

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ANÁPOLIS – UNIEVANGÉLICA
CAMPUS CERES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

GUSTAVO RODRIGUES BARBOSA e WANDERSON DANTAS CORRÊA

AVALIAÇÃO A RESISTÊNCIA DE PILARES EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

PUBLICAÇÃO N°:

**CERES / GO
2020**

GUSTAVO RODRIGUES BARBOSA e WANDERSON DANTAS CORRÊA

AVALIAÇÃO A RESISTÊNCIA DE PILARES EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

PUBLICAÇÃO Nº:

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA.**

ORIENTADOR: LUIZ TOMAZ DE AQUINO NETO

CERES / GO: 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

BARBOSA, GUSTAVO RODRIGUES e CORRÊA, WANDERSON DANTAS.

Resistência de Pilares em Mineração Subterrânea 2020

xi, 33P, 297 mm (ENC/UEG, Bacharel, Engenharia Civil, 2007).

TCC - UniEVANGÉLICA

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|----------------|------------|
| 1. Mineração | 2. Pilares |
| 3. Subterrânea | 4. Mina |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARBOSA, G. R. e CORRÊA, W. D. Resistência de Pilares em Mineração Subterrânea TCC, Publicação ENC. PF-001A/20, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Ceres, GO, 32p, 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gustavo Rodrigues Barbosa e Wanderson Dantas Corrêa.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Resistência de Pilares em Mineração Subterrânea.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2020

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gustavo Rodrigues Barbosa
75806-619 - Ceres/GO - Brasil

Wanderson Dantas Corrêa
75806-619 - Ceres/GO - Brasil

GUSTAVO RODRIGUES BARBOSA E WANDERSON DANTAS CORRÊA

RESISTÊNCIA DE PILARES EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.

APROVADO POR:

**LUIZ TOMAZ DE AQUINO NETO, Mestre (Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Campus Ceres)
(ORIENTADOR)**

**JANAINE MONICA DE OLIVEIRA SOUSA, Mestre (Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Campus Ceres)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**VILSON DALLA LIBERA JUNIOR, Mestre (Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Campus Ceres)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: CERES/GO, 09 de dezembro de 2020.

RESISTÊNCIA DE PILARES EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

Gustavo Rodrigues Barbosa¹

Wanderson Dantas Corrêa²

Luiz Tomaz De Aquino Neto³

RESUMO

Desde a pré-história, as rochas vêm sendo utilizadas pelo homem para a fabricação de armas, ferramentas e utensílios, casas, fortificações, esculturas e construções de uma maneira geral. Os primeiros relatos sobre dimensionamento de pilares se popularizaram através de artigos realizados em meados do século XX, após alguns pilares atingirem seu Estado de Limite Último, gerando dano que ficou conhecido por efeito cascata, gerando várias mortes, em minas de carvão na África do Sul. Sendo o objetivo de tal artigo analisar o comportamento dos pilares em minas subterrâneas, apresentando de forma sucinta as etapas que são necessárias para que se possa realizar um dimensionamento de forma segura e eficaz. Para realizar o dimensionamento devemos conhecer as características do maciço rochoso por meio de testes de laboratório e mapeamentos geotécnicos e compreender as tensões atuantes no mesmo, afim de poder identificar sua resistência. O principal método para o desenvolvimento de tal pesquisa foi demonstrar a operacionalidade das técnicas encontradas na literatura associada a uma análise de campo em pilares durante e após a execução da lavra mostrando a importância dos pilares para um painel de lavra. O trabalho foi realizado em campo, feito na mina subterrânea Pilar, que se encontra na cidade de Pilar de Goiás no estado de Goiás. Nestas regiões foram evidenciados danos consideráveis nos pilares após a lavra, porem cada região apresenta suas particularidades, onde os pilares podem sofrer danos durante a execução da lavra, isto se dá devido à grande concentração de carga que é liberada pelos explosivos. E concluiu-se que a correta execução da lavra tem um papel fundamental na estabilidade final do pilar já que uma lavra mal realizada gerar quebra nos pilares onde altera sua seção que foi previamente dimensionada, outro ponto a se considerar são a resistência do maciço rochoso onde muitas vezes se trabalha com litologias de competências diferentes. Todas essas etapas são importantes para que seja realizado um dimensionamento adequado, neste sentido as análises empíricas, ou seja análise dia a dia do comportamento dos pilares, são necessários para se adequar o projeto.

Palavras-chave: Mineração. Pilares. Subterrânea. Mina.

Discente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA) – Campus Ceres. E-mail: gustavo_rb22@hotmail.com

² Discente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA) – Campus Ceres. E-mail: wandersondantass@hotmail.com

³ Mestre, professor do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA) – Campus Ceres. E-mail: engenheiroluiz@hotmail.com

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 8 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| 2. 1 ESTUDO LITOLÓGICO DA MINA PILAR..... | 13 |
| 2. 2 ENSAIOS GEOTÉCNICOS EM AMOSTRAS DE ROCHAS | 14 |
| 2. 3 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO RMR E Q..... | 15 |
| 2. 4 SISTEMA RMR - BIENIAWSKI..... | 15 |
| 2. 5 SISTEMA Q DE BARTON | 16 |
| 2. 6 TENSÕES IN-SITU | 17 |
| 2. 7 EXEMPLOS DE FORMULAS PARA DIMENSIONAMENTO EM PILARES ENCONTRADAS NAS BIBLIOGRAFIAS REFERENTES ESTUDOS DE CASOS | 18 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 21 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 23 |
| 4.1 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO NA REGIÃO DE ESTUDO | 23 |
| 4.2 AVALIAÇÃO DE PILARES APÓS A LAVRA..... | 25 |
| 4. 3 PILARES COM DANOS OU COM ESTADO LIMITE ULTIMO..... | 25 |
| 4.4 MAPEAMENTO DE DANOS EM PILARES E MONITORAMENTO CRACK METER..... | 26 |
| 4.5 PILARES COM DANOS X TEMPO | 27 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 31 |
| REFERÊNCIAS | 32 |

1 INTRODUÇÃO

Desde a pré-história, as rochas vêm sendo utilizadas pelo homem para a fabricação de armas, ferramentas e utensílios, casas, fortificações, esculturas e construções de uma maneira geral e até túneis foram construídos com esse material produzidas na Mesopotâmia como pirâmides e barragens que foram feitas a partir da seleção, extração e corte em rochas, trabalho este feito de acordo com Goodman (1998) a mais de 4.700 anos.

Inicialmente rochas e minérios eram retirados da própria superfície sendo fácil sua extração, com a escassez destes recursos a extração por meio de minas subterrâneas. Para a realização de uma lavra subterrânea são necessários conhecimentos específicos do maciço rochoso e o comportamento do mesmo após início das escavações.

Porém, o conhecimento para dimensionamento de pilares em minas subterrâneas ainda é uma ciência muito recente e que tem uma importância primordial quando se fala de mineração subterrânea. Os primeiros relatos sobre dimensionamento de pilares se popularizaram através de artigos realizados em meados do século XX, após alguns pilares atingirem seu Estado de Limite Último, gerando danos que ficaram conhecidos por efeito cascata, gerando várias mortes, em minas de carvão na África do Sul. A partir desse desastre vários autores começaram a realizar estudos acerca do tema onde cada um idealizou fórmulas que vão desde métodos empíricos, a métodos teóricos, métodos heurísticos e métodos numéricos, (GERMANI, 2002).

Os defeitos em pilares apesar de não serem na maioria das vezes evidenciados em grande escala ainda acontecem com muita frequência, seja por dimensionamentos falhos ou por ocorrência de danos nos mesmos durante a lavra, conjunto de operações coordenadas pelo qual o objetivo é o aproveitamento industrial da jazida, (BERNARDES, 2017).

As informações sobre a velocidade que ocorrem as mudanças em um ambiente subterrâneo são fundamentais, onde qualquer pequeno descuido pode comprometer todo um planejamento, saber evidenciar possíveis danos que podem ocorrer em pilares ainda no seu início de seu uso e apresentar um dimensionamento que garanta que o Estado Limite de Serviço, que muitas vezes é desconsiderado, e de fundamental importância para o sucesso de um projeto que visa extração mineral realizado por lavra subterrânea.

A extração de minério através de minas subterrâneas, requer atenção e conhecimento sobre os comportamentos do maciço rochoso durante a vida de uma mina, sendo este conhecimento indispensável para a estabilidade e segurança, tanto para os trabalhadores como para a continuidade das atividades. Existem diversos métodos de extração de minério em minas subterrâneas, dentre eles, destaca-se o método com realce autoportante: câmaras e pilares. Neste método de lavra são desenvolvidas galerias paralelas entre si e posteriormente é realizada a lavra do minério onde se deixa pilares de rocha, com preferência de tamanho uniforme, entre as galerias para que possam suportar o teto e conseqüentemente as tensões advindas que iram ser redirecionadas para estes pilares durante e após a lavra dando sustentabilidade a toda mina.

