



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



ANÁLISE COMPARATIVA DE TELAS METÁLICAS E NÃO METÁLICAS UTILIZADAS NA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

Por:

Autor: Marcelo Henrique Lopes Alves

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Ouro Preto

2019

UFOP
Universidade Federal de Ouro Preto

Ouro Preto
2019

Marcelo Henrique Lopes Alves

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TELAS METÁLICAS E NÃO
METÁLICAS UTILIZADAS NA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Lavra de mina subterrânea

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Ouro Preto

2019

A474a

Alves, Marcelo Henrique Lopes.

Análise comparativa de telas metálicas e não metálicas utilizadas na mineração subterrânea [manuscrito] / Marcelo Henrique Lopes Alves. - 2019.

65f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Lavra subterrânea. 2. Deformações e tensões. 3. Escavação. I. Silva, José Margarida da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.016:624.15



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

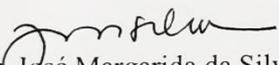
Aos 19 dias do mês de julho de 2019, às 14h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “*ANÁLISE COMPARATIVA DE TELAS METÁLICAS E NÃO METÁLICAS UTILIZADAS NA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA*”, pelo aluno **Marcelo Henrique Lopes Alves**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Margarida da Silva (orientador)**, **Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza** e **Eng.^a de Minas Ana Luísa Costa Fiorito**.

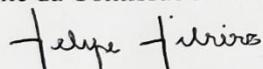
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **APROVAÇÃO** do candidato, com a nota **9,5**... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

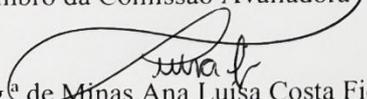
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

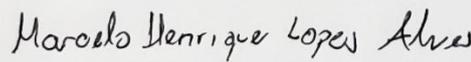
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

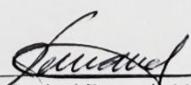
Ouro Preto, 19 de julho de 2019.


Prof. Dr. José Margarida da Silva
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador


Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza
Membro da Comissão Avaliadora


Eng.^a de Minas Ana Luísa Costa Fiorito
Membro da Comissão Avaliadora


Marcelo Henrique Lopes Alves


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais, José e Maria Célia, e aos meus irmãos, Matheus e Verônica, por sempre estarem ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sempre ser meu alicerce em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais, Maria Célia e José, e aos meus irmãos Verônica e Matheus, por estarem sempre ao meu lado independentemente das circunstâncias.

À Universidade Federal de Ouro Preto, à Escola de Minas e aos professores pelo ensino de excelência.

Ao professor Dr. José Margarida da Silva pelo apoio e orientação durante todo o período de realização deste trabalho.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado e me auxiliaram durante todo o período da graduação.

À colaboração da Anglogold Ashanti e da DSI Underground que proporcionaram o apoio necessário para a realização deste estudo.

EPÍGRAFE

“Se você quer algo que nunca teve, você precisa estar disposto a fazer algo que nunca fez” – Thomas Jefferson

RESUMO

Diferentes tipos de suportes e reforços são utilizados para sustentar as aberturas geradas na mineração subterrânea. Dentre os diversos escoramentos passíveis de serem utilizados, as telas metálicas e as poliméricas possuem um papel fundamental na estabilização de minas em subsolo. Possuindo a função de restringir a movimentação das faces das aberturas subterrâneas e conter pequenos blocos os quais podem se desprender do maciço rochoso, as telas devem ser bem compreendidas para a sua melhor utilização. Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a AngloGold Ashanti e a DSI Underground com a finalidade de realizar uma análise comparativa de quatro modelos diferentes de telas, sendo elas: eletro fundidas galvanizadas, eletro fundidas não galvanizadas, poliméricas e soldadas metálicas. Para isso, foram realizados testes de carregamento nas dependências da DSI Underground localizada em Nova Lima, Minas Gerais. Como resultado, foi feita uma análise comparativa e gerado um gráfico de tensão por deslocamento. Este será utilizado como fonte de referência pela AngloGold Ashanti na estabilização de uma das principais rampas de acesso da mina Cuiabá, localizada em Sabará, Minas Gerais. Dentre as quatro telas testadas as eletro fundidas galvanizadas e eletro fundidas não galvanizadas obtiveram os maiores valores de carga suportada e de deslocamento. Além disso, apresentaram resistência residual após a primeira ruptura. As telas poliméricas analisadas obtiveram os menores valores de resistências em todos os carregamentos. Ademais, apresentaram resistência residual insignificante após a primeira ruptura. As telas soldadas metálicas obtiveram valores de carga intermediários se comparada com as demais telas.

Palavras-chave: Tela metálica. Tela polimérica. Mineração subterrânea. Escavação subterrânea. Relação tensão-deformação.

ABSTRACT

Different types of supports and reinforcements are used to sustain stopes that are excavated in underground mines. Among several supports that can be used, metallic and polymer meshes play a fundamental role in underground stabilization. Having the function of restricting displacement in underground openings and containing loose blocks that can detach from the rock mass, meshes must be well understood for their best use. This work was developed in partnership with AngloGold Ashanti and DSI Underground for the purpose of performing a comparative analysis of four different models of meshes which are: electrofused galvanized, electrofused non-galvanized, polymeric and welded wire. Load tests were executed at DSI Underground installations located in Nova Lima, Minas Gerais. As result, a comparative analysis was done, and a load displacement graphic was generated. The graphic will be used as reference source by AngloGold Ashanti for the stabilization of Serrotinho ramp, one of the main access ramps of Cuiabá mine located in Sabará, Minas Gerais. Among the four meshes, the electrofused galvanized and electrofused non-galvanized obtained the highest load and displacement values, besides showing residual resistance after the rupture of the meshes. The polymer meshes analyzed obtained the lowest values of resistance to loading. In addition, they presented insignificant residual resistance after the first ruptures. The metallic welded meshes obtained intermediate loading values when compared to the other meshes.

Keywords: Metallic mesh. Polymer mesh. Underground mining. Underground excavation. Load-displacement relation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de lavra a céu aberto e subterrânea.....	22
Figura 2 - Ocorrência de <i>buckling</i> em uma escavação	23
Figura 3 - Métodos de lavra subterrânea classificados de acordo com a forma de sustentação das escavações	25
Figura 4 - Zona de influência de escavações subterrâneas	26
Figura 5 – Sistema de sustentação formado por telas	28
Figura 6 – Aplicação de telas metálicas	29
Figura 7 - Diagrama Tensão Deformação Convencional e Real de um Material Dúctil	31
Figura 8 - Comportamento Frágil e Dúctil dos Materiais	32
Figura 9 - Modos de ruptura em telas metálicas soldadas	33
Figura 10 – Variáveis de uma tela metálica soldada	34
Figura 11 - Tela Polimérica	35
Figura 12 - Desenho esquemático da configuração utilizada nos ensaios.....	36
Figura 13 – Localização da Mina Cuiabá	37
Figura 14 – Evolução da massa de ouro produzida na Mina Cuiabá	38
Figura 15 - Geologia da seção do nível N11	39
Figura 16 - Mecanismo de Ruptura da Rocha Foliada	40
Figura 17 - Flexão em uma Rocha Foliada na mina Cuiabá	40
Figura 18 - Layout da Rampa Serrotinho	41
Figura 19 - Localização da DSI Underground	43
Figura 20 - Tela eletro fundida não galvanizada (DSI)	44
Figura 21 - Tela eletro fundida galvanizada (DSI)	45
Figura 22 - Tela polimérica (DSI Underground)	45
Figura 23 - Tela Soldada metálica (ArcelorMittal)	46
Figura 24 – Equipamento de carga	46
Figura 25 – Tirantes	47
Figura 26 - Chapas circulares	47
Figura 27 - Balança de carga	48
Figura 28 - Chapa central de carregamento.....	48
Figura 29 - Sistema utilizado por Dolinar	49
Figura 30 - Sistema utilizado nos ensaios.....	50
Figura 31 - Desenho esquemático do deslocamento das telas.....	50
Figura 32 - Ruptura da tela eletro fundida não galvanizada e eletro fundida galvanizada na zona das soldas	51
Figura 33 - Ruptura da tela eletro fundida não galvanizada.....	52
Figura 34 - Ruptura da tela eletro fundida galvanizada.....	52
Figura 35 - Ruptura entre a tela e a chapa central de carregamento.....	53
Figura 36 - Ruptura da solda.....	54
Figura 37 - Ruptura da solda no contato tela/tirante	54

