

Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus de Poços de Caldas
Curso de Especialização em Engenharia de Mineral (CEEM)

Thomás Cozer Araujo

Influência do planejamento de mina na dinâmica de transporte de ROM

Poços de Caldas

2023

Thomás Cozer Araujo

Influência do planejamento de mina na dinâmica de transporte de ROM

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Giorgio di Tomi

Poços de Caldas

2023



Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Araujo, Thomás Cozer.

Influência do planejamento de mina na dinâmica de transporte de ROM /
Thomás Cozer Araujo. - Poços de Caldas, MG, 2023.

61 f. : il. -

Orientador(a): Giorgio de Tomi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de
Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Custos. 2. ESG. 3. Planejamento. 4. Pedreira. 5. Transporte de ROM. I.
Tomi, Giorgio de, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas
Rodovia Eng. Nivaldo Vilas, nº 11.908 - Cidade Universitária
CEP: 37704-400 - Poços de Caldas (MG)



Thomás Cozer Araujo

Influência do planejamento de mina na dinâmica de transporte de ROM

A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra de Minas

Aprovada em: 31 de outubro de 2023

Orientador: Prof. Giorgio de Tomi

Instituição: Escola Politécnica da USP

Assinatura:

Examinador 1: Eng. Rafael Araoz Human

Instituição: Escola Politécnica da USP

Assinatura:

Examinador 2: Prof. Edmo Rodovalho da Cunha

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:



“Boa sorte é o que acontece quando a oportunidade encontra o planejamento.” (Thomas Edison)



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do empreendimento	13
Figura 2: Custos operacionais de lavra de mina a céu aberto	15
Figura 3 - Desenvolvimento da mina em 2004.....	17
Figura 4 - Desenvolvimento da mina em 2010.....	18
Figura 5 - Desenvolvimento da mina em 2014.....	19
Figura 6 - Desenvolvimento da mina em 2015 (primeiro semestre).....	20
Figura 7 - Desenvolvimento da mina em 2015 (segundo semestre).....	21
Figura 8 - Desenvolvimento da mina em 2016.....	22
Figura 9 - Desenvolvimento da mina em 2017.....	23
Figura 10 - Desenvolvimento da mina em 2018	24
Figura 11 - Desenvolvimento da mina em 2019.....	25
Figura 12 - Desenvolvimento da mina em 2020	26
Figura 13 - Desenvolvimento da mina em 2021	27
Figura 14 - Desenvolvimento da mina em 2022	28
Figura 15 - Desenvolvimento da mina em 2023	29
Figura 16: Inclinação Longitudinal.....	31
Figura 17 - Relação da velocidade do caminhão em função da resistência ao rolamento.....	33
Figura 18: Seção de geofísica, linha 1.	35
Figura 19: Diagrama de metodologia	38
Figura 20 - Velocidades por trecho da via de acesso	42
Figura 21: Material lançado ao fundo da cava	45
Figura 22: Linhas de geofísica	47
Figura 23: Seções de geofísicas georreferenciadas, vista noroeste isométrica.....	48
Figura 24: Modelo de blocos completo, vista noroeste isométrica	49

Figura 25: Mapa de restrições de avanço da cava.....	50
Figura 26: Modelo de blocos real, vista noroeste isométrica	51
Figura 27: Modelo de blocos real com estéril, vista nordeste isométrica e vista leste	52
Figura 28: Strings de pit design, vista nordeste isométrica e vista leste.....	54
Figura 29: Superfície de cava final, vista nordeste isométrica e vista leste	55
Figura 30: Cava final após operação booleana, vista superior e vista sudoeste isométrica	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Segmentação da via de acesso principal	43
Tabela 2: Tempo de ascensão da rampa	43
Tabela 3: Faturamento perdido	44
Tabela 4: Custo extra de diesel	44
Tabela 5: Cálculo do material lançado ao fundo da cava por desmontes.....	45
Tabela 6: Custo extra de diesel do material lançado para baixo	46
Tabela 7: Dados de entrada para Pit Design.....	53
Tabela 8: Cálculo do valor total.....	57
Tabela 9: Cubagem.....	58

LISTA DE EQUAÇÃO

$V_y = V_o * \sin\theta$ Equação 1: Cálculo da velocidade vertical	41
--	----

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	12
INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
OBJETIVO	16
Objetivo geral	16
Objetivos específicos.....	16
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
Cronologia do desenvolvimento da mina.....	17
Condições de acesso à mina	29
Modelo de transporte da mina	32
Prospecção mineral: Geofísica	33
Projeto de cava final.....	35
Custo atrelado às infraestruturas	36
METODOLOGIA.....	38
RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
Cálculos de perda de produção	41
Design de Cava com Micromine.....	46
CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	59
ANEXO A – Seções de geofísica	63

RESUMO

O presente estudo foi desenvolvido em uma pedreira localizada no interior de São Paulo e busca evidenciar a importância do planejamento de mina nos custos de uma empresa, com foco na etapa de transporte de ROM, para isso, são abordadas questões de pesquisa mineral no formato de sondagem e geofísica, fatores de ESG para construir o limite final da cava, visto que a mina se localiza próxima de um bairro e APP, software de planejamento (Micromine) para realizar a construção e estudo palpável da cava final, análise cronológica do desenvolvimento da mina, onde foi identificado desde a abertura da mina como foram conduzidas as operações, medições em campo para definir velocidades médias em cada trecho da via de acesso principal e desenvolvimentos futuros da mina. Foram apresentados também durante a revisão bibliográfica diversas boas práticas do mercado dos assuntos tratados no projeto. Com tais dados foi possível estimar o prejuízo causado pela falta de planejamento da pedreira, atrelados ao baixo conhecimento geológico e aberturas de rampas inadequadas, resultando em uma somatória de R\$ 9.290.636,13, sendo esta apenas uma parte do total presumível. Por fim, através do Micromine, foi possível gerar a cava final que abrange todo o minério e com rampas suaves, possibilitando melhor escoamento da produção.

Palavras-chave: Custos, ESG, MicroMine, planejamento, pedreira, transporte de ROM

ABSTRACT

The present study was developed in a quarry located in the interior of São Paulo and seeks to highlight the importance of mine planning in a company's costs, focusing on the ROM transport stage. For this purpose, mineral research issues are addressed in the format of surveying and geophysics, ESG factors to build the final limit of the pit, since the mine is located close to a neighborhood and APP, planning software (Micromine) to carry out the construction and tangible study of the final pit, chronological analysis of the development of the pit mine, where it was identified since the opening of the mine how operations were conducted, field measurements to define average speeds in each section of the main access road and future developments of the mine. Several good market practices on the topics covered in the project were also presented during the bibliographic review. With such data, it was possible to estimate the damage caused by the lack of quarry planning, linked to poor geological knowledge and inadequate ramp openings, resulting in a sum of R\$ 9,290,636.13, this being only a part of the presumed total. Finally, through Micromine, it was possible to generate the final pit that covers the entire ore and with smooth ramps, enabling better production flow.

Keywords: Costs, ESG, MicroMine, planning, quarry, ROM transport

INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O estudo em questão foi desenvolvido em uma mineradora de basalto localizada no município de Nova Odessa – São Paulo, conforme Figura 1 abaixo:

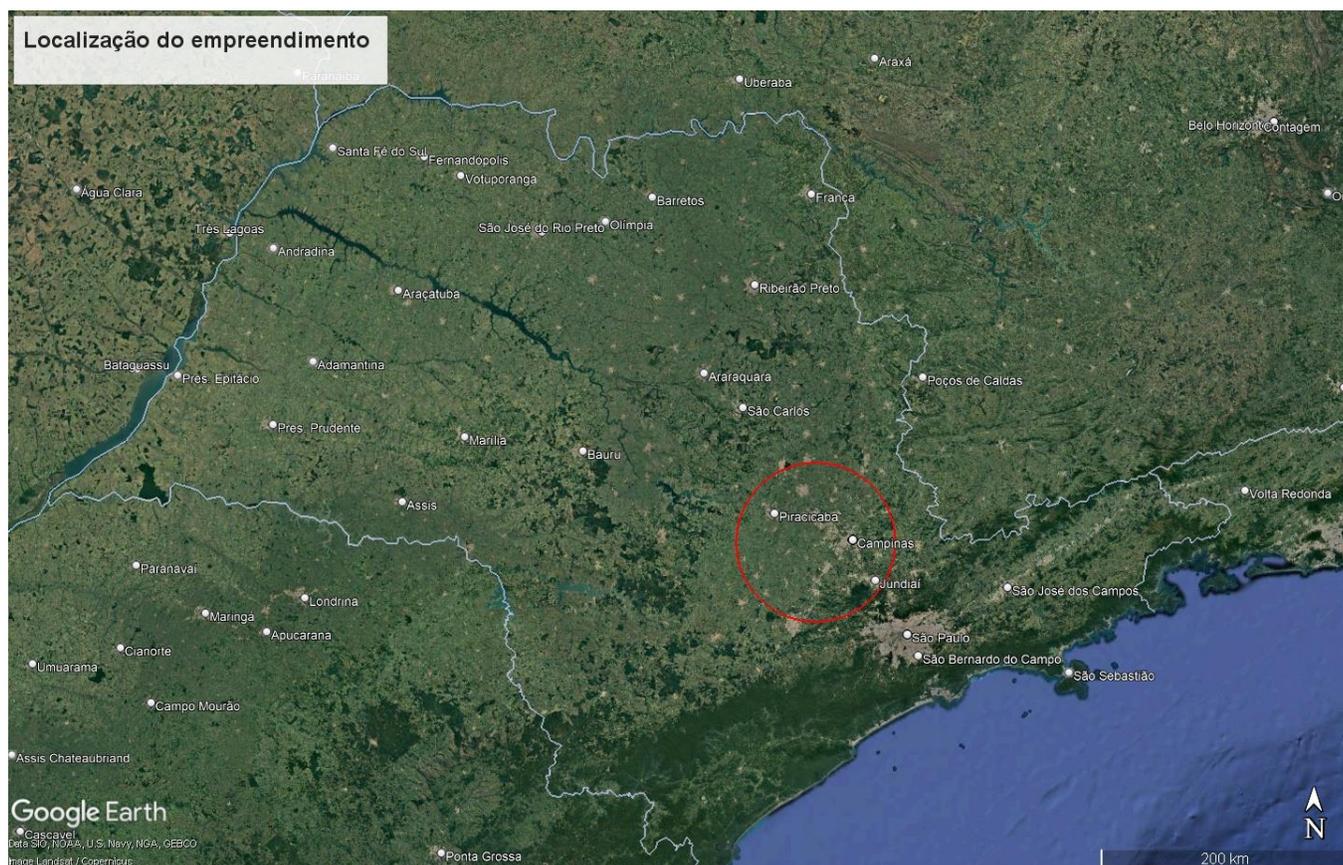


Figura 1 - Localização do empreendimento

Fonte: Autor

A insuficiência de informações geológicas é uma das principais características da mineração em pequena escala (MPE). Ao analisar diferentes características das pequenas minerações, a falta de conhecimento da jazida é um fator substancial para a geração de planejamento sem consistência, ocasionando uma lavra ineficiente do material (DNPM, 2010).

De acordo com Hentschel et al. (2002), a carência de capital de investimento na etapa de exploração na MPE é uma das principais causas do aproveitamento mineral ineficiente, pois ao

iniciar a lavra sem planejamento de longo prazo, logo as dificuldades técnicas começam a assomar.

Hruschka e Echavarria (2011) relatam que é nessa etapa que surgem os inúmeros desafios para MPE, que, geralmente são negligenciados devido à insuficiência de capital, sendo necessário intervenções mais custosas ao longo da vida da mina para resolver os problemas.

O planejamento de lavra tem como objetivo reduzir os custos e potencializar a lucratividade no projeto final do empreendimento (Hustrulid, Kuchta, 2013 apud Martins, 2017).

Uma das metas do planejamento estratégico dentro de um empreendimento mineiro é diminuir os riscos e maximizar os ganhos e seu desenvolvimento deve estender-se durante todas as atividades da mina até o seu fechamento (Freitas, 2015 apud Martins, 2017)

Silva (2008) reforça que para se atingir um resultado eficiente do planejamento de lavra é de fundamental importância de se alcançar o maior nível de conhecimento da jazida para conseguir um bom retorno do investimento aplicado, sendo possível planejar os avanços da mina de forma clara e objetiva.