Normalmente algumas partes do minério não são lavradas, ficando nos pilares que dão sustentação para a mina, logo a responsabilidade é transferida nessa categoria para o engenheiro geotécnico que irá dimensionar pilares a fim de equilibrar a realização de maior taxa de extração possível. Com o menor pilar obtém-se uma lucratividade maior, mas nunca deixando de lado a parte mais importante que é garantir a estabilidade da mina sem comprometer sua estrutura e todas as vidas que ali estão, (KIRSTEN, 2018).

Do mesmo modo que ocorre nas construções civis, os pilares subterrâneos são elementos de estrutura que visam garantir a estabilidade sem que danos sejam sofridos na estrutura. Quando um pilar atinge seu Estado Limite Último (ELU) em uma mina subterrânea, pode haver comprometimento de todo um painel de lavra, uma vez que a carga recebida por este pilar será distribuída entre os pilares ao redor, podendo chegar a colapsar toda uma galeria levando a outras fatalidades, logo, percebe-se que os pilares em uma mina subterrânea são um dos mais importantes elementos estruturais (BASTOS, 2011).

Por fim é importante esclarecer que o fato de existir pouca discussão sobre o tema e a importância que este representa para os lucros das empresas quanto para a segurança de quem realiza a extração mineral necessita ser discutida e evidenciada, onde os estudos que tratam de dimensionamentos de pilares ainda tratam-se de uma ciência nova e com pouco espaço. Demonstrar metodologias existentes para o dimensionamento de pilares neste contexto e suas características, seus resultados alcançados para resistência e esforços recebidos no maciço rochoso tem amplo embasamento nas construções civis.

Logo tal trabalho irá abordar a importância dos pilares e demonstrar alguns métodos para dimensionar pilares e compreender como encontrar a força que estes estão recebendo, então será feita a explanação sobre o assunto junto à abordagem dirigida as etapas para a realização do dimensionamento. Na prática os parâmetros que são utilizados para o dimensionamento de pilares em minas subterrâneas juntamente com as análises empíricas do comportamento dos mesmos ao longo dos anos após a realização da lavra embasaram o presente trabalho.

Analisando o comportamento dos pilares em minas subterrâneas e apresentando de forma sucinta as características do maciço rochoso por meio de testes de laboratório e mapeamentos geotécnicos, existe a possibilidade de mostrar sua resistência. Identificar as tensões atuantes nos pilares, usando exemplos em que pilares na mina Pilar, situada na cidade de Pilar de Goiás, que ultrapassaram seu estado limite de serviço, pretende-se verificar comportamento de pilares numa mineração subterrânea, conseqüentemente a sua resistência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Pilar que de acordo com Kirsten (2018) é uma das fases mais importantes de um projeto de estrutura, e sua má avaliação do dimensionamento, pode trazer diferentes problemas, tais como, estruturas sem estabilidade, estruturas que não atendem às demandas do serviço e até mesmo no aumento de custo da estrutura. A análise do contato entre os pilares e o piso da sua fundação é muito importante para as minas subterrâneas.

De acordo com LOPEZ (2017), tais minas que são exploradas pelo método de câmaras e pilares, nada mais é do que um método no qual um conjunto de câmaras é desenvolvido, deixando pilares de rocha de tamanho uniforme, para suportar o teto, esses pilares podem ser ou não removidos posteriormente à retirada do minério, já que pode ocorrer um colapsos a qualquer momento e, dependendo da profundidade, pode chegar a ativar colapso de diversas galerias.

Nos casos extremos, a falta dos parâmetros geotécnicos atualizados que são aplicações de métodos científicos e princípios de engenharia sobre conhecimento dos materiais da crosta

terrestre para a solução de problemas de engenharia, durante os avanços ou durante a elaboração do projeto de longo prazo é o principal motivo que pode acarretar a não identificação de problemas de estabilidade. Ainda aduz Jaeger e Cook (1969) que o rompimento dos pilares pode chegar a ser extremo quando sobrecarregados em rochas de alta rigidez, fazendo com que a vida dos colaboradores fique em risco, tendo-se que adotar medidas rígidas de segurança.

Atualmente pilares de rocha no setor de mineração subterrânea tem se tornado um assunto de suma importância já que está diretamente relacionado com a taxa de extração e estabilidade. Em outros países principalmente na África do Sul, de acordo com Zipf (2000) já ocorriam, inicialmente neste país em minas de carvão, e foram com base nessas experiências obtidas por meio dos erros cometidos que se tem esta melhora na estabilidade no uso de pilares. Ainda de acordo com Salamon e Munro (1967) em um estudo feito que é usado até hoje, foi descrito que a força dos pilares pode ser expressa no intervalo entre a altura e largura.

Os estudos geotécnicos, no Brasil não suprem as necessidades dos projetos de mineração subterrânea, porém, isso nunca foi um problema para à implantação de vários projetos de mineração com pilares até o momento, mesmo que cada rocha tenha suas particularidades e sendo diferente umas das outras (NEME; CURI; SILVA; CARNEIRO, 2011).

O posicionamento dos pilares feito pelo método de câmara e pilares que segundo Eloy (2016) existem alguns métodos racionais e empírico, que foram formulados para camadas sub-horizontais. Porém, a aplicação desses métodos ao projeto de pilares onde há camadas inclinadas, traz soluções inadequadas, já que a teoria usada para as cargas atuantes não abrangem o problema de um pilar que está numa camada inclinada, na medida em que é considerado apenas a força normal na camada, ou seja, uma força maior poderia causar tragédias.

Porém, os problemas relacionados a engenharia geotécnica, mais específico a mecânica das rochas, envolvem questões básicas que de acordo com Duarte e Gomes (2002) seriam a resistência para um determinado estado de tensão, ou seja, um excesso de tensão atuante no maciço rochoso do pilar que provoca ruptura no pilar tanto em um local específico como em um todo. Outro fator é conhecido como deslocamento admissível, que ocorre quando um deslocamento normal torna-se problemático, o que com o tempo pode gerar danos e destruição do pilar, logo faz se importante sempre verificar em qual estado de tensão encontra-se o deslocamento e o que este tem causado, para que haja segurança da mina.

No caso de pilares de rocha existe uma dificuldade de definir quando pode ocorrer o estado de ruptura, porém é algo comum associar a tensão que o maciço vem sofrendo com a deformação que ele aparenta ter ao longo dos dias, mas isso não significa que a deformação faça com que a rocha perca totalmente sua capacidade de resistência, pois são vários critérios que influenciam na resistência de uma rocha que era intacta desde de seu primeiro uso (GONÇALVES; MARINHO; FUTAI; SILVA, 2014).

Um dos critérios mais utilizados são o de Mohr-Coloumb, sendo o primeiro critério que surgiu em 1773, proposto por Coulomb (1773), e leva em consideração apenas a força de atrito e a coesão do maciço rochoso onde a resistência é composta de coesão e material de atrito, logo esse é um dos parâmetro mais utilizados para identificação de resistência ou falta dela em minas subterrâneas.

Maçiços rochosos são um conjunto de blocos de rochas propensos a descontinuidades de acordo com Bekaert (2020). É importante conhecer as características das descontinuidades, que são orientação, persistência, e espaçamento, pois elas podem mudar o comportamento geotécnico dos maciços, o que leva a diminuição da sua resistência mecânica causando queda do pilar, Silva (2017) diz em seu texto que essa queda pode ser de até 30 vezes, na equação de Coulomb:

$$\tau = \sigma \phi + S \quad (1)$$

Onde σ é a tensão normal no plano de ruptura, ϕ é o ângulo de atrito, o ângulo de atrito e a coesão são os parâmetros do material que são obtidos a partir de ensaios triaxiais com corpos de prova confeccionados com amostra de rocha intacta onde há tensões em qualquer plano do pilar rochoso.

Ao se tratar de minas subterrâneas o objetivo da escavação é a retirada do mineral que se encontra no maciço rochoso sendo necessário realizar aberturas. Nessas aberturas na maioria das vezes são deixados os pilares, para remover parte do maciço rochoso é necessário aberturas adicionais daquelas que ocorrem por isso a importância de acordo com Duarte e Gomes (2002) de manter o maciço rochoso estável observando a tensão e a deformação para manter o maciço de forma que esse se utilize da resistência residual. Utilizando-se de métodos de estabilização como reforço e suporte e observar o comportamento de cada tipo de rocha separadamente para maior segurança.

