, 2001).

$$N_e = S_y = \frac{V_d}{V_t} \quad (1)$$

Onde:

- S_y é a porosidade específica, que deve ser apresentado em percentual (%);
- V_d é o volume de água drenada por gravidade;
- V_t é o volume total.

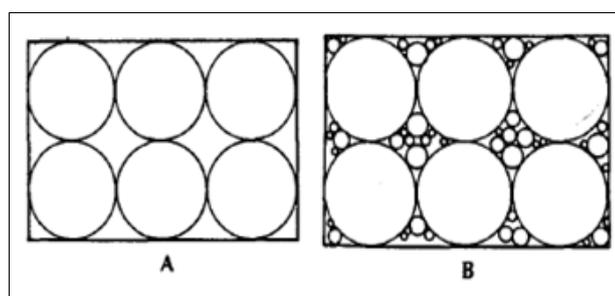


Figura 4 – Exemplo de diminuição de porosidade quando ocupado por grãos menores nos espaços vazios.

Fonte: FETTER, 2001, p. 72.

2.3.2 Coeficiente de Armazenamento

O conceito de coeficiente de armazenamento, S , é o volume de água liberada ou armazenada, por unidade área superficial do aquífero, por unidade de variação no componente de carga normal àquela superfície. Ou seja, volume de água que sai do aquífero por unidade de variação de rebaixamento (CLEARY, 2007).

Para aquíferos confinados seu valor varia na faixa de 10^{-5} a 10^{-3} e em aquíferos livres 10^{-2} a 0,5 (FILHO, 2008).

2.3.3 Vazão específica

É a razão entre o volume de água que uma rocha fornecerá, sob influência da gravidade, e o volume total da rocha ou sedimento.

2.3.4 Condutibilidade Hidráulica

Em 1856, o engenheiro hidráulico francês Henry Darcy verificou diversos fatores geométricos, indicados na Figura 5, que influenciavam na vazão de água, expressando a equação 2 que ficou conhecida por Lei de Darcy (CABRAL, 2008).

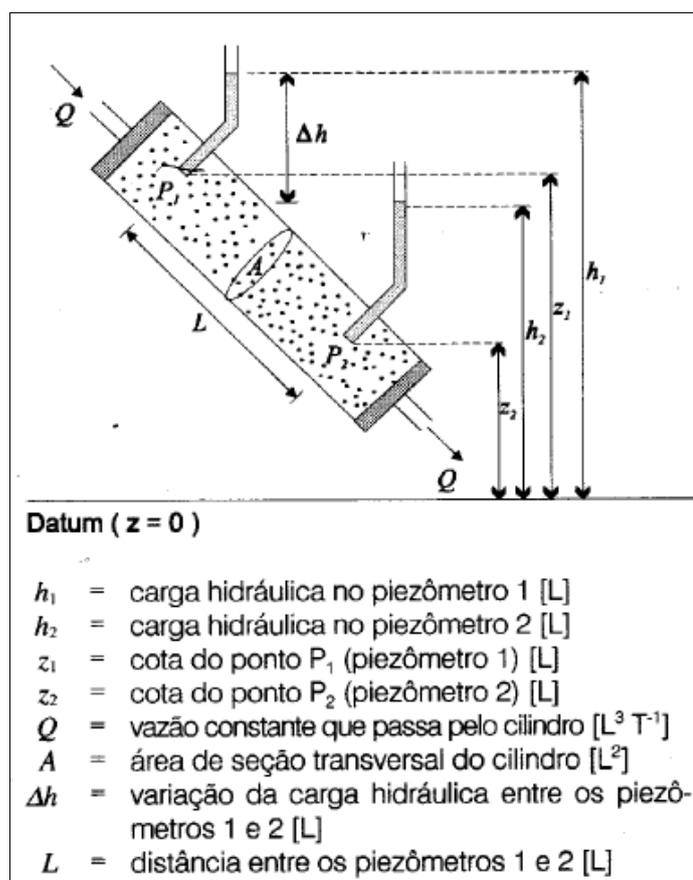


Figura 5 - Esboço esquemático do dispositivo utilizado por Darcy

Fonte: CABRAL, 2008, p. 78.

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (2)$$

Sendo K uma constante para cada solo, que recebe o nome de coeficiente de permeabilidade ou condutibilidade hidráulica. O coeficiente de permeabilidade K para um mesmo solo é influenciado, com maior intensidade, pela temperatura e pelo índice de vazios. O primeiro ocorre porque a viscosidade da água diminui com o aumento da temperatura e ocasiona para que o escoamento pelo solo seja mais fácil. O segundo é explicado pela porosidade, quanto maior a porosidade do solo mais facilmente a água percola no solo, portanto o coeficiente é mais baixos quando se tem menores vazios nos solos e, conseqüentemente menores partículas (PINTO, 2006; ALONSO, 2007).

O coeficiente hidráulico refere-se à facilidade do aquífero em exercer a função de ser um condutor hidráulico. Esta depende das características do meio poroso e das propriedades do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica) (CABRAL, 2008).

2.3.5 Transmissividade

A transmissividade (T) está diretamente relacionada à condutibilidade hidráulica. Corresponde a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por unidade de largura do aquífero (espessura saturada), equação 3. Nos aquíferos nas zonas saturadas a espessura muda com o tempo e a distância, T, pode variar com a carga hidráulica (CLEARY, 2007).

$$T = K \cdot b \quad (3)$$

Onde:

- T= transmissividade (m²/dia; m²/s);
- K= condutividade hidráulica (m/s; m/h; mm/h; m/dia);
- b= espessura do aquífero (m).

2.4 Movimento da Água Subterrânea

Na zona de saturação, o movimento da água é conhecido como percolação, e é governado por pressões hidrostáticas, também gravitacionais.

2.4.1 Teorema de Bernoulli e Potencial Hidráulico

A água que percola em meios naturais é só uma parte da água intersticial, denominada água livre ou água gravitacional, pois escoar sob a ação de pressões externas ou sob a ação da gravidade, por exemplo, em poços de captação (AZEVEDO e FILHO, 1998).

A energia total de um fluido perfeito, com viscosidade nula e em fluxo permanente, permanece constante, sendo expressa pela equação de Bernoulli, equação 4:

$$z + \frac{p}{\gamma_a} + \frac{vp^2}{2g} = H = \text{constante} \quad (4)$$

Onde:

- Z = carga de posição ou energia potencial gravitacional (altura geométrica a partir de um plano horizontal de referência);
- p/γ_a = carga de pressão ou energia de pressão do fluido ou carga piezométrica;
- $vp^2/2g$ = carga de energia cinética, carga dinâmica ou energia cinética;
- vp = velocidade de percolação intersticial;
- H = carga total ou energia total em cada ponto

O teorema de Bernoulli também se aplica ao fluxo laminar de água através do solo. Geralmente a velocidade da água nos solos é muito baixo, a carga cinética da equação pode ser desprezada por ser muito pequeno o seu valor quando comparado com a carga piezométrica (ALONSO, 2007).

Se o ponto considerado está associado a um plano de referência, o nível piezométrico será, equação 5:

$$h = z + \frac{p}{\gamma a} \quad (5)$$

Sendo:

- h = altura piezométrica correspondente ao potencial hidráulico.

A água só se movimenta quando ocorrem variações no potencial hidráulico(h), sendo que o fluxo só se dará dos pontos de maior para menor potencial hidráulico e não no sentido das menores pressões hidrostáticas. A água pode escoar de zonas de baixa pressão para zonas de alta pressão se a diferença de potencial hidráulico for favorável (AZEVEDO e FILHO, 1998).

Os níveis potenciométricos ou nível de água (NA) são determinados no terreno através de furos de sondagens denominado Indicadores de Nível d'água (INA's), piezômetros (PZ's) e poços, as definições dos níveis podem ser (CLEARY, 2007):

Nível estático (NE): é a distância entre a superfície do terreno e a posição do nível d'água dentro do poço ou instrumentos nas condições de equilíbrio, ou seja, com o poço fora de funcionamento e sem a interferência de outros poços bombeando (Figura 6).

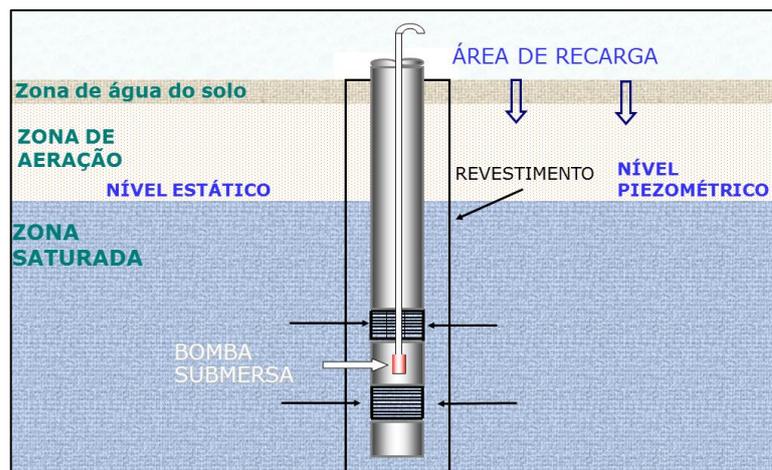


Figura 6 – Nível Estático

Fonte: SOUZA, 2014.

Nível dinâmico (ND) é a distância entre a superfície do terreno e o nível da água dentro do poço após o início do bombeamento (Figura 7).

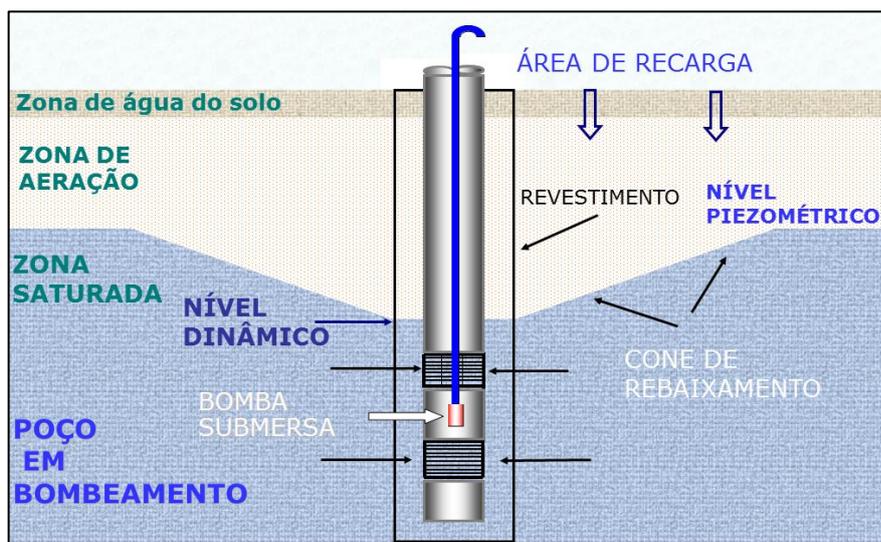


Figura 7 – Nível Dinâmico.

Fonte: SOUZA, 2014.

2.4.2 Mapa potenciométrico e linhas de Fluxo

Cada ponto possui um valor de potencial hidráulico, conhecendo-se o nível piezométrico em vários pontos de um determinado meio, é possível construir mapas de isotencial hidráulico, denominados como mapas piezométricos ou

potenciométricos, que mostram a forma e a elevação de uma superfície piezométrica. O traçado dos mapas potenciométricos é realizado à semelhança de mapas topográficos, onde as linhas correspondem às isopiezas ou linhas equipotenciais, representando o nível de água naquele local. Faz-se uso de técnicas de interpolação e extrapolação para a execução do mapa potenciométricos, que pode ser feito manual ou em *softwares* sofisticados (AZEVEDO e FILHO, 1998).

As linhas equipotenciais são linhas ao longo das quais a carga hidráulica é constante. Se for colocado um piezômetro em qualquer ponto de uma dada linha equipotencial, a coluna de água no piezômetro sobe sempre até ao mesmo nível (ALONSO, 2007).

Ao desenhar às linhas equipotenciais, o sentido do fluxo passa a ser conhecido, as linhas de fluxo principais podem ser traçadas ortogonalmente entre as linhas equipotenciais. A partir dos mapas potenciométricos, é possível estabelecer o padrão do fluxo subterrâneo, delimitar limites e divisores da bacia hidrográfica, definir os gradientes hidráulicos, as áreas de recarga e descarga de bacia, etc. Enfim expressar o comportamento geral do escoamento subterrâneo, a Figura 8 exemplifica esta situação (AZEVEDO e FILHO, 1998).

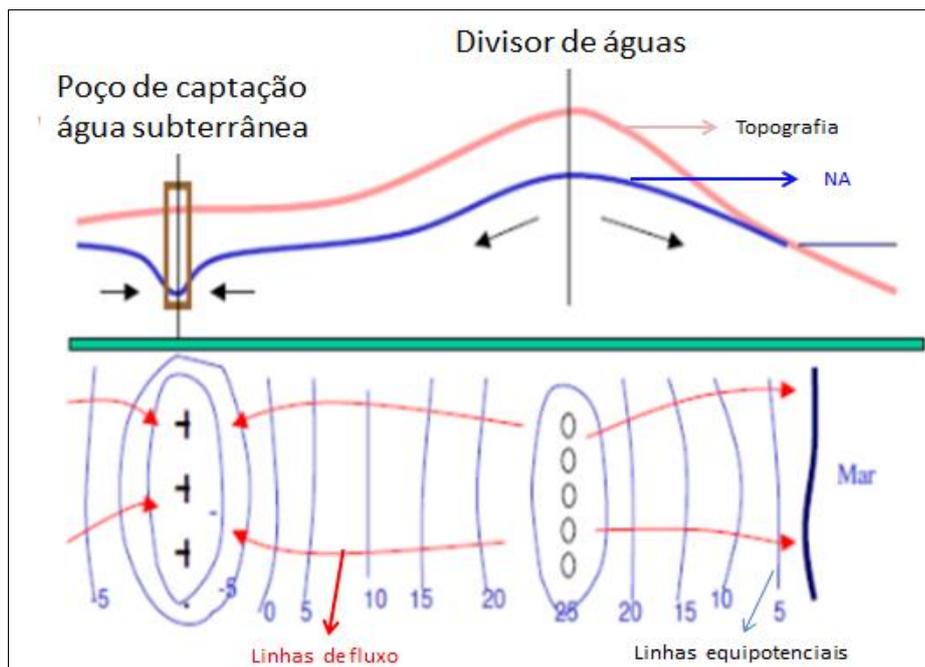


Figura 8 – Terreno natural e o seu respectivo mapa potenciométrico.

Fonte: Modificado de *Acuaclub*.

2.5 Rebaixamento do Nível d'água em Minerações

Os trabalhos de desaguamento em grandes obras de mineração ganhou destaque no Brasil a partir na década de 80, com mais ênfase principalmente nas minas subterrâneas para fins de rebaixamento de nível d'água (NA) e permitir o aprofundamento das escavações e conseqüentemente o avanço de lavra. As minerações realizam o rebaixamento do nível d'água desde o momento em que a cava atinge o nível d'água até o descomissionamento da mina (BERTACHINI e ALMEIDA, 2003 *apud* ABUD, *et al.*, 2014).

A tarefa de rebaixamento do nível d'água antecede o início das operações de mina, é aplicado em situações que a lavra em algum momento da operação irá interceptar o nível da água do aquífero em, esta etapa é chamada de pré-rebaixamento. O pré-rebaixamento consiste em manter secas as regiões da mina em função do planejamento de lavra. A atividade se estende durante toda a vida útil da mina. Dessa forma, o planejamento do rebaixamento é realizado em concordância e de forma a atender aos planos de lavra de curto, médio e longo prazo, desde o início até a exaustão da mina (BERTACHINI e ALMEIDA, 2003 *apud* ABUD, *et al.*, 2014).

Quando não é possível ter a região seca dizemos que não está totalmente eficiente o sistema de rebaixamento de nível d'água. Tal ineficiência gera alguns problemas devido à umidade ou presença de água no local. Em seguida serão explicitados alguns destes problemas que a Hidrogeologia e Geotecnia de mina buscam sanar com a proposta deste trabalho.

2.5.1 Impactos operacionais

Os impactos abordados neste tópico foram levantados em relatos operacionais na mina em estudo como também na literatura (MACEDO, et al., 2004; AMARAL e BOITRAGO, 2016 *apud* MDGEO 2010).

Dentre diversos impactos que a água e umidade elevada na cava causam no dia a dia operacional da mina, os principais são: aumento de custo, baixa produtividade e paradas operacionais.

O aumento de custo mais relevante é o transporte de água ao invés de minério e o aumento de carga morta na caçamba dos caminhões, a redução de umidade de minério implicará conseqüentemente em redução de custos, tal economia é uma das justificativas plausíveis para o investimento que se propõe neste trabalho. A Figura 9 mostra as caçambas de caminhões de uma mina com grande carga morta devido à alta umidade do material.

