



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

COMUNIDADE EVANGÉLICA LUTERANA "SÃO PAULO"
Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 3.607 - D.O.U. nº 202 de 20/10/2005

Caroline Dourado Moreira Lima

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE TRANSIÇÃO DE MÉTODOS DE LAVRA A CÉU
ABERTO PARA LAVRA SUBTERRÂNEA DA COLORGEMS LTDA.**

Palmas

2014

Caroline Dourado Moreira Lima

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE TRANSIÇÃO DE MÉTODOS DE LAVRA A CÉU
ABERTO PARA LAVRA SUBTERRÂNEA DA COLORGEMS LTDA.**

Trabalho apresentado como requisito parcial da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do curso de Engenharia de Minas, orientado pelo Professor Mestre Rodrigo Mattos Rodrigues.

Palmas

2014

Caroline Dourado Moreira Lima

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE TRANSIÇÃO DE MÉTODOS DE LAVRA A CÉU
ABERTO PARA LAVRA SUBTERRÂNEA DA COLORGEMS LTDA.**

Trabalho apresentado como requisito parcial da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do curso de Engenharia de Minas, orientado pelo Professor Mestre Rodrigo Mattos Rodrigues.

Aprovada em _____ Junho de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Rodrigo Mattos Rodrigues
Centro Universitário Luterano de Palmas

Prof. M.Sc. Daniel Francisco Padilha Setti
Centro Universitário Luterano de Palmas

Prof. Esp. José Cleuton Batista
Centro Universitário Luterano de Palmas

Palmas

2014

Dedico este trabalho principalmente a quem contribuiu à minha formação e possibilitou-a, dando as orientações necessárias para eu formar a estrutura profissional que eu esperava ter.

São eles professores: Leonardo Pedrosa que iniciou o trabalho de coordenação do curso deixando uma base sólida para que continuássemos sem retrocesso.

Rodrigo Mattos que com seu jeito amigo de ser e sua disposição frente aos trabalhos fez crescer também o entendimento a respeito da Geologia que é a ciência mais vinculada à Mineração.

José Cleuton que permitiu aos acadêmicos um acesso maior ao campo profissional dentro das oportunidades que ele criou bem como ao Daniel Padilha que se esforçou em crescer junto e se permitir contribuir mais além do que esperávamos. Ao Erwin e André Zingano que se dedicaram em vir para o estado para cumprir com a grade curricular do curso dando aulas em módulos e que com certeza ampliaram nosso conhecimento com as experiências que possuem.

E a todos os outros professores que auxiliaram nesse desenvolvimento e crescimento, bem como aos colaboradores da Instituição.

Agradeço a Deus por me conceder, mesmo diante as dificuldades, esta oportunidade e em ter colocado pessoas tão especiais na minha vida pra auxiliar nessa caminhada de 5 anos.

Não poderei deixar de citar que são meu companheiro e meu filho que serviram e deram incentivos nas horas que mais precisei, bem como minha mãe e meu pai que auxiliaram da forma como puderam, minha sogra e ainda por toda a família que de alguma forma privilegiou a minha escolha e sucesso.

Com meus amigos de caminhada desse curso foi possível crescer juntos e nos guiar a um só objetivo, de sermos bons profissionais aonde quer que estejamos, respaldados principalmente pelo respeito e humildade. E ainda os alunos do curso, João Pedro (responsável pelo laboratório) e Vinícius Cirqueira por me auxiliarem na extração dos testemunhos das amostras para o teste realizado neste trabalho.

“A palavra não pode ser só falada, tem que ser praticada.”

(José Gabriel da Costa)

RESUMO

LIMA, Caroline Dourado Moreira. **Análise de viabilidade de transição de métodos de lavra a céu aberto para lavra subterrânea da Colorgems LTDA.** 2014. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Minas do Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2014.

Este trabalho apresenta os aspectos que envolvem o contexto de transição do método operacional da cava sob a perspectiva de Lavra a Céu Aberto da Jazida Rodolita I, localizada no município de Peixe. O estudo possibilitou observar a dinamização do novo método de cava sob a influência dos aspectos produtivo, econômico, técnico, ambiental e legal.

Para analisar a transição do método de lavra planeja-se utilizar os subsídios técnicos de caráter geológico e geotécnico ao projeto de lavra, que podem ser obtidos através de testes, ensaios, modelos, entre outros.

Neste trabalho, um dos testes escolhidos foi o de compressão, como critério que determinará a competência da rocha estudada para posterior transição a um novo design operacional utilizando técnicas de Lavra Subterrânea.

Esta análise ocorreu em etapas sucessivas. O levantamento bibliográfico contextualizou a ocorrência geológica e a partir daí foram analisados trabalhos acadêmicos com características inerentes ao estudo realizado. A utilização do banco de dados de uma consultoria especializada foi a base para a caracterização técnica, informações do desenvolvimento e planejamento da mina ao longo do histórico técnico-econômico, entre outros.

O resultado final dessa análise será a demonstração dos principais fatores utilizados para a análise operacional da transição de método de lavra baseado nas características geológico/geotécnicas do maciço rochoso em que se encontra a mineralização estudada.

Palavras-chave: transição; método de lavra; município de Peixe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração representando a transição da mina a Céu Aberto para Subterrânea.....	10
Figura 2: Critério de decisão na transição de L.C.A. e L.S. sob perspectiva econômica.....	13
Figura 3: Jazida Rodolita I, Cava principal em Dezembro 2008, com os trabalhos de extração próximos à cota 315m, vista do sul para o norte. Lavra paralisada em fase manutenção do lençol freático rebaixado com bombeamento. Fonte: PAE - Processo número 860.787/2012.....	23
Figura 4: Cava principal – Outubro 2013. Fonte: Própria.....	23
Figura 5: Cava principal – Maio 2014. Fonte: Própria.....	23
Figura 6: Seção ideal de cava de extração com definição de taludes.....	25
Figura 7: Testemunhos extraídos de blocos de rocha coletados in situ, na Jazida Rodolita I, em dois pontos distintos.....	33
Figura 8: Representação esquemática da cava. Fonte: Própria.....	35
Figura 9: Elipsoide de deformação. Fonte: Salamuni, 2009.....	36
Figura 10: Local e equipamento em que foi realizado o teste de compressão simples.....	38
Figura 11: Resultados do Teste de Compressão Simples com CP1 e CP2.....	40
Figura 12: Tendência dos custos na mineração a céu aberto e subterrânea (Lopes, 2012 <i>apud</i> Silva, 2010).....	45
Figura 13: Fluxograma de metodologia a partir do aspecto econômico.....	47

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1: Classificação Geomecânica RMR – parâmetros e coeficientes. Fonte: Google.....41

Tabela 1: Valores típicos do índice de resistência à carga pontual. Fonte: Azevedo, 2002.....42

LISTA DE ABREVIATURAS

L.C.A. – Lavra a Céu Aberto

L.S. – Lavra Subterrânea

RFP – Relatório Final de Pesquisa

CP1 – Corpo de Prova 1

CP2 – Corpo de Prova 2

RMR – Rock Mass Rating

RQD – Rock Quality Designation

NRM – Normas Reguladoras da Mineração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	Caracterização Geológica.....	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
6	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O mineral contido na área estudada é a granada, que em suas mais variadas composições, formas e tamanhos são componentes industriais importantes, na indústria joalheira, como gema e outros fins industriais, a granada almandina-piropo geralmente é usada em três grandes campos de aplicação na indústria: meios abrasivos grosseiros, grãos abrasivos para jato d'água cortante e meio de alta densidade para filtração de água.

Embora a estrutura de cristal permita um quase infinito número das espécies de granadas serem formadas, na realidade, somente uma meia dúzia ou apenas alguns minerais de granada são encontrados geralmente na natureza, e somente dois ou três têm significado econômico. (RPF, Processo nº 860.787/2012).

A seleção do método de lavra é um dos principais elementos em qualquer análise econômica de uma mina e sua escolha permite o desenvolvimento da operação (MACEDO, 2001).

Um conjunto de critérios que determinam o bom desenvolvimento da atividade minerária, entre ele destaca-se a seleção do método de acordo com os aspectos estruturais (geologia, geotecnia), aspectos econômicos (viabilidade de execução do método) e técnico (capacidade técnica de desenvolver tal escolha). A escolha sem a devida definição dos parâmetros e aspectos relacionados desencadeia resultados negativos.

Para essa análise supracitada um tema que será abordado com ênfase para melhor entendimento do que foi tratado é a aplicação da Mecânica das Rochas e sua utilização no estudo proposto.

Macedo (2001) afirma que esse ramo da Ciência tem permitido avanços significativos nas técnicas analíticas que possibilitam a decisão preliminar sobre a escolha do método de lavra. Por isso a caracterização geotécnica precisa ser desenvolvida na fase inicial do projeto para posterior utilização nas tomadas de decisão.

De acordo com Macedo (2001) é comum a utilização de sondagem a diamante, embora frequentemente não sejam feitas análises de resistência entre outras. Sendo assim, será realizado o Teste de compressão axial para contribuir com o acervo de informações geotécnicas que posteriormente podem ser utilizadas como fonte de determinação na possível transição de método de Lavra a Céu Aberto para Lavra Subterrânea. Dados mais detalhados, como, por

exemplo, características do maciço que variam com o tempo, consequências da exposição das rochas às condições ambientais da mina e sequência de extração mais adequada, só estarão disponíveis após critério de decisão para a transição ser estabelecido.

Para efetivar uma transição de métodos além das avaliações anteriormente citadas e inerentes ao processo de escolha, será necessário obter subsídios de caráter geológico e geotécnico ao projeto de lavra que podem ser obtidos através de testes, ensaios, modelos, entre outros.

Para esse estudo foi realizado o Teste de compressão axial que determinará a competência da rocha estudada para posterior submissão a um novo método, o que é considerado neste caso, o de Lavra Subterrânea.

Segundo Souza (2003), em função da complexa formação geológica e estrutural de alguns tipos de maciços, a definição de um modelo geomecânico consistente não é uma tarefa fácil, quando comparado aos maciços menos brandos e mais homogêneos. Nesse caso o maciço se encontra em zonas de falhas, com alto grau de intemperismo e onde o minério está distribuído de forma errática o que pode ser atribuído a necessidade do estudo frente a essas características.

A tendência natural das minas a céu aberto, à medida que se desenvolve a lavra, é que a cava se torne mais profunda, podendo-se atingir um limite econômico e técnico que não permita o seu prosseguimento (NEME, 2010). Torna-se necessário, dessa forma, um estudo sob a perspectiva dessa provável mudança para assegurar razões técnicas que permitam que tal objetivo gerado por essa tendência seja um dia desenvolvido com segurança.

Na figura 1, a seguir, pode-se analisar que o limite econômico e técnico da lavra a céu aberto para a subterrânea é representado estruturalmente pelo Crown Pillar, que define a segurança para o desenvolvimento das atividades em subsolo.