Figura 38 – Carregamento máximo x Deslocamento	57
Figura 39 - Carregamento x Deslocamento Dolinar	57
Figura 40 - Relação Tensão máxima x deformação máxima	58
Figura 41 - Relação Tensão x deformação	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema de Suporte e Reforços da Mina Cuiabá	42
Tabela 2 - Diâmetro e espaçamento dos fios	44
Tabela 3- Dados coletados nos ensaios	55

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

AMIRA - Associação Australiana de Indústrias Minerai s Limitada

BIF - Formação ferrífera bandada

cm - Centímetros

cm² – Centímetros quadrados

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

E - Módulo de elasticidade (Módulo de Young)

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

m – Metro

MAN – Metabasilto andesito

MBA – Metabasilto

MBAx – Zona de cloritização em rochas máficas

mm – Milímetro

Mpa – Megapascal

NIOSH - *National Institute for Occupational Safety and Health*

Oz – Onça

PIB – Produto interno bruto

S = Espaçamento

T = Diâmetro

VCR - *Vertical Crater Retreat*

W = Altura da tela

X = Largura da tela

X1 – Petapelitos

X2 - Zona de sericitização

X2Cl – Zona de carbonatação

XS – Petapelitos com intercalações de tufitos félsicos

ϵ - Deformação

σ – Tensão

σ_E – Limite de escoamento

σ_p – Limite de proporcionalidade

σ_r – Limite de resistência

σ_{rup} - Tensão de ruptura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. JUSTIFICATIVA	19
2.1 JUSTIFICATIVA GERAL	19
2.2 JUSTIFICATIVA ESPECÍFICA	19
3. OBJETIVOS	20
3.1 OBJETIVO GERAL	20
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	20
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1 TIPOS DE LAVRA	21
4.1.1 CARACTERÍSTICAS DA LAVRA SUBTERRÂNEA	22
4.1.2 FOLIAÇÕES E <i>BUCKLING</i>	23
4.2 SUPORTES E REFORÇOS	23
4.3 TELAS PARA LAVRA SUBTERRÂNEA	27
4.4 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS	29
4.4.1 RUPTURA DO MATERIAL	31
4.5 TELAS	32
4.5.1 TELAS METÁLICAS SOLDADAS	32
4.5.3 TELAS POLIMÉRICAS	34
5. ESTUDO DE CASO	37
5.1 MINA CUIABÁ	37
5.1.1 GEOLOGIA DA MINA	38
5.1.2 COMPETÊNCIA DO MACIÇO ROCHOSO	39
5.1.3 RAMPA SERROTINHO	40
5.1.4 Sistema de Suportes e Reforços da Mina Cuiabá	41
6. MATERIAIS E MÉTODOS	43
6.1 LOCAL DOS ENSAIOS	43
6.2 TELAS ANALISADAS	44
6.3 MATERIAIS UTILIZADOS	46
6.4 MÉTODO DOS ENSAIOS	49
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

7.1 TIPOS DE RUPTURA	51
7.1.1 Telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas	51
7.1.2 Telas poliméricas	53
7.1.3 Telas soldadas metálicas	53
7.2 VALORES ENCONTRADO NOS TESTES DE CARGA.....	55
7.2.1 Telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas	55
7.2.2 Telas poliméricas	56
7.2.3 Telas Soldadas metálicas.....	56
7.3 CARREGAMENTO X DESLOCAMENTO	57
8. CONCLUSÕES	59
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades mais antigas praticadas pela humanidade. Existem datações de épocas pré-históricas em que o homem já extraía rochas e minerais da superfície da Terra para a fabricação de utensílios que auxiliassem nas atividades cotidianas de caça e de construção. No Brasil, não diferentemente, a mineração também teve um papel importante na história do país. Desde o Brasil Colônia a extração de bens minerais possui papel importante na economia brasileira. Atualmente, 4% do PIB e 20,5% das exportações do país são decorrentes da mineração segundo o Ministério de Minas e Energia (2018). Além disso, segundo dados do Ministério do Trabalho (2015, apud IBRAM, 2015), esse setor da economia é o responsável pela geração de 214 mil empregos diretos e, segundo o Informe Mineral 2º/2014 do DNPM (apud IBRAM, 2015, p. 10) são 2,7 milhões de empregos indiretos que o setor minerário gera.

No Brasil existem 8400 minas (DNPM, 2015, apud IBRAM, 2015), o que faz com que a indústria mineral brasileira alcance números bem expressivos de produção. Deste número, uma pequena parcela é representada pela mineração subterrânea se comparada à produção em lavras a céu aberto. A lavra subterrânea apesar de representar uma fatia relativamente pequena da mineração mundial, cerca de 16%, conforme Atlas Copco, 2008, apud Silva, 2018c, vem ganhando cada vez mais significância devido à exaustão de reservas minerais mais superficiais, do aumento da tecnologia de lavra e do avanço de técnicas de estabilização de aberturas subterrâneas, o que permite a extração de corpos mineralizados cada vez mais profundos. Contudo, apesar de uma melhoria significativa nas técnicas de extração de corpos minerais, a estabilidade das escavações subterrâneas ainda é um grande desafio a ser enfrentado. Com a lavra ocorrendo a profundidades maiores e a necessidade de extrair grandes volumes de minério, a dificuldade de manter uma mina geotecnicamente estável aumenta.

Atualmente, diversos tipos de suportes e reforços são utilizados para sustentar os vazios que são gerados quando o minério é retirado na lavra subterrânea. Alguns dos principais são os pilares naturais ou artificiais, concreto projetado, telas, tirantes, cabos, cavilhas *split sets*, *swellex bolts* entre outros. A escolha de quais tipos de

suportes e/ou reforços que devem ser utilizados leva em consideração as características geológicas e geomecânicas da rocha a ser lavrada, o método de lavra utilizado e o custo (SILVA, 2018a). Por isso, é muito particular de cada mina e de cada tipo de escavação a escolha dos escoramentos a serem empregados.

Dentre os diversos escoramentos passíveis de serem utilizados em minas subterrâneas, as telas metálicas e não metálicas exercem um papel muito importante na estabilização do maciço rochoso. Esses suportes que podem ser classificados como contínuos ou revestimentos, possuem a função de restringir a movimentação das faces das aberturas subterrâneas e conter pequenos blocos soltos.

Apesar da importância que as telas possuem, nos últimos 30 anos ocorreram poucas mudanças no modo de fabricação e utilização desses suportes. Alguns estudos foram realizados nas últimas décadas, sendo que as principais inovações desenvolvidas foram principalmente relacionadas às propriedades mecânicas dos materiais e não na aplicação dos suportes.

O objetivo deste trabalho é ser uma das primeiras fontes de referência sobre telas metálicas e não metálicas para mineração subterrânea desenvolvidas no Brasil. Para isso, foi realizado um estudo comparativo com quatro modelos de telas disponíveis no mercado brasileiro. Foram realizados testes de carregamento nas dependências da DSI Underground no intuito de analisar as deformações sofridas quando as mesmas eram carregadas.

O trabalho foi realizado em parceria com a AngloGold Ashanti e os resultados encontrados servirão como fonte de referência para a seleção de uma tela que se adeque às necessidades de estabilização de uma das principais rampas de acesso da Mina Cuiabá localizada em Sabará, Minas Gerais.

2. JUSTIFICATIVA

2.1 JUSTIFICATIVA GERAL

Nos últimos 30 anos ocorreram poucas mudanças na fabricação de telas, sendo que as principais inovações são relacionadas as propriedades mecânicas e não na aplicação desses suportes. As mudanças focaram principalmente na capacidade de alongamento, diâmetros de fio e condições de superfície dos materiais, isto é, fio liso ou deformado (VILLAESCUSA et al., 2013). Apesar de algumas pesquisas terem sido realizadas nos últimos anos, faz-se necessária a realização de mais estudos objetivando compreender melhor o comportamento desse tipo de suporte. Com uma melhor compreensão e conseqüentemente uma melhor aplicação das telas, haverá ganhos significativos na estabilização e segurança de escavações subterrâneas, além de redução nos custos com suportes e reforços.