Como não se pode prevenir totalmente todos os deslocamentos que ocorrem no limite de uma escavação, é necessário evitar erros no projeto, pois pode ser um grande problema. Portanto de acordo com Giani (1992) para entender os deslocamentos e evitar futuros problemas nas minas subterrâneas são necessários considerar três efeitos primários da escavação:

- a) Os deslocamentos que ocorrem porque a rocha sob pressão é removida, permitindo que a rocha remanescente possa mover-se devido ao descarregamento.
- b) Não existem tensões normais ou cisalhantes em uma superfície de escavações não-suportadas; portanto o limite da escavação deve ser um plano de tensão principal de magnitude zero, normal a superfície. De modo geral, isto envolve perturbação do campo de tensões virgens, tanto nas magnitudes quanto nas orientações das tensões.
- c) No limite de uma escavação aberta para a atmosfera, qualquer pressão de fluido preexistente no maciço rochoso será reduzida a zero ou, mais precisamente, a pressão atmosférica. Isto faz com que a escavação passe a agir como um ralo e que qualquer fluido existente no interior do maciço tenda a fluir para a escavação. (DUARTE e GOMES, 2002, *on-line*)

Por esse motivo é necessário que se faça a vigilância do comportamento tanto do terreno quanto do maciço rochoso, utilizando tanto a maneira visual quanto a profissional, ou seja, aquela que utiliza a instrumentação. De acordo com Duarte e Gomes (2002) existe uma contradição ao se falar em vigilância, pois existe o monitoramento e o ensaio, ambos são

parecidos por fazerem uso de equipamento. Porém, a função do monitoramento é medir como se comporta o terreno de maneira natural, e o ensaio mede o chamado comportamento induzido que trata-se do comportamento e deformação de um corpo de prova ao ser comprimido, isso serve para determinar a deformidade do maciço rochoso, pois ao pressurizar um túnel em construção durante um ensaio consegue-se ter as medidas necessárias.

Ao fazer isso pode ser usado a inspeção visual, por alguém já capacitado e experiente o suficiente, porque na maioria das vezes a inspeção visual simples é suficiente, entretanto tal método não é eficaz e não pode ser usado ao longo do tempo por não oferecer medidas e subsidiariamente não oferece garantias. Já o método de instrumentação é mais seguro ao se tratar de monitoramento a longo prazo, pois este oferece registro de informações pertinentes e consegue também alcançar locais inacessíveis como o interior de algum local de sondagem, coisa que a inspeção visual não é capaz de realizar (AZEVEDO; MARQUES, 2002).

O monitoramento tem como foco principal as mudanças e não os valores, mudanças essas como condição de tensões subterrâneas, usando esse método principalmente em projetos de minas subterrâneas como na condução do primeiro estágio de investigação, até o acompanhamento da obra concluída, para que haja investigação de rupturas e possíveis instabilidades em curso, obter dados de projeto, verificar dados e hipóteses utilizados no projeto, proteger trabalhadores e manter estabilidade a longo prazo.

Diante do exposto é visto que pilares subterrâneos requerem um uso de uma teoria apropriada que não seja focada apenas na força normal que um pilar é capaz de suportar, mas também nas adversidades que podem vir a acontecer como tensões cisalhantes e momentos atuantes. Existem atualmente disponíveis para venda, ferramentas tecnológicas como programas que permitem descrever o problema em sua forma padrão, que de acordo com Eloy (2016) tem uma função e objetivo a serem recuperados e até suas restrições, que geralmente são funções limitadas que ocorrem por meio de inequações.

Tais ferramentas computacionais, têm algoritmos próprios para solução de problemas de programação matemática não linear, dão acesso a uma interação de todas as funções participantes no problema trazendo uma resposta compatível com o objetivo de diminuir a recuperação.

Ao se iniciar um projeto residencial temos um projeto estrutural onde o engenheiro tem a capacidade de adequar tal projeto de forma a se chegar a um objetivo inicial. Com os conhecimentos adquiridos durante a graduação em engenharia civil pode-se mudar uma parede, aumentar a resistência de uma viga e conseqüentemente a resistência de toda uma estrutura residencial, rodoviária ou qualquer que seja. O trabalho que é possível se realizar com o concreto armado são inúmeros e podemos atingir obras inimagináveis.

Ao fazer a análise de tal tema, foi visto que em qualquer projeto é necessário conhecer o esforço recebido pela estrutura e conhecimento da resistência do material empregado, porém não basta termos somente estes dados, mas também como a estruturas se comportam após o recebimento de tais cargas.

Ao trazer estes conceitos, empregados na engenharia civil, para o âmbito da engenharia geotécnica sendo mais específico para a mineração subterrânea torna-se claro que a ciência empregada são as mesmas porém com algumas particularidades quando inserida em uma

mineração subterrânea onde tem o único material para dimensionar os pilares são a própria rocha.

Compreender a resistência dos materiais é base para se iniciar um projeto estrutural e ao se analisar os pilares de uma mineração subterrânea neste caso estamos falando do maciço rochoso que é o material que temos para trabalhar. E ao trabalhar com este tipo de estrutura natural é necessário ter a capacidade de analisar, dimensionar e proporcionar que este suporte tenha resistência capaz de gerar estabilidade para cargas atuantes.

2. 1 Estudo Litológico da Mina Pilar

A geologia regional em Pilar de Goiás é composta por derrames ultramáficos e máficos, rochas sedimentares e rochas ígneas. As rochas ultramáficos e máficos, são representadas por basalto e derrames komatiíticos. Peridotito, dunito e piroxenito também estão presentes. A sequência sedimentar contém grafita xistos, grauvacas e argilitos enquanto que as rochas vulcânicas correspondem a tufo ácido e derrames félsicos (WINGE, 2015).

Dentre estas rochas mencionadas foram mapeadas conforme Tabela 1, sete litologias distintas na mina Pilar onde foram classificadas da seguinte forma:

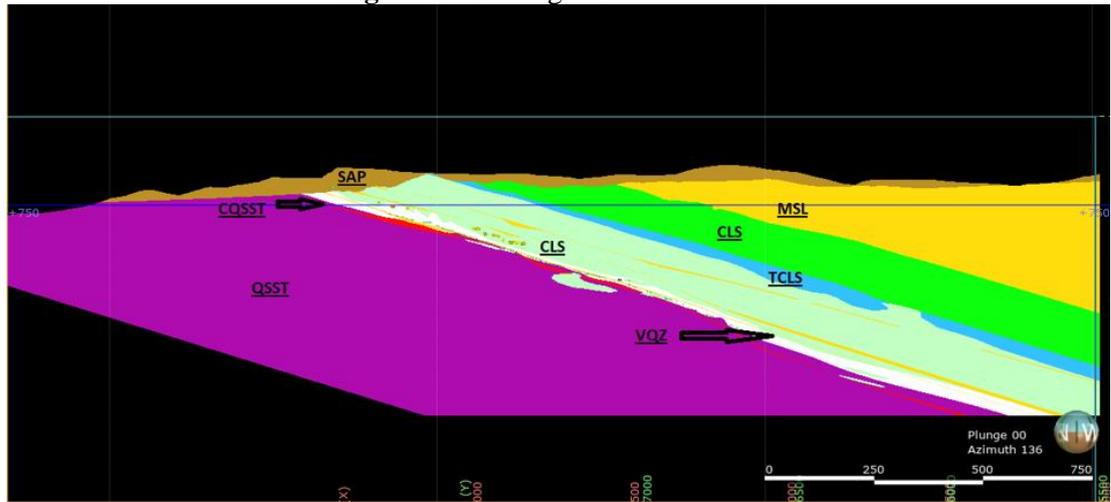
Tabela 1 – Litologias presentes na mina Pilar

| Sigla | Litologia |
|--------------|---------------------------------|
| CLS | CLORITA-XISTO |
| IS | XISTO CARBONOSO |
| QSST_1 | QUARTZO-SERICITA-XISTO- TALCO_1 |
| QSST_2 | QUARTZO-SERICITA-XISTO- TALCO_2 |
| QSST_3 | QUARTZO-SERICITA-XISTO- TALCO_3 |
| D | DIORITO |
| MSL | METAGRAVAUCA |

Fonte: PGDM (2020)

As litologias encontradas na mina pilar se dispuseram da seguinte forma conforme a Figura 1.

Figura 1 – Litologia local mina Pilar



Fonte: PGDM (2020)

2. 2 Ensaios geotécnicos em amostras de rochas

Os ensaios geotécnicos realizados nas amostras de rocha da mina Pilar foram realizados pelo laboratório técnico e engenharia LTDA, LTEC, os resultados foram obtidos após os ensaios de determinação da resistência a compressão uniaxial e resistência a compressão diametral.

A tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de compressão uniaxial, e os resultados dos módulos de deformabilidade e coeficiente de Poisson.

Tabela 2 - Resultado de compressão uniaxial

| Registro LTEC | Amostra | Litologia | Relação h/O | Resistência à compressão δ_c (Mpa) | Deformação específica axial ($\gamma/m/m$) | Deformação específica transversal ($\gamma/m/m$) | Modulo de Deformabilidade E (Gpa) | Coefficiente de Poisson e |
|---------------|-----------|------------------------------|-------------|---|--|--|-----------------------------------|---------------------------|
| 00543 2015 | Q-126-01 | Sericita bt qtz xisto (Q) | 2,7 | 38,7 | 5510,4 | -431,9 | 15,6 | 0,44 |
| 00544 2015 | Q-128-03 | Sericita bt qtz xisto (Q) | 2,2 | 67,6 | 8074,7 | -1082,2 | 22,7 | 0,41 |
| 00545 2015A | Q-109-04A | Sericita bt cl xisto (Q) | 2,6 | 30,9 | 2018,7 | -400,1 | 16,3 | 0,25 |
| 00545 2015B | Q-109-04B | | 2,1 | 55,1 | 3264,5 | -981,6 | 25,6 | 0,46 |
| 00545 2015C | Q-109-04C | | 2,1 | 52,8 | 2157,1 | -747,0 | 27,9 | 0,48 |
| 00546 2015A | I-110-05A | Biotita qtz xisto (I) | 2,6 | 198,9 | 7366,3 | -3287,3 | 41,1 | - |
| 00546 2015B | I-110-05B | | 2,6 | 217,9 | 5445,8 | -1204,0 | 49,1 | 0,45 |
| 00547 2015A | I-122-06A | Quartzo xisto (I) | 2,6 | 117,9 | 3157,6 | -1964,2 | 54,2 | 0,38 |
| 00547 2015B | I-122-06B | | 2,4 | 88,1 | 1989,7 | -1953,9 | 55,8 | 0,41 |
| 00547 2015C | I-122-06C | | 2,0 | 159,8 | 2537,7 | -491,5 | 72,5 | 0,36 |
| 00548 2015 | I-128-07 | Quartzo br clorita xisto (I) | 2,0 | 116,6 | 3308,1 | -470,7 | 42,9 | 0,21 |

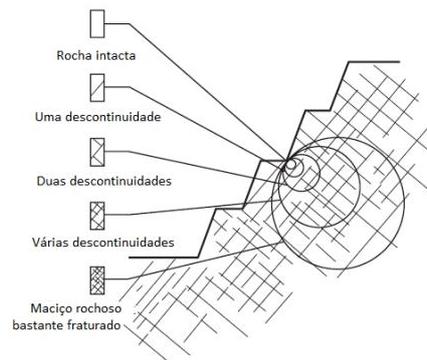
Fonte: Relatório técnico – RT02015-REV00 (2014)

Analisando a tabela 2, identifica-se que as litologias dispostas na mina Pilar variam consideravelmente a sua resistência quanto a compressão. Os valores estão entre 30,9 Mpa (Sericita bt cl xisto) até 217,9 Mpa (Biotita qtz xisto). A resistência das litologias está diretamente associada ao comportamento do pilar durante e após a lavra, assunto esta que será discutido no decorrer do trabalho.

2. 3 Mapeamento geotécnico RMR e Q

O mapeamento geotécnico consiste em realizar a caracterização do maciço rochoso como demonstrado na Figura 3, onde são levantadas basicamente todas as estruturas que o compõe e qualifica-lo conforme as especificações, ou seja, a classificação do maciço rochoso é um componente indispensável para definir as diferentes classes de maciço encontrados durante o desenvolvimento de uma escavação, (WOLPP, 2018).

Figura 3 – Rocha intacta e descontinuidades no maciço rochoso



Fonte: Adaptado de Hoek (2002).

A classificação geotécnica ajuda o engenheiro responsável pela geotecnia, elaborar estudos a fim de entender o comportamento do maciço rochoso, prever o tipo de contenção a ser utilizada, definir os vão máximos das escavações e dar parâmetros para dimensionar os pilares a serem deixados como suportes naturais, (WOLPP, 2018).

2. 4 Sistema RMR - Bieniawski

Este sistema RMR foi desenvolvido na década de setenta por Bieniawski, para este sistema de classificação Bieniawski realizou estudos de casos em escavações subterrâneas.

A classificação RMR caracteriza o maciço em seis parâmetros levando um peso cada um a depender do mapeamento realizado em campo, os parâmetros para mapeamento são descritos abaixo e na Quadro 1 de acordo com Bieniawski:

- Resistência à compressão simples ou índice de compressão puntiforme;
 - RQD (“Rock Quality Designation”);
 - Espaçamento das descontinuidades;
 - Condições das descontinuidades;
 - Condições de água subterrânea;
 - Orientação relativa das descontinuidades/escavação.
- (BIENIAWSKI, 1989. *On-line*).

Quadro 1 – Tabela de classificação RMR

| 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 | 0,6-2 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 | | | |

Fonte: MINERIA PETROLEO Y ENERGIA, adaptada, (2020)

2. 5 SISTEMA Q DE BARTON

A classificação de Barton foi desenvolvida pelo próprio Barton juntamente com Lien e Lunde, esta classificação também foi elaborada durante a década de setenta. Assim como no sistema RMR os autores realizaram observações empíricas em vários estudos de casos de escavações subterrâneas e também utiliza seis parâmetros para definir a classificação do maciço rochoso, estes parâmetros podem ser descritos a seguir:

RQD - Índice de qualidade da rocha;

J_n - Índice de influência do número de famílias das descontinuidades;

J_r - Índice de influência da rugosidade das descontinuidades;

J_a - Índice da alteração das descontinuidades;

J_w - Índice de influência do caudal afluente;

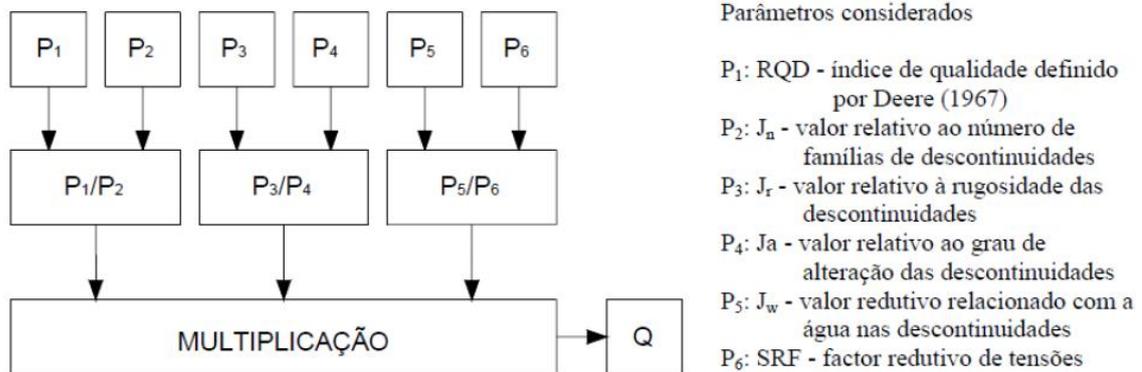
SRF - Índice de influência do estado de tensões no maciço no entorno da cavidade (*Stress Reduction Factor*).

Para se chegar ao resultado Q, Barton elaborou a seguinte fórmula, e sua explicação na Figura 4:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) * \left(\frac{J_r}{J_a} \right) * \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

Fonte: BARTON, (1974).

Figura 4 – Parâmetros para obtenção do valor Q

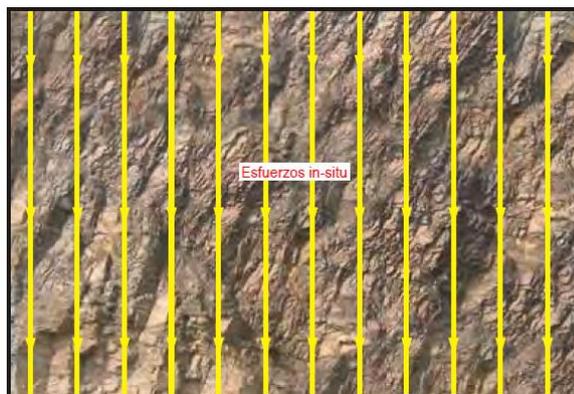


Fonte: Miranda (2003).