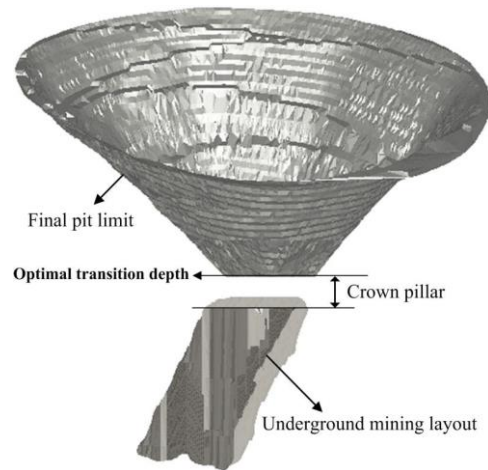


Figura 1: Ilustração representando a transição da mina a Céu Aberto para Subterrânea.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Comumente o método de lavra é designado como sendo a técnica de extração do material. Isso define a importância de sua seleção, já que todo o projeto é elaborado em torno da técnica utilizada para lavrar o depósito (MACÊDO, 2001). Para a efetivação de um projeto e para que ele seja bem desenvolvido é essencial que seja realizado uma caracterização técnica que dê suporte para eventuais e possíveis mudanças. Por exemplo, as características geológicas de um corpo mineralizado pode ter variações que podem influenciar diretamente na produção e na segurança da área de lavra.

A seleção do método de lavra pode ser dividida em duas fases:

1. Avaliação das condições geológicas, sociais e ambientais para permitir a eliminação de alguns métodos que não estejam de acordo com os critérios desejados.
2. Escolha do método que apresente o menor custo, sujeito às condições técnicas que garantam uma maior segurança. (MACÊDO, 2001).

Com essa afirmação é possível notar que além das premissas que viabilizam a aprovação de um projeto de mineração para uma atividade ser desenvolvida, as condições técnicas definem principalmente os aspectos estruturais e ambientais que definem a produção e os custos envolvidos.

No caso desse trabalho serão estudados os principais fatores utilizados para a análise operacional da transição de método de lavra baseado nas características geológico/geotécnicas do maciço rochoso em que se encontra a mineralização.

Macêdo (2001) desenvolveu pesquisas demonstrando a relação do índice de segurança de prováveis mudanças que eliminam gargalos no desenvolvimento do planejamento proposto, conforme exposto logo abaixo:

Embora possam ocorrer modificações durante os serviços de lavra, implicando custos adicionais, essas alterações, geralmente, não produzirão um projeto ótimo em termos de eficiência operacional, porém, caso seja imperioso essa mudança, será preciso estabelecer um método que possua maior flexibilidade em termos de

variações na técnica de extração. O emprego do termo "técnica de extração" reflete os aspectos técnicos da seleção do método, que é parte fundamental da análise.

Nota-se que mesmo com as avaliações realizadas, as condições técnicas conhecidas estão sujeitas à alteração, devido às escolhas do estilo de gerenciamento e do planejamento mais flexível, que aceite mudanças e resultados significativos mesmo a longo prazo.

Sob essa perspectiva fica claro que maximizar o aproveitamento de uma jazida é um dos objetivos principais de um projeto de mineração. De acordo com Lopes (2012),

O aprofundamento das minas a céu aberto, associado ao desenvolvimento das tecnologias de lavra, vem permitindo um melhor aproveitamento das jazidas minerais. Desta forma, minas a céu aberto vem ao longo dos anos, alcançando cada vez maiores profundidades, buscando maior recuperação da reserva lavrável, maximizando assim o uso dos ativos existentes.

Traçado o objetivo de obter maior recuperação da reserva lavrável, torna-se possível alcançar maiores profundidades de cava e maior detalhamento técnico sobre as características geológicas/geotécnicas para a transição propriamente dita.

O replanejamento representa de alguma forma a necessidade de conhecimento técnico e isso pode complementar o caso estudado, em que foi escolhido como critério o teste de compressão uniaxial. Este teste determinará a competência da rocha estudada para transição a um novo design operacional, utilizando técnicas de Lavra Subterrânea.

Analisando mergulho e profundidade do corpo mineralizado, o desenvolvimento da cava alcança um nível em que a segurança estrutural estará comprometida, podendo futuramente afetar a produção. Portanto, será necessário que a "técnica de extração" seja implementada no caso de propor modificação com o avanço das atividades.

Para que esse levantamento seja possível é necessário aprofundar o conhecimento estrutural e do volume da mineralização. Essa caracterização será necessária para análise de tensão do maciço rochoso. Com isso pode-se determinar a profundidade viável de operação para a lavra a céu aberto ou a lavra subterrânea.

Atualmente poucos estudos encontram-se disponíveis na literatura técnica relacionados à determinação da profundidade ótima para a transição da mineração a céu aberto para a subterrânea. A maioria destes estudos foi desenvolvida na última década e se referem a uma

situação de mineração particular, quando combinações de métodos de superfície e subterrâneos foram utilizadas (LOPES, 2012 *apud* Bakhtavar *et al.*, 2007).

São relacionados a esse tipo de tendência natural da lavra a céu aberto os aspectos econômico, ambiental, legal, de segurança estrutural, entre outros. Sendo assim, se for confirmada a competência da rocha estudada, pode-se estabelecer, juntamente com outros estudos e testes, a profundidade aproximada de transição, visando maximizar o aproveitamento mineral melhorando ainda o fluxo de caixa do empreendimento, pois com isso a existência de reservas e/ou recursos remanescentes com potencial econômico estarão definidos.

Como afirma Lopes (2012) que diante deste cenário, os estudos para determinação da profundidade ótima de transição da lavra a céu aberto para subterrânea vêm se tornando uma questão de suma importância para o futuro próximo da mineração.

Podemos analisar critérios de decisão que auxiliam na escolha de um replanejamento que permita mudanças nas atividades operacionais e em um novo design da cava como tem acontecido na área de estudo. O aspecto econômico precisa considerado, pois a partir disso, se define a viabilidade ou não do projeto ser executado.

Gama (2008) mostra através da figura abaixo, o limite e o que deve ser considerado na abordagem da perspectiva econômica.

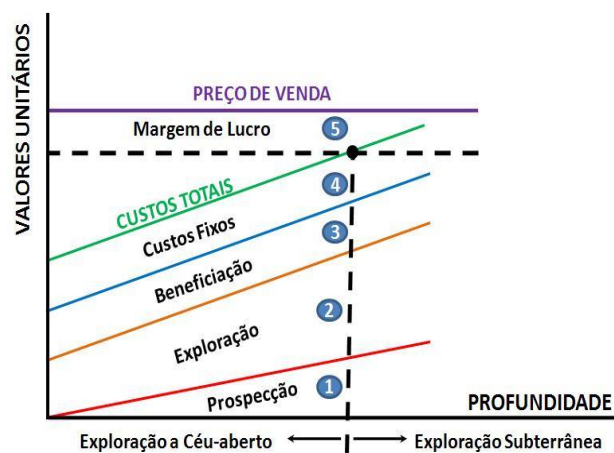


Figura 2: Critério de decisão na transição de L.C.A. e L.S. sob perspectiva econômica. Fonte: Gama, 2008.

Na relação de valores unitários com a profundidade alcançada, nota-se que quanto maior a profundidade, maiores são os custos unitários de cada uma das operações. Quando essas variáveis ultrapassam a linha tracejada na vertical, não compensa mais a Lavra a Céu Aberto - L.C.A. Nesse caso é melhor a transição do método para Lavra Subterrânea - L.S. E quando ambas ultrapassam a linha tracejada na horizontal (paralela à profundidade) a lavra em nenhum

dos métodos é mais viável ou se torna menos rentável por ultrapassar a margem de lucro. E caso ainda ultrapasse o preço de venda já não é mais necessário operar também.

Como por exemplo, no ano de 2013 foi possível aplicar 70% dos recursos gerados em replanejamento indicando que é possível associar produção com retaludamento.

A partir desse cenário foi possível interpretar resultados otimistas a longo prazo. Com isso, a necessidade em se adequar essa opção preparando a cava para o projeto final, visando aprofundar a cava atual, partindo de uma cota a outra, desenvolvendo um novo design e estudando a possibilidade de uso de técnicas de L.S. será possível o aproveitamento máximo da jazida.

Como Gama (2008) mostra a partir dos fatores que influenciam na seleção de L.S. Pode-se notar que previamente são levantados dados geológicos/geotécnicos para depois ser analisado o aspecto econômico.

- Morfologia do depósito mineral (forma, tamanho e posição espacial)
- Distribuição 3-D dos teores de minério
- Propriedades mecânicas da rocha e do minério
- Disponibilidades financeiras iniciais e subsequentes
- Segurança, higiene e respeito pela legislação
- Efeito das operações subsidiárias (ventilação, drenagem, redes eléctrica, de água, ar comprimido, etc.)
- Outros fatores específicos.

A **morfologia do depósito mineral** já foi parcialmente definida por profissionais habilitados para efetivação das atividades de lavra e que hoje passa por um replanejamento onde se observa uma produção baseada na reestruturação da cava para desenvolvimento de um novo design que não comprometa a produção.

A **distribuição 3-D dos teores de minério** foi proposto na primeira parte deste trabalho onde foi analisado o aspecto estrutural e que ainda necessita de uma elaboração mais precisa desse tipo de dados para integrar o conhecimento prévio necessário. Como foi proposto um refinamento dos dados geológicos em modelos 3-D bem como a distribuição dos teores.

As **propriedades mecânicas da rocha e do minério** fazem parte da segunda parte desse trabalho em que será realizado um teste em laboratório para tornar mais claro as características inerentes ao material estudado, medindo sua competência.

As **disponibilidades financeiras iniciais e subsequentes** como foi dito anteriormente no ano de 2013 foi possível aplicar 70% dos recursos gerados em replanejamento indicando que é possível associar produção com retaludamento. Determinando o ponto de equilíbrio entre os custos fixos e totais, margem de lucro e preço de venda pode-se alcançar a disponibilidade necessária.

Segurança, higiene e respeito pela legislação são base para realização de qualquer projeto de mineração que seja aprovado. Em um contexto de transição pode existir uma maior exigência nas adequações paralelo a um maior grau de responsabilidade.

O efeito das operações subsidiárias é representado principalmente pelo levantamento geológico/geotécnico onde determinará a capacidade de suporte natural da própria rocha de onde serão realizadas essas operações. Como por exemplo os níveis de esforço geotécnico por fase de projeto. Pode ser representado também pelos custos adicionais ao projeto.

2.1 Caracterização Geológica

Com ênfase na realização de testes que suprem o conhecimento geológico/geotécnico do maciço rochoso estudado, conclui-se dessa forma, que a mecânica das rochas é um dos principais parâmetros que abrange tal conhecimento.

Azevedo (2002) declara que a mecânica das rochas foi definida pelo *Committee Of Rock Mechanics oh the Geological Society of America* como: “a ciência teórica e aplicada do comportamento mecânico da rocha; é o ramo da ciência que se preocupa com a resposta da rocha aos campos de força do seu ambiente físico”.

Como o maciço rochoso vai se comportar na área até alcançar a profundidade pela L.C.A. e ainda como irá se estabilizar diante da transição das operações sob a técnica de L.S. é determinado por essa ciência. Ainda no mesmo contexto Azevedo (2002, *apud* Goodman 1989) afirma,

[...] a mecânica das rochas inclui alguns aspectos não considerados em outros campos da mecânica aplicada – a seleção geológica do terreno mais do que o controle das propriedades dos materiais, medidas das tensões iniciais e análise, por meio de gráficos e modelos, dos múltiplos modos de ruptura. A mecânica das rochas está, então, estritamente relacionada com a geologia e a engenharia de geologia.

Com essa definição, observa-se que os níveis de esforço geotécnico por fase de projeto que será desenvolvido no caso de uma transição ou ainda sob a perspectiva de L.C.A. é essencial na análise do aspecto estrutural da cava.

Azevedo (2002), afirma sobre maciço rochoso que é

Conjunto formado pela matriz rochosa e por todas as discontinuidades presentes, contêm feições em geral planares ou tabulares, originadas por processos tectônicos ocorridos durante a evolução geológica e que apresentam propriedades de resistência e rigidez muito inferiores à matriz rochosa circunvizinha.