2.2 JUSTIFICATIVA ESPECÍFICA

A rampa Serrotinho, uma das principais rampas de acesso da Mina Cuiabá, está localizada em um maciço rochoso com alta presença de foliações. Além disso, algumas frentes de lavra em Cuiabá foram alocadas a uma curta distância da rampa de acesso, fazendo com que ocorresse uma sobreposição das zonas de influência das escavações. Por esse motivo, é necessária a instalação de um conjunto de suportes e reforços que inclui a utilização de telas. Esse trabalho tem como justificativa estabelecer uma metodologia de testes que possa ser utilizada como fonte de referência para a escolha de uma tela que melhor se adéque ao comportamento geomecânico da rampa Serrotinho.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um comparativo entre diferentes telas metálicas e não metálicas utilizadas na mineração subterrânea. O estudo se deu a partir da realização de 12 testes com 4 modelos de telas nas instalações da DSI Underground, localizada em Nova Lima, Minas Gerais.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- i. Realizar um comparativo entre as telas.

- ii. Realizar testes de resistência em telas metálicas e não metálicas com diferentes características no intuito de analisar as cargas suportadas e as deformações sofridas pelas mesmas.

- iii. Gerar um gráfico de tensão por deslocamento de diferentes modelos de telas metálicas e não metálicas com o objetivo de auxiliar na escolha da tela que melhor se adeque às necessidades de estabilização da rampa Serrotinho na mina Cuiabá pertencente à Anglogold Ashanti.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

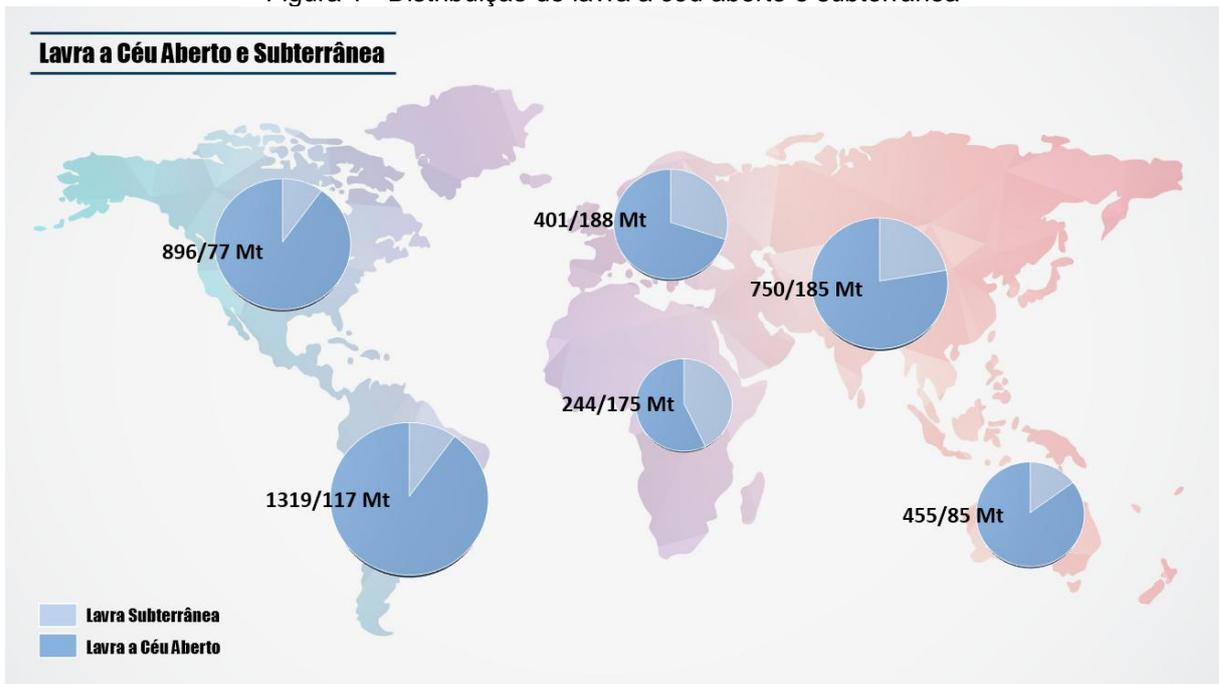
4.1 TIPOS DE LAVRA

Pode-se descrever a mineração como sendo a atividade ou ocupação responsável pela extração de rochas e minerais da superfície ou subsuperfície da Terra. Esses bens minerais incluem minerais metálicos que servem como fonte de cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel ou não metálicos como areia, gipsita, pedras preciosas entre outros.

As minas podem ser divididas em dois tipos, céu aberto e subterrânea. Esta é última utilizada para explorar corpos minerais que estejam em grandes profundidades em relação à superfície da Terra. Já aquela consiste na extração de reservas minerais que afloram ou que estejam localizados a profundidades pequenas em relação a superfície. Quando o corpo a ser extraído está a uma profundidade muito grande, é economicamente inviável a lavra a céu aberto devido à grande quantidade de estéril que deve ser retirado, ou seja, a relação estéril minério é muito alta. Dessa maneira, a lavra subterrânea é utilizada para maximizar o retorno do investimento devido a utilização de métodos de lavra que promovam uma menor diluição do minério.

A lavra subterrânea apesar de representar uma fatia relativamente pequena da mineração mundial, como pode ser visto na figura 1, vem aumentando cada vez mais a sua participação ao redor do mundo. O aumento é uma consequência da exaustão de reservas minerais mais superficiais, do avanço das tecnologias de lavra e da melhoria das técnicas de estabilização de aberturas subterrâneas.

Figura 1 - Distribuição de lavra a céu aberto e subterrânea



Fonte: Adaptado de Atlas Copco (2008)

4.1.1 CARACTERÍSTICAS DA LAVRA SUBTERRÂNEA

A lavra subterrânea possui diversas particularidades que devem ser levadas em consideração durante o planejamento de uma mina. O custo de lavra na maioria das vezes é mais alto e a taxa de produção é mais baixa se comparada com a lavra a céu aberto, por outro lado é um tipo de lavra mais seletiva (Silva,2018c). Além disso, os métodos de lavra são diferentes dos utilizados na lavra a céu aberto e esses dependem de características como geometria, teor, resistência da rocha, profundidade do corpo mineral, além do capital de investimento necessário para o início das atividades.

As escavações subterrâneas geralmente são realizadas em rochas competentes, entretanto devido à existência de planos de acamamento, dobras, falhas, juntas, fraturas, zonas de cisalhamento, intrusões e foliações que influenciam na estabilidade dos arredores da abertura subterrânea (ZHU & ZHAO, 2004) é, segundo Brady e Brown (1985), necessária a utilização de suportes ou reforços visando alcançar quatro objetivos, sendo eles (VILLAESCUSA et al, 1999): assegurar a completa estabilidade da estrutura da mina, proteger as principais aberturas e acessos, garantir a saúde e

segurança em todas as áreas de trabalho e manter a capacidade de produção das regiões ainda não lavradas da mina.

4.1.2 FOLIAÇÕES E *BUCKLING*

As foliações possuem grande influência na estabilidade das escavações subterrâneas. Devido a orientação preferencial que os minerais possuem na presença de foliações, o maciço rochoso pode romper pelo mecanismo de flexão, também conhecido como *buckling*. Segundo Karampinos et al. (2015) o mecanismo de ruptura por flexão (*buckling*) ocorre normalmente em rochas metamórficas ou em rochas sedimentares que possuem camadas finamente estratificadas e segundo Hutchinson e Diederichs (1996) a flexão ocorre em rochas foliadas submetidas a compressão, o que ocasiona o mecanismo de instabilidade no maciço rochoso. A figura 2 mostra esse tipo de ruptura.

Figura 2 - Ocorrência de *buckling* em uma escavação



Fonte: Trópia (2013)

4.2 SUPORTES E REFORÇOS

A distinção entre suporte e reforço que será feita neste trabalho é baseada na definição de Windsor e Thompson (1993, apud BRADY & BROWN, 1985, p. 312). Segundo os autores suporte são equipamentos ou dispositivos que exercem uma

força reativa contrária à movimentação da abertura subterrânea. Esteios de madeira, pilares naturais ou artificiais, concreto projetado e telas são alguns exemplos de suportes. Já o reforço consiste na melhoria das características de resistência inerentes do maciço rochoso ou na diminuição da deformabilidade da rocha através da introdução de tirantes, cabos, cavilhas *split sets*, *swellex bolts* e outros dispositivos na mesma ou através de injeções, enfilagens e congelamento de terreno, como em Silva (2018b).