2. 6 Tensões in-situ

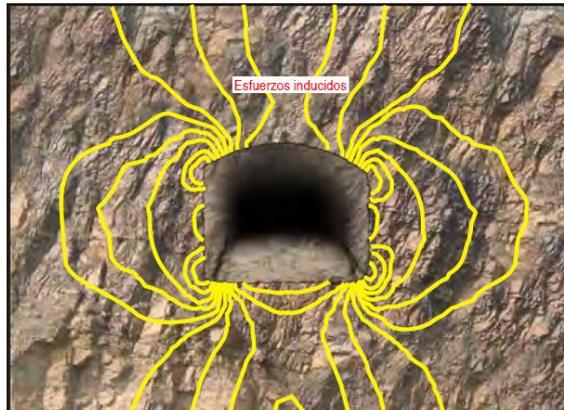
A estabilidade de uma escavação subterrânea está associada como já mencionado na resistência da rocha, na sua classificação geotécnica e também nos esforços referentes as tensões. À medida que o desenvolvimento da mina vai avançando, ou seja, atingindo níveis mais profundos, a influência das tensões naturais sobre esta rocha também vai se alterando isto devido ao aumento das cargas devido a quantidade de rocha acima. A partir do momento que iniciamos as aberturas das galerias na rocha as tensões são reorganizadas de acordo com a galeria aberta assim apresentando um novo comportamento. Esta reorganização das tensões é chamada de tensões induzidas com este novo cenário tais tensões podem acarretar concentrações em certos pontos de uma galeria ou de um pilar conforme Figura 5 e 6, nestes casos podendo gerar sérios problemas para a estabilidade e segurança de uma mina.

Figura 5 – Tensões in-situ



Fonte: Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea, (2019).

Figura 6 – Tensões induzidas



Fonte: Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea, (2019)

Para conhecermos a resistência dos pilares devemos conhecer também quais são os esforços atuantes nesta estrutura, para calcularmos as tensões verticais utilizamos a seguinte fórmula:

$$\sigma_{vo} = \gamma z$$

A fórmula apresentada consiste em calcularmos o peso específico da rocha (γ) vezes a profundidade (z). Não é apenas as cargas tensões verticais que se deve ter conhecimento para a eficácia de um direcionamento de pilares, as tensões horizontais sobre as galerias e pilares também necessitam de ser conhecidas, para o cálculo destas tensões utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\sigma_{ho} = k \sigma_{vo} = k \gamma z$$

Nesta fórmula para tensões horizontais há um anexo com a tensão vertical acrescido do fator K , sendo K igual a:

$$k = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{z} \right)$$

Assim como no cálculo das tensões verticais, z se refere a profundidade referenciada em metros enquanto E_h refere-se ao módulo de deformação médio da crosta terrestre sendo suas medições na horizontal, o valor de E_h deve ser dado em GPa.

2.7 Exemplos de fórmulas para dimensionamento em pilares encontradas nas bibliografias referentes estudos de casos

Ao se falar em estabilidade de pilares para uma mina subterrânea assim como na engenharia civil necessitamos que a resistência deste pilar deve ser maior que a carga que está atuando no mesmo, neste caso tratamos esta majoração como fator de segurança. Para o cálculo de estabilidade de um pilar calculamos a relação do esforço sobre o pilar com a sua capacidade

de sustentar esta carga, basicamente o conceito e o mesmo encontrado na engenharia civil, mas como já mencionado com algumas diferenças nas formulações.

Lunder e Pakalnis foram um dos autores que formularam metodologias empíricas utilizadas para estimar a resistência de um pilar, estes autores evidenciaram seus estudos analisando o comportamento de 178 pilares levando em consideração suas seções, o confinamento dos mesmo e a resistência da rocha intacta.

$$\sigma_{ps} = (K * UCS) \bullet (C_1 + C_2 * kappa)$$

$$kappa = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - Cpav}{1 + Cpav} \right) \right]$$

$$Cpav = 0.46 \times \left[\log \left(\frac{W_p}{h} + 0.75 \right) \right]^{1.4}_{(W_p/h)}$$

| | |
|---------------------------------|---|
| σ_{ps} | FORÇA DOS PILARES NA ROCHA COMPETENTE (HARD ROCK) |
| K | FATOR DE RESISTÊNCIA DO PISO ROCHOSO DA PEDRA INTATA ESTIMADA EM 44% PARA O MÉTODO LUNDER E PAKALNIS |
| UCS | FORÇA DE COMPRESSÃO UNIAXIAL DA ROCHA INTATA NO PILAR (MPa) |
| C1 | CONSTANTE EMPIRICAMENTE DETERMINADA, DEFINIDA COMO 0,68 PELO MÉTODO |
| C2 | CONSTANTE EMPIRICAMENTE DETERMINADA, DEFINIDA COMO 0,52 PELO MÉTODO |
| kappa | FATOR ASSOCIADO À FRICÇÃO PILAR |
| Cpav | MÉDIA DE CONFINAMENTO DO PILAR |
| Wp | LARGURA DO PILAR |
| h | ALTURA DO PILAR |

Fonte: CURSO DE GEOMECÂNICA APLICADA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA
YAMANA GOLD INC. (2019)

Nesta metodologia Lunder e Pakalnis estimam a resistência do pilar em rocha competente e tendo posse da previsão da tensão que está sendo aplicada sobre o pilar chegamos ao fator de segurança, FS. Para se chegar ao fator de segurança realizamos a divisão entre o a resistência do pilar (S_p) e a tensão atuante sobre o mesmo (σ_p).

$$fs = \frac{S_p}{\sigma_p}$$

A metodologia empregada por Lunder e Pakalnis nos fala que a resistência dos pilares pode ser demonstrada a partir dos seguintes parâmetros:

- FS < 1.0, o pilar encontra-se instável e danificado.

- $1.0 \leq FS < 1.4$, o pilar encontra-se danificado porem permanece estável.
- $FS \geq 1.4$, o pilar está estável e sem danos.

Para Bieniawski (1967) a resistência de um pilar pode ser encontrada da seguinte forma:

$$\sigma_p = \sigma_{cm} (0.64 + 0.36(w/h))$$

σ_p Resistencia do pilar;

σ_{cm} Resistencia do maciço rochoso;

W Largura do pilar;

H Altura do pilar.

Esta metodologia foi encontrada realizando estudos empíricos em pilares de carvão onde o autor observou que as tensões não se distribuíam uniformemente sobre os pilares, deste modo era necessário ponderar as tensões atuantes, para a formulação das cargas atuantes Bieniawski utilizou-se de um gradiente de carregamento, encontrado da seguinte forma:

$$\sigma_v = \sigma_{cm} (0.64 + 2.16x/h)$$

σ_v Tensão vertical;

σ_{cm} Resistencia do maciço rochoso;

x Altura do pilar;

h distancia a partir da borda.

Peng (1986) evidenciou seus estudos em duas formulas, as mesmas são apresentadas a seguir:

$$\sigma_p = \sigma_{cm} \left(A + B \frac{W}{h} \right)$$

$$\sigma_p = \sigma_{cm} \frac{W^\alpha}{h^\beta}$$

σ_p Resistencia do pilar;

σ_{cm} Resistencia do maciço rochoso;

W Largura do pilar;

H Altura do pilar.

α Parâmetro utilizado devido a classificação do maciço rochoso encontrado no pilar

β Parâmetro utilizado devido a classificação do maciço rochoso encontrado no pilar

Desde a década de sessenta vários autores se dispuseram a estudar casos onde pilares atingiram seu estado de limite último, são inúmeras as formulas encontradas durante este período até os dias de hoje, cada autor se dispôs a entender o comportamento do maciço rochoso e seus componentes que pressupõe a sua resistência chegando assim a dados confiáveis para a mina de estudo. Um ponto em comum entre as formulas são que todos os autores levam em consideração a seção do pilar assim como a resistência da rocha intacta para seus estudos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia a ser usada nesta pesquisa acadêmica será a referencial e trabalho de campo além de apresentação de pesquisas bibliográficas qualitativas, buscando entender o funcionamento da resistência de pilares em minas subterrâneas. O alvo dessa pesquisa científica em questão será descrito por meio de revisões bibliográficas, artigos científicos, livros pertinentes, e a própria associação brasileira de normas técnicas. Visando principalmente entender o método de câmaras e pilares em minas subterrâneas, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Pilares após realização de lavra, método câmara de pilares



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

O principal método para o desenvolvimento de tal pesquisa foi demonstrar a operacionalidade das técnicas encontradas na literatura associada a uma análise de campo em pilares durante e após a execução da lavra mostrando a importância dos pilares para um painel de lavra. O trabalho realizado em campo foi feito na mina subterrânea Pilar, que se encontra na cidade de Pilar de Goiás no estado de Goiás. Com ensaios de amostras de rochas pretende-se analisar a resistências das litologias encontradas na mina Pilar e conseqüentemente o comportamento dos pilares remanescentes após a lavra e verificar de forma gradual como atuam as deformações nos mesmos, quando estes são submetidos a cargas além da sua capacidade de resistência e assim poder identificar o impacto que pilares com falhas possam ter sobre a

continuidade da lavra em outros níveis da mina. Os ensaios foram realizados pelo LTEC, laboratório técnico e engenharia LTDA, onde foram realizados ensaios para determinação da resistência a compressão uniaxial método da ISRM ASTM D7012 e o ensaio de resistência a compressão diametral (tração indireta) sugestão de métodos da ISRM ASTM D3967. Juntamente com os ensaios de amostras em rocha também foi utilizado para qualificar a qualidade do maciço rochoso mapeamentos geotécnicos realizados em campo demonstrado através da Figura 8.