E ainda afirma sobre o mesmo contexto que planos como juntas, falhas e alguns casos de foliações proeminentes e contatos geológicos bruscos constituem-se em exemplos típicos.

Pode-se notar que pela avaliação geológica que existe é característico desse maciço rochoso planos de fraqueza representados por zonas de cisalhamento e fraturas.

Para melhor entendimento do material estudado o levantamento geológico da área estudada será apresentado a seguir.

De acordo com o Processo Número RFP - 860.787/2012:

“A geologia local da área de pesquisa é representada por rochas e sedimentos das seguintes unidades: Complexo Goiano, Complexo Metamórfico Aruanã-Pindorama, Grupo Serra da Mesa e Aluviões Holocênicos. Destas, a de maior expressão e que ocorre praticamente em quase a totalidade da área é o Complexo metamórfico Aruanã-Pindorama.

De um modo geral, as principais litologias encontradas na área são os micaxistos com granadas e quartzitos subordinados; localmente também são evidentes restos de paleossomas gnáissico-migmatíticos intensamente cataclasados e milonitizados, conferindo a rocha um aspecto xistoso característico.

As jazidas de minério granatífero posicionam-se em relevo plano, intensamente arrasado, com pacote de rocha alterada da ordem de até 30m, as quais formam lentes mineralizadas com até 400m de extensão e espessuras que não ultrapassam 20 metros. Os corpos estão associados às zonas de cisalhamentos, onde se dispõem como colunas ou barras do tipo *mullions*, com caimentos no geral para noroeste em ângulo de até 25°, onde a rocha granatífera encontra-se aflorante na superfície. Ocorre ainda enriquecimento residual de granadas, que se comportam como resistatos no solo de alteração.

Os materiais das jazidas correspondem no geral à rocha quartzo micácea, gnaissificada, tendo como encaixantes lentes de pegmatito quartzo-feldspático e muscovita, grosseiro, caulinzado. Junto, ocorrem delgadas lentes (inferiores a 3m de espessura) de quartzito feldspático, com muscovita, rocha de textura média a grosseira.

Todas as relações de contato fazem-se por meio de planos de cisalhamento e espelhos de falha cobertos por ultramilonitos alterados. Portanto, a necessidade de reajuste ao método de lavra de bancadas, se dá pela existência de um espesso manto de intemperismo num ambiente plano e arrasado, o que torna os taludes extremamente instáveis”.

Já se pode notar que pelo comportamento parcial desse material em meio as técnicas de L.C.A. que é facilmente desintegrado, pois a tensão e coesão entre as partículas constituintes não é alta o suficiente para transpor esse material a um novo método operacional. As principais características notadas são:

- Relevo plano, intensamente arrasado, com pacote de rocha alterada da ordem de até 30m.
- Os corpos estão associados às zonas de cisalhamentos.
- Todas as relações de contato fazem-se por meio de planos de cisalhamento e espelhos de falha cobertos por ultramilonitos alterados.
- Existência de um espesso manto de intemperismo num ambiente plano e arrasado (o que torna os taludes extremamente instáveis).

De acordo com a avaliação geológica declarada pelo geólogo da mina, o plano de fraqueza principal varia de N10 a N15E, com mergulho médio de caimento de 70 a 85°. Tem uma gama de variação de zonas de fraqueza representadas nessa zona principal de cisalhamento, onde, dependendo do local em que se coleta amostra, pode variar de 80 a 85° o mergulho.

É exatamente nesse plano principal que se tem o desenvolvimento das faces da rocha mais micáceas que são estruturas de fraqueza natural dessa zona de cisalhamento, como por exemplo, o crescimento de mica que forma uma zona de ruptura (de fraqueza), da mesma forma que o minério se aloja nesse sistema com tais características, pois os fluidos da rocha enriquecido de granadas se rescritalizam nesses planos de fraqueza.

Existem dois sistemas, o principal que é o próprio sistema de cisalhamento e paralelamente quando este traciona e rompe, ele gera uma série de trincas que ficam abertas, e que gera outra zona de fratura.

Azevedo (2002) afirma que o maciço rochoso deve ser reconhecido como um material descontínuo, que pode ter propriedades diferentes em pontos e direções diferentes. Não é um material fabricado, mas um material que foi frequentemente submetido a ações mecânicas, térmicas e químicas ao longo de milhões de anos.

Ainda no mesmo contexto questiona e explica,

Supondo-se que possam ser estimadas as tensões preexistentes (iniciais) no maciço rochoso e que se possa prever como estas tensões serão modificadas pelas construções

e operação das obras de engenharia, como se pode determinar o comportamento do maciço (se a rocha vai romper, fissurar, empenar, escoar, etc.)? Utiliza-se um critério de ruptura – equações que agrupam as combinações limite dos componentes de tensão, separando as condições aceitáveis das condições inadmissíveis.

O estudo e determinação das propriedades mecânicas, além da caracterização geológica estrutural da região são fatores com elevada importância na determinação das metodologias aplicadas em cada planejamento.

Uma série de sistemas empíricos de classificação e caracterização do maciço rochoso permitem a definição dos distintos parâmetros geomecânicos. Esses tipos de dados se tornam fundamentais na hora de ter uma projeção adequada e otimizada da cava final e também para uma possível transição pois garante condições de estabilidade dos taludes e de segurança no seu desenvolvimento.

Para atender essa afirmativa será realizado o teste de compressão axial (simples) com o objetivo de obter resultados acerca do comportamento do maciço rochoso, mais precisamente da rocha encaixante.

O teste de compressão axial de acordo com Azevedo (2002) é o ensaio mais frequentemente utilizado em mecânica das rochas na determinação da sua resistência e deformabilidade. A grande maioria das classificações de materiais rochosos utiliza dados de compressão simples. O ensaio de compressão axial é de execução simples, entretanto a preparação de amostra, cilíndrica, pode ser difícil e cara.

A resistência à compressão simples corresponde à carga de ruptura da amostra, expressa por

$$\sigma_c = q_u = P/A$$

$\sigma_c = q_u$ – resistência à compressão uniaxial máxima ou última;

P – carga de ruptura;

A – área inicial da amostra.

A execução do teste em laboratório foi de certa maneira simples, porém a preparação da amostra foi difícil pelo tempo que levou para extrair os testemunhos das amostras e cara pelo uso de aditivos para o motor de perfuração do laboratório e ainda de combustível para ir até o local de estudo que fica a aproximadamente 300km de Palmas. Os resultados serão apresentados no capítulo 4 deste trabalho.

Para ser realizada uma análise econômica prévia pode-se considerar os parâmetros básicos que foram abordados no Relatório Final de Pesquisa – RPF, processo número 860.787/2012.

Parâmetros básicos

I- Teor médio: 1 % de granada classificável por tonelada de rocha mineralizada. É considerado o valor de R\$16,65/kg de granadas classificadas;

II- A relação estéril/minério oscila entre 4,7 e 6,2:1. Por conservadorismo (que define algo próximo do que seja mais ótimo frente a esses dados levantados), nos cálculos de viabilidade econômica toma-se como 6,2:1.

III- Para cada metro cúbico de rocha explorada 86% é descartada como rejeito e 14% é constituído de sólidos não desagregáveis retidos em malha de ¼” de abertura.

IV- A pesquisa que resultou na cubagem de 247.182,65t de rocha mineralizada, portanto 3.139, 22 t de granada classificável foi conduzida de maneira confiável com resultados consistentes.

V- A utilização da mão de obra é privilegiada já que boa parte do processo depende de seleção e classificação manual.

VI - A produção anual de minério projetada é de 20.000t até o vencimento do Alvará. A reserva medida suportaria 12 anos de operação nesta escala.

Nos Resultados serão apresentadas quais variáveis estão relacionadas com essa análise econômica e que precisa ser abordada no estudo de qualquer possibilidade de aperfeiçoamento de um mesmo método ou transição de um para outro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta análise ocorreu em etapas sucessivas. O levantamento bibliográfico contextualizou a ocorrência geológica e a partir daí foram analisados trabalhos acadêmicos com características inerentes ao estudo realizado. A utilização do banco de dados de uma consultoria especializada foi a base para a caracterização técnica, informações do desenvolvimento e planejamento da mina ao longo do histórico técnico-econômico, entre outros.

No levantamento bibliográfico realizado através dos relatórios da consultoria especializada foram encontrados dados referentes ao planejamento da mina, dados relacionados aos aspectos econômicos, estruturais, geológicos, ambientais, entre outros.

Essas informações serviram de base para contextualizar a caracterização técnica e analisar o desenvolvimento do planejamento que desencadeou esse estudo, onde foi avaliada a possibilidade de aperfeiçoamento através do novo design da cava bem como será a de conhecimento prévio do que pode ser desenvolvido após alcance da cava final.

Na etapa seguinte, com essas informações, foi possível analisar as principais alternativas e suas respectivas implicações, para o aproveitamento econômico das porções mineralizadas remanescentes da cava final, propondo maior aprofundamento do conhecimento geológico/geotécnico que permitirá maiores intervenções e com isso afirmar tal possibilidade de mudança das técnicas de extração.

Com isso foram analisados os critérios de decisão inerentes a esse processo, bem como a abordagem econômica e estrutural que perfazem a base da escolha necessária, mesmo que de forma parcial.

Foi realizada visitas ao local para registros de informações juntamente com os funcionários, registros de fotos da cava e da atividade num todo, para comparações do seu desenvolvimento ao longo do tempo e, ainda, coleta de amostras para execução do teste de compressão simples.

Das amostras coletadas foram extraídos testemunhos com dimensões aproximadas de 12cm de comprimento e diâmetro de 5 cm cada. A extração foi realizada no laboratório de Engenharia de Minas no Ceulp/Ulbra, com auxílio de um equipamento perfurador, modelo Branco.

Após essa extração foi realizado o teste de compressão axial no laboratório de Engenharia Civil em uma máquina universal de ensaios (tração, compressão, flexão, etc) de

modelo PC 200 (Emic), que elaborou gráficos de resistência à tensão em relação ao tempo e que serão apresentados no Resultados e Discussões deste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No desenvolvimento da primeira parte deste trabalho visando abordar os aspectos que envolveram o replanejamento da cava, sendo seu design e método operacional alterados ao longo do histórico-econômico, foi possível notar que com a decisão de produzir ao mesmo tempo do replanejamento, obteve-se respostas positivas em todo o cenário mas ainda predisposto ao aperfeiçoamento dentro da viabilidade que for possível.

No aspecto econômico houve e ainda tem a possibilidade de investimento no desenvolvimento da cava atendendo suas respectivas premissas legais paralelo a obtenção de lucro que permite investimento, por exemplo, em maquinários e maior número de trabalhadores.

No aspecto estrutural pelas características do maciço rochoso e que ainda é passível de adequações, houve um avanço no sentido do corpo mineralizado, aprofundando a cava em 40 metros, aproximadamente. O que foi possível avaliar sem sondagem foi até a profundidade de 50 metros e hoje a altura das paredes nas partes mais profundas já está bem próxima desse valor.

Inicialmente no ano de 2008 para o design da cava foram desenvolvidos taludes, como pode ser visto na figura 3, com altura de bancadas e bermas definidas por um método de dimensionamento específico, onde foi declarado pelo geólogo da mina, que foi feita a modelagem da jazida e sobre isso se estabeleceu um padrão de abertura da mina, taludes e bermas, baseado em um modelo padrão de definição.