Dessa forma é evidente que a utilização do planejamento de lavra como ferramenta é de fundamental importância para o empreendimento mineiro e que para a sua realização é necessário o conhecimento preliminar do depósito na fase de pesquisa (Martins, 2017).

"A etapa de sequenciamento é parte integral do processo de otimização da mina, permitindo o melhor controle das restrições econômicas, geométricas, técnicas e ambientais[...]" (SILVA, 2008, p.61).

Segundo Achireko (1998), a otimização da cava é valioso, pois acarreta informações importantes para a avaliação econômica do depósito mineral, além de possibilitar a projeção para o desenvolvimento dos planos de longo, médio e curto prazos.

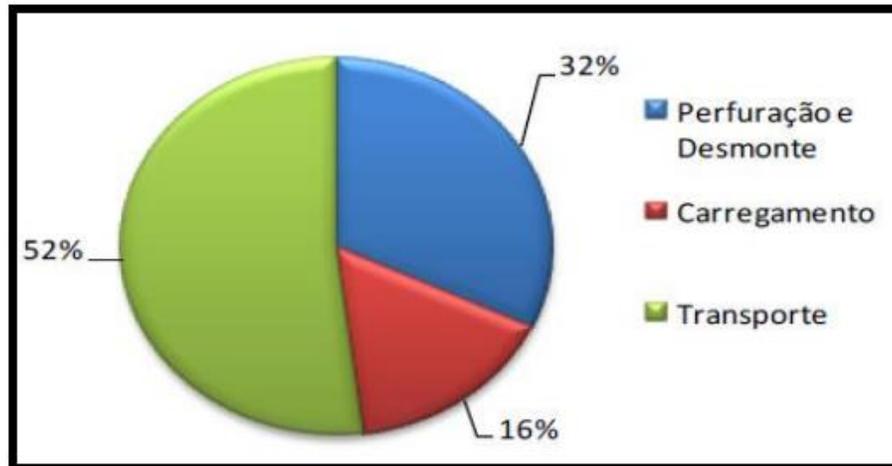


Figura 2: Custos operacionais de lavra de mina a céu aberto

Fonte: Lopes (2010)

Lopes (2010) diz que a maioria das minas que operam pelo método convencional de lavra, utilizando caminhões para levar material, tem a composição de seus custos de lavra divididos conforme Figura 2, onde observa-se que a maior parte dos custos (52%) é ocupada pelo gasto com o transporte. Tal fato permite a possibilidade de consideráveis reduções de custo em função de boas práticas adotadas durante a operação.

Dessa forma, nota-se a interligação entre as etapas da mineração. A pesquisa geológica pode afetar o planejamento das operações, que conseqüentemente pode afetar a movimentação de Run-of-Mine (ROM) da mina, causando grandes prejuízos para a mineradora.

OBJETIVO

Objetivo geral

Demonstrar que o adequado planejamento de mina pode promover economia e segurança em uma pedreira.

Objetivos específicos

- Realizar estudo cronológico para se obter conhecimento a respeito do sequenciamento empregado na mina;
- Realizar levantamento de campo a respeito da velocidade média dos caminhões fora de estrada frente às diferentes inclinações durante o trajeto de transporte do ROM;
- Demonstrar as vantagens de se ter rampas com inclinações dentro do recomendado por especialistas;
- Calcular a massa de minério que foi retirada após a construção da rampa com inclinação acima do recomendado, para calcular a perda de produção;
- Realizar levantamento do custo de realocação de infraestrutura em função do avanço da lavra;
- Verificar a possibilidade de utilizar a geofísica como método indireto para prospecção mineral;
- Modelar o corpo geológico da área de estudo, diferenciando solo, basalto, arenito e compor a topografia do local;
- Propor a cava ótima respeitando os limites e boas práticas quanto às vias de acesso, através do software Micromine.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cronologia do desenvolvimento da mina

A Figura 3 abaixo evidencia como era o local que futuramente seria instalada a pedreira. O solo era utilizado no cultivo de soja em sua totalidade. Ao Norte existe um pequeno lago, onde foi possível notar o afloramento de rocha basáltica.

É possível observar também que o local em questão já está provido de uma planta de britagem e algumas infraestruturas, como oficina, refeitório e expedição, visto que a empresa já teria em operação uma outra cava próxima.



Figura 3 - Desenvolvimento da mina em 2004

Fonte: Google Earth (2023)

De acordo com a Figura 4, em 2004 começaram as primeiras obras de decapeamento, a fim de retirar a camada de solo que recobre a rocha e torna exposta a porção de interesse naquele momento.



Figura 4 - Desenvolvimento da mina em 2010

Fonte: Google Earth (2023)

Entre o período de 2010 a 2014, a Figura 5 expõe que houve significativo avanço na etapa de retirada de estéril e início do desenvolvimento da primeira e segunda bancada da pedreira, com DMT de aproximadamente 790m.



Figura 5 - Desenvolvimento da mina em 2014

Fonte: Google Earth (2023)

Em 2015, a Figura 6 demonstra que houve continuidade nos trabalhos de decapeamento e avanço tanto no Banco 1, quanto no Banco 2.

Em função do desenvolvimento da lavra houve necessidade do deslocamento do caminho utilizado para escoar o material desmontado até a britagem primária, resultando em um DMT de 950m nesse período.

Os avanços da remoção de estéril indicavam a continuidade da rocha até muito próxima de estruturas previamente existentes naquele local, como por exemplo o refeitório e escritório, que teve sua remoção e foi construído novamente em novo espaço que estivesse desprovido de rocha no subsolo.



Figura 6 - Desenvolvimento da mina em 2015 (primeiro semestre)

Fonte: Google Earth (2023)

No segundo semestre de 2015, foram realizados desmontes em Banco 1 e Banco 2 a fim de se conformar uma nova rampa de acesso que diminuiria significativamente a distância percorrida pelos caminhões fora de estrada durante o transporte de material. De acordo com a Figura 7, essa redução foi de 65% no trajeto total, resultando em uma nova DMT de 330m.

A estrada foi conformada utilizando material desmontado, movido com escavadeira para atingir a inclinação necessária e posteriormente forrado com bica para evitar corte em pneus. A inclinação final dessa rampa é de 18,4%, sendo 24 metros de desnível a serem superados em 130m de rampa.



Figura 7 - Desenvolvimento da mina em 2015 (segundo semestre)

Fonte: Google Earth (2023)

A Figura 8 mostra que em 2016 a antiga estrada já está desativada e no local desta houve avanço no decapeamento, resultando em mais rocha exposta pronta para produção.



Figura 8 - Desenvolvimento da mina em 2016

Fonte: Google Earth (2023)

A Figura 9 comprova que em 2017 deu-se início na abertura do banco 3. A partir desse ponto podemos notar nas Figuras 10, 11, 12 e 13 que não houve grandes alterações no desenvolvimento da mina, como atividades de decapeamento ou abertura/reconformação de novos acessos, apenas o contínuo aprofundamento da mesma.



Figura 9 - Desenvolvimento da mina em 2017

Fonte: Google Earth (2023)



Figura 10 - Desenvolvimento da mina em 2018

Fonte: Google Earth (2023)



Figura 11 - Desenvolvimento da mina em 2019

Fonte: Google Earth (2023)



Figura 12 - Desenvolvimento da mina em 2020

Fonte: Google Earth (2023)



Figura 13 - Desenvolvimento da mina em 2021

Fonte: Google Earth (2023)

A Figura 14 evidencia um desenvolvimento delicado que foi planejado e conduzido em 2022 no talude Noroeste da pedreira.

Até então existia uma grande berma que seria utilizada para realizar uma estrada com inclinação menor em relação à que vinha sendo utilizada na mina, o fato é que em dado momento, foi calculado que esse novo acesso para se tornar viável teria que ter inclinação semelhante ao que já estava aberto, tornando inviável essa operação.

Foram realizadas detonações a fim da retirada desse material estagnado, composto pelos bancos 3, 4, 5 e 6. Por ser um desenvolvimento fora da ordem ideal de produção, trouxe alguns desafios em relação à segurança e custo da operação, devido ao espaço restrito, a questão de manobra dos caminhões foi delicada e despendia maiores tempos para serem realizada, o que geraria um impacto na produção diária e conseqüentemente mensal.

Outro fator foi em relação ao lançamento do material desmontado. Como já havia bancadas inferiores desenvolvidas, em decorrência das detonações, fragmentos eram lançados ao fundo da cava, acarretando maior distância de transporte e tempo de operação.

Além disso, a perfuração deveria realizar fogos precisos, para garantir a continuidade da operação, uma vez que um sequenciamento incorreto dos polígonos poderia travar a continuidade dos trabalhos por algum tempo.



Figura 14 - Desenvolvimento da mina em 2022

Fonte: Google Earth (2023)

Na Figura 14 acima, nota-se que o banco 7 já está praticamente todo desenvolvido, sendo finalizado em 2023, de acordo com a Figura 15.



Figura 15 - Desenvolvimento da mina em 2023

Fonte: Google Earth (2023)

Condições de acesso à mina

Os acessos de mina foram considerados por muito tempo de baixa relevância dentro da atividade de mineração. Porém, hoje as estradas vêm ganhando cada vez mais destaque no setor mineral, com estudos para avaliar a influência destas no custo operacional, na saúde e segurança dos colaboradores, e impacto na produtividade dos equipamentos, que afetam diretamente o lucro da empresa (REIS, 2014 apud SANTOS, 2022).

As vias são responsáveis pelo desenvolvimento e sequenciamento das frentes de lavra, sendo o principal componente para possibilitar as operações em uma mina, pois todo fluxo de veículos e equipamentos para movimentação de massa na mina transitam por elas. Em função disso, a falha na construção e gerenciamento das estradas de mina, podem ocasionar problemas que abrangem aos aspectos geométricos, estruturais, e funcionais, e tem ligação direta no

aumento dos custos operacionais e de eventos de segurança na mina (THOMPSON; VISSER, 2006 apud SANTOS, 2022)

As vias de acesso representam uma estrada não pavimentada e provocam um desafio muito grande para as áreas de operação, infraestrutura e planejamento de lavra, pois todo o escoamento da produção é realizado por elas. Com isso, projetos mal executados podem comprometer a segurança da operação, acarretar aumentos no custo de manutenção de equipamentos com a redução da vida útil de componentes, e consumo excessivo de combustível e pneus, e impactos socioambientais (SILVA, 2020 apud SANTOS, 2022).

De acordo com Coutinho (2017) a manutenção de acessos de mina é uma atividade essencial que deve ser realizada com objetivo de proporcionar maior segurança no tráfego de caminhões e menor custo com consumo de pneus e combustível.

A manutenção das vias pode reduzir impactos causados no corpo dos operadores, evitar desvios desnecessários por conta de inconformidades na pista, além de garantir a possibilidade de o equipamento desenvolver uma rota uniforme durante todo o percurso, sem aceleradas ou freadas bruscas.

Em estudo realizado por RODOVALHO (2016) foi analisada a influência do desempenho individual dos operadores no consumo de combustível. Pôde-se concluir que o fator humano não promove mudanças significantes no consumo de combustível, entretanto as condições de estrada da mina por onde trafegam os caminhões impactam diretamente no gasto com combustível, onde é possível a redução do custo desses equipamentos provendo estradas de melhor qualidade.

Em estudo econômico comparando o custo de utilização de equipamentos auxiliares como motoniveladoras, pás carregadeiras etc. com o ganho em redução de custo com pneus, o custo atrelado representa 5% em relação ao ganho gerado desse equipamento na melhoria das estradas. (CORRÊA, 2016), tornando viável o investimento nesse tipo de prática.

Na Figura 16 pode-se observar duas situações de construção de uma estrada, do lado esquerdo (incorreta) e do lado direito (correta). Na situação correta, foi respeitada a construção de um acesso com gradiente menor que 10% e constante em toda a sua extensão.