Figura 8 – Mapeamento geotécnico realizado na mina Pilar



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020).

Os ensaios foram realizados seguindo as orientações constantes descritas na norma técnica para ensaios. Para a realização dos mapeamentos geotécnicos foram utilizados os métodos de classificação geotécnica que são mais aceitos atualmente na sociedade internacional de mecânica dos solos e engenharia geotécnica onde pode-se mencionar a classificação RMR e Q de Barton.

Além da classificação do maciço rochoso foi utilizado durante o presente trabalho levantamento dos danos nos pilares após a lavra, onde foi utilizada para a classificação o método damage level visto na tabela 3 e também medições com crack meter como pode ser visto na figura 9 juntamente com inspeções ao decorrer do tempo nestas regiões onde os pilares sofreram danos após a lavra.

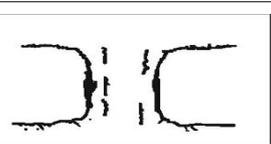
Figura 9 – Pilar com monitoramento crack meter



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

Desta maneira, tendo as considerações finais a respeito da metodologia, a verdadeira intenção é evidenciar as técnicas de elaboração e formatação deste projeto científico, esclarecendo conceitos utilizados, e sua aplicação, fazendo uso de teorias, estudos comparados e o caso concreto da Mina Pilar.

Tabela 3 – Tabela para classificação de danos em pilares após a lavra

| Nível de danos | Descrição da condições dos pilares | Aporencia do pilar |
|--------------------------------------|---|---|
| S0 - Não e identificado danos | NENHUMA INDICAÇÃO DE FRATURA INDUZIDA POR ESTRESSE. PILAR INTACTO |  |
| S1 - Danos pequenos | Pilar lascando nos cantos, perda de massa menor que a parede do pilar. As fraturas são orientadas subalternamente às paredes e são curtas em relação à altura do pilar. |  |
| S2 - Danos moderados | Aumento da fragmentação nos cantos dos pilares. Fraturas nas paredes dos pilares mais numerosas e contínuas. As fraturas se orientam paralelas as paredes e com comprimentos inferiores à altura do pilar. |  |
| S3 - Danos significativos | Fraturas contínuas, paralelas e abertas ao longo das paredes pilares. Fraturas diagonais pouco desenvolvidas (estrela ampulheta). Os comprimentos das fraturas são maiores que a metade da altura do pilar. |  |
| S4 - Danos severos | Fraturas contínuas, paralelas e abertas ao longo das paredes pilares. Fraturas diagonais bem desenvolvidas (ampulheta clássica). Os comprimentos das fraturas são maiores que a metade da altura do pilar. |  |
| S5 - Danos extremos | Pilar com falha, pode ter uma capacidade residual de resistência mínima e fornecer pouco ou nenhum suporte para o local. Podem ocorrer quebras extremas e queda de blocos. O pilar apresenta uma considerável perda de massa. |  |

Fonte: MINERIA E PETROLEO Y ENERGIA, (2014)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Mapeamento geotécnico na região de estudo

Para base de estudo do presente trabalho será considerado a região da mina Pilar nomeada como RS117. Nestas regiões foram evidenciados danos consideráveis nos pilares após a lavra, porem cada região apresenta suas particularidades.

Nesta região da mina encontra-se as litologias predominantes no corpo mineralizado conhecido por HG1, que são o IS, xisto carbonoso, e o QSST, quartzo sericita xisto talco. O xisto carbonoso apresenta uma resistência a compressão uniaxial que varia de 100 a 145 Mpa enquanto que o QSST possui uma resistência mais baixa em média de 50 Mpa.

O mapeamento geotécnico realizado na RS117 foi dividido seguindo as classificações do quadro 7:

Quadro 7– Tabela para classificação geotécnica do maciço rochoso

| Material escavado | Rocha sã | Rocha pouco fraturada foliada | Rocha fraturada e foliada | Rocha fraca e ou / muito fraturada | Rocha macia, argilosa ou disgregavel |
|-------------------|----------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Classe de Maciço | A | B | C | D | E |
| RMR | 99-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | >20 |
| Q Barton | <60 | 60 - 6,0 | 6,0 - 0,7 | 0,7 - 0,07 | >0,07 |

Fonte: CGO (2014).

- A - Maciço excelente;
- B - Maciço bom;
- C - Maciço regular;
- D - Maciço ruim;
- E - Maciço muito ruim.

Fonte: CGO (2014).

Na região da RS117 e RS116, RS paralela a RS117, foram realizados 15 mapeamentos geotécnicos, conforme o quadro 8 chegaram-se a estas classificações geotécnicas:

Quadro 8 - Mapeamento geotécnico região da RS117 e RS116

| REGIÃO RS117 E NAS PROXIMIDADES | |
|---------------------------------|-----------------|
| Classificação | Pontos mapeados |
| REGULAR | 5 |
| BOM | 8 |
| RUIM | 2 |

Fonte: PGDM – Departamento Geotécnico (2020)

A figura 10 detalha os pontos onde foram realizados os mapeamentos, sendo cada ponto indicado pela cor da sua classificação geotécnica.

Figura 11 – Pilar com início de dano RS117, set 2017



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020).

Foram constatados que o acúmulo de tensões eram progressivos com o passar do tempo, os pilares com acúmulo de tensões apresentavam gradativamente maiores danos chegando até ao seu estado de limite último, conforme Figura 12, isto foi identificado em todas as regiões que apresentavam litologia de baixíssima resistência no footwall.

Figura 12 – Pilar ao atingir seu estado de limite ultimo RS602, out 2019



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

4.4 Mapeamento De Danos Em Pilares E Monitoramento Crack Meter

Para entendimento desta anomalia nos pilares iniciou-se o mapeamento de danos nos pilares, seguindo como parâmetro para tal classificação a tabela 3, damage level. Foram realizados a classificação de danos nos pilares na região da RS117 para a realização deste trabalho nos anos entre os anos de 2017 a 2020.

Para o auxiliar a identificação da progressão dos danos em um curto espaço de tempo utilizou-se o monitoramento com a técnica crack meter, apesar da baixa tecnologia essa técnica proporciona evidenciar a progressão nas aberturas das trincas dos pilares de forma bastante eficaz.

O crack meter consiste na aplicação de gesso ou argamassa junto as aberturas iniciais que se formam nos pilares devido aumento das tensões, sendo também instalados dois pinos paralelos uma ao outro onde a rocha ainda está sem danos, com os pinos já instalados pode-se realizar a medição da distância entre os pinos com a utilização de um paquímetro digital e juntamente com a inspeção diária junto ao gesso pode-se verificar se o pilar continua com movimentação. O gesso é material mais apropriado já que apresenta uma menor resistência e

consequentemente trinca com maior facilidade, como demonstrado na figura 13, porem em locais úmidos não é possível a sua utilização (FALLÉ, 2012).

Figura 13 – Crack meter instalado em pilar na região da RS117



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

4. 5 Pilares com danos x Tempo

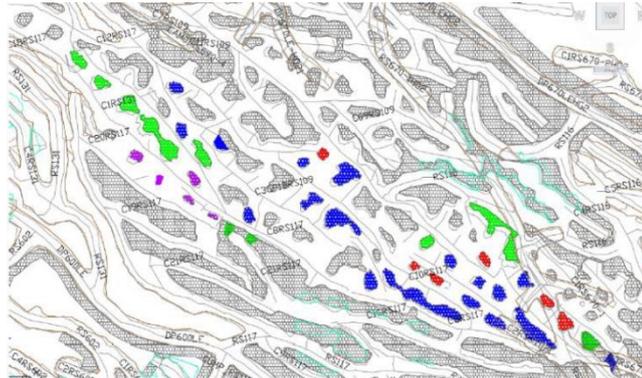
A partir das classificações dos pilares, utilizando-se da tabela 3 damage level, foi possível analisar a evolução ou não dos danos devido as tensões ao longo de quatro anos. A região do nosso estudo, RS117, pode nos mostrar o comportamento dos pilares após a realização da lavra ao longo deste tempo. Nas figuras 14, 15, e 16 podem ser observados os pilares, sendo cada pilar tendo sua cor de acordo com os danos encontrados no respectivo ano seguindo a classificação damage level, tabela 3.