É possível evidenciar numericamente este impacto através de controle de viagens de caminhão comumente denominado “fator caçamba”, que relaciona a massa efetiva transportada, quantidade de viagens e a capacidade de cada caminhão. Sabe-se que pode haver outros fatores que interferem neste fator caçamba, porém a avaliação visual confirma se é ou não a umidade que está impactando negativamente.



Figura 9 – Caminhões com material aderido a caçamba devido umidade do material.

Fonte: Arquivo pessoal.

Um dos fatores de baixa produtividade dos equipamentos na mina ocorre quando há presença de água e também alta umidade seja nas frentes de lavra, como também na retirada de estéril, acessos e estradas. Porque além de se deslocar maquinários para a confecção de canaletas de drenagem, ajustes nas pistas, há enormes dificuldades na confecção de praças de minério para que os caminhões consigam acessar com segurança e sem riscos de atolamento. O tempo do ciclo do caminhão acaba ficando também mais longo. A Figura 10 mostra uma frente de lavra com alta umidade devida percolação de água de bancadas superiores e surgências nesta cota.



Figura 10 – Excesso de umidade em frente de lavra.

Fonte: Arquivo pessoal.

Algumas das paradas operacionais na etapa posterior, britagem, são consequência da baixa produtividade dos equipamentos da mina, por exemplo, um maior tempo de trânsito do minério até o britador pode gerar paradas por motivos de falta de minério para alimentá-lo. Outro fator que causa paradas operacionais é a agregação de material nos equipamentos da britagem, tais como: correias, britadores, peneiras, pois quando o material está muito úmido ele adere nas superfícies dos equipamentos, e para efetuar a desagregação deste material é necessária a paralização de todo o circuito. Se a umidade estiver muito elevada ela também afeta a retomada do minério para a usina de beneficiamento, ocasionando paradas nesta etapa também. As Figuras 11 a 14 exemplificam alguns destes casos.



Figura 11 – Obstrução da malha das grelhas, que realizam o escalpe antes do britador de mandíbulas, por material fino de alta umidade.

Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 12 – Material fino com alta umidade agregado ocasionando obstrução da malha das peneiras.

Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 13 – Paralisação para desagregação de material no britador de impacto devido alta umidade do minério.

Fonte: Arquivo pessoal.

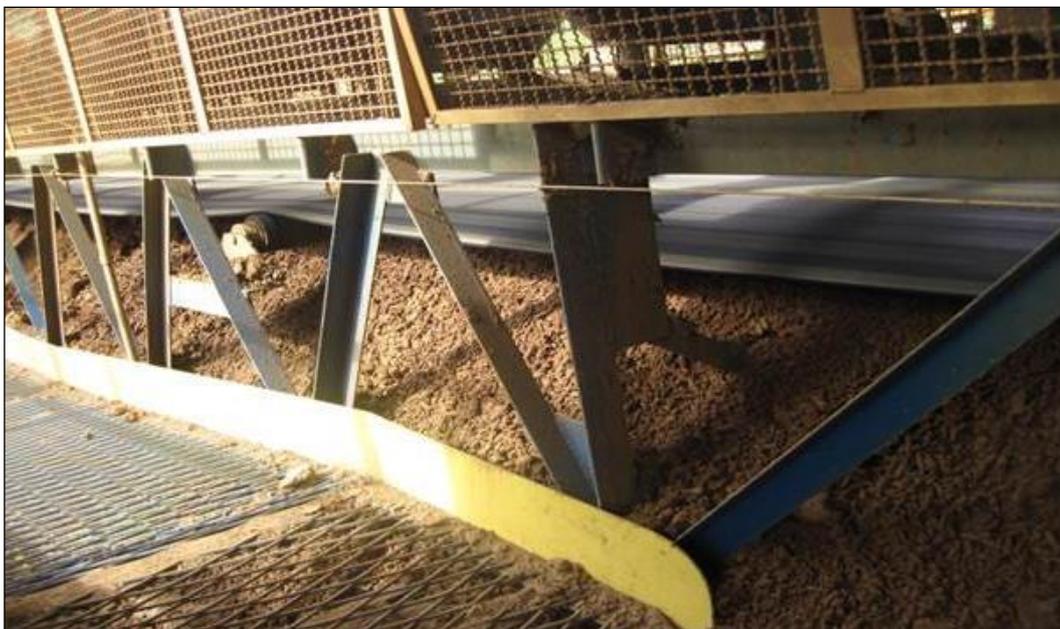


Figura 14 – Acúmulo de material proveniente do retorno da correia transportadora devido à alta umidade do minério ocasionando paradas operacionais.

Fonte: Arquivo pessoal.

2.5.2 Estabilidade de Taludes

Uma superfície de solo exposta que forma um ângulo com a superfície horizontal é chamado de talude. Pode ser natural ou artificial. Se a superfície do solo não for horizontal, uma componente da gravidade tende a mover o solo para baixo, e se a gravidade for grande o suficiente, pode ocorrer à ruptura do talude. Deve-se verificar a segurança dos taludes, que consiste em determinar a tensão de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície de ruptura mais provável e a comparação dela com a resistência do solo ao cisalhamento, este processo é chamado de análise de estabilidade de taludes. A grande complexidade do estudo é a presença de água e a sua percolação (KRYNINE e JUDD, 2014).

A equipe de Geotecnia de mina é quem faz o estudo de estabilidade de taludes e define com que inclinação um determinado talude pode ser escavado. Cabe à operação de mina atender a estas especificações (BRITO, 2011).

O fator de segurança (F_s) é a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento (τ_f) e as forças solicitantes (τ_d), ou favoráveis ao movimento, equação 6 (KRYNINE e JUDD, 2014).

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (6)$$

Na mineração o fator de segurança para taludes permanentes é de 1,5, já para os taludes provisórios, aqueles que ainda estão sofrendo avanço de lavra, o fator de segurança mínimo aceitável, para um período curto de tempo, é de 1,3. A otimização de taludes deve representar a junção de economia e segurança. Assim, o estudo da estabilidade dos taludes de uma cava de mineração a céu aberto implica na determinação da geometria de escavação com acesso direto ao bem mineral de interesse e com a maior segurança possível. Esta geometria contempla a determinação dos ângulos dos taludes individuais, ângulos gerais da cava, alturas de bancadas e dimensões das bermas (REIS, 2010).

Os desafios tornam-se cada vez mais ousados, principalmente em cavas em que o minério mergulha a grandes profundidades, exigindo-se a adoção de

metodologias de escavação que possibilitem, de forma segura e acima de tudo econômica, a lavra da substância de interesse. Assim, do ponto de vista geotécnico, a estabilidade de taludes constitui ferramenta essencial na definição final das geometrias da cava (REIS, 2010).

A presença de água no talude é determinante nos mecanismos de instabilização de um talude, por induzir a saturação dos maciços, promover aumentos das poropressões, resultar na eliminação de tensões capilares e da cimentação e impor forças de percolação na direção do fluxo, e faz com que diminua o fator de segurança (REIS, 2010).

Com isto o rebaixamento de N.A. e as definições da Hidrogeologia passam a ser fundamentais para a otimização dos taludes. A forte interação hidrogeologia e geotecnia para esta atividade é imprescindível.

É muito importante também que a otimização de taludes seja conjunta à análise do sequenciamento de lavra, que apresenta a evolução da escavação passo a passo ao longo do tempo. Essa análise é que irá definir como deve ser a evolução do rebaixamento do nível d'água (BERTACHINI e ALMEIDA, 2003).

Mesmo com um avanço significativo nos estudos de engenharia de taludes, ainda ocorrem diversos casos de ruptura com perdas significativas de vidas e equipamentos. As rupturas de talude em uma mina podem causar impactos que englobam segurança, fatores sociais, econômicos e ambientais.

Dentre os diversos impactos os mais sérios são as perdas de vidas ou invalidez, outros não menos significativos são os comprometimentos/dificuldades operacionais das etapas primárias de lavra (perfuração, desmonte, carregamento e transporte) e auxiliares da lavra. Alguns dos outros diversos impactos, podemos citar os danos econômicos para os trabalhadores, perda de credibilidade da corporação tanto da parte de acionistas como da sociedade em geral, perda de equipamentos, custos adicionais com limpeza, interrupção das operações, perda de minério entre outros prejuízos, reforçando assim a necessidade de uma atenção especial para

uma análise de estabilidade confiável para que tais riscos sejam evitados (BRITO, 2011).

A alta umidade, associada a material micáceo e/ou argiloso fraturado, geralmente tem provocado rompimento em cunha e queda de material dos taludes, comprometendo a segurança operacional e comprometendo a estabilidade dos avanços e bancadas na mina em estudo deste trabalho. As Figuras 15 a 17 mostram exemplos de áreas comprometidas com destaque para as zonas de rompimento em cunha e percolação de água.



Figura 15 – Material argilo-micáceo com vários rompimentos em cunha promovido pelo próprio fraturamento do material e contribuído pela percolação de água intersticial.

Fonte: Arquivo pessoal.

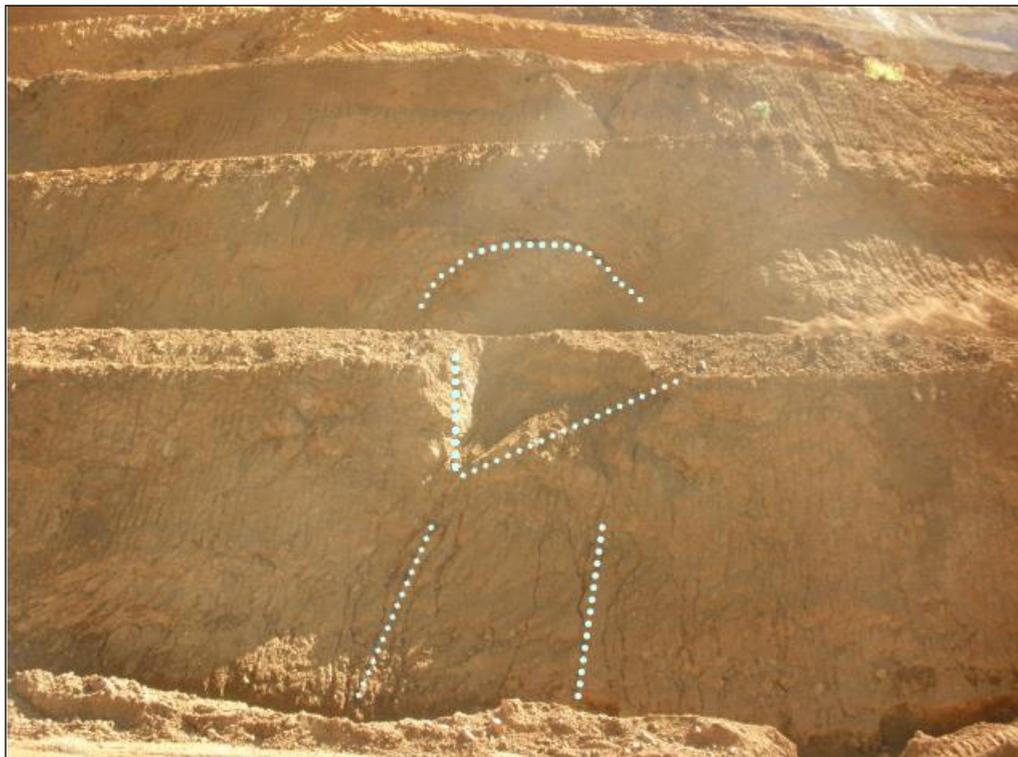


Figura 16 - Fraturamento circular com rompimento em cunha e perpendicular ao talude.
Fonte: Arquivo pessoal.

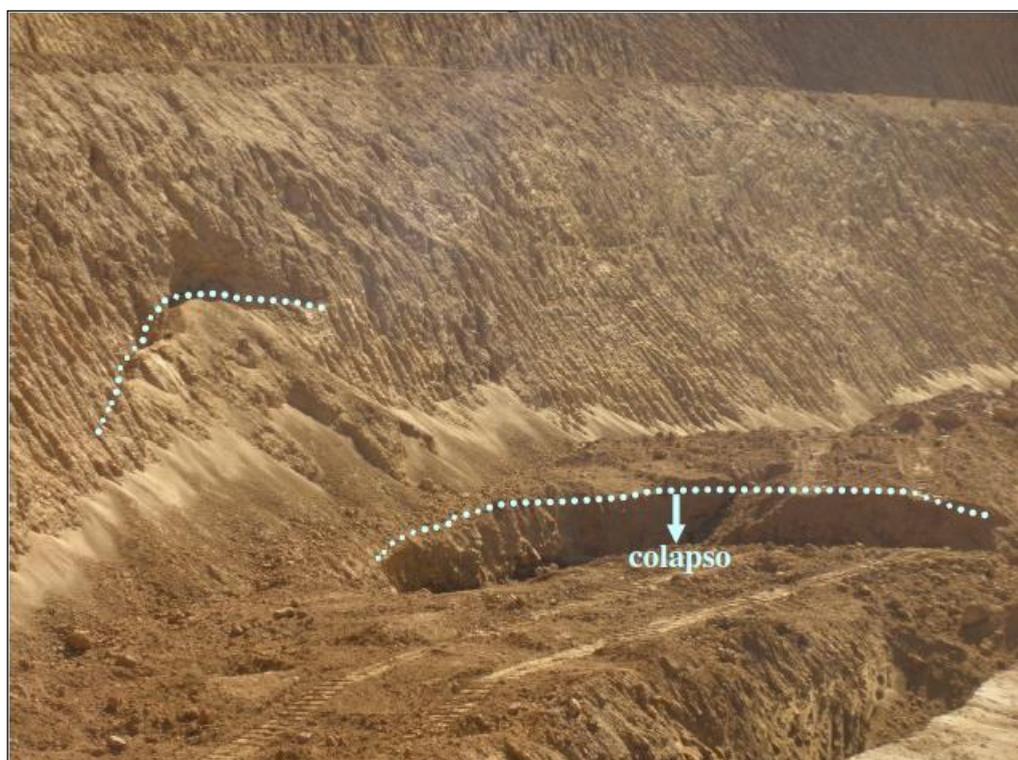


Figura 17 - Fraturamento em cunha com rompimento do talude e ainda rebatimento do piso com quebra do mesmo e colapso devido à percolação de água (material micáceo).
Fonte: Arquivo pessoal.

2.5.3 Métodos para rebaixamento do nível d'água

Os métodos de controle de percolação têm como principal objetivo disciplinar o fluxo d'água no maciço, seja através do rebaixamento do lençol d'água, seja controlando as surgências d'água no interior da escavação através de filtros e/ou drenos. Em geral, quando possível, o rebaixamento do lençol d'água é a forma mais eficiente de controlar a percolação (CORRÊA, 2006).

Os sistemas mais usuais em lavra a céu aberto são: bombeamento direto, ponteiros filtrantes, poços profundos de bombeamento e drenos horizontais profundos (DHP's). Estes métodos para rebaixamento de nível d'água são descritos a seguir com suas principais características, aplicações e limitações, exceto os DHP's que serão mais detalhados no item 3.6 a parte, já que é o método escolhido para a aplicação de rebaixamento de nível d'água para este trabalho.

2.5.3.1 *Bombeamento direto*

Conhecido também como esgotamento de vala ou trincheira. Este sistema é o mais simples de todos, consistindo na coleta de água das trincheiras abertas no fundo da escavação ligadas a um ou vários poços estrategicamente dispostos. Esse método é geralmente aplicado em escavações de pequena profundidade, tipicamente menor que 3m e o fluxo de água para dentro da escavação pode ser esgotado por bombas de baixa capacidade. Neste processo a água que percola através do maciço e infiltra na trincheira é bombeada para fora da escavação, mantendo-se o nível d'água na trincheira abaixo do fundo da escavação. A Figura 18 ilustra o método de rebaixamento por bombeamento direto (CORRÊA, 2006; MARANGON; ALONSO, 2007).

Alonso (2007) apresenta alguns inconvenientes deste método:

- Em escavações suportadas por cortinas estanques contínuas, a força de percolação da água pode causar grande perda do suporte quando o gradiente hidráulico for elevado, prejudicando os trabalhos e se existir uma camada argilosa, pouco permeável, pode ocorrer à ruptura do fundo da escavação;
- Observar continuamente a saída da bomba a fim de verificar a não ocorrência de carreamento de partículas de solo, pois o carreamento destas acarreta em recalques acentuados em estruturas em volta. Ao constatar o carreamento de sólidos, deve-se melhorar o sistema com filtros, ou até mesmo os DHP's.