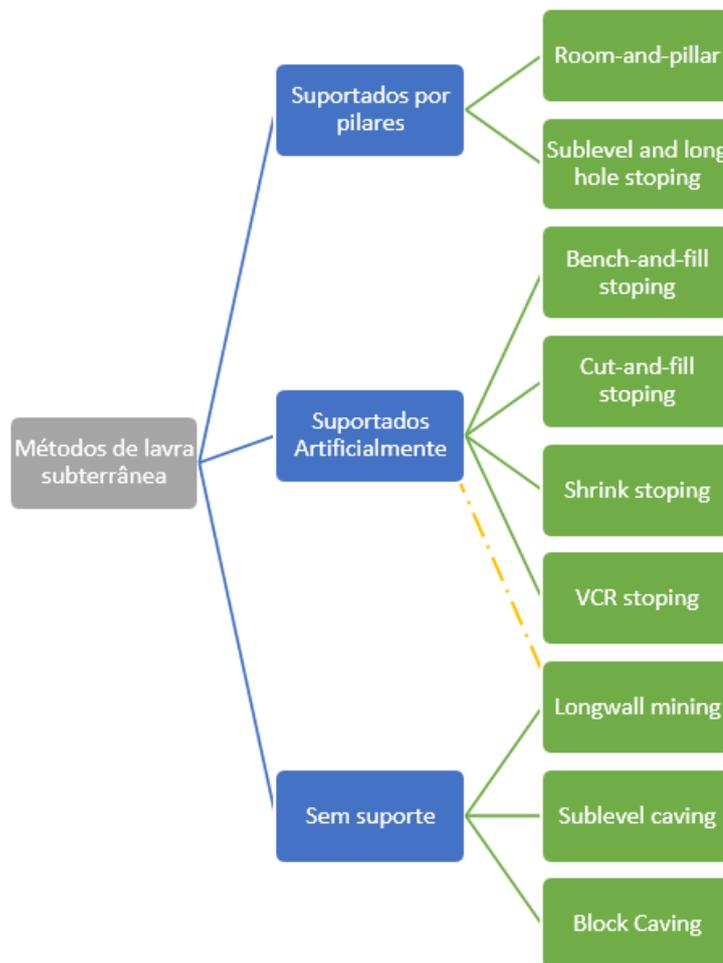
O tipo de suporte ou reforço a ser utilizado em uma mina subterrânea é baseado em diversos fatores. As características geológicas e geomecânicas do maciço rochoso a ser lavrado possuem efeitos dominantes nas operações de lavra. Elas influenciam no design da mina, na estabilidade das aberturas, na fragmentação das rochas, no risco de subsidência das superfícies e conseqüentemente no tipo de suporte e reforço a ser utilizado. É importante conhecer as características do maciço rochoso antes e depois dele ser escavado. Isso é necessário pois, diferentemente de outros projetos em que apenas a geometria e a superfície da estrutura definem a resposta a um carregamento imposto a um sistema, na lavra subterrânea as tensões do sistema são uma consequência da tensão natural em que a rocha está submetida antes da lavra ser iniciada e da tensão induzida que a própria lavra causa no maciço rochoso, conforme Brady e Brown (1985).

Os métodos de lavra que consistem em uma sequência de operações que são realizadas repetidamente tanto na rocha mineralizada quanto na rocha hospedeira também possuem um papel fundamental na definição dos escoramentos a serem utilizados. Em qualquer tipo de lavra, independentemente do método empregado, o objetivo principal a ser alcançado é a recuperação máxima do minério em subsuperfície e para isso, é necessária a criação de acessos na mineralização para liberar o minério da rocha hospedeira. Sendo assim, para alcançar esse objetivo, os escoramentos devem se adequar às características dos métodos de lavra a fim de que a maior quantidade de minério seja explorada com a maior segurança possível.

A geometria, a disposição, a orientação, o tamanho, as configurações geomecânicas e os teores do corpo mineral são algumas propriedades que influenciam na seleção dos métodos de lavra empregados e conseqüentemente nos suportes e reforços

utilizados. A depender dessas características um método de lavra pode ser selecionado ou não. Entre os principais métodos usados em minas subterrâneas, figura 3, podem ser citados o *Room and Pillar*, *Sublevel Open Stopping*, *Cut and Fill Stopping*, *Shrinkage Stopping*, *Vertical Crater Retreat (VCR)*, *Bench-and-Fill Stopping*, *Longwall*, *Sublevel Caving* e *Block Caving*.

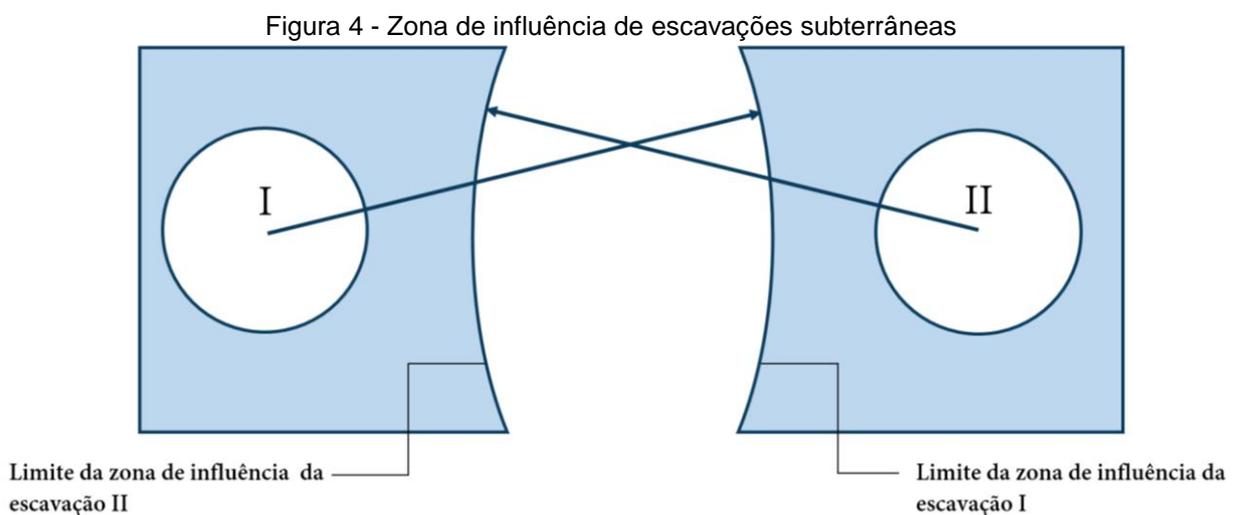
Figura 3 - Métodos de lavra subterrânea classificados de acordo com a forma de sustentação das escavações



Fonte: Adaptado de Brady e Brown (1985)

Durante a execução do método de lavra selecionado é importante planejar e analisar a geometria das escavações subterrâneas. O tamanho das aberturas, a direção e a distância entre os vãos afetam a estabilidade da mina. Por exemplo, quando a lavra ocorre muito próxima das vias de acessos, há uma sobreposição das zonas de influência das escavações, o que por sua vez afeta no tipo e quantidade de suportes e reforços a serem utilizados.

Nesse contexto é importante que seja compreendida a definição de zona de influência de tensões. Segundo Brady e Brown (2004) é definido como a zona em que a tensão natural, in situ, é afetada devido a abertura de escavações subterrâneas. A figura 4 representa essa situação de influência onde duas escavações foram executadas em regiões próximas. Na figura, I e II representam duas escavações e a região central em branco representa a área onde as zonas de influência de ambas as escavações se sobrepõem.



Fonte: Adaptado de Brady & Brown (2004)

Uma vez analisadas as características do maciço rochoso, além de selecionado e analisado o método de lavra a ser utilizado, a escolha dos suportes e reforços que melhor se adequam à mina pode ser feita. Essa escolha, por sua vez, é muito difícil de ser realizada, pois além das características do maciço rochoso e do método de lavra a ser utilizado, vários fatores intrínsecos de cada suporte e reforço devem ser considerados como, por exemplo, o custo, a disponibilidade, a praticidade de instalação, a capacidade e as condições de carregamento estática ou dinâmica (LOUCHNIKOV et al, 1999).