Tabela 3 – Tabela para classificação de danos em pilares após a lavra

| Nível de danos | Decrição da condições dos pilares | Aporencia do pilar |
|--------------------------------------|---|--------------------|
| S0 - Não e identificado danos | NENHUMA INDICAÇÃO DE FRATURA INDUZIDA POR ESTRESSE. PILAR INTACTO | |
| S1 - Danos pequenos | Pilar lascando nos cantos, perca de massa menor que a parede do pilar. As fraturas são orientadas subalternamente às paredes e são curtas em relação à altura do pilar. | |
| S2 - Danos moderados | Aumento da fragmentação nos cantos dos pilares. Fraturas nas paredes dos pilares mais numerosas e contínuas. As fraturas se orientam paralelas as paredes e com comprimentos inferiores à altura do pilar. | |
| S3 - Danos significativos | Fraturas contínuas, paralelas e abertas ao longo das paredes pilares. Fraturas diagonais poucos desenvolvidas (estrela ampulheta). Os comprimentos das fraturas são maiores que a metade da altura do pilar. | |
| S4 - Danos severos | Fraturas contínuas, paralelas e abertas ao longo das paredes pilares. Fraturas diagonais bem desenvolvidas (ampulheta clássica). Os comprimentos das fraturas são maiores que a metade da altura do pilar. | |
| S5 - Danos extremos | Pilar com falha, pode ter uma capacidade residual de resistência mínima e fornecer pouco ou nenhum suporte para o local. Podem ocorrer quebras extremas e queda de blocos. O pilar apresenta uma considerável perca de massa. | |

Fonte: MINERIA E PETROLEO Y ENERGIA, (2014)

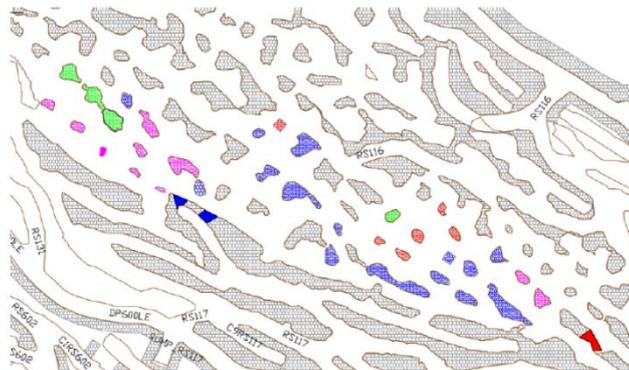
Figura 14 –Mapeamento de danos em pilares RS117 set/2017



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

Na figura 14, set/2017, a maioria dos pilares encontra-se na cor azul, classificação S1, tendo poucos danos após a lavra.

Figura 15 –Mapeamento de danos em pilares RS117 set/2018



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

Na figura 15, set/2018, alguns pilares já passam da cor azul, S1, para danos maiores como na cor vermelha, S2, e na cor rosa, dano S3 conforme classificação da tabela 3.

Figura 16 –Mapeamento de danos em pilares RS117 jul./2020



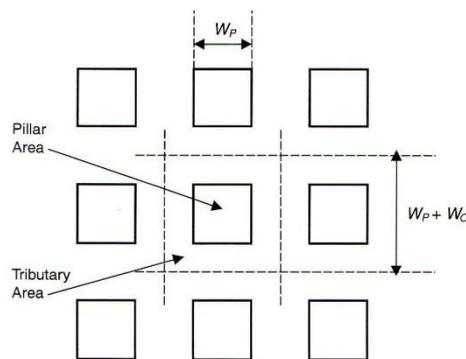
Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

Na figura 16, julho/2020, após diminuição nas seções de alguns pilares e decorrência das litologias de menor resistência no footwall vemos que vários pilares possuem algum dano seja ele de menor escala até pilares que atingiram o seu estado de limite último.

A partir desta comparação ao longo dos anos pode-se identificar que os pilares com maior seção levaram um maior tempo para apresentarem danos quando comparados aos pilares de menor seção, outro ponto a ser observado é o fato de que os pilares próximos aos pilares barreiras, pilares de comprimento contínuo que separa as GP, galerias principais, das RS, rampa secundárias, também levaram um tempo maior para que pudesse surgir alguma anomalia em suas estruturas. A partir desta análise evidenciamos que ao inverso que foi mencionado anteriormente, pilares com menor seção tiveram um acréscimo de danos considerável em um curto período, tendo os pilares vizinhos a mesma anomalia posteriormente.

A distribuição de cargas sobre pilares está diretamente associada à sua seção, ou seja, a sua área tributária onde cada pilar comporta certa carga. Nesta analogia quando um pilar perde resistência a carga que este suportava e conseqüentemente redistribuída aos pilares vizinhos e assim subseqüentemente a todos os demais pilares, conforme figura 17.

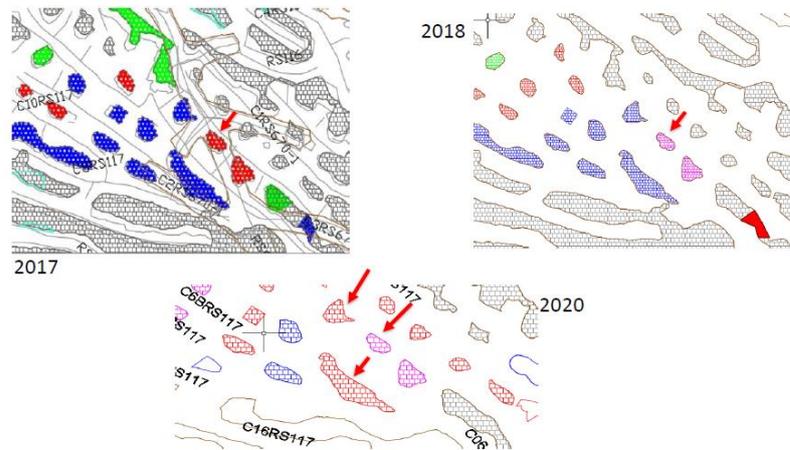
Figura 17 –Esboço de área tributária de um pilar.



Fonte: Geotecnia Minera - Universidade de Chile

Como um exemplo da redistribuição de cargas verifica-se na figura 18 que o pilar indicado pela seta, em 2017 já apresentava dano S3, em 2018 o mesmo pilar não aumentou seu dano, porém a carga que tal pilar suportava foi redistribuída aos pilares vizinhos trazendo danos nos mesmos. No ano de 2020 mesmo continuando tal pilar na categoria de dano S3, conforme visto em 2017, todos os pilares vizinhos que antes estavam na categoria de dano S1 em 2020 já apresentavam danos consideráveis estando na categoria S3 e S4.

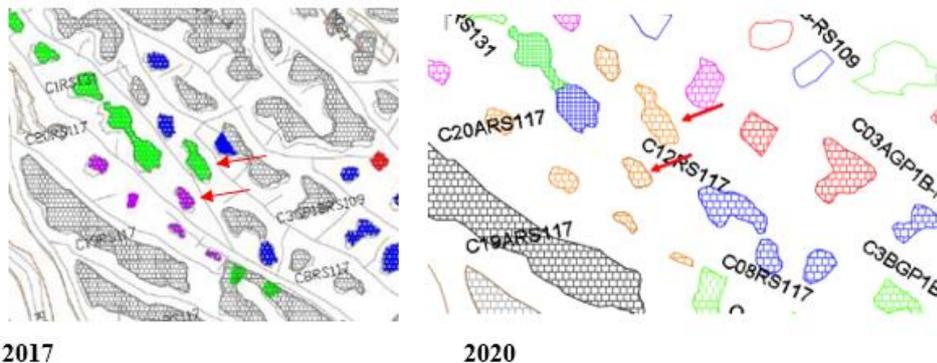
Figura 18 –Redistribuição de tensões sobre pilares subterrâneos



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

Em julho de 2020 foi constatado que alguns pilares indicados na figura 19 chegaram a atingir seu estado de limite último, sendo que no ano de 2017 tais pilares apresentavam danos na categoria S1 e S4, trata-se de mais uma vez evidencia de redistribuição de tensões nesta região.