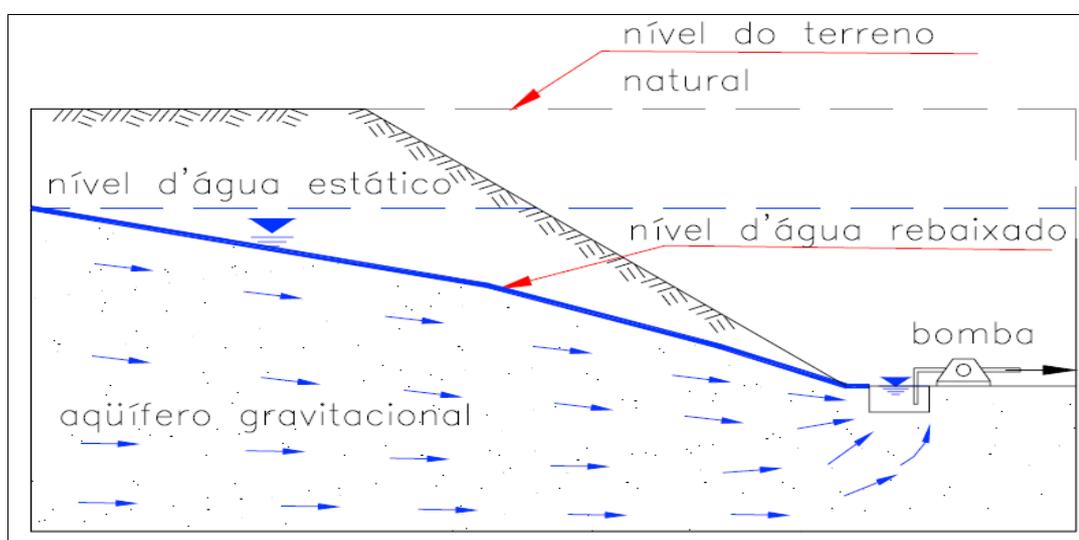


Figura 18 - Rebaixamento através de bombeamento direto em trincheira

Fonte: CORRÊA, 2006, p. 13.

2.5.3.2 *Ponteiras Filtrantes (Well-points)*

Este método de rebaixamento de nível d'água consiste na disposição de um conjunto de ponteiras em furos de pequeno diâmetro, conectadas a um tubo coletor de 4" de diâmetro ligados a uma bomba à vácuo, ao longo da periferia da área a ser rebaixada. As ponteiras são, geralmente, espaçadas de 0.5 a 3 m onde são conectadas no coletor pelas tomadas de água. Este espaçamento depende da natureza do solo e do aquífero a ser bombeado (MACIEL, MARIANO, *et al.*, 2016; ALONSO, 2007; CORRÊA, 2006; DOBEREINER e VAZ, 1998; MÜLLER, 2004).

Segundo Dobereiner e Vaz (1998), são empregadas em solos moles e incoerentes (solos de baixa consistência).

As ponteiras geralmente apresentam ranhuras filtrantes na parte inferior. E a extração da água é feita por uma bomba de vácuo acoplada a uma tubulação de descarga disposta ao longo das ponteiras, sendo necessária uma boa vedação nas conexões. A sucção de ar reduz a pressão atmosférica no interior da tubulação e das ponteiras, promovendo a retirada de água do aquífero (MACIEL, MARIANO, *et al.*, 2016; DOBEREINER e VAZ, 1998).

A principal limitação de uso das ponteiras é quanto à capacidade de rebaixamento, que em geral é inferior a 5m. Entretanto, as ponteiras podem ser empregadas em escavações profundas, desde que sejam instaladas em vários níveis ao longo do talude de escavação. A Figura 19 ilustra o método de rebaixamento por ponteiras em diferentes níveis (DOBEREINER e VAZ, 1998; CORRÊA, 2006).

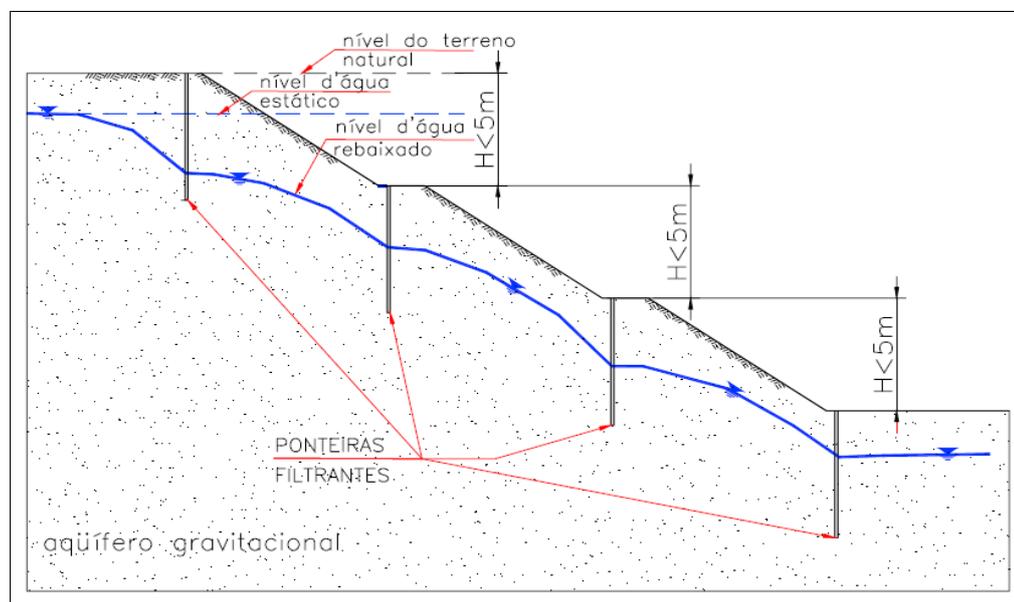


Figura 19 - Rebaixamento através de ponteiras filtrantes instaladas em níveis.

Fonte: CORRÊA, 2006, p. 14.

2.5.3.3 *Poços profundos de bombeamento*

Para superar as limitações de profundidade dos métodos apresentados anteriormente, foi desenvolvido o sistema de rebaixamento com poços profundos. Os poços são construídos por meio de perfuração geralmente entre 200 a 400 mm, na qual são introduzidas tubulações lisas e nas litologias que possuem maior capacidade de transmitir água, que podem ser confirmadas com a execução de perfilagem após a finalização da perfuração, são colocados os filtros. No espaço anelar entre o tubo e a parede de perfuração é preenchido por um filtro de areia, chamado de pré-filtro, com granulometria adequada. Estes poços profundos para rebaixamento possuem aspectos construtivos semelhantes aos de poços de abastecimento de água. A extração de água é feita através de um conjunto motobomba, de acionamento elétrico, submersível. A água é direcionada através de mangotes, canos, adutoras para fora da área de cava (DOBEREINER e VAZ, 1998; MÜLLER, 2004; ALONSO, 2007; CORRÊA, 2006).

Os poços de bombeamento são aplicáveis para o rebaixamento de nível d'água em qualquer tipo de solo e de rocha. Podem ser construídos com espaçamento que possibilite uma maior eficiência de rebaixamento em função das condições hidrogeológicas locais (DOBEREINER e VAZ, 1998).

A Figura 20 mostra o nível d'água rebaixado pelo poço profundo em funcionamento.

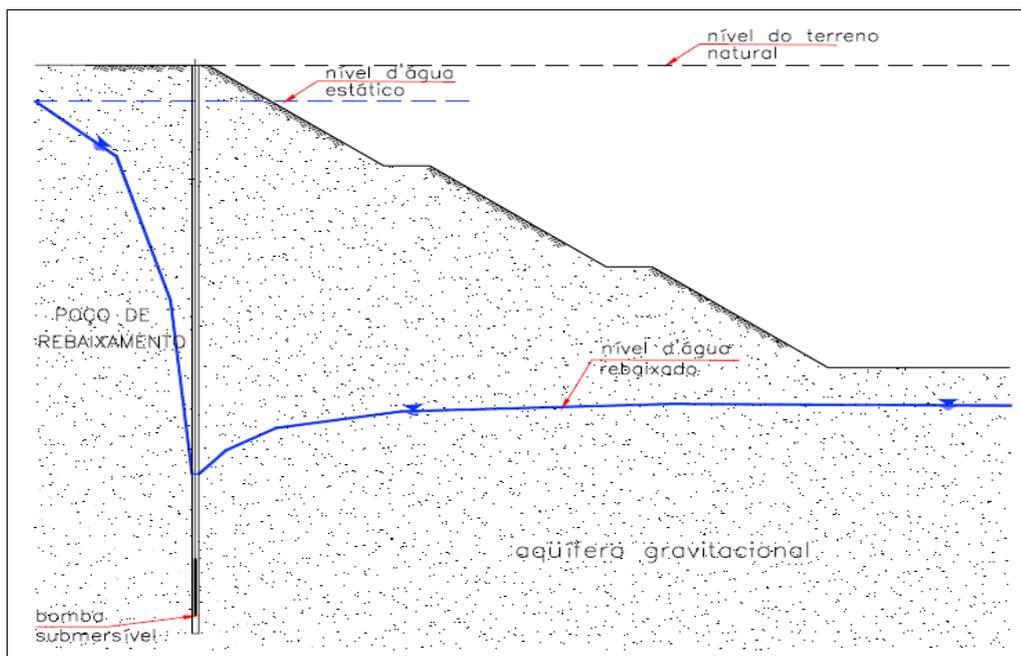


Figura 20 - Rebaixamento através de poços profundos.

Fonte: CORRÊA, 2006, p. 16.

Os poços causam um rebaixamento chamado de cone de rebaixamento que possui um raio de influência, que é a distância para qual o efeito de seu bombeamento é nulo, ou seja, é a distância limite do cone e da área de rebaixamento desse poço e pode servir de guia para prever sua interferência em um poço adjacente. Os raios de influência dos poços variam em função da transmissividade e da condutividade hidráulica local. Por essa razão, a alocação de poços de bombeamento destinados à captação de água para abastecimento deve, imprescindivelmente, levar em consideração o raio de influência dos poços adjacentes. Entretanto, em empreendimentos dedicados à mineração, a interferência entre poços é totalmente benéfica, pois garante um maior rebaixamento local do nível de água, principalmente nos fundos de cava, Figura 21 e 22 (SILVA, ABUD, *et al.*, 2016).

É importante salientar que, para qualquer tipo de escavação com necessidade de rebaixamento do nível de água subterrânea, deve-se providenciar um pré-rebaixamento antes do início da escavação. O volume de água subterrânea a ser explorado no pré-rebaixamento pode ser definido por meio de modelos numéricos.

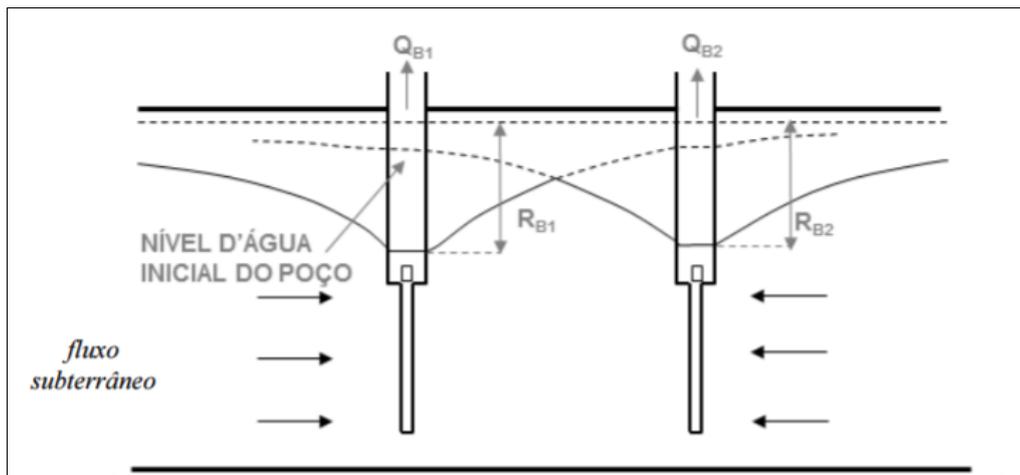


Figura 21 – Demonstração de interferência entre poços profundos.

Fonte: SILVA, ABUD, *et al.*, 2016.

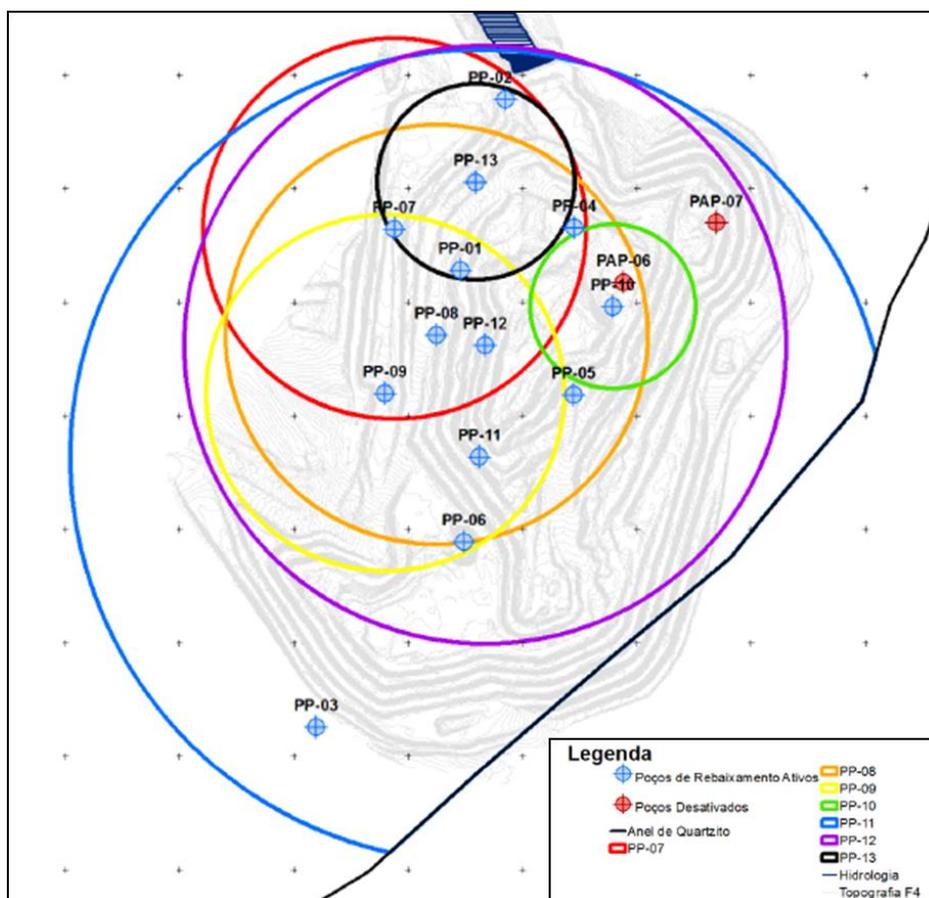


Figura 22 – Cones de Rebaixamento de poços profundos se sobrepondo acarretando no rebaixamento de NA local.

Fonte: SILVA, ABUD, *et al.*, 2016.

2.6 Dreno Horizontal Profundo

Mais conhecido pela sigla DHP, o dreno horizontal profundo é utilizado para a drenagem localizada de camadas ou feições do maciço geológico. Geralmente são posicionados individualmente devido ao efeito localizado, entretanto, podem ser dispostos em arranjos com espaçamento variável (DOBEREINER e VAZ, 1998).

O objetivo da drenagem profunda é promover o rebaixamento do nível d'água internamento de um maciço de modo a evitar a surgência de água na face do talude, principalmente nos períodos de chuvas, e garantir sua estabilidade. Eles são eficientes quando a saturação atinge-os. Não existe a rigor um procedimento de cálculo para os drenos sub-horizontais. A instalação geralmente é feita nos locais que há surgências de água até conseguir o rebaixamento do nível d'água local. Para avaliar tal efeito no rebaixamento é necessário o monitoramento de nível d'água em indicadores de nível de água (INA), Figura 23, e piezômetros (PUC-RJ).



Figura 23 – Indicador de Nível de Água (INA) em uma mina.

Fonte: Arquivo Pessoal

O DHP é construído por meio de uma perfuração horizontal com inclinação de 0° ou sub-horizonta com inclinação de 3 a 10° , de modo que o escoamento gravitacional seja satisfatório. Podem ser executados em maciços com aquíferos

confinados ou não confinados. São perfurados na face dos taludes, utilizando equipamentos de sondagem rotativa ou rotopercussão, geralmente com diâmetro de 100 milímetros. A profundidade varia de 30 a 100 metros (DOBEREINER e VAZ, 1998; PUC-RJ; TECPER; MÜLLER, 2004).