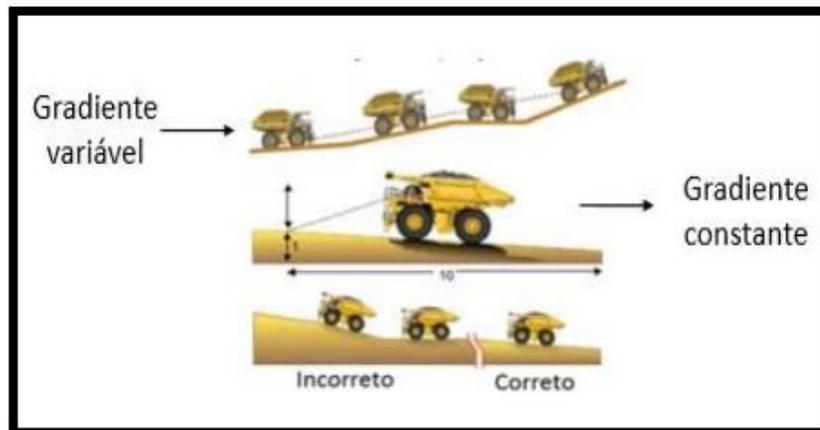


Figura 16: Inclinação Longitudinal

Fonte: Adaptado de Caterpillar (2009)

Na primeira situação o gradiente não foi respeitado, dado à má construção ou manutenção falha da estrada. A inclinação de uma estrada e sua devida conservação são itens que devem respeitar os limites operacionais pré-estabelecidos pelo fabricante dos equipamentos, devendo ser a menor possível para se evitar o gasto excessivo com combustível, pneus e peças do trem-de-força dos equipamentos (SOUSA JÚNIOR, 2012).

O gradiente de uma rampa de acesso é definido como a sua inclinação vertical em relação à horizontal, geralmente expressa em percentual. O gradiente deve ser o mais regular e constante possível, evitando-se que mude em intervalos curtos, para isso é importante avaliações regulares e intervenções assim que possível, a fim de garantir a qualidade para tráfego dos caminhões.

Gradientes irregulares provocam altos esforços no câmbio de transmissão, devido à troca recorrente das marchas, além da diminuição da velocidade dos equipamentos de transporte. Segundo KAUFMAN (1977), muitos operadores de caminhões analisaram que boas condições de operação são encontradas em rampas com inclinação máxima entre 7% e 9%. Porém, nos Estados Unidos, existem leis e regulamentos estabelecendo que 10% é a inclinação máxima permitida.

Thompson e Visser (2014) relatam que as inclinações longitudinais das estradas não devem ter mudanças repentinas, pois um gradiente constante evita mudanças abruptas de marcha que interferem na velocidade do caminhão. A inclinação longitudinal inconstante de uma rampa acarreta aumento de custo na manutenção dos equipamentos, perda de produtividade e redução no tempo de vida útil dos pneus, devido a cortes causados por materiais que

transbordam da caçamba dos caminhões, além do aumento na intervenção de manutenção na estrada.

Segundo Curi (2014) o aumento na distância média de transporte (DMT) em função do aprofundamento da mina, causa aumento no custo de lavra em consequência do aumento do custo de transporte. RIBEIRO (2013) pondera que o preço de óleo diesel é o que mais tem influência no aumento de custo operacional de lavra, por ser um bem utilizado por diversos equipamentos.

O aumento na DMT pode ser causado pela expansão superficial da mina também, caso seja necessário circundar o perímetro dela para chegar ao destino.

Modelo de transporte da mina

Na pedreira objeto de estudo, o transporte do material detonado é feito através de caminhões fora de estrada até o britador primário. O modelo dos caminhões utilizados na mina é da marca Caterpillar, modelo 770. Essas máquinas possuem 38 toneladas de capacidade nominal de transporte de acordo com o fornecedor.

A Figura 17 abaixo mostra a relação de velocidade desenvolvida em função da carga transportada e da resistência ao rolamento apresentado pela via, sendo função da qualidade da estrada, denominada de laminação e a inclinação dela.

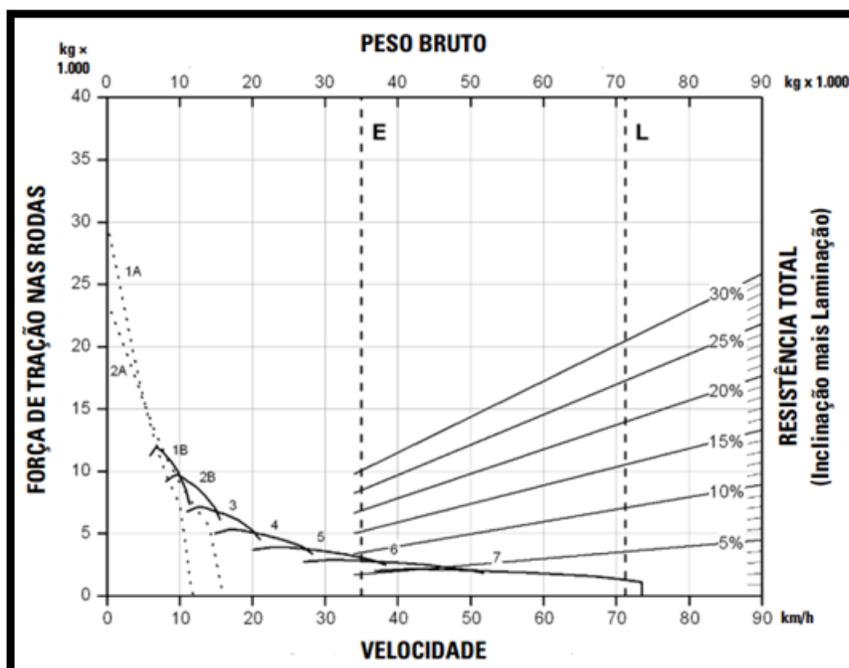


Figura 17 - Relação da velocidade do caminhão em função da resistência ao rolamento

Fonte: Caterpillar (2009)

Para as condições de tráfego da via classificadas como boa, regular e ruim, os coeficientes de resistência ao rolamento para o caminhão carregado assumem valores equivalentes a 0,97%, 1,36% e 1,65%, respectivamente (SILVA, 2019).

Prospecção mineral: Geofísica

De acordo com Luiz (2013), a geofísica de prospecção investiga os cinco primeiros quilômetros da crosta terrestre. Essa investigação é feita através da observação dos efeitos causados nos campos físicos e na propagação de ondas por variações de resistividade do meio.

As variações nas propriedades físicas estão relacionadas à concentração de ou às estruturas onde esses minerais se encontram.

Como a concentração dos minerais de minério é controlada por fenômenos geológicos, é possível, a partir do conhecimento desses fenômenos, estabelecer uma estratégia de prospecção com os métodos geofísicos mais indicados para a sua detecção (LUIZ, 2013).

A localização de depósitos de minerais-minério com metodologia geofísica depende basicamente da existência de contraste entre alguma propriedade física dos depósitos e o ambiente que o cerca (rochas encaixantes). A propriedade física de um depósito, por sua vez, está diretamente relacionada à propriedade física dos minerais presentes e ao seu volume (LUIZ, 2013).

De acordo com Milson (2003) o material a ser estudado, sua natureza e estado físico, diferentes valores do parâmetro resistividade elétrica são encontrados dependendo da dificuldade da corrente elétrica se propagar por este material. Fatores como textura, forma e distribuição dos poros no solo e na rocha, mineralogia, umidade, porosidade, líquidos e gases que preenchem os poros do solo e da rocha e processos que ocorrem na estrutura do solo e da rocha condicionam a resistividade dos materiais geológicos.

No estudo em questão, a intenção foi diferenciar rocha basáltica de arenito e solo. Tanto o arenito quanto o solo, por apresentarem maior porosidade em comparação ao basalto, espera-se que apresentem uma resistividade menor, enquanto o basalto tenha resistividades maiores.

A utilização de métodos eletromagnéticos no domínio do tempo está, de uma forma geral, direcionada para o estudo da prospecção mineira de depósitos minerais profundos, fornecendo bons resultados na determinação da sua geometria e desenvolvimento vertical e horizontal. Neste método, o campo primário é gerado em pulsos da ordem dos milissegundos, é posteriormente desligado e o campo secundário induzido no subsolo é então medido (LUIZ, 2013).

O ciclo, quer para a indução quer para a detecção do campo induzido, tornando os trabalhos de campo relativamente expeditos (Correia et al., 2010 apud Duarte, 2014). A geofísica torna-se viável para prospecção em grandes áreas, pois consegue abranger de forma prática todo o local estudado e direcionar melhor os trabalhos secundários de sondagem. Uma pesquisa mineral feita apenas por sondagem pode se tornar mais custosa, portanto, o ideal é minimizar o uso dessa ferramenta, quando possível.

A Figura 18 a seguir demonstra o resultado de uma seção de geofísica. As cores mais escuras como roxo e vermelho, indicam que a resistividade naquele local é elevada, da ordem de 5000 ohm.m, já cores mais claras como o azul, a resistividade fica em torno de 100 ohm.m.

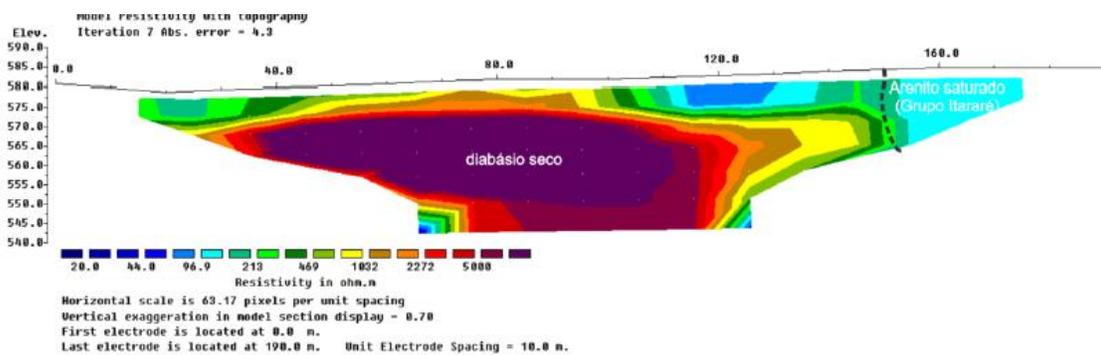


Figura 18: Seção de geofísica, linha 1.

Fonte: MOREIRA (2019)

Sendo assim, podemos concluir que altas resistividades representam o basalto sem a presença de água, já as baixas resistividades podem representar basaltos saturados e nas menores, pode-se concluir que seja arenito saturado, devida à baixíssima resistividade apresentada pelo meio.

A Figura 18 faz parte de um trabalho realizado por toda área da pedreira a fim de localizar a posição do corpo geológico de basalto, sendo que as outras seções estudadas foram alocadas no anexo deste trabalho.

Projeto de cava final

Os limites finais da cava definem o volume e a forma de uma mina a céu aberto no final de sua vida útil, buscando a maximização da riqueza futura. Esses contornos finais definem a extensão da reserva lavrável e a quantidade de material estéril a ser retirado, respeitando premissas de produção e segurança utilizadas no projeto. Normalmente, marcam a fronteira-limite, além da qual a exploração não será mais econômica. Os limites finais da cava delimitam uma fronteira, dentro da qual as estruturas de superfície da mina, tais como plantas de beneficiamento e escritórios, não devem ser posicionadas (Carmo & Curi, 2001).

Até a década de setenta, a otimização de cavas finais, na mineração, era feita pelo método manual, de tentativas. Segundo tal método, procurava-se chegar a uma cava que fosse econômica e, caso houvesse estéril dentro dessa cava além do admissível, a mesma deveria ser redesenhada, para se obter mais minério e menos estéril. Na medida do possível, a cava deveria ser ampliada em novas tentativas e, assim, sucessivamente, até se alcançar uma cava final satisfatória (Valente, 1982).

Existe uma dificuldade, comum a todos os algoritmos de otimização econômica de cavas finais de mineração. Essa dificuldade refere-se ao fato de os limites finais da cava não poderem ser determinados até que os valores econômicos dos blocos sejam conhecidos com maior precisão. Entretanto os valores econômicos dos blocos não podem ser conhecidos com precisão, até que a sequência de lavra seja especificada. Por sua vez, a sequência de lavra, eventualmente, não poderá ser especificada, até que os limites da cava sejam definidos. Trata-se de um problema recorrente que precisa ser bem equacionado (Carmo et al, 2006).

Otimização é uma palavra que vem sendo gradualmente aceita para descrever o conjunto de técnicas que introduzem modelos matemáticos analíticos nas atividades de planejamento de mina. Entretanto o significado de otimizar, ou melhorar algo, é relativo.