Brady e Brown (1985, p. 317) descreveram alguns princípios básicos que podem ser utilizados como guia na utilização de suportes e reforços os quais estão listados a seguir.

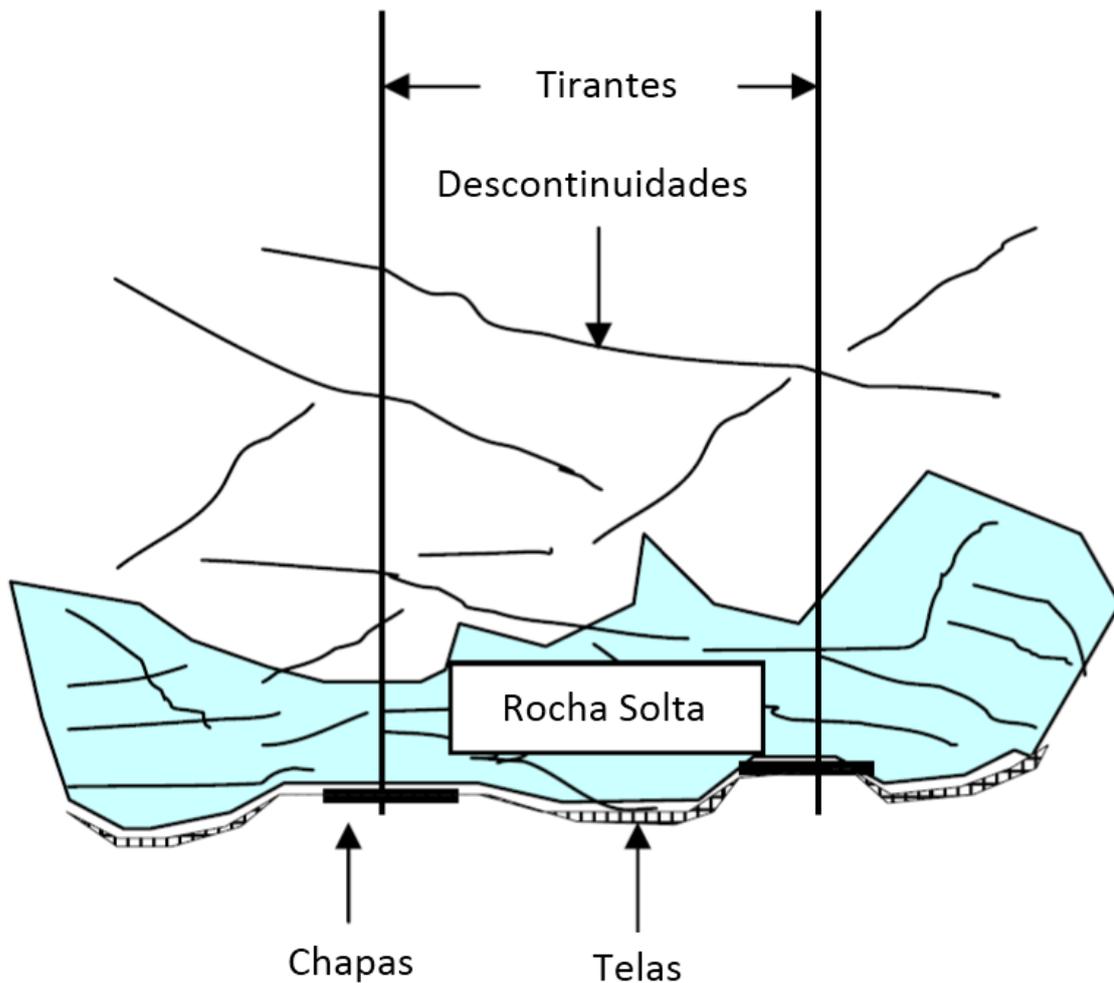
- a) A instalação dos suportes e reforços deve ser feita o mais rápido possível após a escavação. Em alguns casos, quando possível, é recomendada a aplicação de alguns reforços antes mesmo da lavra acontecer.
- b) O contato entre os suportes e reforços com o maciço rochoso deve ser o maior possível.
- c) A deformação do sistema de reforços e suportes deve acomodar o deslocamento da rocha.
- d) Os suportes e reforços devem preservar ao máximo as características mecânicas intrínsecas da rocha.
- e) A remoção e troca dos suportes e reforços devem ser evitadas ao máximo.
- f) O sistema de suporte e reforço deve se adaptar ao máximo às mudanças das características do maciço rochoso ao longo da vida útil da mina.
- g) O sistema de suporte e reforço deve obstruir o mínimo possível o trabalho de avanço de lavra.
- h) As rochas encaixantes devem ser perturbadas o mínimo possível para que suas características mecânicas sejam mantidas intactas.

4.3 TELAS PARA LAVRA SUBTERRÂNEA

Este trabalho tem como foco a busca de uma maior compreensão das telas metálicas e não metálicas disponíveis no mercado brasileiro. Busca-se compreender o comportamento desse suporte classificado como contínuo ou revestimento, no intuito de maximizar a sua utilização e conseqüentemente a restrição da movimentação das faces das aberturas subterrâneas da rampa Serrotinho. Para isso será realizado um comparativo entre diferentes telas metálicas e não metálicas.

As telas são amplamente utilizadas na mineração para restringir a movimentação das faces das aberturas subterrâneas ou conter pequenos blocos que podem se desprender do maciço rochoso atingindo trabalhadores e equipamentos. Elas consistem em fios longitudinais e transversais ligados entre si e são geralmente fabricadas de arames de aço que podem ser soldados ou entrelaçados. Alguns tipos de telas também podem ser fabricados de polímeros, todavia a variação soldada costuma ser a mais utilizada na mineração. Na figura 5 pode-se visualizar como é um sistema esquemático de sustentação formado por telas.

Figura 5 – Sistema de sustentação formado por telas



Fonte: Villaescusa (1999)

Para aplicações na mineração, as telas são utilizadas juntamente com chapas de aço que são restringidas por tirantes ou cabos como mostrado na figura 6. Em uma investigação realizada pela Associação Australiana de Indústrias Mineraias Limitada – AMIRA, analisou-se o típico uso das telas na mineração. No estudo foi observado que o espaçamento entre os tirantes é geralmente governado pelas dimensões das telas. Segundo o estudo, o espaçamento médio entre os tirantes quando utilizados isoladamente é tipicamente cerca de 1,2 metro. Já na presença de telas com tamanho padrão de 2.4 metros, o espaçamento entre os tirantes pode ser reduzido para 1,1 metro. Isso representa um aumento de aproximadamente de 9% no número de tirantes utilizados (THOMPSON et al., 1999, apud VILLAESCUSA et al., 1999).

Figura 6 – Aplicação de telas metálicas



Fonte: DSI Underground (2019)

4.4 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

Um dos principais problemas enfrentados durante a utilização das telas é a definição do momento de ruptura desses suportes quando tensionados pela rocha. Por esse motivo é importante compreender o comportamento dos materiais utilizados na fabricação desses dispositivos.

Uma das características mais importantes dos materiais no estado sólido é a capacidade de resistir ou transmitir tensões. Diferentes materiais se comportam de maneiras distintas quando submetidos a carregamentos externos. A depender das características intrínsecas do material, sua resposta a um estímulo ocorre de diferentes maneiras. Para compreender como se comporta os materiais quando estes são carregados, são realizados ensaios para determinar as suas deformações diante de tensões variadas. Podem ser construídos diagramas tensão-deformação que fornecem importantes informações, tais como o módulo de elasticidade, se o material é dúctil ou frágil, a faixa de comportamento elástico e plástico, além do ponto de ruptura do material (BEER & JOHNSTON, 1995).