. Mas sendo necessário avançar para lavrar maior quantidade de material e pela decisão em redimensionar a cava para atender os aspectos legais, ambientais e econômicos, o design da cava mudou, atendendo o que era necessário.

Na figura 4 a seguir, podemos ver a diferença do desenho da cava onde a frente de lavra continuou no mesmo ponto e as paredes menos definidas porém estabilizadas. Na figura 5 pode-se notar o quanto a produção aumentou frente a profundidade alcançada, onde hoje está a aproximadamente 40 metros de altura e com uma quantidade significativa de maquinário trabalhando.

Com essa evolução da cava e com as técnicas operacionais sob a perspectiva de L.C.A., onde foram aperfeiçoadas ao longo do tempo, buscando atender os requisitos mínimos, observa-se que a tendência natural da mina é aprofundar cada vez mais a cava e a necessidade em buscar soluções que se adequem a essa situação é de fundamental importância.



Figura 3: Jazida Rodolita I, Cava principal em Dezembro 2008, com os trabalhos de extração próximos à cota 315m, vista do sul para o norte. Lavra paralisada em fase manutenção do lençol freático rebaixado com bombeamento. Fonte: PAE - Processo número 860.787/2012.



Figura 4: Cava principal – Outubro 2013. Fonte: Própria.



Figura 5: Cava principal – Maio 2014. Fonte: Própria.

A seguir será feita uma análise comparativa entre o que foi abordado na primeira parte deste trabalho e o que está sendo analisado e proposto nessa segunda parte.

Aspecto estrutural

O redimensionamento das bancadas para melhor **estabilidade dos taludes**:

I- Para que na própria cava não se concentrasse os pontos críticos relacionados com a segurança, os taludes, em fase de corte ou já definitivos, foram redimensionados em alturas entre 4 e 6 metros, com bermas de 3,5m, suficientes para trânsito de máquinas e caminhões, ou seja, com existência de bancadas para melhor estabilização dos mesmos (RPF, Processo nº 860.787/2012).

Posteriormente o que foi desenvolvido foi para assegurar a estabilidade das paredes da cava pois já não havia mais o desenho dos taludes pelo avanço que a cava teve e nem a consideração desses dados pois o avanço anulou a importância dos mesmos. Para esses resultados foi feita a modelagem da jazida e sobre isso se estabeleceu um padrão de abertura da mina, taludes e bermas, baseado em um modelo padrão de definição.

A figura 6 a seguir, mostra a representação dessas informações na seção ideal da cava de extração quando o projeto de taludes foi desenvolvido.

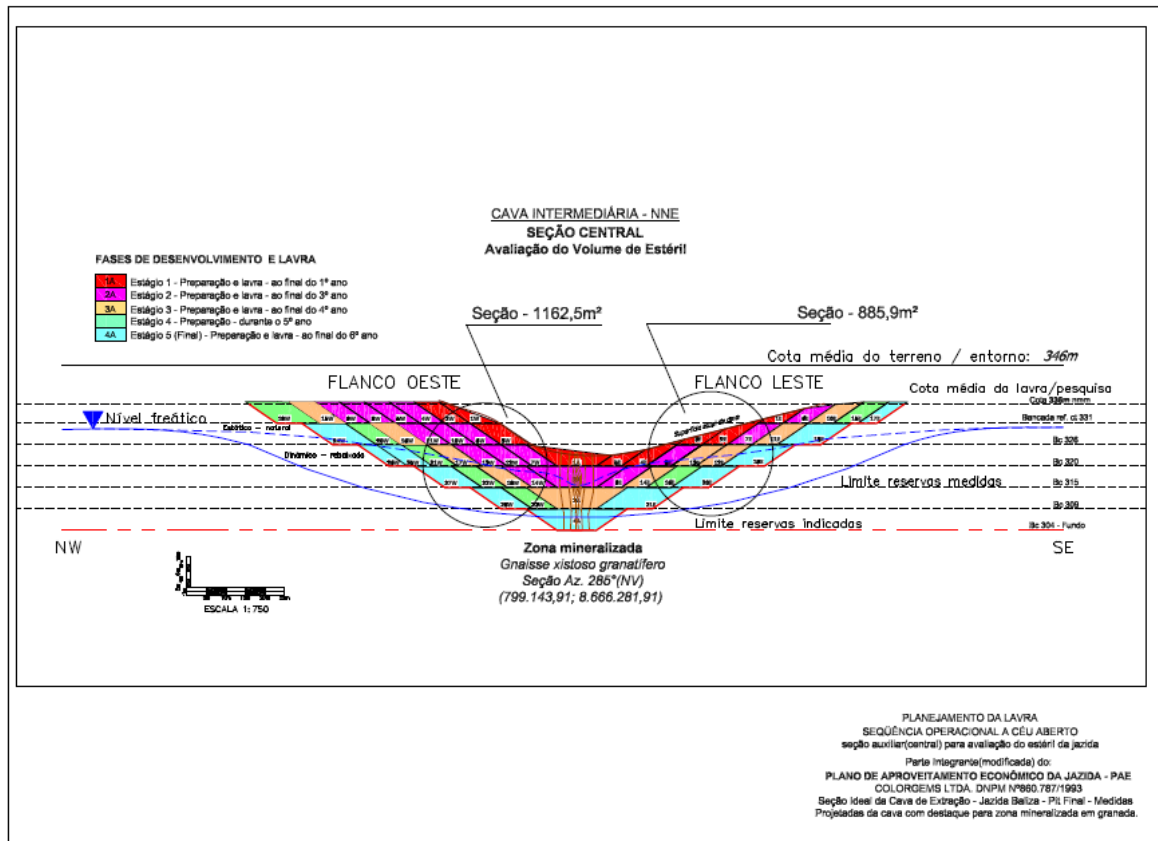


Figura 6: Seção ideal de cava de extração com definição de taludes.

II- Para o aspecto produtivo e econômico da jazida é necessário adequar esses valores através de outros estudos que podem ser feitos, onde através da proposta do projeto para o retaludamento está previsto avançar mais 50 metros. Os parâmetros que definiram isso é que além dos indícios que a própria cava apresenta em relação ao seu comportamento estrutural, existe ainda a experiência dos profissionais que desenvolvem o projeto da cava baseados na caracterização geológica que já existe.

De acordo com o geólogo da mina, Marcos Bonato, com isso permite-se uma suposição, com elevado grau de segurança, que a estrutura pode se manter até esse nível de 50 metros que é o nível que se tem conhecimento, mas para a realização de um planejamento futuro da mina, somente uma campanha de sondagem pode possibilitar que o desenvolvimento da cava seja feito com razões técnicas e de segurança.

Através das sondagens é possível determinar as zonas de fraqueza, se a rocha tem potencial, se a zona estudada está ou não mineralizada, quais os componentes, entre outras características inerentes a caracterização técnica propriamente dita.

A modelagem do corpo mineralizado realizada até então não assegura esse objetivo como fonte de informação e conhecimento suficientes.

Sobre os aspectos das características estruturais que estão relacionadas ao tema deste trabalho a avaliação geológica declarada pelo profissional afirma que existem dois sistemas, o principal que é o próprio sistema de cisalhamento e paralelamente quando esse sistema sofre tração e rompe (pelas forças contrárias de atuação em torno do corpo mineralizado que gera o cisalhamento), ele gera uma série de trincas que ficam abertas e que gera uma outra zona de fratura que não é objeto desse estudo.

O plano de fraqueza principal varia de N10 a N15E, com mergulho médio de caimento de 70 a 85°. Tem uma gama de variação de zonas de fraqueza representadas nessa zona principal de cisalhamento, onde, dependendo do local em que se coleta amostra, pode variar de 80 a 85° o mergulho.

É exatamente nesse plano principal que se tem o desenvolvimento das faces da rocha mais micáceas que são estruturas de fraqueza natural dessa zona de cisalhamento, como por exemplo, o crescimento de mica que forma uma zona de ruptura (de fraqueza), da mesma forma que o minério se aloja nesse sistema, pois os fluidos da rocha enriquecido de granadas se rescritalizam nesses planos de fraqueza. Isso pôde ser observado no Corpo de Prova 1 – CP1 em que o testemunho sofreu carga e tensão e se rompeu no plano de fraqueza da amostra e onde havia grande presença de mica, representando essa zona no contexto da mina. Maiores detalhes serão comentados posteriormente.

Nota-se com essa avaliação que existe uma vulnerabilidade estrutural na cava e por isso a necessidade de estudos preliminares quanto a caracterização geotécnica e geomecânica.

Aspecto Ambiental

I - A produção mais mecanizada com o uso de desmonte mecânico e de explosivos fez com que fossem gerados impactos mais representativos que no outro método, como se tivessem sido potencializados. Pode-se citar a geração de ruídos e despejo de óleo pelo uso equipamentos e emanção de ruídos e vibrações pelo uso de explosivos. Esses foram os resultados com aspecto mais negativo da otimização dessa parte do processo.

O desmonte por explosivos sempre foi utilizado porém em proporção bem menos representativa do que hoje, por isso o desmonte por explosivos era associado com desmonte por escavação mecânica, já que o material permitia dessa forma. Como operação complementar a esse tipo de desmonte, era utilizado o desmonte hidráulico para desagregação do material desmontado.

Com a mudança para o desmonte somente por explosivos, obteve-se ganhos em condições de insalubridade do ambiente do trabalho, pois não houve mais encharcamento dos trabalhadores durante o período de atividades como acontecia com o uso do desmonte hidráulico.

II- Para a presente análise temos que a transição de método de Lavra a Céu Aberto (L.C.A.) para Lavra Subterrânea (L.S) irá transpor esses resultados alcançados com L.C.A., pois o desenvolvimento da cava atual até a cava final, propõe medidas de ajustes que necessitam de um controle maior, mantendo rigorosamente a qualidade que representa uma relação mais íntima do planejamento e execução do projeto com o aspecto ambiental.

E se um dia for determinada a transição de método para a L.S. será necessário abrir um novo leque de informações e pesquisas para recuperação da área da mina enquanto método L.C.A. bem como sua estabilidade para não comprometer as atividades em subsolo, se assim for.

Aspecto de Segurança do trabalho

As Normas Reguladoras da Mineração - NRM's, mais precisamente a NRM 22, definem o desenvolvimento das atividades em subsolo de acordo com alguns critérios que se relacionam principalmente com a segurança da área da mina contribuindo ao fator de segurança do trabalho de acordo com o fator principal de estudo deste caso que é a estabilidade dos maciços pelas características geológicas do material, como se pode notar na descrição dessa norma a seguir:

NRM 22.14 - Estabilidade dos Maciços:

22.14.1 - Todas as obras de mineração, no subsolo e na superfície, devem ser levantadas topograficamente e representadas em mapas e plantas, revistas e atualizadas periodicamente por profissional habilitado.

22.14.1.1 - Devem ser realizadas, no mínimo a cada seis meses, medições topográficas para verificar a verticalidade das torres dos poços.

22.14.2 - A empresa ou Permissionário de Lavra Garimpeira deve adotar procedimentos técnicos, de forma a controlar a estabilidade do maciço, observando-se critérios de engenharia, incluindo ações para:

a) monitorar o movimento dos estratos;

b) tratar de forma adequada o teto e as paredes dos locais de trabalho e de circulação de pessoal;

c) monitorar e controlar as bancadas e taludes das minas a céu aberto;

d) verificar o impacto sobre a estabilidade de áreas anteriormente lavradas e

e) verificar a presença de fatores condicionantes de instabilidade dos maciços, em especial, água, gases, rochas alteradas, falhas e fraturas.