Existem algumas variações quanto aos tipos de perfuração, que incluem mudanças nos acessórios utilizados, num mesmo DHP pode haver mudanças quanto ao tipo de perfuração para que se consigam executar a profundidade final planejada do DHP. O que geralmente acarreta tal mudança é a variação nas características do maciço que está sendo perfurado. Podendo também haver mudanças da espessura de perfuração e revestimentos dos drenos. Os tipos de perfuração são (TECPER):

- Perfuração rotativa sem revestimento simultâneo;
- Perfuração rotativa com revestimento simultâneo;
- Perfuração rotopercussiva com revestimento simultâneo:
 - Perfuração com revestimento simultâneo tracionado excêntrico;
 - Perfuração com revestimento simultâneo “empurrado” excêntrico;
 - Perfuração com revestimento simultâneo tracionado concêntrico.

A Figura 24 mostra uma perfuratriz realizando a perfuração de um DHP, a Figura 25 apresenta a perfuração do DHP sem revestimento do furo, utilizando apenas sabão (*Foam*) e PHPA (poliacrilamida) para a limpeza do furo, e a Figura 26 mostra o desenho esquemático da perfuração do DHP.



Figura 24 – Perfuratriz realizando um DHP.

Fonte: Tecper.



Figura 25 – Perfuratriz realizando um DHP, com limpeza de furo.

Fonte: Tecper

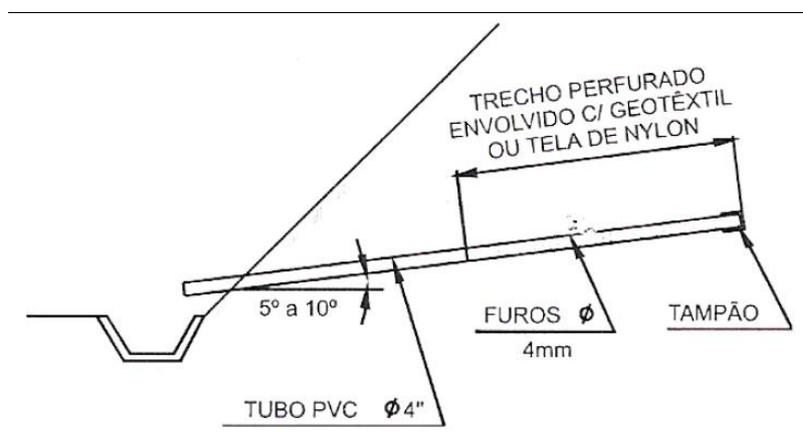


Figura 26 – Desenho esquemático de um DHP.

Fonte: DOBEREINER e VAZ, 1998 apud CARVALHO, 1991.

O DHP deve estar localizado no maciço geológico de tal forma que a extensão do tubo filtrante imersa no aquífero seja a maior possível. Antes da instalação do DHP, é necessário o prévio conhecimento da distribuição da camada que constitui o aquífero, quando são confinados; ou conhecer o comportamento da superfície do lençol freático, quando são aquíferos livres. Porém, na maioria dos casos, existem caminhos preferenciais de percolação nos maciços geológicos, que concentram a água subterrânea e podem ser de difícil localização, sendo que,

nestes casos, o posicionamento do DHP é executado por tentativa (DOBEREINER e VAZ, 1998; MÜLLER, 2004).

As aplicações deste método demonstram que drenos mais longos e espaçados são mais eficientes do que os drenos curtos com espaçamento menor, pois o rebaixamento ocorre ao longo do dreno e quanto mais longo mais distante da face do talude estará a superfície freática. Assim, quanto mais suave o talude, maior deverá ser o comprimento do dreno (PUC-RJ).

O revestimento dos drenos deve ocorrer imediatamente após a conclusão dos trabalhos de perfuração e retirada das hastes, para evitar que ocorram desmoronamentos no furo, impedindo o revestimento do dreno. Os tubos de revestimento dos drenos são de PVC, ranhurados, do tipo monitoramento geomecânico, com sistema de juntas por rosca macho/fêmea e anel de vedação, em geral com diâmetro interno de 50 mm e externo de 64 mm e abertura de 0,75mm, Figura 27. O primeiro tubo do dreno é fechado com um tampão ou “caps” fêmea para não permitir a entrada de material e servir de ponta para ajudar na introdução da coluna de revestimento. Pode também ser utilizada tubulação de PVC tradicional rígido, com diâmetro de 38 a 50 milímetros, sendo a maior parte constituída por um tubo filtrante (furos ou ranhuras) envolvido em geotêxtil quando instalado em solo ou envolvido em duas voltas de tela plástica quando instalado em rocha (TECPER; PUC-RJ).

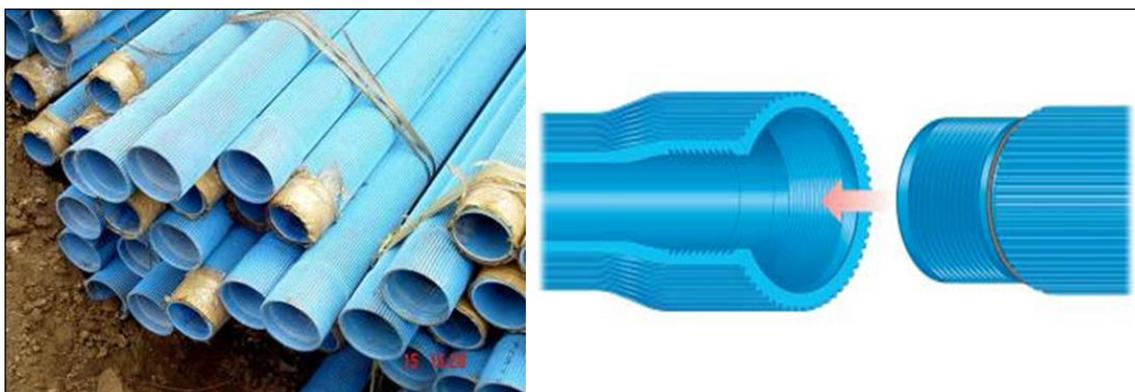


Figura 27 – Tubo de PVC Geomecânico.

Fonte: TECPER

Após a colocação dos tubos de revestimento dos drenos, o espaço anelar entre a coluna e a parede do furo é injetado um pré-filtro composto por areia selecionada, lavada, de composição quartzosa e granulometria de 2 a 3 mm. A areia é colocada dentro de um jateador, onde uma linha de ar comprimido injeta a areia através de uma mangueira por dentro de tubos auxiliares de aço, com $\frac{3}{4}$ " de diâmetro, que são introduzidos dentro do furo, externamente ao tubo de PVC de revestimento dos drenos. O espaço anelar deve ser preenchido do final do dreno até os primeiros 10 ou 15 metros do mesmo. No intervalo inicial do dreno, de 0 a 10 ou 15 metros, o espaço anelar é preenchido com um material isolante, *pellets* de bentonita moída intercalado com areia selecionada, para evitar a percolação de água até a face do talude e conseqüentemente seu rompimento. É realizado um acabamento final com cimentação da boca do dreno. A Figura 28 apresenta este procedimento sendo executado em uma mina (TECPER; CEMBRANELLI, REIS e VEIGA, 2009).



Figura 28 – Injeção de areia selecionada nos DHP's.

Fonte: TECPER

A Figura 29 apresenta um DHP em funcionamento logo que perfurado.



Figura 29 - DHP instalado na Mina de Tamanduá – Nova Lima (MG).

Fonte: CEMBRANELLI, REIS e VEIGA, 2009.

Finalizada a instalação do dreno sua vazão é medida e a vazão do dreno ao lado. Se for observada uma redução na vazão do dreno ao lado significa que existe comunicação entre eles e o intervalo definido entre os drenos está bom, caso contrário recomenda-se perfurar outro dreno entre eles. Em alguns casos os DHP's são canalizados para uma tubulação coletora e desviados para fora do talude, Figura 30.



Figura 30 - DHP canalizado.

Fonte: CEMBRANELLI, REIS e VEIGA, 2009.

Os DHP's são também utilizados na construção civil para drenagem dos taludes. A Figura 31 é à vista dos drenos horizontais (DHP's) instalados em um talude para construção de ferrovia.



Figura 31 – DHP's instalados em um talude da ferrovia em construção.

Fonte: VALEC, 2014, p.64.

Após um período de operação dos DHP's é possível avaliar o rebaixamento de nível d'água por INAs instalados próximos, bem como nas faces do talude a diminuição da mancha de umidade e ausência de surgências de água.

A Figura 32 mostra um estudo realizado em que os DHP's contribuíram para a estabilização de taludes que possuía uma superfície com alto potencial de ruptura, e surgências de água no pé do talude, sendo que após um tempo de operação dos DHP's a superfície de possível ruptura fica livre da percolação de água, e as surgências no pé do talude não acontecem mais, devido ao rebaixamento do nível de água (GARCIA, ALBUQUERQUE e NARESI JUNIOR, 2013).

Outros autores também apresentam o mesmo resultado da Figura 32, quanto ao rebaixamento do nível de água após a utilização dos DHP's, pode-se citar Alonso (2007, p.139), Bastos (2006, p. 27), PUC-RJ (p.24) e TECPER (p.24).

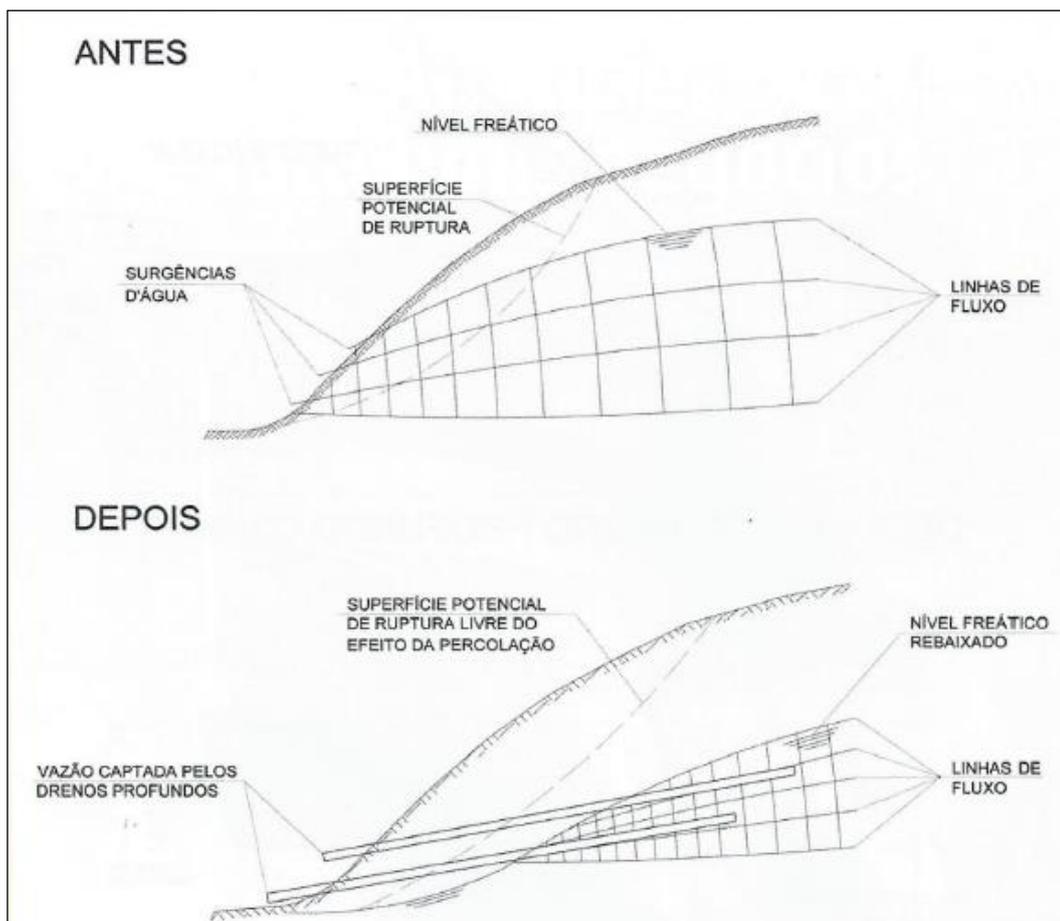


Figura 32 – Nível de água antes e depois da instalação dos DHP's.

Fonte: GARCIA, ALBUQUERQUE e NARESI JUNIOR, 2013, p.81.

A seguir serão apresentados resultados de simulações no *software modflow* que apresenta a eficiência dos drenos, considerando principalmente o comprimento do dreno, elevação e espaçamento, em função das características do aquífero. São expostos os resultados das simulações em forma de seções transversais, apresentando o comportamento do nível de água em um terreno inclinado em cada mudança nos parâmetros, sob estado de recarga constante. Os parâmetros atribuídos são isotrópicos com $K = 1 \text{ ft/d}$, $R = 0,01 \text{ ft/d}$ e drenam a condutividade hidráulica igual a do material geológico (ou seja, 1 ft/d) (POHLL, CARROLL, *et al.*, 2013).

Na Figura 33, todos os drenos são instalados em uma elevação de 50 pés da parte inferior da unidade geológica em uma elevação de 0 ft. Eles são instalados no pé da inclinação. O resultado desta simulação foi que à medida que o comprimento do dreno aumenta, os níveis de água caem.

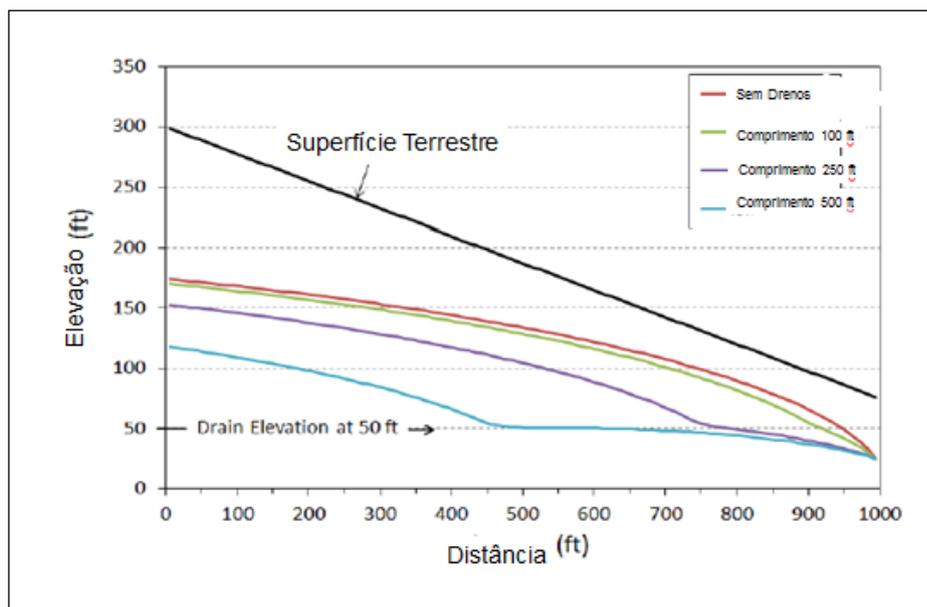


Figura 33 – Variação do NA em função dos comprimentos dos DHP's obtidos usando MODFLOW.

Fonte: Adaptado de POHLL, CARROLL, *et al.*, 2013.

Em contraste, na Figura 34 os drenos são instalados em uma elevação de 50 ft, 100 ft and 150 ft a uma distância de 500 pés no declive. Os drenos localizados na elevação mais baixa propiciam uma maior queda do nível de água. Para o exemplo fornecido, o dreno instalado a uma elevação de 50 pés, ou ao pé da inclinação, é mais eficaz na redução dos níveis de água em comparação com um dreno instalado em alta em uma elevação de 150 pés (POHLL, CARROLL, *et al.*, 2013).

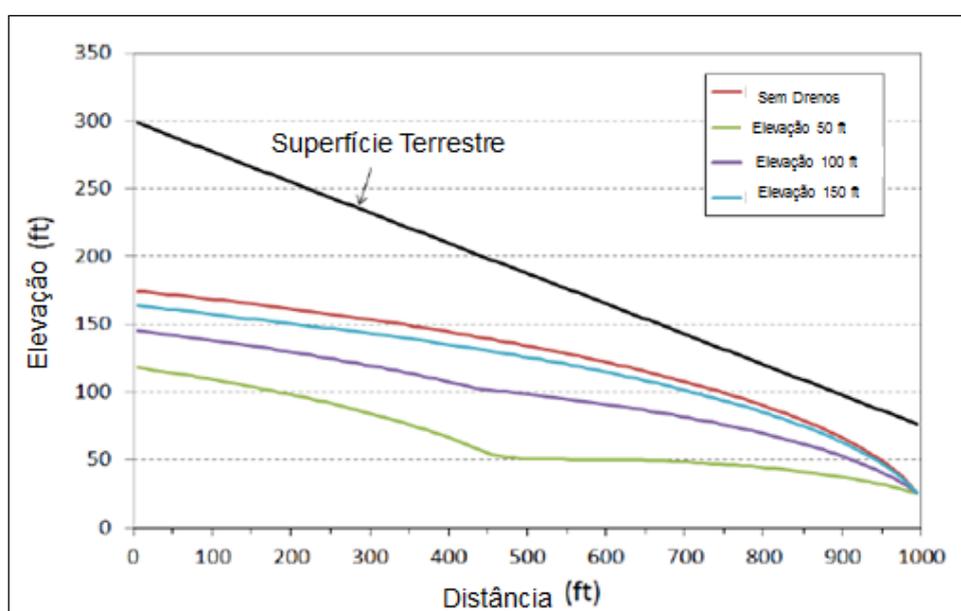


Figura 34 – Variação do NA em função da elevação dos DHP's obtidos usando MODFLOW.