É impossível obter-se unanimidade sobre o melhor plano de exaustão de uma dada mina, frente aos diferentes pontos de vista que podem surgir durante uma análise. Para isto seria necessário o consenso entre profissionais de diversas áreas. Em termos da modelagem da mina, a maior atenção tem-se concentrado em delinear o limite final da cava, porque este tem demonstrado ser o problema menos complexo. Frequentemente, o problema mais crítico a ser resolvido corresponde ao sequenciamento da lavra, ou seja, como programar a produção em relação ao tempo (Carmo & Curi, 2001).

A complexidade do sequenciamento está atrelada a ocorrências operacionais da mina no dia a dia que são impossíveis de serem previstas em planos de longo prazo. Outro fator que traz constante instabilidade para o sequenciamento é o próprio mercado do produto, que por vezes pode apresentar preços mais atrativos, possibilitando a lavra de blocos mais pobres, porém em outras não.

Custo atrelado às infraestruturas

Durante a vida útil da mina algumas estruturas precisaram/precisarão ser reconstruídas em locais com ausência de minério no subsolo, portanto a empresa terá um custo com essa realocação.

Através de pesquisas internas com os responsáveis por orçamentos foi possível obter uma estimativa do custo atrelado a cada obra.

Em 2014 o refeitório foi realocado, já o escritório que ali havia foi demolido, mas não foi reconstruído, em função de ser de outra empresa que passou a não ter mais negócios no local.

Para futuros avanços da mina, o posto de combustível deverá ser removido com um custo aproximado de R\$ 200.000,00. A oficina terá um custo aproximado de R\$ 3.000.000,00 e o poço de água em torno de 150 mil reais.

Em 2015 a nova rampa conformada com material desmontado teve um custo aproximado de 120 mil reais, em valores atuais, somando-se custo com explosivo e diesel das máquinas para conformar o acesso.

METODOLOGIA

A metodologia do trabalho se desenvolveu conforme a Figura 19 a seguir:

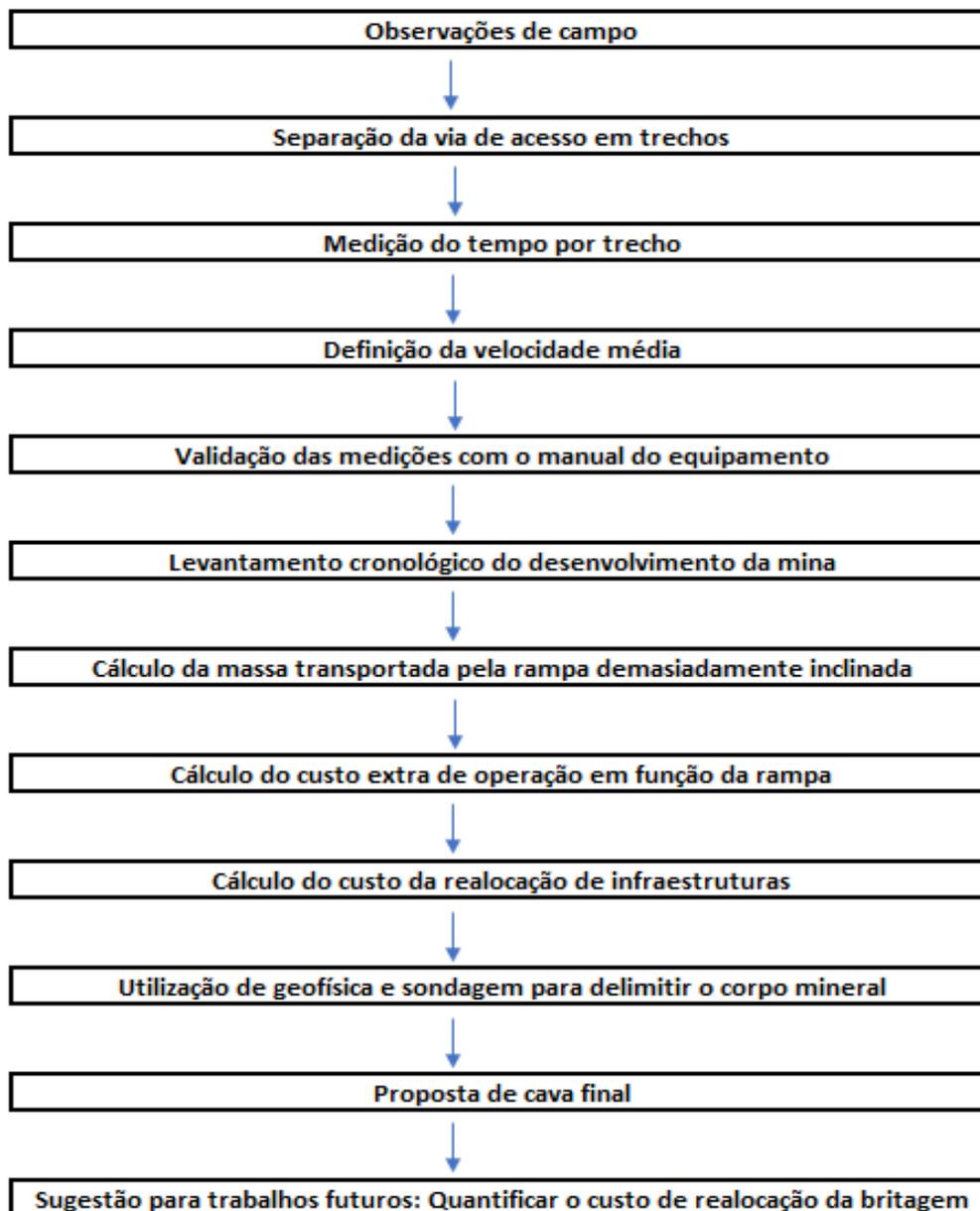


Figura 19: Diagrama de metodologia

Fonte: Autor

O presente trabalho se deu início através de observações de campo, onde foi possível notar que os caminhões faziam um esforço demasiadamente maior em certos trechos da principal via de acesso.

Tal via foi dividida em partes, onde cada parte apresentava uma peculiaridade, em função de inclinação e se possuía ou não curvas. A partir disso, foram realizadas diversas medições através de um cronometro, onde se obteve o tempo que os caminhões levavam para superar cada trecho.

A próxima etapa do projeto foi utilizar o software Google Earth para delimitar as etapas da via e calcular o comprimento de cada uma, sendo possível estabelecer uma relação entre tempo e distância, resultando na velocidade média por trecho.

Todas as informações levantadas foram então colocadas no Microsoft Excel, para que se pudesse entender como as circunstâncias da via afetavam a velocidade média de transporte.

Foi realizada uma verificação dos dados obtidos em campo através do manual do caminhão utilizado na mina para transporte de ROM, para excluir possibilidade de grandes divergências. Enfim, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para entender qual seria a inclinação indicada para acessos permanentes em estradas de mineração.

Foi realizado um cálculo para se conhecer a velocidade vertical dos equipamentos frente a diferentes inclinações de rampa, para se confirmar as vantagens de rampas mais suaves.

Após a etapa de campo, foi possível definir qual a rampa de maior inclinação, conseqüentemente a que mais afeta negativamente a produtividade da frota de transporte. Posteriormente foi feito um levantamento cronológico do desenvolvimento da mina, desde a etapa de decapeamento, para compreender como as bancadas foram lavradas e em que momento tal rampa surgiu.

Definido o momento da abertura da rampa com alta inclinação, com o auxílio do software MicroMine foi possível incluir as curvas de nível da mina, determinar a cota do pé dessa rampa e calcular quantas toneladas lavradas passaram por esse trecho.

Tal perda de produção da frota foi estimada e calculou-se o faturamento total perdido (em valores atuais) em função da rampa íngreme.

Foi realizado o cálculo do custo de transporte do material localizado na beirada das bancadas da mina, que quando for desmontado, será arremessado ao fundo da cava, tendo seu custo de produção aumentado, devido ao aprofundamento antes do alargamento da pedreira.

Para evidenciar ainda mais a importância de um planejamento correto da mina e seu ônus se não realizado, foram agrupadas seções de geofísica realizadas na pedreira, cujas foram georreferenciadas no MicroMine, sendo possível estabelecer o limite espacial do minério.

Ao criar o limite da cava final, notou-se que existem infraestruturas dentro dele, então foi estimado o custo para remoção de algumas.

Foi desenvolvida então a cava final da pedreira, com rampas suaves e abrangendo todo o minério.

Por fim, foi sugerido para trabalhos futuros, quantificar o custo para realocação da britagem, que está acima de minério.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cálculos de perda de produção

Considerando uma rampa de 17% de inclinação e de condição regular, o coeficiente de resistência seria de 18,36%, resultando em uma velocidade de aproximadamente 5km/h. Já uma rampa com 7% de inclinação e nas mesmas condições de tráfego o coeficiente seria de 8,36%, conferindo uma velocidade de 17km/h.

É possível calcular a velocidade ascendente desses equipamentos utilizando-se dos dados citados acima.

$$V_y = V_o * \sin \theta \quad \text{Equação 1: Cálculo da velocidade vertical}$$

Os resultados obtidos são de 0,7m/s e 1,8m/s, respectivamente para os casos citados acima. Sendo assim, mesmo percorrendo distâncias maiores, estradas com inclinações menores oferecem maior velocidade vertical aos equipamentos, fato essencial para superar os grandes desníveis quando se trabalha em cavas a céu aberto.



Figura 20 - Velocidades por trecho da via de acesso

Fonte: Autor

Na Figura 20 acima, podemos notar a relação de velocidade desenvolvida pelos caminhões em diversos trechos do acesso principal da mina. Logo na saída do carregamento, em azul, a velocidade média é de 10 km/h, o local é praticamente plano, porém a presença de água e a curva 180° requer cuidado dos operadores, o que reduz a velocidade média.

Em seguida no trecho vermelho e verde, com inclinação de 7%, os equipamentos conseguem desenvolver velocidades de até 17 km/h. No trecho amarelo, com 13% de inclinação a média é de 8km. A maior inclinação se apresenta na saída da mina, com 17%, nesse local a velocidade média dos caminhões é de 5km/h. Por fim, o último trecho é a chegada ao britador, que possui 6% de inclinação e a velocidade média é de 14km/h.

Tabela 1 - Segmentação da via de acesso principal

Trecho	Comprimento (m)	Velocidade média (km/h)	Inclinação (%)
	106	10	0
	88	15	7
	117	17	7
	98	8	13
	136	5	17
	74	14	6

A tabela 2 abaixo evidencia o tempo para que um caminhão de transporte atravesse o trecho em rampa. Nota-se que existe uma diferença de 21 segundos para cada viagem que passa por ali reduzindo a capacidade de transporte da frota.

Tabela 2: Tempo de ascensão da rampa

H (m)	24
Velocidade vertical 1 (m/s)	0,7
Velocidade vertical 2 (m/s)	1,8
T1 para subir o trecho (s)	34
T2 para subir o trecho (s)	13
Diferença (s)	21

A produção estimada do britador primário é de 120 quilos por segundo dessa forma, tal tempo perdido resulta em uma redução de 2,5 t para cada 36 t transportadas que é a capacidade do caminhão resultando então em uma perda de 7% na produtividade do britador.

Através do MicroMine foi possível calcular quantas toneladas foram produzidas abaixo da cota da rampa, ou seja, quantas toneladas foram afetadas pela condição demasiadamente inclinada do acesso.

De acordo com a tabela 3 foi calculado uma perda de faturamento dentro do período de produção do material de R\$ 5.646.774, totalizando 373 horas perdidas em função da velocidade reduzida da frota de transporte

Tabela 3: Faturamento perdido

% Perda	7%
Rocha retirada abaixo da rampa (ton)	2.310.044
Produção total perdida (t)	161.336
Preço de venda (R\$)	35
Faturamento total (R\$)	5.646.774
Tempo total perdido (h)	373

Outro custo que foi levado em consideração além da perda de produção no britador primário foi o consumo de diesel em função do maior tempo de ciclo dos caminhões. De acordo com a tabela 4 foi calculado um custo extra de R\$ 67.224.