22.14. 3 – Os métodos de lavra em que haja abatimento controlado do maciço ou com recuperação de pilares deverão ser acompanhados de medidas de segurança, que permitam o monitoramento permanente do processo de extração e supervisionado por pessoal qualificado.

22.14.4 – Quando se verificarem situações potenciais de instabilidade no maciço através de avaliações que levem em consideração as condições geotécnicas e geomecânicas do local, as atividades deverão ser imediatamente paralisadas, com afastamento dos trabalhadores da área de risco, adotadas as medidas corretivas necessárias, executadas sob supervisão e por pessoal qualificado.

22.14.4.1 – São consideradas indicativas de situações de potencial instabilidade no maciço as seguintes ocorrências:

a) em minas a céu aberto:

I - fraturas ou blocos desgarrados do corpo principal nas faces dos bancos da cava e abertura de trincas no topo do banco;

II - abertura de fraturas em rochas com eventual surgimento de água;

III - feições de subsidências superficiais;

IV - estruturas em taludes negativos e

V - percolação de água através de planos de fratura ou quebras mecânicas; e

b) em minas subterrâneas:

I - quebras mecânicas com blocos desgarrados dos tetos ou paredes;

II - quebras mecânicas no teto, nas encaixantes ou nos pilares de sustentação;

III - surgimento de água em volume anormal durante escavação, perfuração ou após detonação e

IV - deformação acentuada nas estruturas de sustentação.

22.14.4.2 - Na ocorrência das situações descritas no subitem 22.14.4.1 sem o devido monitoramento , conforme previsto no subitem 22.14.2, as atividades serão imediatamente paralisadas, sem prejuízo da adoção das medidas corretivas necessárias

22.14.4.2.1 - A retomada das atividades operacionais somente poderá ocorrer após a adoção de medidas corretivas e liberação formal da área pela supervisão técnica responsável.

22.14.5 - A deposição de qualquer material próximo às cristas das bancadas e o estacionamento de máquinas devem obedecer a uma distância mínima de segurança, definida em função da estabilidade e da altura da bancada.

22.14.6- É obrigatória a estabilização ou remoção, até uma distância adequada, de material com risco de queda das cristas da bancada superior.

Aspecto econômico

I- Na primeira parte do trabalho vimos que no aspecto econômico obteve-se maiores despesas com mão-de-obra mais qualificada para manuseio de maquinários mas que também renderá retornos financeiros pela produção mais mecanizada. E ainda o trabalhador terá mais vantagens pela remuneração e experiência.

II- Já para o que é proposto nessa presente análise podemos ressaltar:

- Os investimentos permitidos pelo rendimento do replanejamento,
- Desenvolver estudos e pesquisas que identifiquem a relação admissível entre a viabilidade de manter o método de L.C.A. ou de transição para L.S.,
- Fazer um levantamento dos custos de estabilização da cava e maquinário necessário para alcançar a cava final,

- Propor novos investimentos em pesquisas mais específicas que representem qualitativa e quantitativamente as características inerentes ao corpo mineralizado e à área da cava.

Aspectos produtivos

I- Foi possível notar que a mina passou de um sistema de garimpo com considerável retirada de material de interesse sem planejamento, para um sistema mecanizado e organizado.

Com o aperfeiçoamento do método operacional e técnicas sob a perspectiva de L.C.A, foi possível gerar recursos suficientes para o replanejamento da mina envolvendo economicidade a médio e longo prazo, buscando encontrar o equilíbrio entre produzir e replanear, por exemplo em 2013, foi possível investir 70% dos lucros obtidos em replanejamento, ou seja, investir no que fosse necessário para desenvolver a cava de acordo com os parâmetros estabelecidos para a nova definição. (Informação verbal).

II- Foi possível nas análises feitas que ainda hoje o objetivo na mina era minimizar os pontos críticos representados pela vulnerabilidade estrutural da cava e por isso a necessidade de um desenho que possibilite isso, por isso foi realizado um teste que pode determinar parcialmente o comportamento da rocha perante ações mecânicas que gerem carga e tensão, para dessa forma, definir o melhor design que dê a estabilidade necessária para a cava final e para atividades além desse ponto.

Foi proposto e será necessário ainda a abordagem relacionada a essa proposição que é considerar o “Status de Nível Geotécnico” que engloba praticamente todos os níveis de desenvolvimento da cava. Os modelos apresentados a seguir foram propostos por Read e Stacey (2012).

Foi possível evidenciar o Modelo Geológico que está intrinsecamente relacionado ao Modelo Estrutural e que influencia diretamente as causas prováveis que possam gerar uma instabilidade relacionadas as características da geologia local.

Foram abordados também outros modelos que porventura podem otimizar futuros planejamentos da cava, bem como do seu design. Foram citados:

O “Modelo Hidrogeológico” tem sua importância já que em 2008 as atividades foram paralisadas por circunstâncias estruturais que envolviam esse contexto hidrogeológico, pela lavra ter sido paralisada em fase de manutenção do lençol freático sendo este, rebaixado com bombeamento, como mostrado na Figura 3.

Das duas paredes da cava, uma apresenta um material que permite maior percolação de água, inundando parte do acesso na frente de lavra. Já foi proposto em novo projeto que será feita a transposição da Barragem de rejeitos para outro local onde não seja possível que a água presente na polpa seja infiltrada pelo solo e alcance essa parede, pois ainda fica próxima.

Ainda avaliando os modelos propostos Read e Stacey (2012) afirmam que a “Força da Rocha Intacta” é entendida como a capacidade que a rocha em seu estado intacto, ou seja, natural, tem em suportar qualquer movimentação previamente definida sem gerar instabilidade no maciço rochoso que a hospeda. De acordo com a avaliação geológica que consta no capítulo 2 deste trabalho, as principais características do corpo são:

- Relevo plano, intensamente arrasado, com pacote de rocha alterada da ordem de até 30m.
- Os corpos estão associados às zonas de cisalhamentos.
- Todas as relações de contato fazem-se por meio de planos de cisalhamento e espelhos de falha cobertos por ultramilonitos alterados.
- Existência de um espesso manto de intemperismo num ambiente plano e arrasado (o que torna os taludes extremamente instáveis).

Essas características definem que o corpo rochoso se encontra principalmente em zona de máxima intensidade dos eventos tectônicos e por isso é passível de se encontrar zonas misturadas e alteradas. De acordo com que vai se afastando da zona principal de fratura que é onde está a maior concentração de minério, é possível se encontrar a rocha com características mais originalmente preservadas, sem deformações e planos de fraqueza (Informação Verbal).

Sendo assim, afirma-se que a força da rocha intacta para a rocha encaixante à zona de cisalhamento, que é essa zona principal de fraturas, pode suportar maior carga e pressão, mantendo seu estado já que ela difere nas características e no comportamento estrutural, pois não apresenta deformações e planos de fraqueza.

O aumento de conhecimento a respeito dessa área pode ser feito com testes como dasquais foi realizado um para esse trabalho, como medida de resistência, teste de tração e compressão em maior número de amostras, entre outros.

A “Força de defeitos estruturais” é entendida como a capacidade que a rocha tem em receber alguma força atuante e gerar defeitos estruturais. Nesse estudo pode ser associado às áreas do maciço rochoso que tem relações de contato que se fazem por meio de planos de cisalhamento e espelhos de falha cobertos por ultramilonitos alterados que representam áreas que podem representar esse nível geotécnico.

Com isso é necessário atribuir maior importância a essas áreas pois podem representar zonas de risco para a estabilidade das paredes da cava bem como para qualquer mudança de método.

É a necessidade de uma “Caracterização Geotécnica” mais bem elaborada para definir e dar segurança ao banco de dados já formado. Isso já vem sendo confirmado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Em se tratando de estabilidade, produtividade e segurança, a aplicação de um desses métodos ou a maioria deles, pode trazer retornos bem significativos. Podem ser considerados o que Read e Stacey (2012) abordam como técnicas que aumente o conhecimento do material e do seu comportamento:

- Perfuração e mapeamento alvo;
- Refinamento dos dados geológicos e modelo 3D;
- Interpretação refinada do modelo estrutural 3D;
- Refinada interpretação dos dados da estrutura e domínios estruturais;
- Selecionar amostragem e testes de laboratório e refinamento de dados;
- Manutenção contínua do banco de dados e um modelo geotécnico 3D;
- Instalação de piezômetros;
- Aprimoramento do banco de dados hidrogeológicos e modelo 3D;

Os estudos geotécnicos precisam ser desenvolvidos para que a alteração das condições de equilíbrio da massa a ser lavrada não constitua regionalmente um perigo à desestabilização devido à pequena monta do serviço; entretanto a abertura da cava implica necessariamente na escavação, remoção e disposição de alguma quantidade de material.

A própria continuidade dos trabalhos de lavra exige que se mantenha o equilíbrio das formações locais. Os problemas decorrentes quanto à instabilidade podem ser facilmente resolvidos através desses estudos complementares e também seguindo o que pede a legislação, como se pode notar na declaração do DNPM (2002), Portaria nº237 na NRM 2.4.1 que devem ser adotados procedimentos técnicos de forma a controlar a estabilidade dos taludes, observando-se critérios de engenharia, incluindo ações para:

- a) Controlar o movimento dos estratos;
- b) Monitorar as bancadas e taludes das minas a céu aberto;
- c) Verificar o impacto sobre a estabilidade de áreas lavradas e

d) Verificar a presença de fatores condicionantes de instabilidade dos taludes, em especial, água, gases, rochas alteradas, falhas e fraturas.

Para isso o conhecimento geológico, geomecânico e geotécnico da estrutura pode satisfazer a compreensão necessária que dê suporte e segurança para realização de futuras adequações.

Para complementação desse conhecimento foi considerado que o teste de compressão simples, como foi anteriormente dito, que é um ensaio que é mais frequentemente utilizado em mecânica das rochas na determinação da resistência e deformabilidade. A grande maioria das classificações de materiais rochosos utiliza dados de compressão simples.

No intuito de alcançar resultados satisfatórios foram coletadas amostras in situ para obtenção de testemunhos com dimensões de 12cmx5cm (diâmetro), como podemos ver na figura 7 a seguir. O teste foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil, no equipamento de compressão simples, onde foi medida a tensão que a rocha suporta sobre a influência de uma carga sobre determinada área, como mostra a Figura 8.



Figura 7: Testemunhos extraídos de blocos de rocha coletados in situ, na Jazida Rodolita I, em dois pontos distintos.

No corpo rochoso na zona de máxima intensidade dos eventos tectônicos é possível de se encontrar zonas misturadas ou juntas umas das outras, isso é representado na figura 8 a seguir que onde se vê a apresentação parcial do corpo mineralizado. De acordo com que vai se afastando dessas zonas se encontra a rocha mais originalmente preservada, sem deformações encontradas e planos de fraqueza. Sendo assim, o CP2 pode ser originado de um núcleo mais preservado da encaixante original.

Podemos ver na representação a seguir que dos dois sistemas que existem, comentados anteriormente, é exatamente sobre o plano principal que se concentram as atividades de lavra bem como a maior quantidade de minério. Na representação isso pode ser observado na escala do desenho onde se define Zona de Cisalhamento/localização das atividades da mina que.