Fonte: Adaptado de POHLL, CARROLL, *et al.*, 2013.

A Figura 35 analisa o espaçamento dos drenos, com drenos perfurados paralelos à inclinação, para esta simulação todos estão localizados em uma elevação de 50 pés, que foi a que melhor apresentou resultado na simulação anterior. A direção do dreno é ditada pelo aspecto unidimensional da simulação MODFLOW. Para o exemplo de disposição dos DHPs, dada igual recarga e características hidráulicas do local, diminuir o espaçamento dos DHP's acarreta em redução do nível de água (POHLL, CARROLL, et al., 2013).

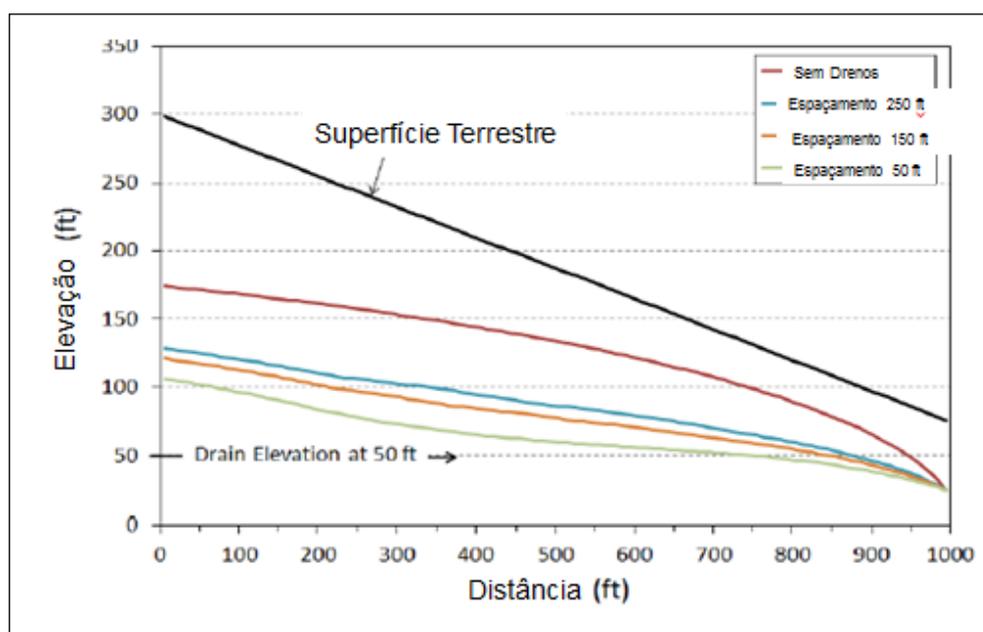


Figura 35 – Variação do NA em função do espaçamento dos DHP's obtidos usando MODFLOW.

Fonte: Adaptado de POHLL, CARROLL, et al., 2013.

A resposta do nível da água ao posicionamento do dreno também é uma função das características do local. Especificamente, a condutividade hidráulica, o rendimento específico (para simulações transitórias) e as taxas de recarga são importantes para o projeto de drenagem e precisam ser considerados. O nível de água aumentará com recarga aumentada e/ou diminuição da condutividade hidráulica. O projeto de drenagem precisará ajustar para acomodar propriedades hidráulicas variáveis. Da mesma forma, a Figura 36 fornece variação do nível de água como uma função da Condutibilidade hidráulica(K) e da taxa de recarga (R). As unidades são em pés por dia. O comprimento do dreno é de 250 pés em uma elevação de 50 pés. O dreno é feito como uma linha preta grossa, originada no pé da inclinação do talude(POHLL, CARROLL, et al., 2013).

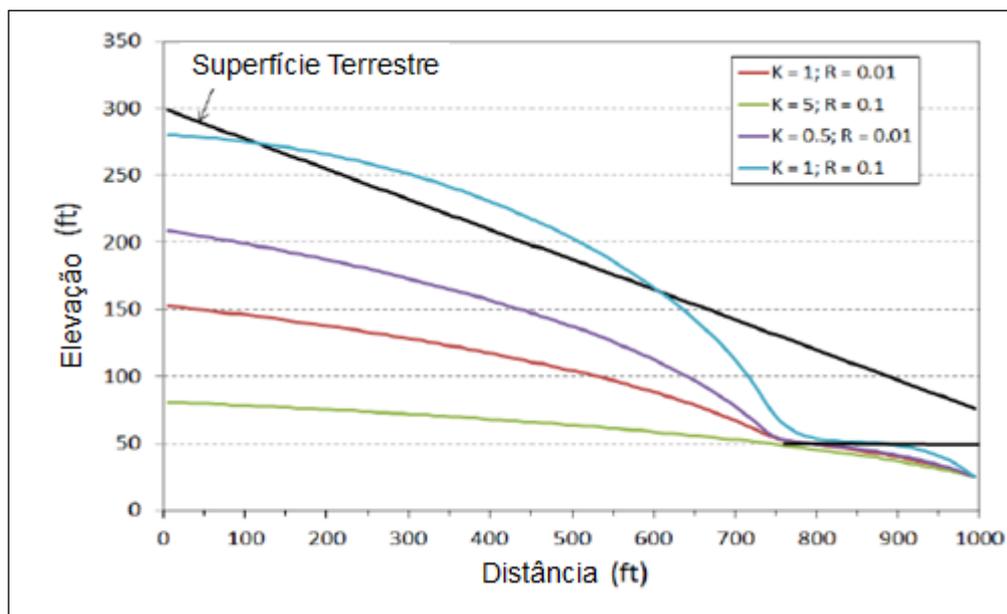


Figura 36 – Variação do NA em função da condutibilidade hidráulica(K) e da taxa de recarga (R), utilizando DHP's obtidos usando MODFLOW.

Fonte: Adaptado de POHLL, CARROLL, *et al.*, 2013.

Interpretando os resultados da modelagem apresentados na Figura 36 é possível concluir que mesmo em diferentes características de materiais com condutibilidade hidráulica distintas, a tendência da água é percolar junto ao início dos drenos e não mais percolar próximo à superfície.

A aplicação dos DHP's em mineração obteve resultados positivos quanto ao rebaixamento de nível d'água e consequentemente estabilidade de taludes, exposto em forma de artigo em congresso nacional por BARCELOS, NUNES, *et al.* (2012) apresentando o trabalho realizado na mina de Tamanduá em Nova Lima-MG. A Figura 37 mostra a disposição dos drenos instalados bem como os INAs para avaliação da variação do NA. E a Figura 38 expoe os dados medidos de NA ao longo do tempo, pode-se observar o monitoramento executado após a construção do DHPs (barras azuis) que o NA mesmo após precipitação elevada (exemplo de 2012) não continuou a subir devido ao desaguamento do aquífero com os novos DHP's.

Outro impacto positivo nesta aplicação prática dos DHP's foi a diminuição do fator de segurança na parede onde foram construídos os DHP's passou de 0,9 para 1,3 (BARCELOS, NUNES, *et al.*, 2012).



Figura 37 – Localização dos DHP's e INAs

Fonte: BARCELOS, NUNES, *et al.*, 2012.

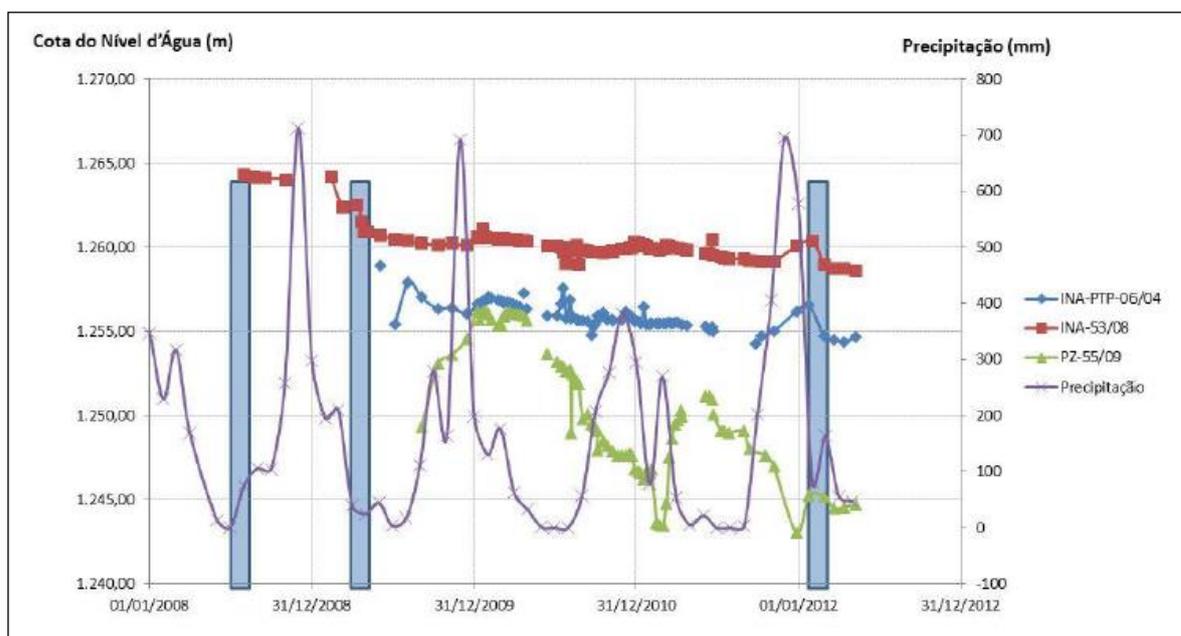


Figura 38 – Instalação dos drenos, monitoramento do nível de água e precipitação.

Fonte: BARCELOS, NUNES, *et al.*, 2012.

Os estudos, simulações e aplicação dos DHP's apresentados neste tópico propiciou o embasamento para definição do provável rebaixamento local do nível de água (NA) após a implantação dos DHP's na mina em estudo neste trabalho.

No ano de 2011 foram realizadas perfurações horizontais na mina em estudo para avaliar se seria possível diminuir a umidade nas frentes de lavra. De maneira rápida, foram realizados 12 furos com 32 m de profundidade, espaçadas em 8m(porém em alguns casos foi testado afastar um pouco mais). Foram apenas testes para ver o que seria possível realizar com o maquinário e materiais disponíveis; nos furos foram inseridos somente o cano de PVC sem a manta geotêxtil e sem o pré-filtro, apenas uma vedação na boca do furo com argila. A Figura 39 mostra a perfuratriz da mina realizando os furos horizontais (RANGEL, 2011).



Figura 39 – Perfuração para instalação de drenos horizontais com perfuratriz na mina em estudo.

Fonte: Rangel, 2011.

Os drenos foram executados respeitando-se as estruturas/litologias identificadas pelo mapeamento geológico realizado previamente. Em geral, os furos foram posicionados perpendicularmente às estruturas de veios e/ou fraturas e/ou no centro de corpos permeáveis, tais quais os bolsões de magnetita e sílica compacta, a exemplo de um dos furos como ilustrado na Figura 40 (RANGEL, 2011).



Figura 40 – Talude antes da perfuração dos drenos, detalhe na altura da mancha de umidade.

Fonte: Rangel, 2011.

Finalizada a operação, ainda não havia água jorrante no local, mas após 2 horas, observou-se a primeira vazão e 24 horas depois, a vazão já era consideravelmente elevada. A Figura 41 mostra os drenos em operação.

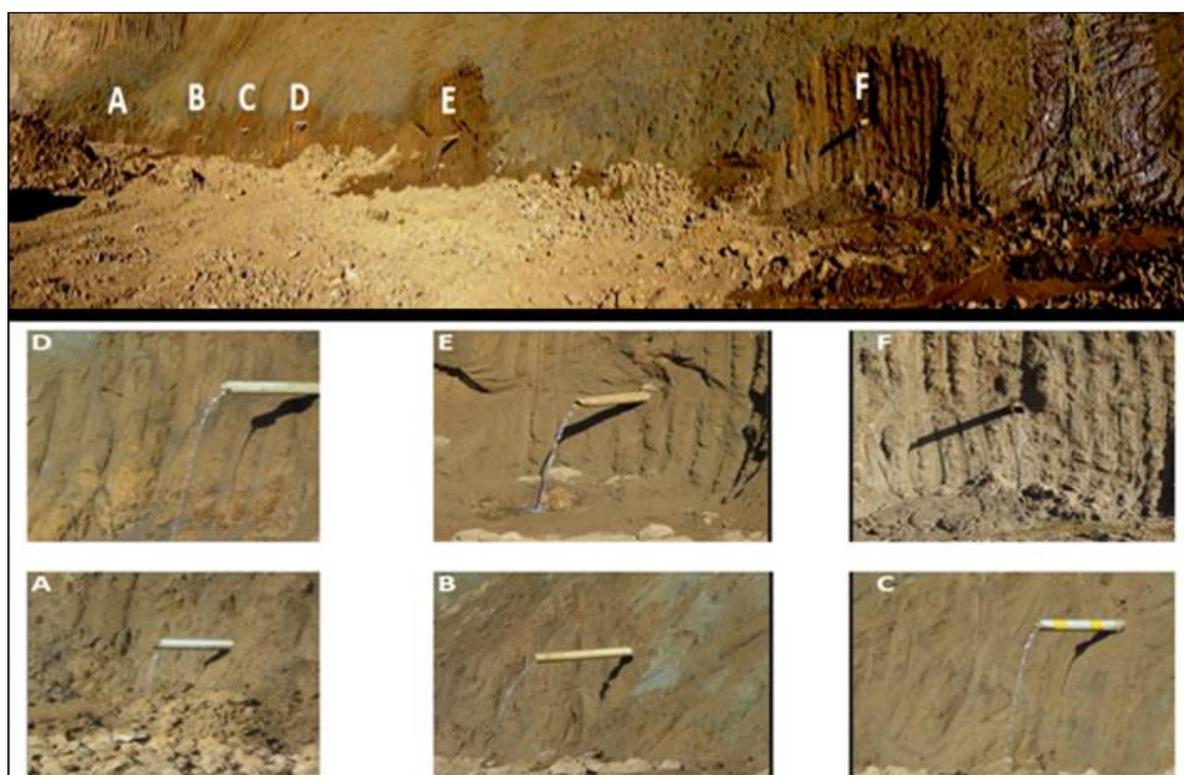


Figura 41 – Drenos em operação na mina em estudo.

Fonte: Arquivo pessoal.

Em consequência deste trabalho, a operação de lavra não encontrou dificuldades na retirada do minério da frente de lavra uma vez que os drenos foram suficientemente capazes de abaixar em aproximadamente 3 pontos percentuais a umidade desta frente, passando de 20% para 17,2% de umidade medida a partir do material coletado na amostragem por perfuratriz. A umidade reduziu não apenas em 3 pontos percentuais, mas também contribuiu para a redução da mancha de umidade que se concentrou apenas ao redor dos furos realizados, reduzindo-se assim a “pluma de influência” do nível d’água nesta região. Após 14 dias da perfuração, houve uma redução significativa da umidade dos taludes alvo como se pode observar na Figura 42 (RANGEL, 2011).



Figura 42 – Talude após 14 dias de operação dos drenos, detalhe na altura da mancha de umidade.

Fonte: Rangel, 2011.

O que se pode concluir com este trabalho é que as perfurações propiciaram uma percolação de água através do dreno com uma vazão de água maior nos primeiros dias e posteriormente diminuindo, devido a fechamento dos furos com o

próprio material, porém alcançou-se uma pequena melhora na umidade na face do talude e uma redução na umidade do minério a ser lavrado (RANGEL, 2011).

Mediante os resultados do trabalho do geólogo Rangel (2011) houve a avaliação das melhorias necessárias e diante da perspectiva de bons resultados que este trabalho já apresentou para a resolução do problema de umidade na mina em estudo, a equipe de hidrogeologia buscou investimentos financeiros para a contratação do serviço de uma empresa especializada na execução dos drenos horizontais profundos para que alcançasse ainda resultados melhores. Um dos principais pontos de melhoria seria o aumento no comprimento dos drenos e a utilização do pré-filtro para melhoria dos resultados.