Tabela 4: Custo extra de diesel

Diferença consumo de diesel	
Consumo (L/h)	30
Consumo (L/h)	0,0083333
Diferença de tempo (s)	21
Diferença de consumo/viagem	0,1746032
Custo diesel (R\$)	6
Rocha retirada abaixo da rampa (ton)	2.310.044
Nº viagens	64.168
Custo extra com diesel (R\$)	67.224

Outra situação que foi estimada foi a respeito do material que será lançado ao fundo da cava ao realizar os desmontes na parte superior da mina, de acordo com a Figura 21 abaixo:



Figura 21: Material lançado ao fundo da cava

Fonte: Autor

Para o cálculo da massa desse material foi considerado uma altura de 70 m correspondente à profundidade da cava, e uma área de 3.061 metros quadrados, totalizando 621.383 t, de acordo com a Tabela 5. A perda de faturamento nesta situação foi de 1.522.388 reais totalizando outras 100 horas de produção perdida.

Tabela 5: Cálculo do material lançado ao fundo da cava por desmontes

Material lançado para baixo	
Área (m ²)	3061
Altura (m)	70
Densidade (t/m ³)	2,9
Massa total (t)	621383
% Perda	7%
Preço de venda (R\$)	35
Faturamento total (R\$)	R\$ 1.522.388,35
Tempo total (h)	100

Continuando na mesma linha de raciocínio foi estimado o gasto extra com diesel dessa situação resultando em R\$ 18.082 conforme a tabela 6 abaixo:

Tabela 6: Custo extra de diesel do material lançado para baixo

Consumo (L/h)	30
Consumo (L/h)	0,008
Diferença de tempo (s)	21
Diferença de consumo/viagem	0,17
Custo diesel (R\$)	6
Total material lançado (ton)	621.383
Nº viagens	17261
Custo extra com diesel (R\$)	R\$ 18.082,57

Design de Cava com Micromine

O primeiro passo para realizar a modelagem completa da cava final foi entender os limites desse sólido, para isso foi utilizado o conhecimento geológico do local, através de geofísicas e sondagem.

Para se ter uma imagem mais palpável da região que abrangida pela rocha de interesse, foi gerada a Figura 22 abaixo, nela podemos verificar onde foi feita a geofísica, onde em verde há presença de minério e em vermelho inexistência e em azul a string utilizada para gerar o modelo de blocos, como limite lateral da cava.



Figura 22: Linhas de geofísica

Fonte: Autor

Cada seção do estudo pode ser verificada no apêndice do presente projeto.

Tem-se conhecimento de uma sondagem realizada no fundo da cava atual, indicando rocha até pelo menos a cota 500m, portanto, esse foi o limite vertical adotado para o projeto.

Ao georreferenciar as seções de geofísica conforme a Figura 23, foi possível definir pontos de contato entre o basalto que é a rocha de interesse, do arenito que seria a encaixante.

Para tal georreferenciamento, foi utilizado a ferramenta “Georeference Image” contida no Micromine. Foram inseridos 4 pontos de controle em cada imagem, um em cada extremidade desta. Esses pontos possuem coordenadas de latitude, longitude e altitude.

Tais contornos geológicos foram obtidos do relatório técnico realizado por empresa terceirizada na pedreira. Nesse caso é de extrema importância o conhecimento do esquema de formação desse depósito. Como é uma intrusão, as bordas desse corpo apresentam forte caimento, que pode ser observado na geofísica.

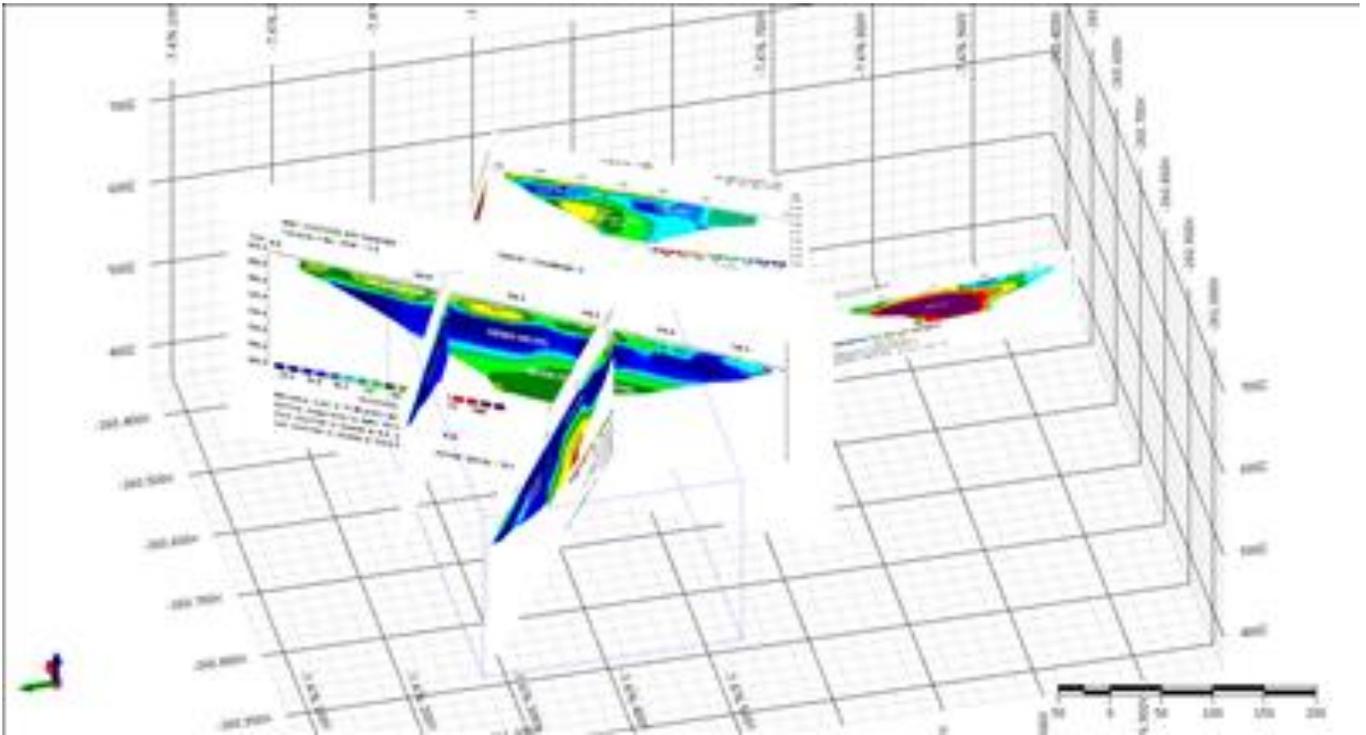


Figura 23: Seções de geofísicas georreferenciadas, vista noroeste isométrica

Fonte: Autor

Foi gerado então, um modelo de blocos (MB) primário, que serviu de base para os próximos passos da modelagem. A Figura 24 esboça os contornos de superfície e logo abaixo o MB.

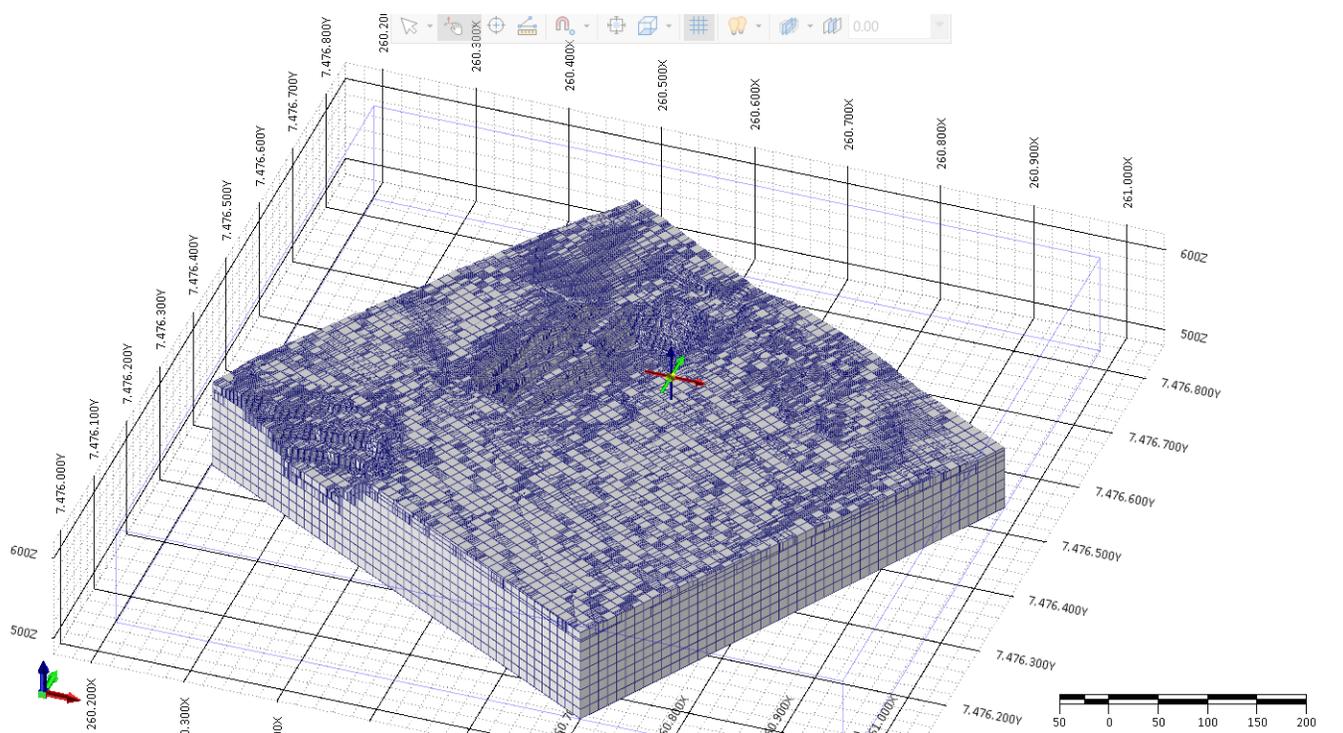


Figura 24: Modelo de blocos completo, vista noroeste isométrica

Fonte: Autor

Com o modelo de blocos em mãos e as geofísicas georreferenciadas, foi possível traçar um limite horizontal do corpo geológico, através de uma string no software. Para restringir a área do modelo, foi utilizado um filtro, que mostra apenas os blocos contidos na string em questão.

Foram envolvidas questões de ESG para definição do limite da cava também, sendo uma APP localizada ao Norte da mina, onde há passagem de um curso d'água e à Oeste existe um bairro residencial, então é necessária uma certa distância para não causar incômodo aos moradores, conforme demonstra a Figura 25.



Figura 25: Mapa de restrições de avanço da cava

Fonte: Autor

A partir disso, criou-se o modelo de blocos real, com cubos de 12m de lado em função da altura da bancada do projeto, onde realmente contém a rocha de interesse, como não se tem interesse em lavar arenito, tais blocos foram descartados do projeto, ilustrado pela Figura 26.