Foi visto que nessa zona se tem o desenvolvimento das faces da rocha mais micáceas que são estruturas de fraqueza natural dessa zona de cisalhamento, como por exemplo, o crescimento de mica que forma uma zona de ruptura (de fraqueza), da mesma forma que o minério se aloja nesse sistema, pois os fluidos da rocha enriquecido de granadas se rescritalizam nesses planos de fraqueza. E no CP1 pode-se observar através da compressão sofrida pela rocha, que no plano de fraqueza da amostra existe uma quantidade considerável de mica que define esse crescimento de minerais nessas aberturas que constituem as falhas ou fraturas da estrutura.

Sob esse ponto de vista é necessário desenvolver estudos que estabeleçam critérios de estabilidade para possível transição de método.

Logo a seguir será apresentado uma representação esquemática sobre a avaliação feita pelo profissional. Nessa representação consta a zona principal de cisalhamento, a direção em que essa zona está orientada, as fraturas formadas pelas forças atuantes de atrito e que geram o cisalhamento a rocha, entre outros.

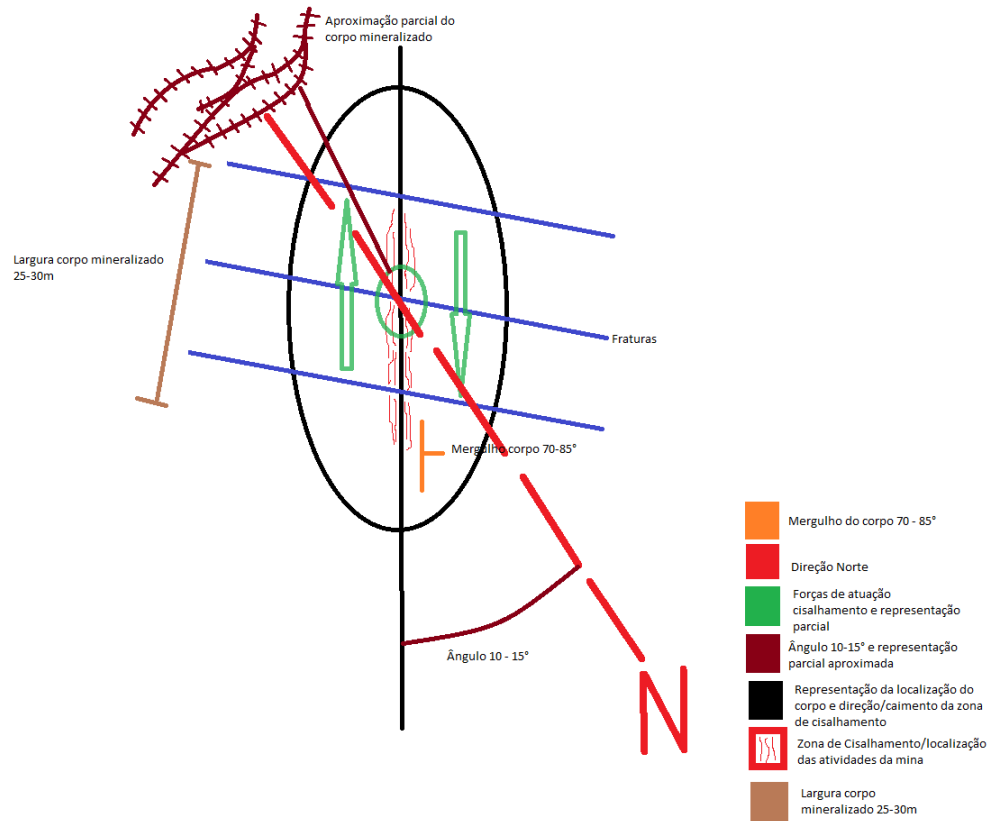


Figura 8: Representação esquemática da cava. Fonte: Própria.

A respeito da representação pode-se afirmar que tendo esforço em sentido contrários (representado pelas setas verdes no desenho), dentro do elipsoide se está representado por uma parcela bem pequena. Quando se faz ou gera atrito, como foi realizado no corpo de prova 1, são geradas trincas paralelas, ou seja, o que aconteceu no corpo de prova acontece em nível de jazida. Sendo assim, quando se faz um tensionamento do esforço no sentido contrário característico do cisalhamento, vão ser geradas uma série de estruturas anastomozadas, uma emendando com a outra (pode ser observado na parte superior do desenho na Apresentação parcial do corpo mineralizado), que são zonas de trincas que podem alojar mineralização e essas zonas constituem a estrutura principal da cava. Essa zona principal varia entre N10-N15E mergulhando pra NW. Portanto, essa zona principal de cisalhamento que constitui a linha principal de fraqueza das rochas da jazida e que é um sistema NW com característica praticamente ortogonal.

Paralelamente quando se tem essa tração se gera outras estruturas, outras linhas de ruptura no mesmo sentido do mergulho do corpo de 70 a 85° (representado pelas linhas em azul

definidas como Fraturas e a forma do mergulho em laranja). Essas linhas são importantes para o estudo mas não permitem o crescimento de minerais, elas somente trincam a rocha, ou seja, não apresentam a mesma vulnerabilidade estrutural da zona principal.

Então se tem dois sistemas, o principal que é o próprio sistema de cisalhamento e paralelamente quando isso traciona e rompe, ele gera uma série de trincas que ficam abertas, que é uma outra zona de fratura, porém não esta não é o objeto do estudo.

É necessário ir no detalhe da mina, medir todos os planos de fraqueza com bússola e com isso se identifica esses dois sistemas, pois como afirma Azevedo (2002), a orientação de uma descontinuidade é determinada por meio de bússola geológica e os resultados podem ser apresentados através de diagramas de blocos, pela roseta de juntas ou pela projeção estereográfica.

Na abordagem da caracterização geológica juntamente com a avaliação do profissional foi levantado a possibilidade de elaboração do elipsoide de deformação da rocha durante a realização do teste para futuros trabalhos de pesquisa, mas mesmo não tendo desenvolvido neste trabalho, foi possível comparar os resultados apresentados pelas amostras com um elipsoide.

A figura a seguir mostra a representação de um elipsoide de deformação e sua constituição. De acordo com Salumani (2009), os eixos de deformação são representados pelas letras “x”, “y”, “z”, cuja relação é $x > y > z$, ou seja, mostra ordem decrescente de deformação. Os eixos dos elipsoides variam de acordo com o stress aplicado na superfície rochosa. Desta forma os eixos podem sofrer,

- (a) estiramento/encurtamento/encurtamento;
- (b) estiramento/encurtamento/estiramento;
- (c) encurtamento/estiramento/estiramento.

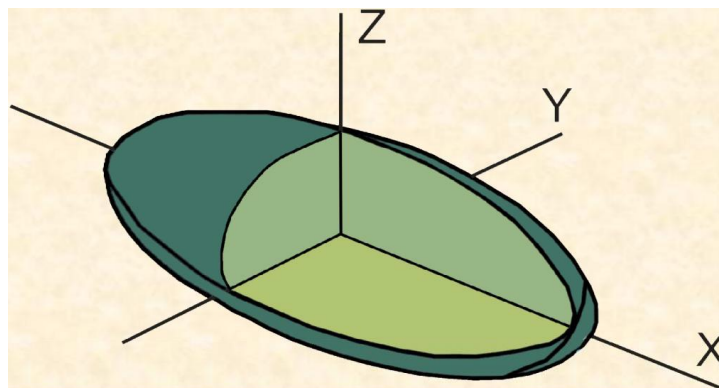


Figura 9: Elipsoide de deformação. Fonte: Salamuni, 2009.

Para essa avaliação considerou-se um corpo de prova com extremos redondos, porém no formato cilíndrico (como o CP analisado), onde se forma o plano de cisalhamento da amostra. Com a compressão sofrida será gerada uma ruptura sob esse plano, assim como aconteceu com o CP1, onde se rompeu sobre as fraturas que já existem na rocha e com isso gerou fraturas em mais dois sentidos, gerando uma fratura ortogonal e que é característico da zona estudada.

Relacionando os resultados das fraturas geradas pelo CP1 quando submetido a compressão, as fraturas mais paralelas possuem um ângulo de 90° de caimento, oblíquo ao alinhamento e com mergulho de N35W vertical.

Com isso define-se, pela avaliação do profissional, que o tipo de fratura é característico da foliação de natureza milonítica, associada a zona de cisalhamento. Milonítica porque normalmente nesses planos é onde acontece os maiores atritos desses blocos de rocha. Inicialmente gera uma “farinha de rocha” e com os esforços continuando, o mineral começa a se resscritalizar com formatos mais alongados e estirados, pois a pressão é muito grande nesse caso.

Onde tem alta pressão e temperatura tem resscritalização de outros minerais. Normalmente na zona de origem do CP1 está recristalizando mica, quartzo e ainda há um ponto de zona de fraqueza onde a granada se infiltrou e também foi resscritalizada, por isso nos fragmentos gerados pelo CP1 após realização de teste foi possível observar principalmente a ocorrência desses minerais e fragmentos do minério.

Se tem a zona mineralizada que se identificou justamente no CP1 e se tem um sistema de fraturas oblíquo associado a esse evento que podem ser menos representativas mas que foram vistas a olho nu no CP1. Uma série de estruturas se forma no momento da ruptura. Ficou comprovado pelo teste de compressão ao romper o testemunho que existe uma zona de fraqueza, pois rompeu sobre a zona de fratura da amostra e onde essa rocha representa o material que aloja a mineralização. Conseqüentemente o comportamento do CP1 representou o que acontece em nível da mina.

Esse ponto de ruptura do corpo de prova para o desenvolvimento da mina, é o sistema que a engenharia e geotecnia precisará de maior atenção pois vão ser sempre os pontos de grande ruptura dos blocos de abatimento, será sempre nesse sistema. O local onde há maior concentração de minério é a zona de maior risco estrutural pois é literalmente a zona de cisalhamento e fraqueza do maciço, onde se concentram as máximas deformações.

A figura a seguir mostra o equipamento em que foi desenvolvido o teste de compressão simples bem como o local, no laboratório de Engenharia Civil do Ceulp Ulbra.



Figura 10: Local e equipamento em que foi realizado o teste de compressão simples. Fonte: Própria.

A resistência à compressão simples (uniaxial) corresponde à carga de ruptura da amostra, expressa por

$$\sigma_c = q_u = P/A$$

$\sigma_c = q_u$ – resistência à compressão uniaxial máxima ou última;

P – carga de ruptura;

A – área inicial da amostra.

O valor de q_u é dado em Kgf que será convertido em kg. Para isso multiplica-se o valor de P para o corpo de prova 1 (CP 1), onde a carga ou força de ruptura que a amostra recebeu foi de 5843 Kgf pelo valor da aceleração da gravidade 9,80 m/s². Depois disso para cada N de força em 1kg do material divide-se o valor por 10. O resultado do CP1 para o valor de P é de 5842,97 kg.

$$\text{Sendo assim, } q_u = 5842,97\text{kg} / 5\text{cm}$$

$Q_u = 1168,6$ kg/cm que o corpo de prova da primeira amostra recebeu de carga e suportou por unidade de área, do equipamento em que foi realizado o teste.

Para o CP2 foram utilizados e desenvolvidos os mesmos critérios, onde valor de q_u é dado em Kgf que será convertido em kg. Para isso multiplica-se o valor de P para o corpo de prova 2 (CP 2), onde a carga ou força de ruptura que a amostra recebeu foi de 18582 Kgf pelo valor da aceleração da gravidade 9,80 m/s². Depois disso para cada N de força em 1kg do material divide-se o valor por 10. O resultado do CP1 para o valor de P é em kg.

$$\text{Sendo assim, } q_u = 18581,98\text{kg} / 5\text{cm}$$

$Q_u = 3716,4 \text{ kg/cm}$ que o corpo de prova da segunda amostra recebeu de carga e suportou por unidade de área, do equipamento em que foi realizado o teste.