Quando carregado, um material dúctil sofre grandes deformações antes de romper, diferentemente dos materiais frágeis que sofrem pequenas deformações antes da ruptura. Como pode ser analisado no diagrama tensão deformação mostrado na figura 7, no início do carregamento de um material dúctil há uma região de comportamento elástico onde as deformações são proporcionais às tensões aplicadas. A relação entre a tensão e a deformação é o módulo de elasticidade o qual é uma característica do material. Durante o comportamento elástico as deformações são reversíveis, ou seja, quando o carregamento é cessado o material retorna a sua forma original. Nessa fase a lei de Hooke, fórmula 1, pode ser aplicada.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Em que:

σ = Tensão

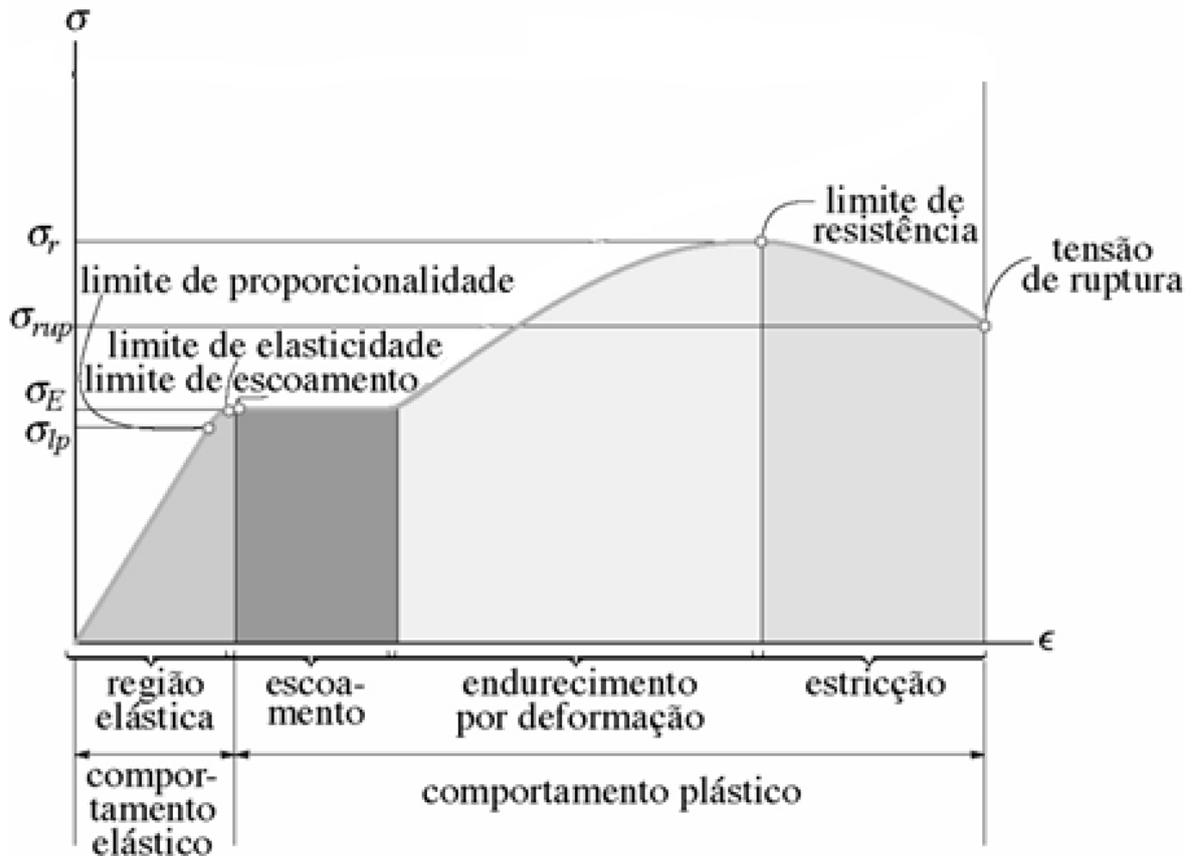
E = Módulo de Elasticidade (módulo de Young)

ε = Deformação

Denomina-se limite de elasticidade a maior tensão aplicada a um material quando o mesmo ainda possui comportamento elástico. A partir desse ponto a fase de escoamento se inicia. Nessa fase o material se deforma de maneira expressiva sofrendo apenas uma pequena variação nas tensões aplicadas. Caso o material tenha uma fase de escoamento bem definida, o limite de elasticidade coincide com a tensão de escoamento (BEER & JOHNSTON, 1995).

Após a fase de escoamento, o incremento da tensão é acompanhado pelo aumento da deformação até que seja alcançado o limite de resistência do material, ou seja, a maior tensão que o material suporta. Após esse ponto de máxima tensão o material se deforma até sofrer a ruptura.

Figura 7 - Diagrama Tensão Deformação Convencional e Real de um Material Dúctil



Fonte: Adaptado de Paris (2019)

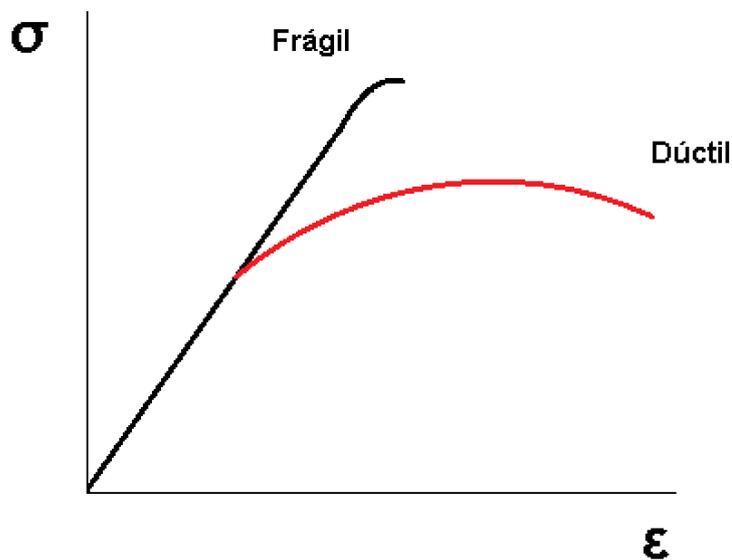
4.4.1 RUPTURA DO MATERIAL

“A falha é a situação em que o sistema deixa de cumprir seu requisito funcional, ou seja, deixa de atender e desempenhar a função para a qual foi projetado”. (ROSA, 2002). Esta situação engloba a falha por colapso total onde o sistema interrompe completamente a execução do seu requisito funcional ou mantém um funcionamento parcial o qual é insuficiente para atender as demandas do projeto original. Quando a capacidade do sistema de suportar uma determinada solicitação de carga é excedida, o colapso da estrutura do material pode acontecer na forma de ruptura.

A ruptura pode ocorrer de duas maneiras, dúctil ou frágil. Esta acontece com os materiais que apresentam pouco ou nenhum escoamento antes da ruptura e é marcada pela predominância da formação de trincas em relação à deformação plástica. Nesse tipo de ruptura, há uma rápida formação e propagação das trincas, o

que leva à rápida ruptura do material. Já a ruptura dúctil ocorre com materiais que sofrem escoamento antes da ruptura ocorrer. O fator principal para definir uma fratura como dúctil é a predominância de deformações plásticas em detrimento da propagação de trincas, ou seja, na fratura dúctil acontece uma lenta propagação de trincas e o material tensionado se deforma plasticamente antes da ruptura. Ambos os tipos de rupturas podem ser observados na figura 8.