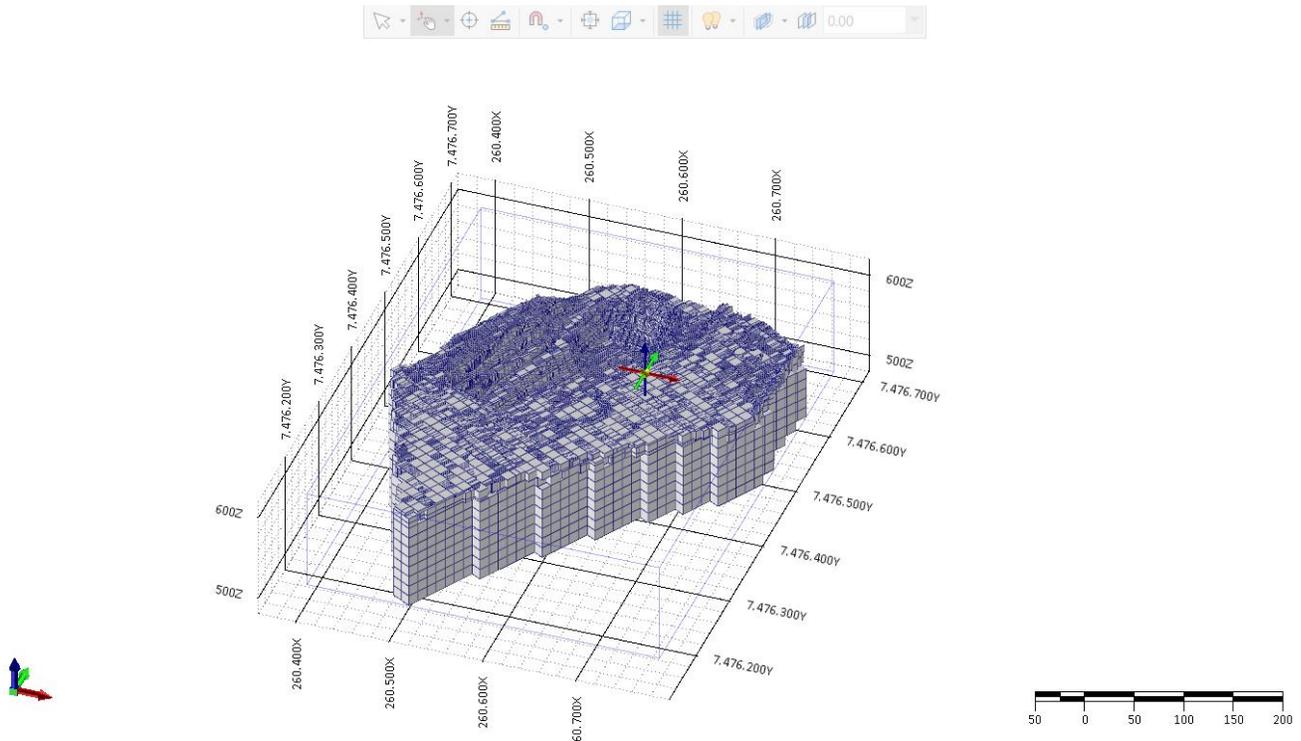


Figura 26: Modelo de blocos real, vista noroeste isométrica

Fonte: Autor

A fim de se obter a relação estéril/minério e a quantidade de cada um ao final do projeto, foi adicionada uma camada média de 22m de estéril, conforme ilustrado na Figura 27 a seguir:

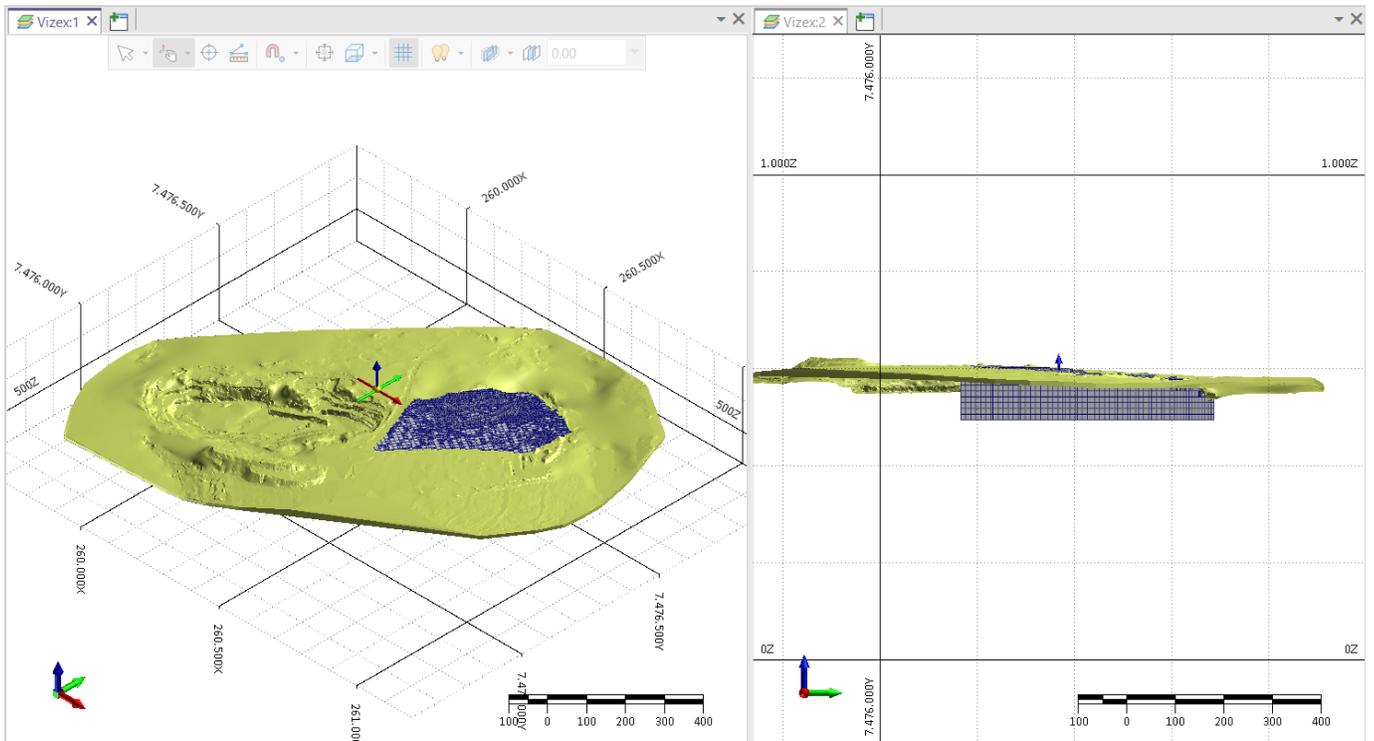


Figura 27: Modelo de blocos real com estéril, vista nordeste isométrica e vista leste

Fonte: Autor

Deu-se início então ao design do pit final do projeto, utilizando a ferramenta “Pit Design”. Foram inseridos os dados de entrada como altura de bancada, ângulo de talude, inclinação de rampa, largura de rampa, sentido da rampa, largura de berma e presença ou não de berma na rampa, conforme demonstrado na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7: Dados de entrada para Pit Design

Altura da bancada	12 metros
Ângulo de talude	75 graus
Inclinação de rampa	10%
Largura de rampa	12 metros
Sentido da rampa	Horário
Largura de berma	5 metros
Berma na rampa?	Não

Foi desenhada uma string externa e superior ao corpo mineral na cota 632m e colocado um ponto onde deveria iniciar a rampa. Utilizando do comando “Project to berm” as bancadas foram sendo projetadas para se verificar se estas estariam abrangendo corretamente o minério. Foram feitos diversos ajustes na primeira string até que se atingisse o objetivo.

Definida a string primária e o correto local de início da rampa, foram projetadas bancada por bancada, fazendo alterações manuais para que não houvesse quinas no projeto, tornando-o o mais operacional possível. Tais níveis foram expandidos até que se atingisse a cota final desejada de 500m, conforme a Figura 28.

É importante salientar que a cota de início foi definida dessa forma, para que o desenho da cava chegasse exatamente na cota 500m, a partir dos múltiplos de 12 em função da altura da bancada.

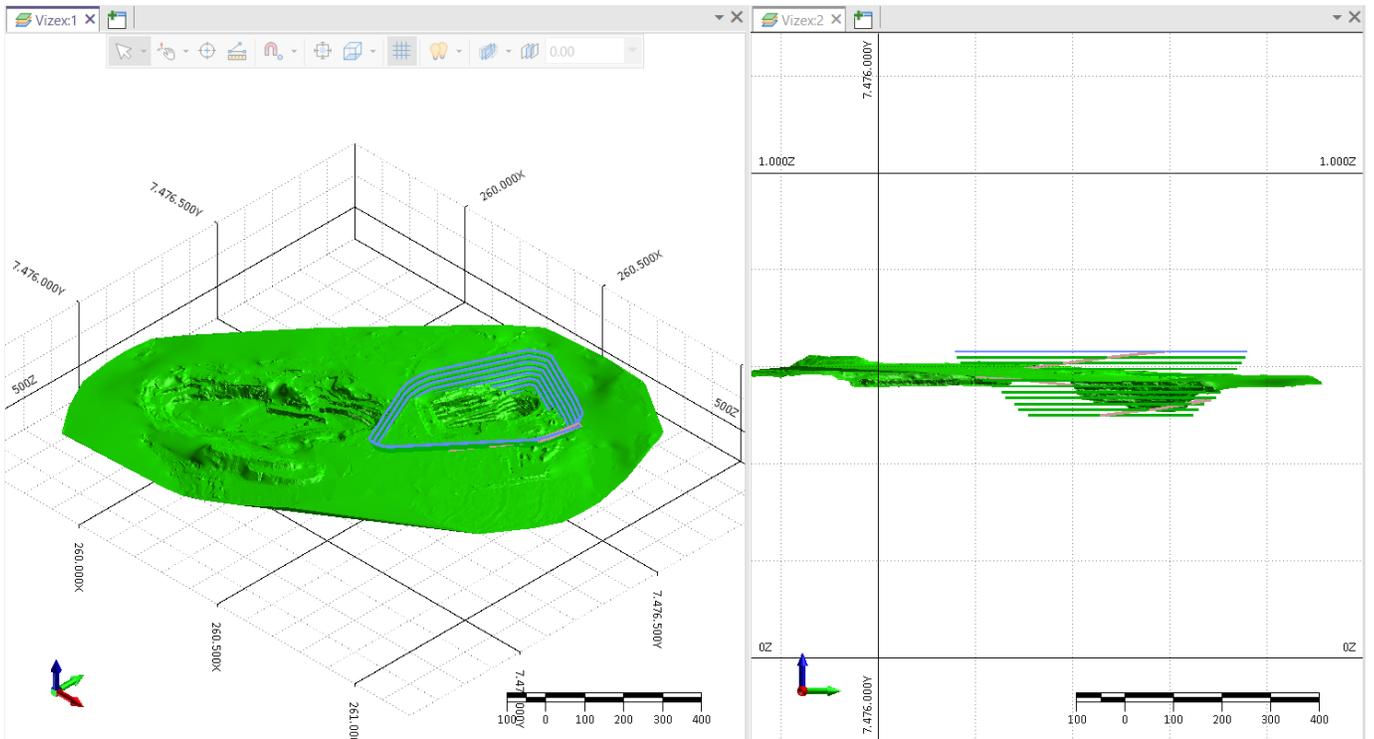


Figura 28: Strings de pit design, vista nordeste isométrica e vista leste

Fonte: Autor

Com o pit final desenvolvido, utilizou-se do comando “Malha triangulada interativa” para gerar uma superfície entre as strings, conforme ilustra a Figura 29.

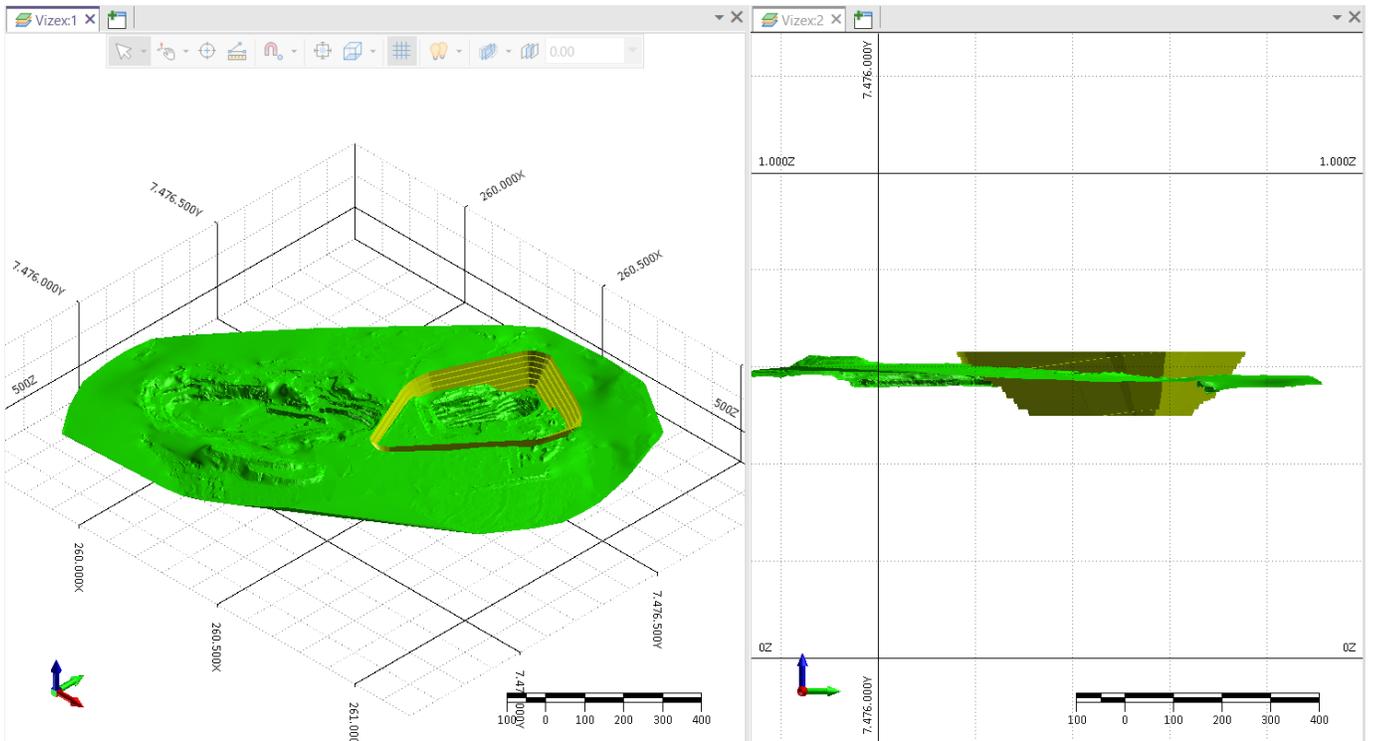


Figura 29: Superfície de cava final, vista nordeste isométrica e vista leste

Fonte: Autor

Então, utilizando do comando “Operações Booleanas”, foi criada um DTM mesclado da cava com a topografia, dessa forma, as regiões que estavam acima da superfície topográfica foram cortadas, deixando-os unidos.