Figura 19 –Redistribuição de tensões sobre pilares subterrâneos



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

Tal pilar indicado na figura 19, no ano de 2017 apresentava dano S4, roxo. Podemos identificar neste pilar um erro de dimensionamento ou erro operacional onde a área que este pilar deve suportar e uma área grande em relação a sua seção, ou seja o vão desta interseção necessitaria de um pilar com maior seção para que não ocorresse tal dano com pouco tempo após a lavra.

Na figura 20 analisando em campo vemos que sua seção realmente não é a indicada para um pilar de interseção, ou seja, este ponto encontra-se com uma maior concentração de cargas devido ao vão entre os pilares consequentemente a seção para este pilar deveria ser maior. Na figura 20, vemos o pilar no ano de 2017 e no ano de 2020 ao atingir seu estado de limite último, pilar este indicado na figura 19.

Figura 20 – Pilar na interseção de galerias no ano de 2017 já apresentando danos. O mesmo pilar no ano de 2020, atingiu seu estado de limite ultimo



Fonte: Estudo de campo, Dantas (2020)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho, baseou em variadas fontes de pesquisa no intuito de abordar as principais premissas para se realizar o dimensionamento de pilares em minas subterrâneas assim como o seu comportamento quando solicitados. A partir de revisões bibliográficas pode-se entender que a resistência de pilares numa mina subterrânea está diretamente associada três parâmetros que são a base para a realização de um projeto de sucesso, conhecer a resistência da rocha, e as dimensões do pilar, altura e largura. Trazendo tais conhecimento para os dimensionamentos de pilares em obras civis observa-se que ambas têm uma analogia, onde o que irá propor a resistência de ambos os pilares são o material utilizado e a seção disposta em projeto.

Conhecer as tensões que implicam sobre um pilar é importante para que seja realizado um dimensionamento adequado, porém muitas vezes este fator não é fácil de se calcular, neste sentido as análises empíricas, ou seja análise dia a dia do comportamento dos pilares, são necessários para se adequar o projeto.

Hoje com a rápida evolução tecnológica temos acesso a softwares que auxiliam no dimensionamento e comportamento dos pilares numa mina, alguns destes softwares dão uma visão 3D podendo identificar os maiores danos em cada pilar, mas vale ressaltar que ter acesso a estas tecnologias não garante que um projeto estar totalmente estável, como mencionado estes softwares nos auxiliam, e indispensável para o profissional responsável por um projeto de tal magnitude o conhecimento sobre as disciplinas necessárias para poder alcançar o seu objetivo, neste caso um projeto estável, rentável e o mais importante um projeto que garanta a segurança de pessoas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Informação e documentação: Referências**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2018. 68 p.

ASSIS, Leonardo. **Escavação E Exploração De Minas A Céu Aberto**. **Repositório UFRJ**, 2013. Disponível em: <https://www.ufjf.br/engenhariacivil/files/2012/10/ESCAVA%c3%87%c3%83O-E-EXPLORA%c3%87%c3%83O-DE-MINAS-A-C%c3%89U-ABERTO.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2020.

AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. **Introdução à Mecânica das Rochas**. Viçosa: **UFV**, 2002. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/700/1/MONOGRAFIA_Correla%C3%A7%C3%A3oParametrosCrit%C3%A9rio.pdf. Acesso em: 20 de setembro de 2020.

BASTOS, Paulo. **Fundamentos do Concreto armado**. Unesp, 2011. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/valtencirgomes/disciplinas/construcao-de-edificios/formas-e-elementos-de-concreto/notas-de-aula-_fundamentos-do-concreto-armado>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

BEKAERT, Belgo. **Aprenda de uma vez por todas a diferença entre mineral, rocha e maciço**. **Belgo Bekaert Arames**, 2020. Disponível em: <https://blog.belgobekaert.com.br/geotech/mineral-rocha-e-macico/>. Acesso em: 17 de setembro de 2020.

BERNARDES, Mariana. **Lavra: o que é, métodos utilizados e a regulamentação**. **MinasJr**, 2017. Disponível em: <<https://www.minasjr.com.br/lavra-o-que-e-metodos-regulamentacao/#:~:text=Segundo%20o%20C%C3%B3digo%20Brasileiro%20de,e%20lavra%20a%20c%C3%A9u%20aberto>>. Acesso em: 18 de novembro de 2020.

CAMURUGI, Nelson. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**. **Repositório USP**, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-03062008101455/publico/NSS_Tese_Doutorado_Rev05final.pdf>. Acesso em: 10 de outubro de 2020.

CORREDOR, J.; PORTILLA, G.; DEMONTE, S.; SILVA, J.; RENÓ, R. **Caracterização da deformação rúptil em rochas foliadas e o impacto na setorização de riscos geotécnicos, Mina Pilar de Goiás**. In: ISRM - Integrating Innovations of Rock Mechanics R.J. Rocca *et al.* Editores. Buenos Aires, p. 19-26, 2015.

ELOY, A. **Dimensionamento Ótimo de Câmaras e Pilares em Camadas Inclinadas**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto - MG, 2016.

FALLÉ, José. **Identificação de problemas e soluções em Betões e argamassa hidráulica**. **Universidade Fernando Pessoa**, 2012. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/61013844.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

GERMANI, Darcy. **A Mineração no Brasil**. CGEE, 2002. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/mineracao_no_brasil_rel_final_1023.pdf/8cbe5e98-23c4-4eac-84ba-0b3c4df3b099?version=1.0>. Acesso em: 18 de novembro de 2020.

GONÇALVES, H; MARINHO, F; FUTAI, M; SILVA, H. **Mecânica dos solos e fundações**. USP, 2014. Disponível em: <<https://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/pef0522/PEF0522Notas%20de%20Aula.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

HERRERA, Jaime. **Modelagem Numérica Tridimensional Para Análise de Eventos de Ruptura na Base de Pilares Inclinados em Rocha Foliada**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade de Ouro Preto - MG, 2019.

JAGER, A. J. RYDER, J. A. **A handbook On Rock engineering Practice for Tabular Hard Rock Mines**. SIMRAC; Johannesburg. 1999.

KIRSTEN, André. **Importância dos Pilares no Comportamento de uma Estrutura. Mais Engenharia**, 2018. Disponível em: <<http://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/pilares-no-comportamento-de-uma-estrutura/>>. Acesso em: 10 de junho de 2020.

LOPEZ, Maria. **Lopez. Modelação Numérica Para O Dimensionamento De Pilares De Minas Subterrâneas**. UFOP, 2017. Disponível em: <https://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/dis-mariamartinez.pdf>. Acesso em: 11 de junho de 2020.

MACEDO, A; BAZANTE, A; BONATES, E. **Seleção do método de lavra: arte e ciência**. SCIELO, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000300010>. Acesso em: 21 de novembro de 2020.

MAGALHÃES, Débora. **Correlação Entre Os Parâmetros Do Critério De Ruptura De Mohr-Coulomb E O Critério Generalizado De Hoek-Brown**. UFOP, 2017. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/700/1/MONOGRAFIA_Correla%C3%A7%C3%A3oParametrosCrit%C3%A9rio.pdf>. Acesso em: 8 de setembro de 2020.

NEME, M; CURTI, A; SILVA, J; CARNEIRO, A. **Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos**. Scielo, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672011000500019>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

RENÓ, Rodolfo; GONTIJO, Alexandre Assunção; HERRERA, Jaime Andres
Corredor; de 13 setembro 2014; **Procedimento Operacional de Mapeamento**.

SALOMON, M.D.G.; MUNRO, A.H. **A study of the strength of coal pillars**. Journal of South African Institute Mineral & Metals. v.67, p.55-67, 1967.

SILVA, J.M. **Tensões em Maciços Rochosos. Estabilidade de Escavações Subterrâneas**. DEMIN. UFOP. 2017.

WINGE, Manfredo. **EVOLUÇÃO DOS TERRENOS GRANULÍTICOS DA PROVÍNCIA ESTRUTURAL TOCANTINS, BRASIL CENTRAL**. UNB, 2015. Disponível em: <<http://mw.eco.br/ig/posg/dout/tese005/index.html>>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

WOLLP, Luís. **CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM TALUDE DA SANTA HELENA MINERAÇÃO**. CEFET - MG, 2018. Disponível em: <<http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Luis-fernando-de-lima-wolpp.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

ZIPF, R. K. **Pillar design to Prevent collapse of room and pillar mines**. Ch. In underground Mining Methods Handbook, W. Hustrulid and R. L. Bullock, eds., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, CO.1999.