Este trabalho de conclusão de curso vem ao encontro da necessidade da justificativa para a empresa de tal investimento, ao simular os possíveis ganhos quanto à quantidade de material liberado com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos para a redução de umidade na mina em estudo.

2.7 SOFTWARES PARA SIMULAÇÃO

2.7.1 ArcGIS

O ArcGIS é o nome de um grupo de programas informáticos e que constitui um Sistema de Informação Geográfica (GIS) utilizado para criação e utilização de mapas, compilação de dados geográficos, análise de informações mapeadas e gestão de informações geográficas em bancos de dados. É produzido pela ESRI (IMAGEM, 2017).

2.7.2 Datamine

A Datamine fornece produtos para todos os estágios da cadeia produtiva da mineração, tais como: Administração de dados geológicos; Modelagem de recursos; Planejamento de mina a céu aberto e subterrânea e Operações. A Datamine possui uma grande gama de produtos, o produto utilizado neste presente trabalho foi o

Studio 3, que é um Software com inúmeras ferramentas para design de mina e Análise geoestatística e modelamento gráfico (DATAMINE).

3 METODOLOGIA

Este trabalho contempla inicialmente a pesquisa bibliográfica de conceitos básicos relacionados às áreas de hidrogeologia e geotecnia com os fundamentos teóricos e soluções para o rebaixamento do NA em atividades de mineração, para a identificação de particularidades e de vantagens de sua implementação. A pesquisa foi realizada em livros, trabalhos acadêmicos, artigos, revistas e a *sites* técnicos.

Para realizar este trabalho propõe-se que seja feita uma pesquisa de campo, sendo exploratória, com uma aplicação prática do método de Drenos Horizontais Profundos para o rebaixamento do NA em uma mina, tratando-se, portanto, de um estudo de caso.

A pesquisa de campo é utilizada com o objetivo de obter informações e conhecimentos acerca do problema para o qual se procura uma resposta, ou uma hipótese que se queira validar, ou, ainda, descobrir novos fatos ou as relações entre eles. Este tipo de pesquisa requer uma compilação bibliográfica sobre o tema em questão que permitirá que se estabeleça um modelo teórico inicial de referência, da mesma forma que auxiliará na determinação das variáveis e elaboração do plano geral da pesquisa (MARCONI e LAKATOS, 2002).

A pesquisa exploratória segundo Marconi e Lakatos (2002) trata-se de investigações de pesquisa empírica cujo objetivo é a formulação de questões ou de um problema, com a finalidade de: desenvolver hipóteses, aumentar a familiaridade do pesquisador com o ambiente de estudo, para a realização de uma pesquisa mais precisa.

Segundo Chizzotti (2006), o estudo de caso é uma caracterização abrangente para designar uma diversidade de pesquisas que coleta e registra dados de um ou vários casos, apresentando a experiência de forma organizada, estruturada e crítica, objetivando a tomada de decisões a seu respeito ou proposta de mudanças.

Com o intuito de alcançar o objetivo proposto neste trabalho que é a simulação da quantidade de material liberado com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos para a redução de umidade em uma empresa mineradora, foram necessários alguns procedimentos que serão apresentados a seguir.

3.1 Geração do mapa potenciométricos com o NA atual - ArcGis

O monitoramento de NA é realizado principalmente por meio de INAS (indicadores de nível de água subterrânea). Os INAS são poços de monitoramento instalados em furos de sondagem. Os furos a serem transformados em INAS normalmente são definidos de acordo com um arranjo geométrico mais adequado para a confecção de mapas potenciométricos. O arranjo geométrico deve apresentar pelo menos três INAS que contemplem o entorno da mina (em forma triangular) e um na porção central da mina de modo a proporcionar uma interpolação de dados que demonstre da forma mais realista possível à superfície de água subterrânea.

Para o devido mapeamento potenciométrico das áreas adjacentes a mina, também são usados INAS regionais, além de informações superficiais tais como surgências, superfícies de lagos, SUMP's e drenagens em geral, que são utilizadas para calibrar as curvas potenciométricas.

Para a geração do mapa potenciométricos na mina em estudo utiliza-se uma metodologia, publicada intitulado de "Geoestatística aplicada a Hidrogeologia para confecção de mapas potenciométricos". Este trabalho teve a finalidade de avaliar qual metodologia que melhor se adequaria à realidade de interpolação de dados hidrogeológicos em áreas de mineração. E a metodologia que obteve melhores resultados para confecção das curvas potenciométricas é expressa no fluxograma da Figura 43. Nessa metodologia a feição que contém os dados dos INAs é submetida à interpolação pelo método *Spline with Barriers by ESRI* através do *software* ArcGIS, onde o mês de referência é escolhido e a barreira espacial é selecionada para limitar a interpolação dos dados (MACEDO, SILVA, *et al.*, 2014).

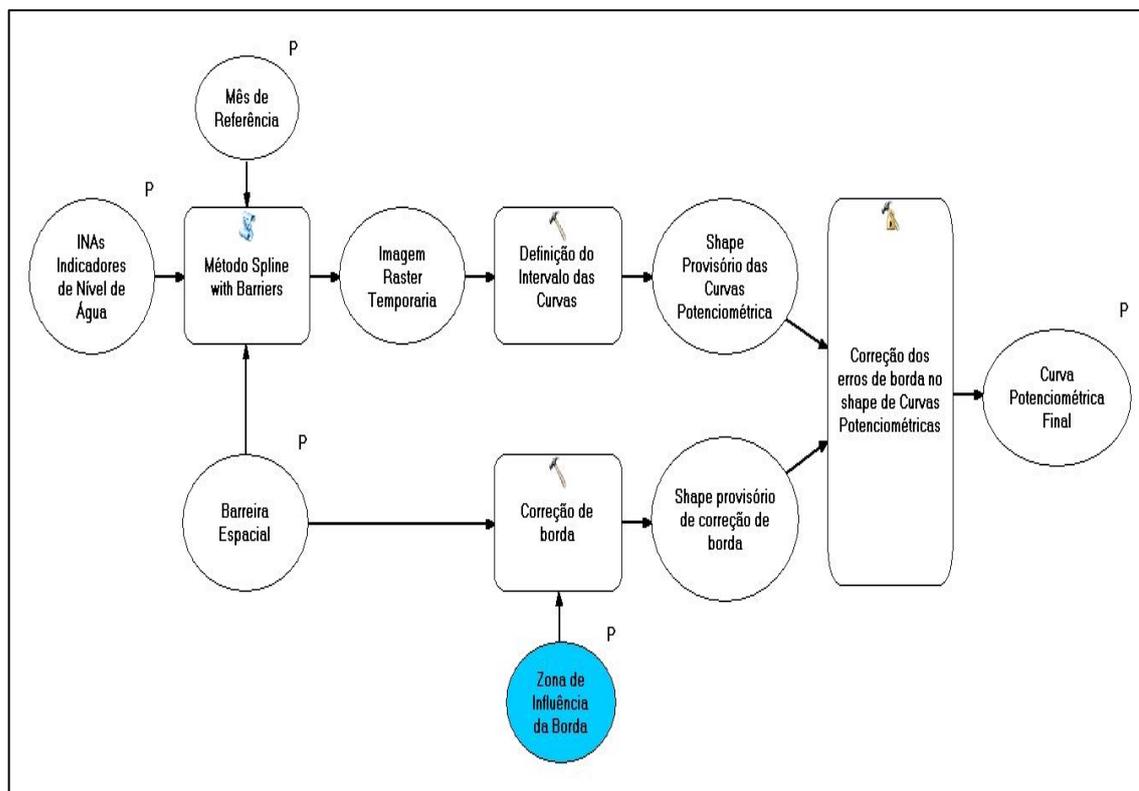


Figura 43 – Fluxograma de geração das superfícies potenciométricas.

Fonte: MACEDO, SILVA, *et al.*, 2014.

O primeiro passo foi consolidar os dados de nível d'água de cada instrumento do mês correspondente, que neste trabalho foi o de abril de 2017, sendo posteriormente inserindo em um arquivo *geodatabase* no *ArcGis*. As barreiras e a máscara de interpolação são arquivos tipo *shapefile* e já foram desenhados especificadamente para a mina em estudo.

De forma a otimizar a geração dos mapas, o procedimento exposto no fluxograma da Figura 43 já é realizado de forma automática, pois o *ArcGis* apresenta a função *Model Builder* que permite criar modelos a partir de fluxos que unem uma sequência de ferramentas necessariamente presentes no *ArcToolbox* e base de dados. A tela inicial para escolha dos dados que serão interpolados, bem como a barreira e máscara estão na Figura 44.

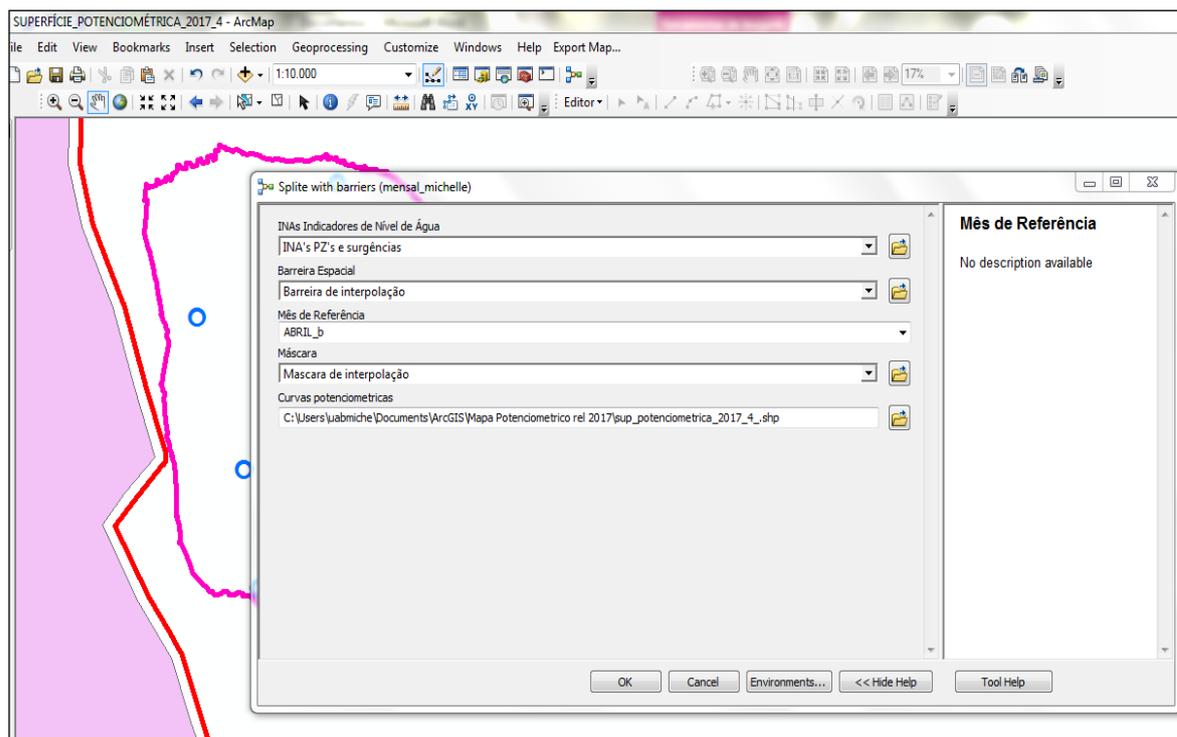


Figura 44 – Escolha dos dados para geração do mapa potenciométricos no ArcGis.

Fonte: Arquivo pessoal.

O produto obtido é apresentado a seguir, que são curvas potenciométricas representando a variação do nível d'água ao longo do terreno, a Figura 45 mostra a situação do nível d'água na área de estudo contornada pelo polígono rosa, e os pontos vermelhos são os futuros DHP's. Este arquivo *shapefile* com o mapa potenciométrico será utilizado na próxima etapa.

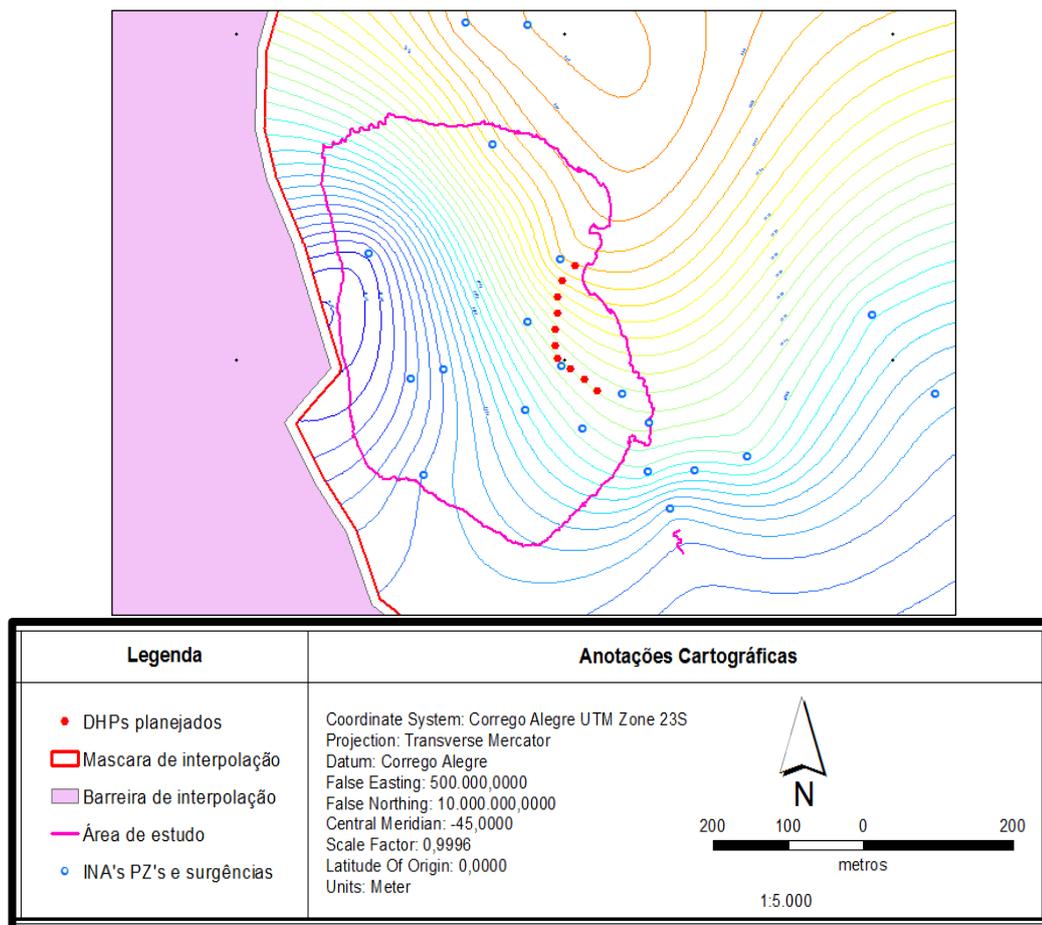


Figura 45 – Mapa potenciométricos da área da mina em estudo.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.2 Geração de superfície do NA atual e NA previsto no *Datamine*

O arquivo com as linhas potenciométricas foi importado para o *Datamine* e posteriormente gerado a *wireframe* dele, através da ferramenta *Make DTM*, que nada mais é que a interpolação dos pontos para geração de uma superfície sólida. Os passos executados estão retratados nas figuras 46 a 48 e a visão do arquivo gerado na Figura 49.

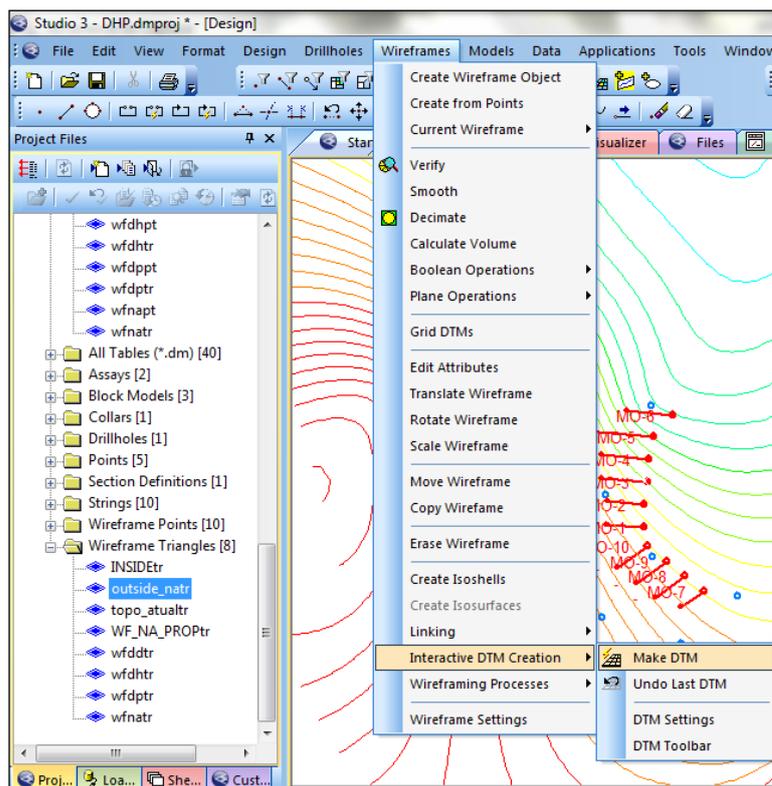


Figura 46 – Escolha da Ferramenta a ser utilizada para gerar superfície do NA atual.