De acordo com a Figura 30, é possível notar a diferença de rocha que ainda pode ser lavrada em comparação com a cava atualmente desenvolvida.

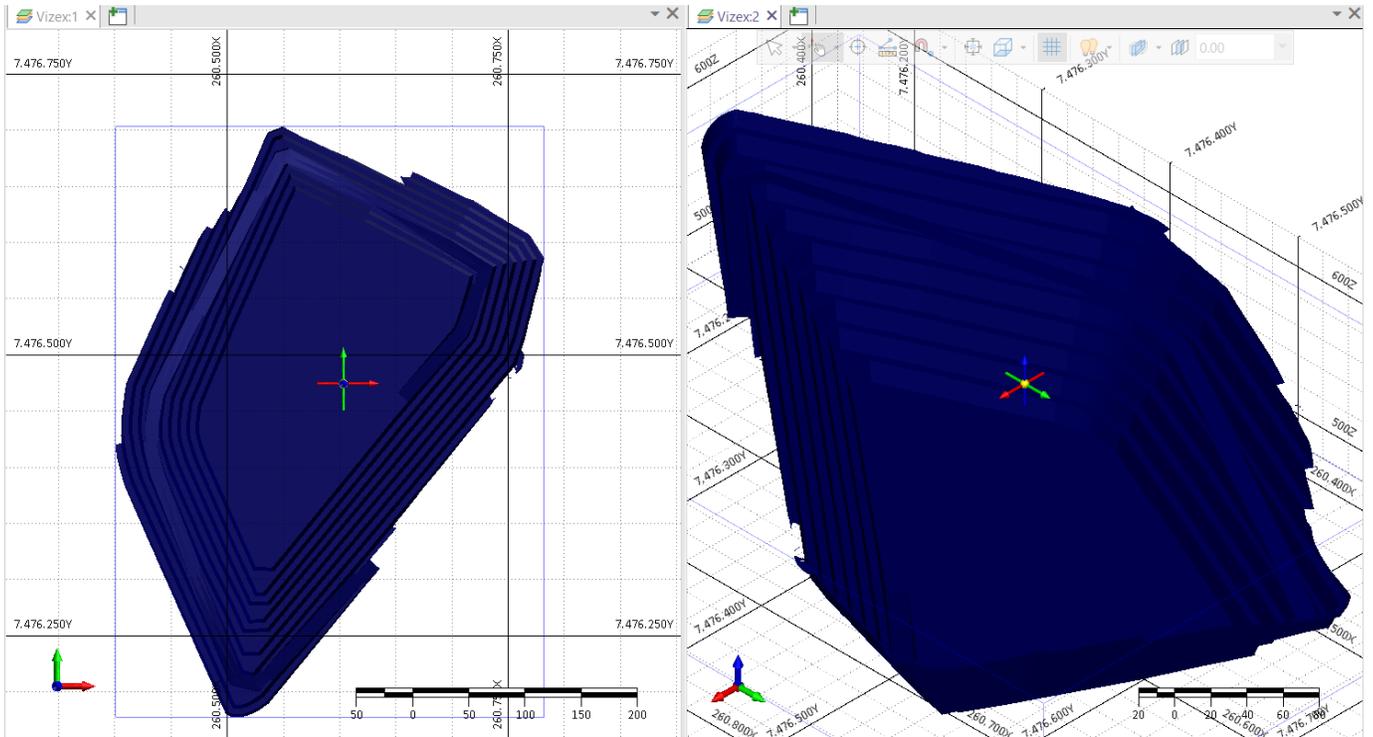


Figura 30: Cava final após operação booleana, vista superior e vista sudoeste isométrica

Fonte: Autor

CONCLUSÕES

Através do projeto desenvolvido foi possível notar a relevância de um bom planejamento para a atividade de mineração. Muitas vezes um parâmetro mal executado pode influenciar negativamente a produção por toda a vida útil da cava, nesses casos a rápida identificação do problema é essencial, sendo necessário propor planos de ação o quanto antes para que o prejuízo seja reduzido.

Os cálculos apresentados na sessão anterior foram agrupados de acordo com a tabela 8, separando-os de acordo com sua natureza, em função da perda de produção, custo de diesel e realocação de infraestruturas.

O valor total encontrado foi de 9290636 BRL, que poderia ter sido economizado através de um planejamento executado desde o início da operação.

Tabela 8: Cálculo do valor total

Perda de faturamento	R\$	7.169.162,57
Fator lucro		0,2
Custo final perda de produção	R\$	5.735.330,06
Custo extra com diesel	R\$	85.306,08
Realocação de infraestrutura	R\$	3.470.000,00
Total	R\$	9.290.636,13

Os resultados obtidos para o custo extra com diesel não foram satisfatórios, acredita-se que a economia seja maior do que a calculada, mas para se obter esse resultado seria necessário considerar o consumo instantâneo dos equipamentos em cada trecho da estrada em função da inclinação invés de utilizar a média do trajeto todo, como foi utilizado no presente projeto.

Vale ressaltar que o prejuízo calculado é uma parte do real, uma vez que existem outros parâmetros a serem considerados para gerar uma análise completa, como custo de realocação dos equipamentos de britagem, custo de manutenção dos equipamentos que trafegaram em uma via demasiadamente inclinada etc.

A tabela 9 foi construída através de cálculos utilizando o software MicroMine, resultando na cubagem da cava final considerando o que já foi retirado da cava atual. O resultado foi de 10.442.584 t de minério e 2.482.207 toneladas de estéreo, vale ressaltar que dependendo dá

licença esse estéril pode vir a ser comercializado. Por fim a relação estéril minério da cava ficou em 0,24.

Tabela 9: Cubagem

Litologia	Volume (m ³)	Densidade (t/m ³)	Massa (t)
Minério	3.600.891	2,9	10.442.584
Estéril	1.460.122	1,7	2.482.207
REM			0,24

Durante a construção da cava final o software se mostrou uma ferramenta extremamente versátil se operada por um profissional capacitado, através dele é possível prever qualquer desenvolvimento da mina e suas consequências. É possível testar diversas configurações de cava e analisar previamente qual se mostra mais vantajosa.

Além de ser possível realizar planejamento de longo prazo abrangendo toda a vida útil da mina, é possível gerar um sequenciamento que será utilizado pelas equipes de curto prazo no dia a dia, garantindo aderência entre o planejado e o executado reduzindo a possibilidade de desvios e consequentemente prejuízos para a empresa.

Ao final da elaboração do projeto foi possível perceber que a falta de conhecimento geológico muitas vezes pode inviabilizar uma mineração, por não se saber exatamente a quantidade, qualidade e posição do minério no subsolo.

É importante ressaltar também a relação dos equipamentos que serão utilizados com as condições de acesso da mina, quanto à inclinação e largura de rampas, raios de curvatura e produção desejada. Tudo isso influencia na tomada de decisão do Engenheiro de Minas ao planejar uma cava otimizada e garantir que a exploração seja a mais lucrativa é possível, respeitando aspectos ambientais, sociais e econômicos.

REFERÊNCIAS

ACHIREKO, P. K. **Application of modified conditional simulation and artificial neural networks to open pit optimization**. 1998. Thesis (Doctor of Philosophy) - Faculty of Engineering, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 1998.

CARMO, F.A.R., CURI, A. **Metodologias para o planejamento de cavas finais de minas a céu aberto otimizadas** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, 2001. (Dissertação de Mestrado).

CARMO, F. A. R., CURI, A.; SOUSA, W. T. DE. **Otimização econômica de explorações a céu aberto**. Rem: Revista de Escola de Minas, v. 59, n. 3, p. 317-321, jul. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/ht7wrXzzVWY5bzdV886Hxbh/#>. Acesso em: 30 agosto de 2023.

CATERPILLAR (Brasil). **770G - Caminhão Fora de Estrada**. Disponível em: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10572868>. Acesso em: 25 ago. 2023.

CATERPILLAR. Caterpillar Performance Handbook. 46 ed. Illinois: Caterpillar Inc., janeiro 2016.

CORRÊA, M.M.; CANAAN SILVEIRA, L.G.; LIMA, H.M. The loss of productivity and costs associated with the premature scrapping of mining tires. World Mining Congress. Rio de Janeiro. 2016.

Correia, C.G., Cruz, R.J.L., Figueiredo, F.P.O., Azevedo, J.M.M., Rodrigues, N.V., 2010. Resultados de prospecção electromagnética nos domínios frequência e tempo. Caso de estudo: Montouro (Cantanhede). Anais do 10º Congresso da Água, APRH, Alvor, Portugal. Comunicação 116, CD-ROM, 16 p.

COUTINHO, Heitor Lobo. **MELHORIA CONTÍNUA APLICADA PARA CARREGAMENTO E TRANSPORTE NA OPERAÇÃO DE MINA A CÉU ABERTO**. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/9435/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_MelhoriaCont%c3%adnuad Aplicada.pdf. Acesso em: 02 set. 2023.

CURI, Adilson. Minas a céu aberto. Planejamento de lavra. Oficina de Textos. 2014. 223 p.

DNPM. Anuario Mineral Brasileiro 2010. Journal of Chemical Information and Modeling, v. 1, p. 860, 2010. , I. A Geofísica na Indústria da Mineração. Rio de Janeiro: SBGf. 2010. p.12.

DUARTE, J. A. M.. **Caracterização geológico-estrutural de uma pedreira de dolerito com aplicação de prospecção geofísica e análise estrutural**. 2014. Disponível em: https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2020/03/36_3054_ART_CG14_ESPECIAL_II.pdf. Acesso em: 28 ago. 2023.

HENTSCHEL, T.; HRUSCHKA, F.; PRIESTER, M. Global Report on Artisanal & Small-Scale Mining. v. V.20, n. 70, p. 1–67, 2002.

HRUSCHKA, F.; ECHAVARRIA, C. Rock-solid chances for responsible artisanalmining: ARM Series on responsible ASM, No. 3. [s.l: s.n.] 2011.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. **Open Pit Mine Planning & design- Fundamentals**. Taylor & Francis inc. 3.ed. 2013. v. 1. 1308 p.

KAULFMAN, W.W. Mine Haulage Roads – A Manual. U.S. Dept. of the Interior. United States. 1977.

LOPES, J. R. Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com uso de sistema de britagem móvel “In Pit” autopropelido. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2010.

LUIZ, José Gouvêa. GEOFÍSICA NA PROSPECÇÃO MINERAL: GUIA PARA APLICAÇÃO. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 8., 2013, Rio de Janeiro. **GEOFÍSICA NA PROSPECÇÃO MINERAL: GUIA PARA APLICAÇÃO**. Rio de Janeiro: Reserch Gate, 2013. p. 1-3. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Luiz-4/publication/263654708_Geofisica_na_prospeccao_mineral_guia_para_aplicacao/links/57c428cb08aee50192e87ff5/Geofisica-na-prospeccao-mineral-guia-para-aplicacao.pdf. Acesso em: 03 set. 2023.