Figura 8 - Comportamento Frágil e Dúctil dos Materiais



Fonte: Adaptado de Beer & Johnston (1985)

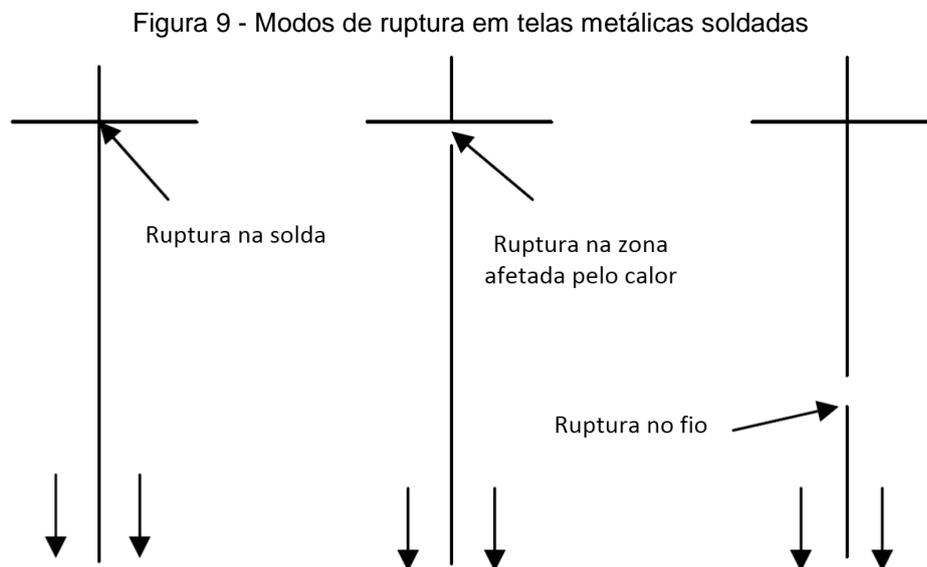
4.5 TELAS

4.5.1 TELAS METÁLICAS SOLDADAS

Já é sabido que no caso de telas metálicas soldadas a ruptura pode ocorrer na solda ou ao longo do fio de aço, sendo que é preferível que o rompimento ocorra no fio e sob nenhuma circunstância a tela deve romper durante o seu manuseio ou instalação. Rupturas nos fios podem acontecer quando a carga máxima que o aço utilizado na fabricação das telas é atingida, enquanto rupturas entre soldas podem acontecer a qualquer momento do carregamento. Em casos extremos de telas com baixo controle de qualidade das soldas, estas podem ser separadas com as mãos (VILLAESCUSA, 1999).

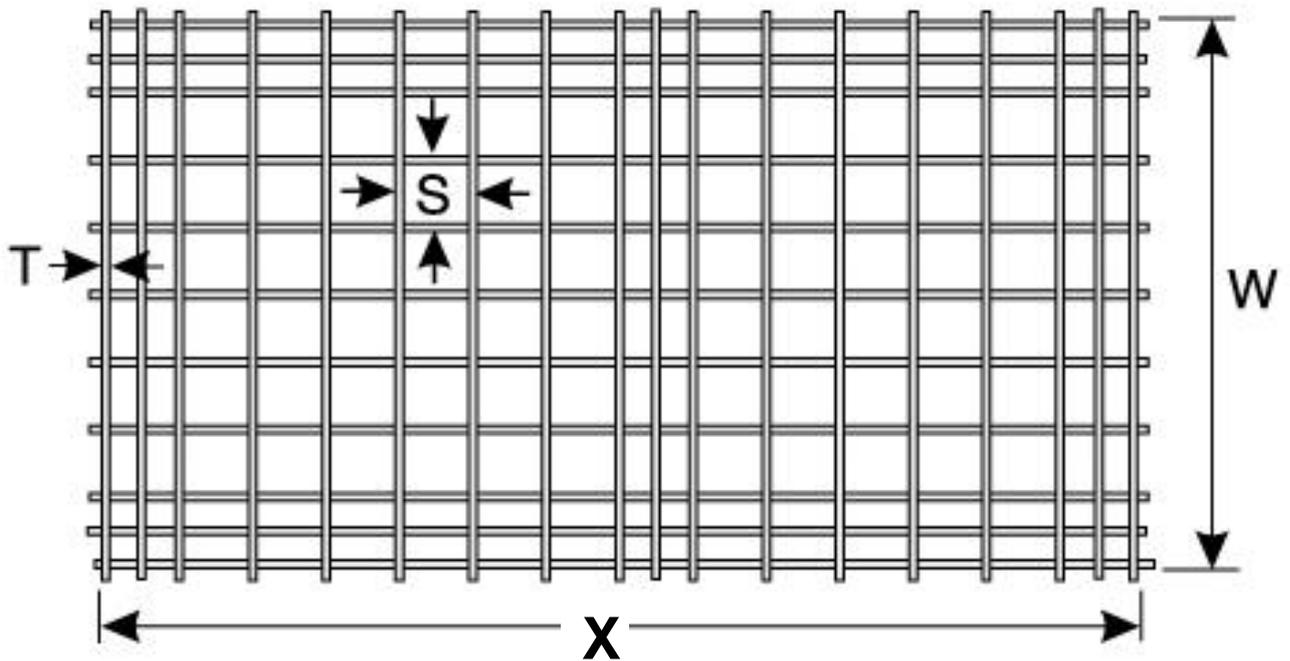
São três os modos de rupturas que podem acontecer durante o carregamento das telas soldadas, assim como pode ser visto na figura 9. O primeiro modo acontece justamente na solda entre os fios e esta ruptura pode ser descrita como uma ruptura por cisalhamento. O limite máximo de carregamento que leva à ruptura nesse ponto é um consequência da tecnologia da solda e do controle de qualidade da mesma. O segundo modo de ruptura acontece na zona afetada pelo calor durante o processo de soldagem. Isso ocorre, pois, a área próxima da região da solda é enfraquecida devido à excessiva pressão de calor e temperatura. Já o terceiro e último modo de ruptura acontece ao longo do fio é um reflexo das características do aço utilizado na fabricação das telas (VILLAESCUSA, 1999).

Algumas características, além do tipo de aço utilizado na fabricação das telas, alteram a capacidade de carga das mesmas. O diâmetro e o espaçamento entre os fios, além do tamanho das telas são alguns exemplos. Uma das configurações mais comuns consiste em fios com 5,6 mm de diâmetro com espaçamento de 100 mm. A figura 10 mostra um desenho esquemático dessas variáveis.



Fonte: Villaescusa (1999)

Figura 10 – Variáveis de uma tela metálica soldada



Fonte: Adaptado de DSI Underground (2019)

Em que:

T = Diâmetro

S = Espaçamento

W = Altura da tela

X = Largura da tela

4.5.3 TELAS POLIMÉRICAS

As telas metálicas vêm sendo utilizadas a décadas e são as mais difundidas na mineração, todavia telas fabricadas à base de polímeros estão sendo desenvolvidas como alternativa às telas metálicas na estabilização de escavações subterrâneas. Apesar destas exercerem um excelente papel na contenção de blocos de rochas soltos nas faces das aberturas subterrâneas, assim aumentando a segurança nas minas, além de acompanhar o deslocamento dos maciços rochosos, há alguns pontos negativos na utilização desse tipo de tela.

A primeira desvantagem é a oxidação das telas metálicas. Como o ambiente subterrâneo é muito úmido, a oxidação das telas ocorre de maneira bem acentuada, de maneira que a capacidade de carga e a vida útil desse reforço são comprometidas. Outro ponto desfavorável a este tipo de tela é o peso do material. Os rolos de telas metálicas que são utilizados na mineração subterrânea são muito pesados, o que dificulta o manuseio e a instalação dos mesmos.

As telas poliméricas vêm como uma solução para esses problemas na lavra subterrânea. Devido as características do material que possuem a mesma capacidade de de carga do aço, os problemas com oxidação passam a ser inexistentes, de maneira que a vida útil desse tipo de reforço passa a ser superior à das telas metálicas. Além disso, o manuseio dos rolos de telas de polímeros é facilitado devido à redução expressiva no peso. A figura 11 mostra um arranjo com tela polimérica.