A resistência à compressão axial suportada pelos corpos de provas foi para o CP1 de $1168,6 \text{ kg/cm}$ e para o CP2 de $3716,4 \text{ kg/cm}$. Nota-se pelos resultados que o CP2 suportou por mais tempo a carga aplicada, conseguindo alcançar um alto valor de resistência à compressão. Isso representa a capacidade que a rocha tem em suportar carga e pressão constante durante um determinado intervalo de tempo, medindo dessa forma sua competência.

O CP2 tem em sua composição, pela avaliação petrográfica realizada, quartzo, mica, biotita e pouca presença de feldspato definindo assim sua espécie mineralógica que é de micaxisto. Mineral com grande ocorrência na área estudada e que é o foco de estudo deste trabalho bem como as atividades desenvolvidas sobre ele.

Já o CP1 pela avaliação petrográfica é uma rocha rica em mica, praticamente composta por mica, com característica bem friável, além disso também contém biotita e sílica. O CP2 foi extraído de um dos blocos escolhidos na área de seleção de produtos da mina. É um material com ocorrência de granadas, foi escolhido como contra-prova para o outro bloco, que foi escolhido diretamente na cava. Este material da cava (CP2) difere do outro material (CP1), pois este tem maior ocorrência de minério.

O teste foi realizado de maneira simples, porém a obtenção dos testemunhos foi através de muito trabalho no laboratório de Engenharia de Minas. Os resultados serão apresentados a no relatório a seguir, na Figura 8:

Com os resultados apresentados pode-se avaliar o comportamento do CP1 e CP2, bem como atribuir uma classificação geomecânica pela tensão sofrida até sua ruptura e o que já foi considerado nos cálculos realizados.

A classificação geomecânica de Bienawsky (RMR), de acordo com Azevedo (2002), fornece uma avaliação geral para o maciço, que aumenta com a qualidade da rocha em uma escala de 0 a 100. Este critério baseia-se em cinco parâmetros universais:

- Resistência à compressão da rocha intacta.
- Rock Quality Designation (Qualidade do testemunho de sondagem)
- Espaçamento de juntas e fraturas
- Características das juntas
- Condições de percolação de água.

O teste escolhido se adequa a essa classificação pois está em um dos parâmetros universais estabelecido pela classificação. O quadro a seguir mostra os valores para cada classificação.

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,5-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Quadro 1: Classificação geomecânica RMR – parâmetros e coeficientes. Fonte: Google.

De acordo com o que se pode observar e com Azevedo (2002), no quadro a compressão uniaxial do CP1 foi de 29,2 MPa, com isso a resistência da rocha analisada é considerada baixa, comparada a de carvão, siltito e xisto. Já para o CP2 a compressão sofrida foi de 92,8 MPa, resistência considerada média, comparada a de arenito, ardósia e folhelho, porém bem próxima

da do valor da classificação de resistência alta de 100 MPa, comparada com granito, mármore e gnaiss. É possível que se afastar 0,50cm a 1,0m os resultados de resistência sejam bem mais altos já que o afastamento da zona de cisalhamento principal denota pouca deformação e planos de fraqueza na rocha. E o CP2 foi coletado bem no ponto da atividade da lavra, com o material com características diferentes do material de minério, bem característico da encaixante na parede da cava, porém próximo.

Com os resultados apresentados pode-se observar que para atividades que ainda serão desenvolvidas na cava, tanto no design como no avanço, o teste realizado é bem pouco representativo, mas mostra o potencial que a rocha encaixante tem em suportar a carga à compressão, tendo dessa forma resistência e competência em uma proporção de nível regular a bom.

De acordo com a classificação da dureza da rocha e com os resultados gerados, a rocha do CP1 é branda pois apresenta, segundo é mostrado na figura 8, resistência uniaxial à compressão de 25 – 50 mpa, onde a tensão de ruptura foi de 29,2 mpa.

Lembrando que os cálculos realizados anteriormente consideram a carga de ruptura em função da área inicial da amostra que é inversamente proporcional a resistência à compressão uniaxial máxima ou última. Para essa classificação considerou-se que a resistência está em função da tensão sofrida pela amostra até se romper. E a rocha do CP2 é mais dura pois apresenta a resistência próxima de 100 – 250 mpa, sendo neste caso de 92,8.

A classificação de resistência pelo índice de resistência a carga pontual para um diâmetro de 50mm ou 0,5cm pode ser comparado com os valores de resistência a compressão. No quadro a seguir observa-se os valores para alguns tipos de rocha.

Material	$I_{s(50)}$ (Mpa)
Arenito e argilito	0,05 – 1,0
Carvão	0,2 – 8,0
Calcário	0,25 – 8,0
Dolomito	6,0 – 11,0
Folhelho	0,2 – 8,0
Gnaiss facoidal	1,91 – 5,78
Kinzigito	2,79 – 5,57
Rochas vulcânicas	3,0 – 15,0

Tabela 1: Valores típicos do índice de resistência à carga pontual. Fonte: Azevedo, 2002.

Realizando cálculos considerando a tensão sofrida pelo CP1 de 29,2 sobre uma área de 5cm de diâmetro do testemunho e esse índice é calculado sobre uma área de 0,5cm, pode-se concluir que:

$$29,2 \text{ Mpa} - 5\text{cm}$$

$$X - 0,5\text{cm}$$

$$X = 2,92\text{Mpa}$$

Na tabela as rochas com esses valores de resistência são calcário, gnaisse faicodal, kinzigito.

Realizando cálculos considerando a tensão sofrida pelo CP2 de 92,8 sobre uma área de 5cm de diâmetro do testemunho e esse índice é calculado sobre uma área de 0,5cm, pode-se concluir que:

$$92,8 \text{ Mpa} - 5\text{cm}$$

$$X - 0,5\text{cm}$$

$$X = 9,28 \text{ Mpa}$$

Na tabela as rochas com esses valores de resistência são dolomito e rochas vulcânicas.

Essa é mais uma classificação que pode ser atribuída somente para comparação e valores, dos resultados alcançados com o que já existe tabelado.

Esse resultado mostrou que a competência da rocha do CP2 em relação a sua capacidade de suportar a carga para níveis toleráveis de deformação pode ser considerado para futuras pesquisas e desenvolvimento das atividades, pois o tipo de rocha dessa amostra está contido em uma grande parcela da cava, sendo um material característico do local, ou seja, o micaxisto ocorre com maior abrangência.

Azevedo (2002), confirma a importância desses resultados,

A resistência determina a eficiência da rocha em manter o seu arranjo original, ou seja, em manter coesos os seus componentes. Os resultados são altamente sensíveis ao método e tipo de carregamento aplicado. É interessante, do ponto de vista prático, estabelecer um índice, de fácil determinação, que esteja correlacionado com a resistência à compressão simples da rocha.

Depois de atribuído importância ao aspecto estrutural da mina (geológico, geomecânico, geotécnico), de acordo com alguns autores, a seleção entre um método a céu aberto ou subterrâneo quando ambos são tecnicamente viáveis, baseia-se essencialmente sobre o critério econômico. A metodologia adotada em determinado setor da jazida é aquela que apresenta o menor custo unitário, considerando-se todos os condicionantes operacionais.

Durante o desenvolvimento da cava a lavra passa por fases de adequação e aperfeiçoamento que determinam quais métodos operacionais e técnicas vão ser utilizados. Na possibilidade de avanço no corpo mineralizado para uma profundidade que comprometa a produção e a segurança da área de lavra, a profundidade final da cava é definida pelos custos previstos da lavra subterrânea.

De acordo com Lopes (2012), existem ainda casos em que as condicionantes operacionais são influenciadas por fatores políticos, ambientais ou sócio-culturais e que podem ser decisivos.

Deste modo, considerando o aspecto econômico, a opção de se lavrar uma mina a céu aberto ou em subsolo, poderá ser expressa pela relação de mineração admissível (relação estéril-minério limite). Esta relação é um dos valores fundamentais de qualquer planejamento de lavra, bem como os denominados teores de corte (para a mesma jazida haverá teores de corte diferentes, se ela for lavrada a céu aberto ou subterrânea), admitindo como tecnicamente viável ambos tipos de lavra (LOPES, 2012 *apud* Hartman, 1992).

Por essa afirmação nota-se pelos resultados interpretados, que neste caso, há uma variação da composição geológica (entre CP1 e CP2, por exemplo) e pelas características atribuídas ao maciço (da avaliação profissional), representando dessa forma, teores de corte diferentes. Com isso pode-se desencadear novas pesquisas para definição do teor de corte ótimo para desenvolvimento dessa transição.

A análise econômica pode ser desenvolvida de maneira simplificada, envolvendo principalmente custos, quantidade do material lavrado e preço praticado na venda do minério por cada método.

Ainda de acordo com Lopes (2012) dispendo da relação de estéril a ser removida e seu custo unitário, os preços do minério lavrado por um método subterrâneo e a céu aberto, a relação estéril-minério máxima, em que ainda haveria economicidade na lavra a céu aberto, obedece à equação (2).

A opção de lavra deverá ser obtida através da análise das expressões:

$$C_s > C_{am} + RC_{ae} - \text{Lavra a céu aberto (2)}$$

$$C_s = C_{am} + RL_{cae} - \text{Relação limite (3)}$$

$$C_s < C_{am} + RC_{ae} - \text{Lavra subterrânea (4)}$$

Onde:

C_s - custo de lavra subterrânea de 1 t de minério, incluindo os custos operacionais de desmonte, carregamento e transporte do mesmo até a usina de concentração;

Cam - custo de lavra a céu aberto de 1 t de minério, incluindo os custos operacionais de desmonte, carregamento e transporte até a usina de concentração;

Cae - custo de lavra do estéril, incluindo seu desmonte, carregamento e transporte até a pilha de estéril;

R - relação de mineração ou relação estéril-minério, que representa o número de unidades de estéril a remover para cada unidade de minério lavrada a céu aberto.

A figura a seguir mostra e afirma o que já foi dito anteriormente que a tendência da mina é aprofundar cada vez mais a cava e com isso os custos atribuídos às operações de todo o desenvolvimento da mina e lavra crescem, determinando um limite estrutural e econômico pra isso.

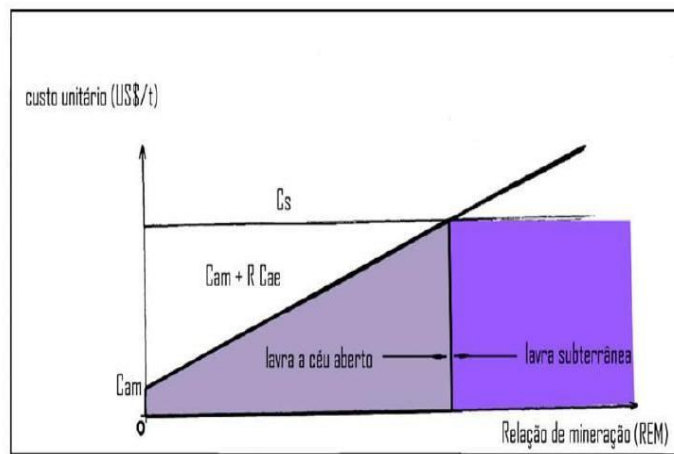


Figura 12: Tendência dos custos na mineração a céu aberto e subterrânea (Lopes, 2012 *apud* Silva, 2010).