MARTINS, Antonio Carlos da Costa. **Impacto da aplicação da Geofísica no planejamento de lavra da mineração de pequena escala**. 2017. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-08082017-104035/publico/AntonioCarlosdaCostaMartinsCorr17.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

MILSON, J. Field Geophysics. Wiley, England, 232 p., 2003.

MOREIRA, César Augusto. **Estudos geofísico para delimitação de corpo intrusivo básico (diabásio) na Pedreira Fazenda Velha, Nova Odessa (SP)**. Nova Odessa: Unesp, 2019. 13 p.

RIBEIRO, B.G.C. Estudo de viabilidade econômica para a implementação de correias transportadoras de ROM de minério de ferro. Estudo de caso da Mina Fábrica em Congonhas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2013.

RODOVALHO, E.C.; LIMA, H.M.; TOMI, G. New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. *Journal of Environmental Management*. 177-185. 2016.

SANTOS, Valdiclei Nunes dos. **AValiaÇÃO DE UM PROJETO INTEGRADO DE ESTRADA DE MINA**. 2022. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/15959/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_Avalia%c3%a7%c3%a3oP rojetoIntegrado.pdf. Acesso em: 20 ago. 2023.

REIS, M.S. Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra à céu aberto de minério de ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

SILVA, A.E.G. **Análise de qualidade de estradas de mineração utilizando indicadores operacionais**. 2020, 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SILVA, N.C.S., **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**. 2008. 124 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, Pedro Guilherme Cipriano. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DE ESTRADAS DE MINA NOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE TRANSPORTE**. 2019. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/11931/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_An%c3%a1liseInflu%c3%aanciaRugosidade.pdf. Acesso em: 03 ago. 2023.

SOUSA JÚNIOR, W.T. Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a Metodologia de Auxílio Multicritério à Decisão. Estudo de caso: mineração de Bauxita. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2012.

TANNANT, D. D.; REGENSBURG, B. Guidelines for Mine Haul Road Design. University of Alberta, Canada: School of Mining and Petroleum Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, 2001. 108 p.

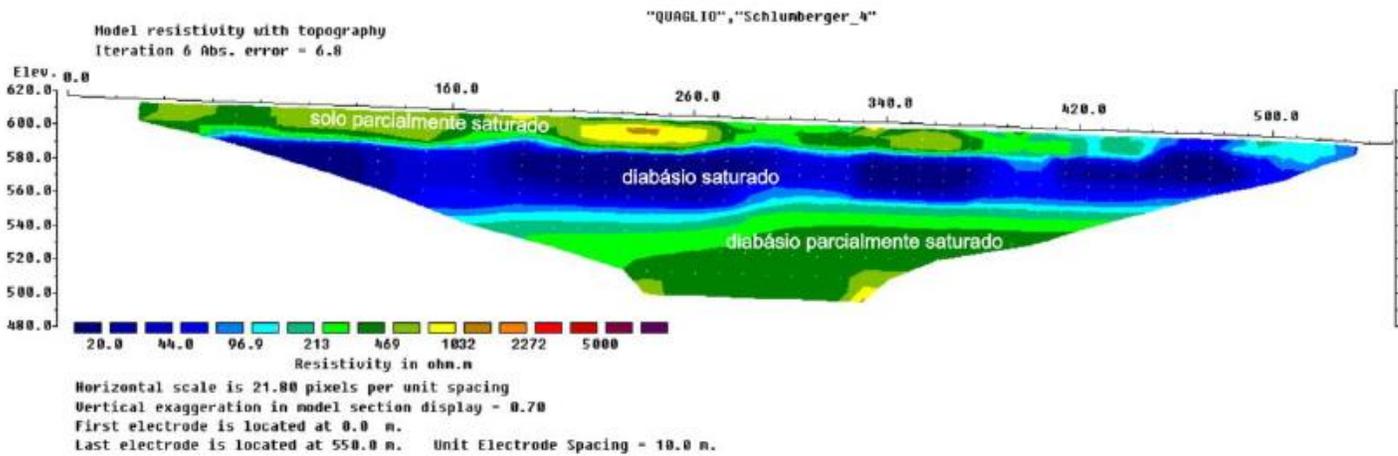
THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. The impact of rolling resistance on fuel, speed and costs: Continuous improvement case studies. Rio Grande do Sul, 2006.

THOMPSON, R.; VISSER, A. Mine Haul Road Design, Construction and Maintenance Management, course notes given on May 2014 at Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

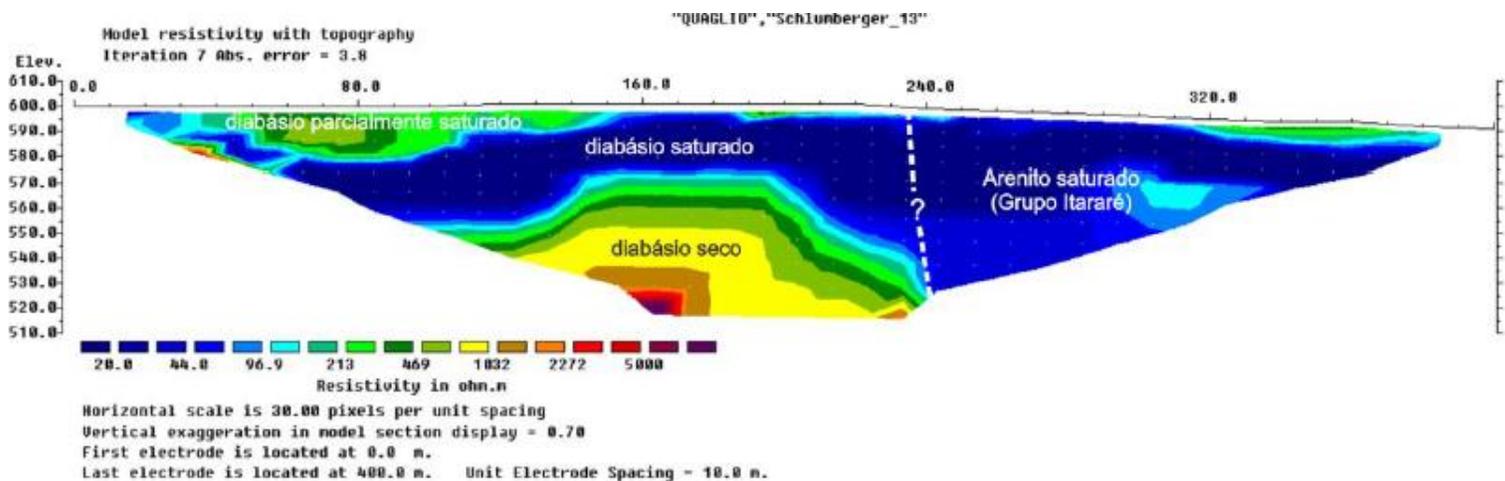
VALENTE, J.M.G.P. **Geomatemática - lições de geoestatística** Ouro Preto: Fundação Gorceix, v. 1-8, 1982.

VIEIRA, J.C. Determinação e quantificação de elementos de relevância em infraestrutura de mina. 2013, 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Parauapebas.

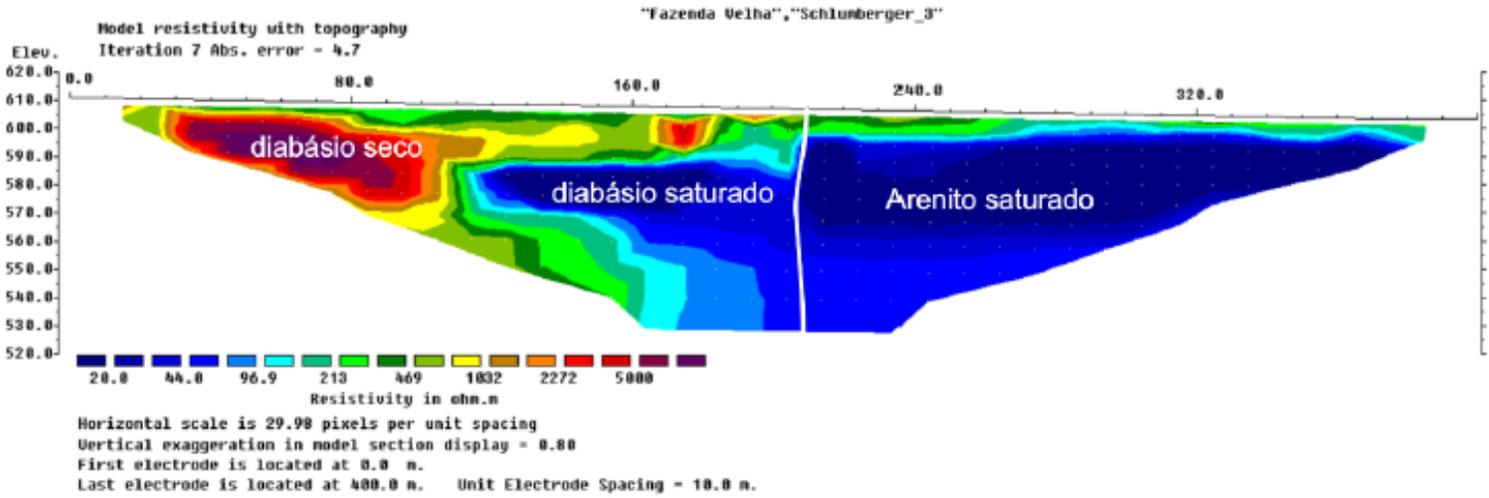
ANEXO A – Seções de geofísica



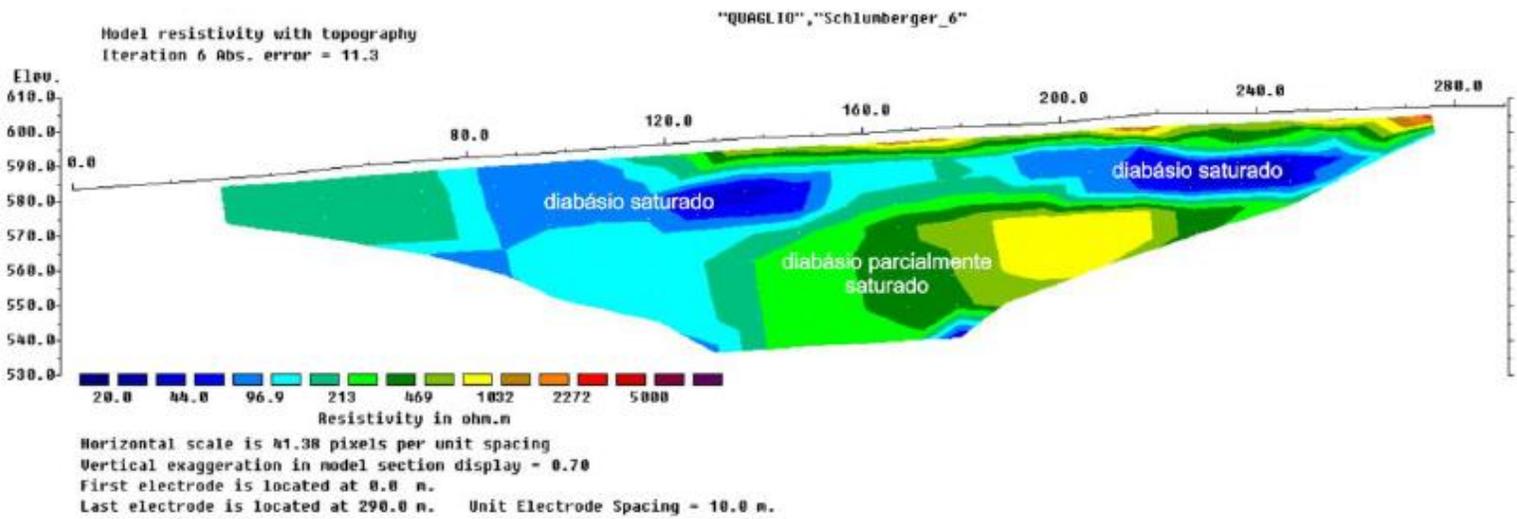
Linha 2 acima



Linha 3 acima



Linha 4 acima



Linha 5 acima