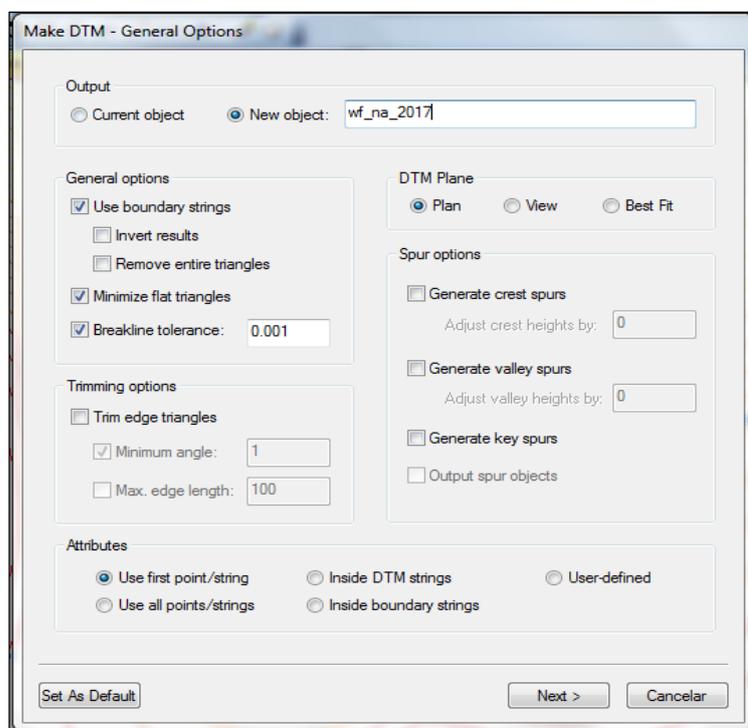


Figura 47 – Passo para geração da superfície do NA atual.

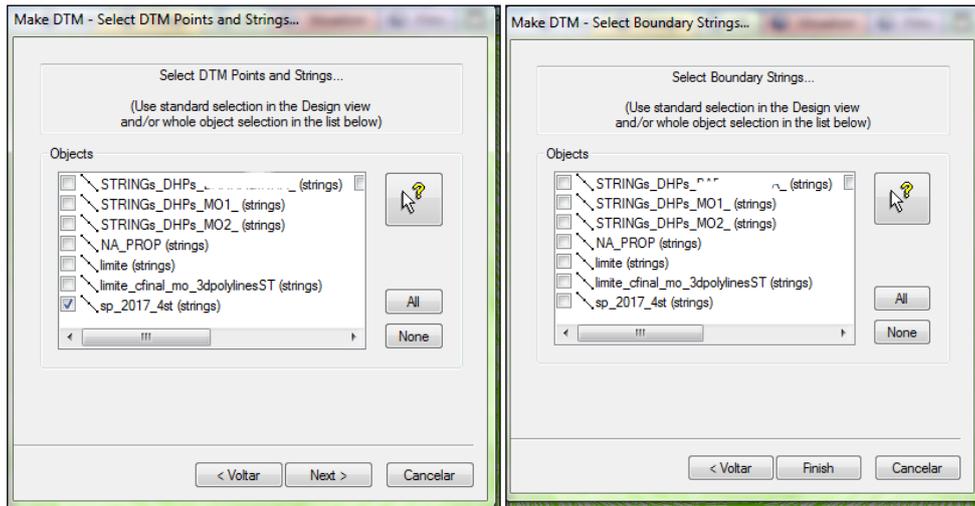


Figura 48 – Escolha do arquivo em forma de linhas (*string*) para geração da superfície do NA atual.

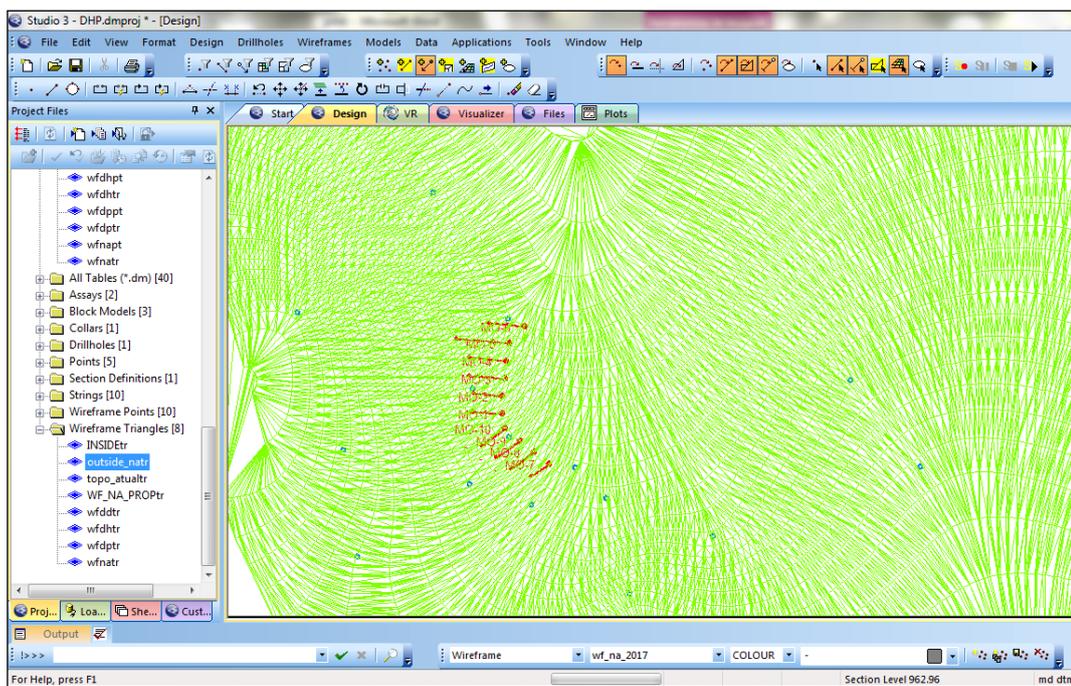


Figura 49 – Vista da superfície interpolada do NA atual - superfície.

Para conseguir visualizar a superfície na tela, é preciso alterar as configurações deste arquivo para formato 3D. A Figura 50 mostra as *wireframes* do NA atual e da topografia em 3D juntamente com os DHP's locados na área de estudo da mina.

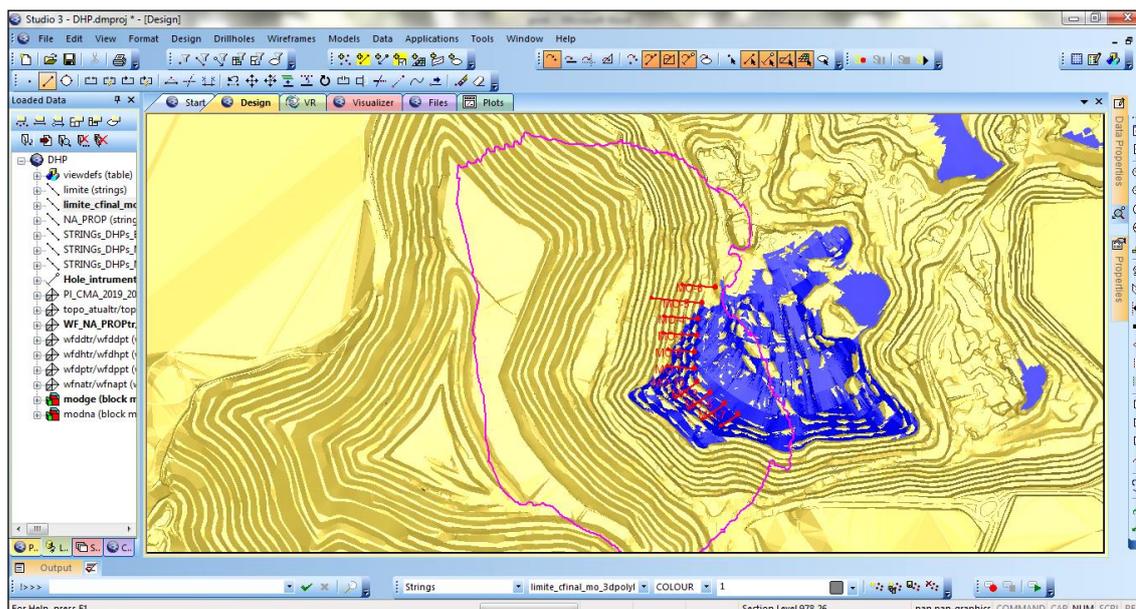


Figura 50 – Vista da superfície topográfica e NA em 3D com os DHP's locados na mina.

A Figura 51 mostra uma seção leste-oeste onde é possível observar a superfície topográfica, o NA atual, um INA, e um dos DHP's propostos.

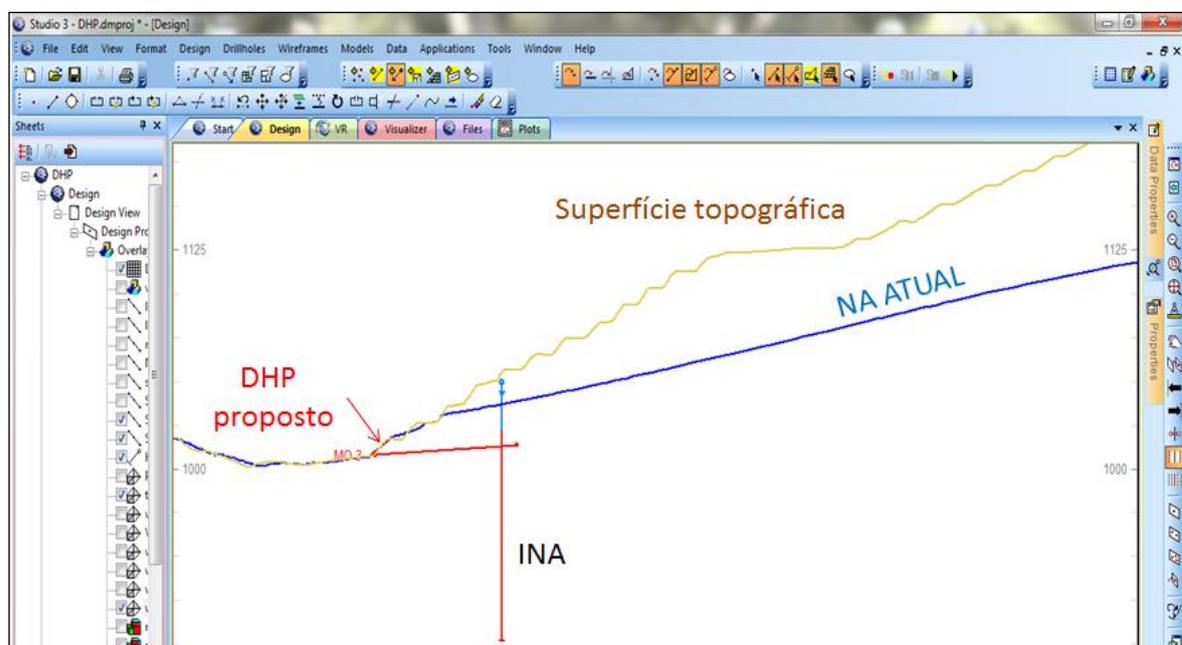


Figura 51 – Seção com o NA atual e a proposta do DHP.

Os DHP's foram locados nos pés dos taludes, pois, como apresentado no item 2.6 deste trabalho, nessa posição eles são mais eficientes para o rebaixamento do NA. Em regiões onde se pretende evitar que ocorra surgências, o estudo foi

realizado considerando a litologia, zonas de minério e previsão do planejamento para avanço de lavra nos próximos 2 anos, sendo simulados 10 drenos com profundidade planejada de 80 a 100m para cada um deles. A Figura 52 mostra uma seção com as litologias e o modelo de blocos.

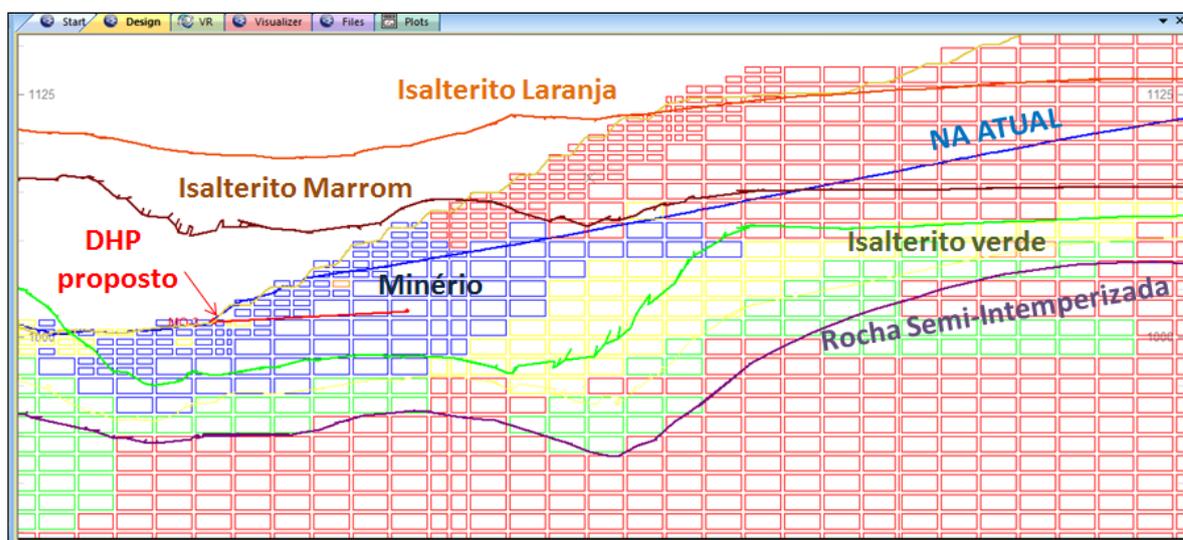


Figura 52 – Seção com litologias e modelo de blocos.

Para que se pudesse simular qual seria a massa efetiva de material que deixaria de ficar saturada com o NA, foi necessário obter a superfície do NA previsto após implantação dos DHP's. As *strings* representando o NA pós-operação dos DHP's foi desenhado em cada seção, tendo como referência os resultados alcançados em outros estudos, obtidos através da referência bibliográfica e simulações já apresentados neste trabalho (item 2.6). A Figura 53 mostra uma das seções que possuirá um DHP instalado, com a *string* desenhada representando o NA após a operação dos DHP's.

O NA inferido foi então transformado em uma superfície freática, conforme Figura 54.

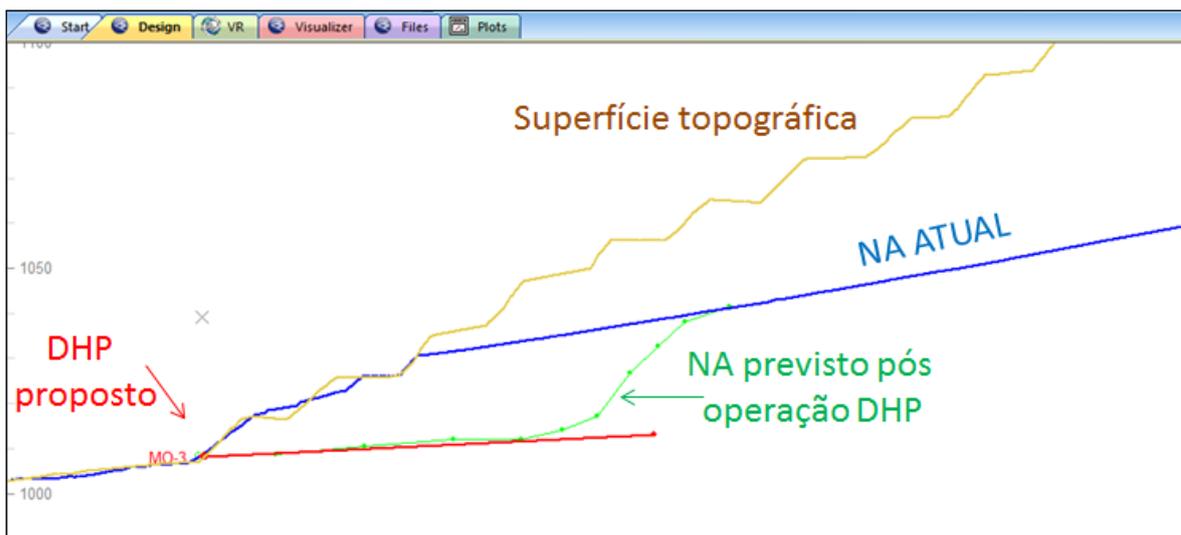


Figura 53 – Seção com o NA atual e previsto pós-operação do DHP's.