Pode-se relacionar essa representação com algumas características do caso estudado em que o aprofundamento da mina a céu aberto em corpo de minério inclinado e com a relação estéril-minério crescente, associada ao aumento dos custos de transporte em consequência de maiores distâncias e profundidades médias alcançadas pela lavra definem um possível cenário de transição.

Em análise comparativa e realizada anteriormente, afirmei que na relação de valores unitários com a profundidade alcançada, nota-se que quanto maior a profundidade, maiores serão os custos unitários de cada umas das operações.

De acordo com Lopes (2012), a opção de se lavar uma mina a céu aberto ou subterrânea dependerá de se ultrapassar ou não a relação de mineração admissível (ou relação estéril-minério limite). Essa é uma análise econômica e a definição do ponto exato da transição de uma mina a céu aberto para subterrânea, deverá incluir ainda a consideração dos seguintes fatores:

- a) as considerações técnicas previamente detalhadas para a seleção de um método de lavra subterrâneo (social, ambiental, econômica, geomecânica etc).
- b) incertezas geológicas, custos e parâmetros geomecânicos considerados no dimensionamento dos taludes da cava final.
- c) a programação de investimentos em equipamentos, mão de obra e em infraestrutura necessárias as operações subterrâneas.
- d) as dimensões do pilar entre a mina a céu aberto e subterrânea (crown pillar), requerido para manter a estabilidade e segurança das escavações subterrâneas e da cava final.
- e) a possibilidade de utilização dos métodos e equipamentos combinados de lavra a céu aberto e subterrânea (sinergia operacional).

A determinação do limite ótimo da cava final de qualquer projeto de mineração é um dos maiores desafios do projeto. Tais limites precisam ser definidos no início dos trabalhos de planejamento de lavra e devem ser reconsiderados, novamente e rotineiramente, durante toda a vida útil da mina (Carmo et al., 2006 e Curi, 2010).

Para atender esses critérios e ter o acompanhamento e desenvolvimento necessários, está sendo abordado desde o início deste trabalho as premissas que competem ao planejamento, como a análise dos aspectos operacionais bem como a caracterização técnica, avaliação econômica e de viabilidade, estudo e testes sobre o maciço rochoso da cava, definição de parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos, controle no avanço da cava e elaboração de pesquisas que identifiquem a cava final e se houver viabilidade técnica-econômica qual a parametrização da profundidade exata de transição, entre outros.

Como podemos observar com esse estudo prévio, há uma quantidade significativa de informações que podem ser geradas e estudadas para melhor entendimento do que é esperado e provável acontecer com as atividades de lavra na Jazida Rodolita I.

Tudo isso pode ser abordado através de melhores definições a partir de modelos como modelo estrutural, geológico, modelos matemáticos, caracterização geotécnica e geomecânica, entre outros. Bem como permitir maior investimento em uso de softwares que garantam maior precisão na especificação de dados, como modelagens em 3D, modelos de algoritmos, softwares que determinem a cava máxima, a profundidade ótima, a resistência da rocha num contexto maior, entre outros.

A seguir na figura 10, Carli (2010) propõe esse modelo de abordagem para definição da transição seguindo os respectivos cenários. Esse modelo é apresentado em forma de fluxograma que para o caso estudado foi necessário inicialmente o levantamento econômico, sendo assim, pode-se avaliar a possibilidade de transição a partir de métodos com esta abordagem.

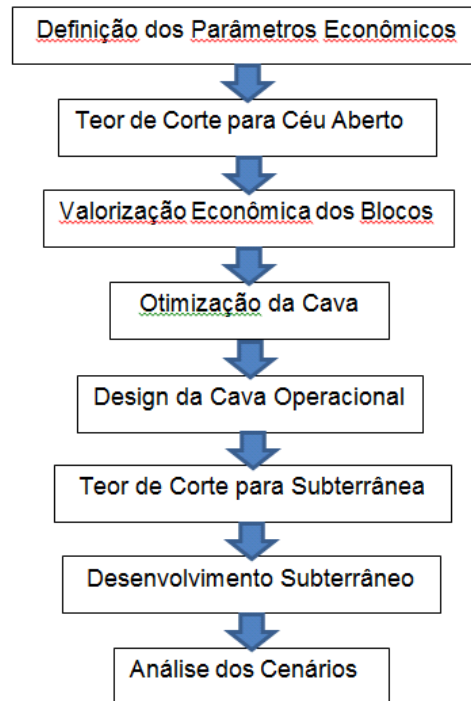


Figura 13: Fluxograma de metodologia a partir do aspecto econômico. Fonte: Carli.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultado final deste trabalho apresentou os principais fatores utilizados para a análise operacional da transição de método de lavra baseado nas características geológico/geotécnicas do maciço rochoso em se encontra a mineralização estudada.

Com os resultados apresentados em que a resistência à compressão axial suportada pelos corpos de provas foi para o CP1 de 1168,6 kg/cm e para o CP2 de 3716,4 kg/cm, nota-se que o CP2 suportou por mais tempo a carga aplicada, conseguindo alcançar um alto valor de resistência à compressão. Isso representa a capacidade que a rocha tem em suportar carga e pressão constante durante um determinado intervalo de tempo, medindo dessa forma sua competência.

No quadro de classificação geomecânica RMR onde foi observado que a compressão uniaxial do CP1 foi de 29,2 MPa, com isso a resistência da rocha analisada é considerada baixa, comparada a de carvão, siltito e xisto. Já para o CP2 a compressão sofrida foi de 92,8 Mpa, resistência considerada média, comparada a de arenito, ardósia e folhelho, porém bem próxima da do valor da classificação de resistência alta de 100 MPa, comparada com granito, mármore e gnaisse. É possível que se afastar 0,50cm a 1,0m os resultados de resistência sejam bem mais altos já que o afastamento da zona de cisalhamento principal denota pouca deformação e planos de fraqueza na rocha. E o CP2 foi coletado bem no ponto da atividade da lavra, com o material com características diferentes do material de minério, bem característico da encaixante na parede da cava, porém próximo dessa zona de fraturas.

A classificação de resistência pelo índice de resistência a carga pontual para um diâmetro de 50mm ou 0,5cm pode ser comparado com os valores de resistência a compressão.

Realizando cálculos considerando a tensão sofrida pelo CP1 de 29,2 sobre uma área de 5cm de diâmetro do testemunho e esse índice é calculado sobre uma área de 0,5cm, pode-se concluir que o resultado de 2,92Mpa na tabela está atribuído às rochas com valores de resistência são calcário, gnaisse faicodal, kinzigito.

Realizando cálculos considerando a tensão sofrida pelo CP2 de 92,8 sobre uma área de 5cm de diâmetro do testemunho e esse índice é calculado sobre uma área de 0,5cm, pode-se concluir que o resultado de 9,28 Mpa na tabela está atribuído às rochas com valores de resistência são o dolomito e rochas vulcânicas.

Essa foi uma classificação complementar que pode ser atribuída somente para comparação e valores, dos resultados alcançados com o que já existe tabelado.

Conclui-se que para atividades que ainda serão desenvolvidas na cava, tanto no design como no avanço, o teste realizado é bem pouco representativo, mas mostra o potencial que a rocha encaixante tem em suportar a carga à compressão, tendo dessa forma resistência e competência em uma proporção de nível regular a bom.

Para efetivar uma transição de métodos além das avaliações anteriormente citadas e inerentes ao processo de escolha, será necessário obter mais subsídios de caráter geológico e geotécnico ao projeto de lavra.

Procurou-se analisar a influência que alguns fatores geotécnicos, como por exemplo, os parâmetros de resistência do maciço rochoso e o comportamento do maciço, para definir sua representatividade na escolha, adequação e transição do método.

Como foi visto que o método é sinônimo de técnica de extração de material e o projeto da mina é uma função da seleção da técnica de extração. Essa técnica deve ser selecionada para depósitos individuais, fazendo-se considerações às situações existentes durante o estudo de viabilidade.

O conhecimento atualizado e a estimativa sobre as tendências futuras da lavra, equipamentos e métodos são necessários, visto que estes evoluem com o progresso tecnológico dos equipamentos de mineração.

O planejamento proposto no projeto da mina deve ser flexível para permitir o desenvolvimento do sistema de extração. O uso de novos equipamentos ou a mudança para um outro método operacional foi visto durante boa parte do histórico-econômico da mina.

Dessa forma observa-se a predisposição do projeto em se adequar as alterações do maciço rochoso e o que pode ser levado em consideração para um futuro replanejamento dentro da possibilidade de transição que existe pelas dimensões do corpo mineralizado (seu mergulho e profundidade).

Para esse estudo da possibilidade de transição do método de L.C.A. para L.S. definiu-se a resistência e competência da rocha encaixante, onde os resultados alcançados podem ser aceitos. Porém se a continuidade de outras frentes de pesquisas relacionados a esse tema demonstrarem um comportamento, em média, diferente da pequena parcela analisada até então, pode ser desconsiderada a transição caso não permita modificações estruturais.

Durante a avaliação das reservas, o custo associado com a obtenção de informações geotécnicas é mínimo, se comparado com os benefícios que esses métodos poderão fornecer no

desenvolvimento do projeto. Por isso é necessário dar continuidade a esse estudo frente a tantas informações que podem ser geradas a partir de cada aspecto abordado.

E ainda com relação ao processo de geração da cava final, concluiu-se através dos estudos e análises dos trabalhos, que existe uma necessidade de geração de dados adicionais sobre as características geotécnicas e geomecânicas do material da cava visando um melhor dimensionamento dos taludes atuais e em profundidade, proporcionando ainda uma melhor definição do contato entre a rocha sã e alterada.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

READ, John; STACEY, Peter. **Guidelines for open pit slope design**. Tradução de Diretrizes para projetos de encostas a céu aberto. Austrália: CRC Press Taylor & Francis Group, p.13, 2012.

AZEVEDO, Izabel Christina Duarte. **Introdução à Mecânica das Rochas**. 1. Viçosa: UFV, 2006. 360 p.

Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. **Normas Reguladoras da Mineração**. Disponível em: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/rcm_08.htm>. Acesso em 26 de Set 2013.

MACÊDO, Alexandre José Buril de. **Seleção do método de lavra: arte e ciência**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo.

NEME, Milton Brigolini. **Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos**. 2010. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

LOPES, Gustavo Fontes. **Transição da mina a céu aberto para subterrânea no Morro da Mina**. 2012. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

SILVA, J. M. **Tópicos da Disciplina Lavra Subterrânea**. 2010. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto.

CARLI, Carla de. **Análise de viabilidade de projetos limite: lavra a céu aberto x lavra subterrânea**. Tese (Mestrado em Planejamento Mineiro) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SOUZA, C.S. Critérios geotécnicos para determinação e operacionalização de cavas e planos sequenciais para mina de carvão com camadas inclinadas – Estudo de caso – Mina de El Hatillo – Colômbia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GAMA, C. Dinis da. Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. V, 2008. Belo Horizonte. **Mineração Subterrânea, Características e Desafios.** – IBRAM.

SALAMUNI, Eduardo. Geologia estrutural, Aula 2. **Análise da Tensão (stress) e Análise da Deformação (strain).** 2009.

Plano de Aproveitamento Econômico Colorgems - PAE. Processo número 860.787/2012. Elaborado por José Cleuton Batista.

Relatório Final de Pesquisa Colorgems - RFP. Processo número 860.787/2012. Elaborado por Marcos César Ceballos Bonatto.

NRM. **Estabilidade dos maciços, NRM 22.14.** Acesso em: 25/06/2014. Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr22.htm>.