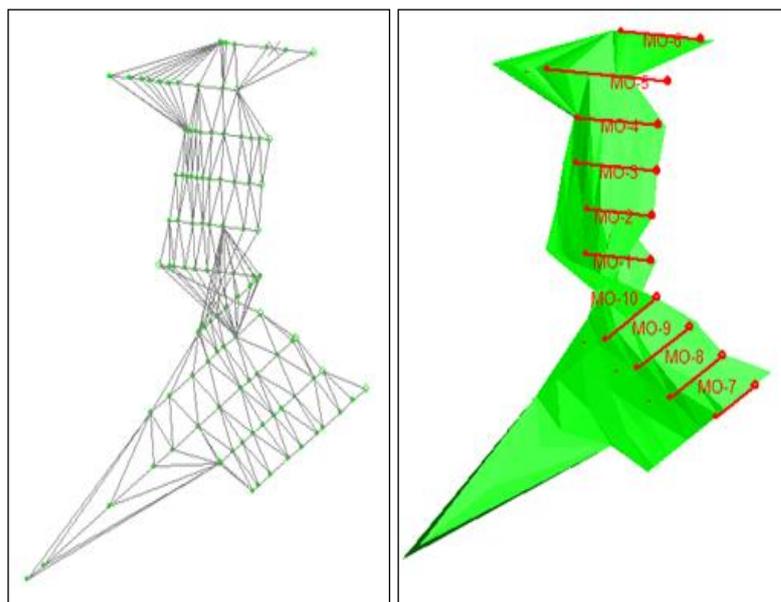


Figura 54 – Vista superior em forma normal e em 3D da superfície do NA inferido pós-operação dos DHP's

3.3 Cubagem entre superfícies

As superfícies de topo e base obtidas no item 3.2 correspondem respectivamente ao nível de água atual e ao nível de água previsto após a operação dos DHP's. Agora é possível calcular a massa de material liberado com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos, ou seja, a quantidade de material que não estaria mais com a água percolando diretamente nela.

O procedimento de cubagem (quantificação de massa) de material é constantemente realizado na empresa pelas equipes de geologia e planejamento. Estas equipes automatizaram esse procedimento rotineiro utilizando o software Datamine através de uma programação computacional (*script*). As principais funções nele executadas são *Selexy*, *Trifil*, *Addmod*, *Mgsort* e *Copy*.

A Figura 55 exibe a tela de interface do *script* para cubagem entre superfícies, onde os dados de entrada são: modelo de blocos, NA atual, NA previsto pós-operação dos DHP's e a delimitação da área de estudo.

The screenshot shows a software window titled 'PLANEJAMENTO DE MEDIO PRAZO' with a sub-header 'CUBAGEM ENTRE SUPERFÍCIES'. The interface includes several input fields and buttons:

- MODELO DE ENTRADA:** A dropdown menu with 'modge' selected.
- TOPOGRAFIA INICIAL [TR]:** A dropdown menu with 'wfnatr' selected.
- TOPOGRAFIA FINAL [TR]:** A dropdown menu with 'wfdtr' selected.
- LIMITE [ST]:** A dropdown menu with 'limite' selected.
- SUB-BLOCAGEM DESEJADA:** Three input fields for 'X', 'Y', and 'Z', each containing the value '1'.
- MODELO DE SAÍDA:** An empty dropdown menu.

At the bottom of the window, there is a navigation bar with four tabs: 'Project Files', 'Loaded Data', 'Sheets', and 'Customization'.

Figura 55 – Tela de interface do *script* para cubagem entre superfícies.

A Figura 56 mostra o material/minério contido entre as superfícies de NA.

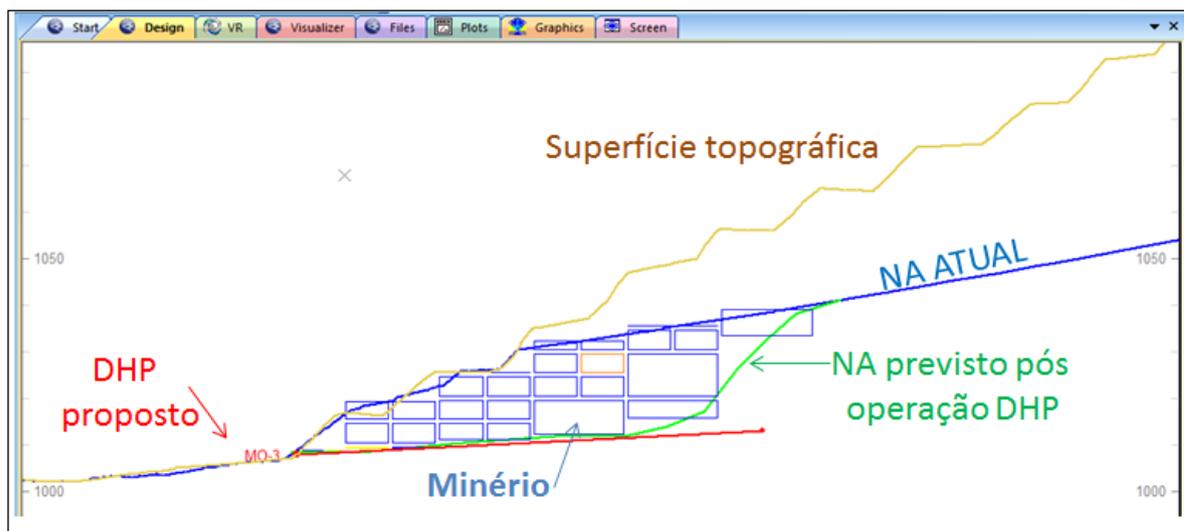


Figura 56 – Seção com a cubagem do material só entre as superfícies desejadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por se tratar de dados de uma empresa privada, não será possível apresentar os dados reais, devido à garantia de segurança da informação da empresa em estudo mediante ao acordo firmado para manter confidencialidade dos dados tratados. Diante desta situação serão apresentados apenas dados percentuais.

Da massa total contida entre as superfícies de NA atual e NA prevista pós-operação dos DHP's a massa que corresponde ao minério é de 81% do total. Toda esta massa entre esta superfície simulada tem previsão de ser lavrada nos próximos 2 anos.

O minério úmido causa mais transtornos operacionais que o estéril, porém ambos são transportados e impactam em termos de custos operacionais, pois é carregada massa de água ao invés de minério ou estéril. O material úmido também fica parcialmente retido nas caçambas dos caminhões gerando “carga morta”.

Uma importante observação é que para determinação do NA previsto pós-operação dos DHP's o dado simulado foi conservador se comparado às referências bibliográficas; sem extrapolação nenhuma abaixo do dreno, que em muitos dos casos estudados acontece. Outro fato importante é que as áreas acima do NA atual apresentam manchas de umidade, tecnicamente conhecida como franjas capilares, estas serão impactadas positivamente pelos DHP's reduzindo-se a umidade. Então a perspectiva é que se tenha na prática resultados ainda melhores já que estas massas não foram contempladas na simulação.

Diante do estudo já realizado na mina, e considerando as características do material, foi adotada para os cálculos uma estimativa de redução de umidade de 7,5% pós-instalação dos DHP's na massa de material contido entre as superfícies. Foram realizados os cálculos em termos financeiros, do quanto esta redução de umidade geraria, apenas em economia de transporte. O valor percentual encontrado

de economia apenas de transporte foi de 63,11% do valor do investimento do serviço da perfuração dos DHP's.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho conseguiu atingir os objetivos propostos que eram de simular a quantidade de material liberado com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos para a redução de umidade. Como também os específicos que são a definição da provável redução local do nível de água e a estimativa da economia com a redução de umidade proporcionada pelo sistema de DHP's.

A hipótese para a solução do problema de umidade na mina em estudo seria a utilização de um entre os demais métodos existentes para o efetivo de rebaixamento do nível d'água, sendo escolhido o método de perfuração de drenos horizontais profundos e este foi testado nas simulações e comprovado eficaz.

Apesar de não pagar efetivamente o investimento, o serviço foi considerado viável por ainda contemplar tantos outros fatores não mensuráveis financeiramente. E principalmente a possibilidade em ganhos no fator de segurança do talude, cujo ângulo de talude praticado poderia ser otimizado, liberando-se mais minério com menor retirada de estéril.

Este trabalho conseguiu atender as necessidades da empresa para justificar o investimento, e após a execução e operação dos DHP's serão tratados os dados reais de nível de água para se ter os verdadeiros ganhos. Espera-se principalmente que diminuam os impactos operacionais tais como rompimento de taludes, alto fator caçamba, obstrução de equipamentos, diminuição da alimentação da britagem e paradas operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUD, M. C. et al. **Operação e manutenção de poços de rebaixamento em mina a céu aberto, um estudo de caso do Complexo Mineraloquímico de Araxá-MG da Vale Fertilizantes.** XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Belo Horizonte: ABAS. 2014. p. 18.

ACUACLUB. NIVEL PIEZOMÉTRICO. Disponível em: <<https://acuclub.wikispaces.com/NIVEL+PIEZOM%C3%89TRICO>>. Acesso em: 2016 novembro 02.

ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos.** São Paulo: Oficina de textos, 2007.

AMARAL, A. E.; BOITRAGO, E. J. **Projeto água limpa - A gestão hídrica e o seu estudo hidrogeológico no desaguamento da mina subterrânea.** XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Campinas: ABS. 2016. p. 8.

AZEVEDO, A. A.; FILHO, J. L. A. Águas Subterrâneas. In: OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 8, p. 111-130.

BARCELOS, C. V. et al. **O uso de drenos horizontais profundos e a estabilidade de taludes.** XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Bonito: ABAS. 2012. p. 4.

BASTOS, I. G. **Estabilização de encostas através de drenagem profunda: estudo de um caso de estabilização com túnel de drenagem.** USP. São Paulo. 2006.

BERTACHINI, A. C.; ALMEIDA, D. C. **O rebaixamento do nível d'água em mineração e obras civis.** Anais: I Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. São Paulo: ABAS. 2003. p. 19-28.

BRITO, S. **Os Taludes da Mineração: Importância e Riscos.** 14º Congresso Brasileiro de Mineração. Belo Horizonte: BVP Engenharia. 2011. p. 78.

CABRAL, J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C., et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 2.2, p. 77-91.

CEMBRANELLI, S. B. F.; REIS, R. C.; VEIGA, D. C. **Relatório de visita técnica.** Fosfertil. Nova Lima e Mariana, p. 4. 2009.

CHIZZOTTI, A. Estudo de Caso. In: _____ **Pesquisa qualitativa em ciências humanas e sociais.** Petrópolis: Vozes, 2006. Cap. 5, p. 135-142.

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas.** Tampa: Clean Environment Brasil, 2007.

CORRÊA, R. A. **Estudo de rebaixamento do lençol d'água em arenito para implantação de estruturas de PCH's.** UFRJ. Rio de Janeiro, p. 122. 2006.

DATAMINE. **Studio 3 - Manual Introdutório de Treinamento para Desenho de Cava a Céu Aberto.** Datamine Software Brasil. Nova Lima.

DOBEREINER, L.; VAZ, L. F. Tratamento de Maciços Naturais. In: OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 22, p. 361-380.

EDWARD E. JOHNSON, I. Origem, ocorrência e movimento da água subterrânea. In: _____ **Água subterrânea e poços tubulares.** Tradução de Ildefonso C. Puppi. 3. ed. São Paulo: CETESB, 1978. Cap. 2, p. 13-44.

FETTER, C. W. Properties of Aquifers. In: _____ **Applied Hydrogeology.** 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. Cap. 3, p. 66-112.

FILHO, J. M. Evolução histórica do conhecimento. In: FEITOSA, A. C., et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 1.1.

FILHO, J. M. Ocorrência de águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C., et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 2.1, p. 53-75.

GARCIA, J. R.; ALBUQUERQUE, P. J. R.; NARESI JUNIOR, L. Estaca Raiz e Serviços Especiais DHP - (Dreno Horizontal Profundo). **Fundações e Obras Geotécnicas,** p. 78-83, Novembro 2013.

HORTA, F. et al. **Utilização de DHPs na despressurização, otimização e segurança dos taludes de mineração.** Vale. [S.l.], p. 26.

IMAGEM. Imagem. **Imagem Esri Oficial Distributor**, 2017. Disponível em: <<http://www.img.com.br/>>. Acesso em: 20 junho 2017.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**. 2. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2009. 104 p. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/cart_AG_SB.pdf>.

KRYNINE, D. P.; JUDD,. Engenharia geotécnica - uma perspectiva histórica. In: _____ **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução de Braja M DAS. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Cap. 1, p. 1-10.

KRYNINE, D. P.; JUDD,. Estabilidade de Taludes. In: _____ **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução de Braja M DAS. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Cap. 14, p. 430-487.

MACEDO, L. G. M. et al. **Alocação de poços de rebaixamento um estudo de caso no complexo de mineração de Tapira da Vale Fertilizantes**. XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Belo Horizonte: ABAS. 2014. p. 9.

MACEDO, L. G. M. et al. **Geoestatística aplicada a Hidrogeologia para confecção de mapas potenciométricos**. XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Belo Horizonte: ABAS. 2014. p. 12.

MACIEL, V. M. et al. **Proposta de utilização de ponteiros drenantes para redução de umidade em frentes de lavra - um estudo de caso da Mina do Barreiro - Araxá - MG**. XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Campinas: ABAS. 2016. p. 1-18.

MARANGON, M. **Rebaixamento do Lençol Freático**. UFJF. Juiz de Fora.

MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. Pesquisa de Campo. In: _____ **Técnicas de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002. Cap. 3.3.1, p. 83-87.

MASSAD, F. Percolação de água em obras de terra. In: _____ **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. Cap. 1, p. 13-40.

MÜLLER, M. C. N. **Rebaixamento Lençol Freático: indicações, métodos e impactos decorrentes**. Universidade Anhembí Morumbi. São Paulo. 2004.

PINTO, S. A água no solo. In: _____ **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. Cap. 6, p. 113-142.

POHLL, G. M. et al. **Design Guidelines for Horizontal Drains used for Slope Stabilization**. Olympia: Washington State Department of Transportation, 2013.

PUC-RJ. Elementos Drenantes em Solos. **Maxwell**, Rio de Janeiro, p. 9. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4301/4301_3.PDF>. Acesso em: 30 outubro 2016.

RANGEL, L. **Relatório interno de projeto hidrogeológico de drenagem da mina utilizando drenos horizontais**. Araxá. 2011.

REIS, R. C. **Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira-MG**. UFOP. Ouro Preto, p. 145. 2010.

SILVA, M. V. A. et al. **Estimativa do raio de influência dos poços de rebaixamento da Mina F4 e sua área de interferência, Complexo Mineralógico de Araxá, Vale Fertilizantes**. XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Campinas: [s.n.]. 2016. p. 8.

SOUZA, J. C. S. **Treinamento Projeto, Construção, Operação e Manutenção de Poços Tubulares**. Simanke Consultoria. Araxá. 2014.

TECPER. **Utilização de DHPs na despressurização, otimização e segurança dos taludes de mineração**. TECPER Fundações e Geotecnia. [S.I.], p. 22.

UNESCO. **Ground Water. Environment and Development**. Tradução de DRM/RJ. [S.I.]: Briefs No 2, 1992. Disponível em: <<http://www.drm.rj.gov.br/index.php/areas-de-atuacao/3-aguassubterraneas>>. Acesso em: 12 Outubro 2016.

VALEC. Drenagem superficial e proteção contra erosão. **VALEC - Engenharia, Construções e Ferrovias S.A.**, 2014. Disponível em: <http://www.valec.gov.br/documentos/normativos_tecnicos/normas_ambientais/Drenagem%20superficial%20e%20prote%C3%A7%C3%A3o%20contra%20eros%C3%A3o%20-%20NAVA%20-%2019%20Rev0.pdf>. Acesso em: 10 Fevereiro 2017.

WREGGE, M. Termos Hidrogeológicos Básicos. **CPRM**, 2016. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Termos-Hidrogeologicos-Basicos-631.html>>. Acesso em: 9 Setembro 2016.

ZANARDO, F. **Análise de Estabilidade de Taludes de Escavação em Mina de Bauxita**. UNIFAL. Poços de Caldas, p. 38. 2014.