Figura 11 - Tela Polimérica



Fonte: Tensar (2019)

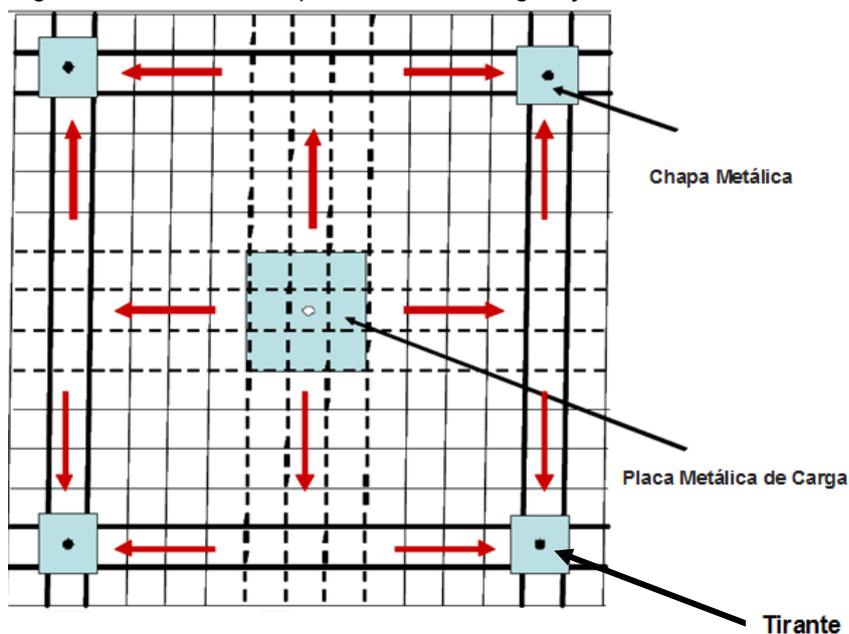
4.6 ESTUDOS JÁ REALIZADOS

Alguns estudos com telas metálicas foram realizados em diferentes países nas últimas décadas segundo Dolinar (2009). No Canadá o Ministério do Trabalho de Ontário (PAKALNIS & AMES,1983, apud DOLINAR, 2009) realizou testes para analisar o

deslocamento de telas metálicas soldadas com fios de diferentes diâmetros. No estudo telas foram alocadas ao longo das faces de uma abertura subterrânea de uma mina e um teste de tração foi realizado. Já em um estudo realizado em um laboratório de testes no Canadá (TANNANT, 1995, apud DOLINAR, 2009), telas fabricadas com diâmetros de fios variados foram analisadas com configurações de tirantes diferentes. Nesse estudo, quando deslocamentos das telas eram notados durante os ensaios, o torque aplicado nos tirantes era modificado. Assim, as capacidades de carga de pico eram determinadas para cada diâmetro de fio. Em 1997 e 1999 Tannant et al e Thompson et al respectivamente (apud DOLINAR, 2009) realizaram outros testes para determinar o deslocamento causado quando uma força era aplicada perpendicularmente as telas. Apesar desses estudos já realizados, ainda existe pouco conhecimento quantitativo sobre telas e a melhor maneira de se utilizar esses suportes.

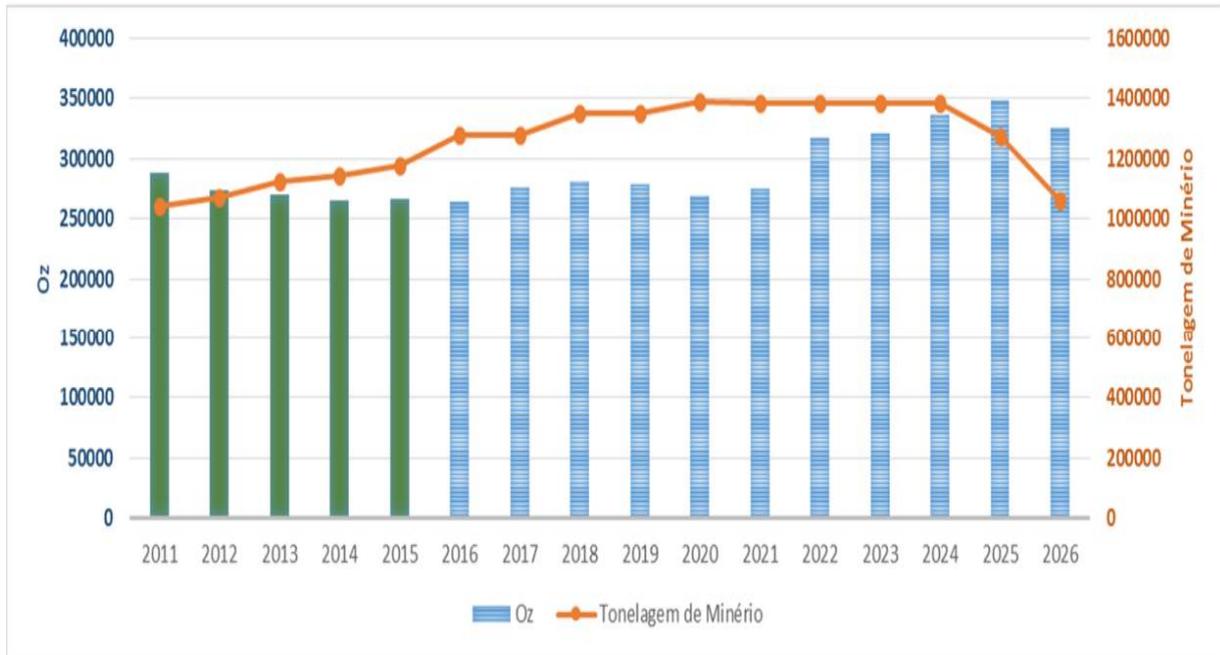
A figura 12 mostra um desenho esquemático da configuração utilizada em um ensaio realizado por Dolinar (2009), onde as setas em vermelho indicam as direções primárias de transferência de carga ao longo dos fios da placa de carga até os tirantes.

Figura 12 - Desenho esquemático da configuração utilizada nos ensaios



Fonte: Dolinar (2009)

Figura 14 – Evolução da massa de ouro produzida na Mina Cuiabá

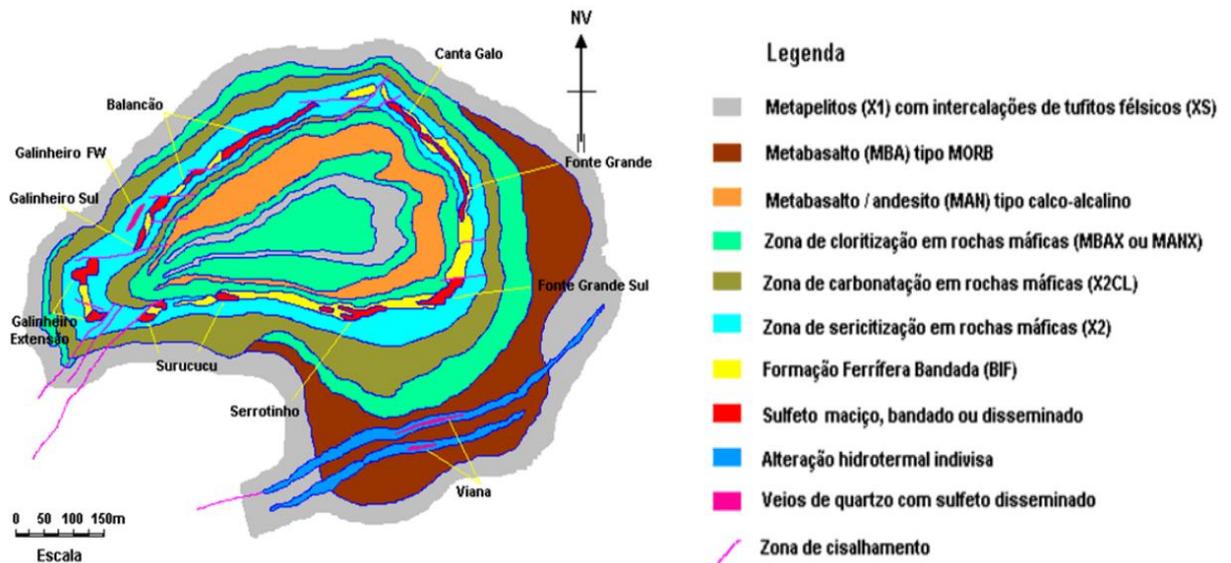


Fonte: Pereira (2016)

5.1.1 GEOLOGIA DA MINA

A mineralização da Mina Cuiabá está relacionada principalmente a uma formação ferrífera bandada (BIF) com baixo grau de metamorfismo que está inserida em rochas máfias, sendo a sequência da base para o topo rochas vulcânicas, ultramáficas, máficas, intermediárias, félsicas e sedimentos detríticos. A área mineralizada está relacionada a zonas de alteração hidrotermal e o corpo de minério, na sua maior parte, é constituído por sulfetos maciços, bandados ou disseminados no BIF localizados em fraturas ou na forma de inclusões nas bordas dos grãos de pirita. Há quatro principais corpos mineralizados que correspondem a maior parte da produção da mina, são eles: Balancão, Fonte Grande Sul, Galinheiro e Serrotinho. A figura 15 mostra a geologia da seção do nível N11 (BARBOSA, 2011).

Figura 15 - Geologia da seção do nível N11



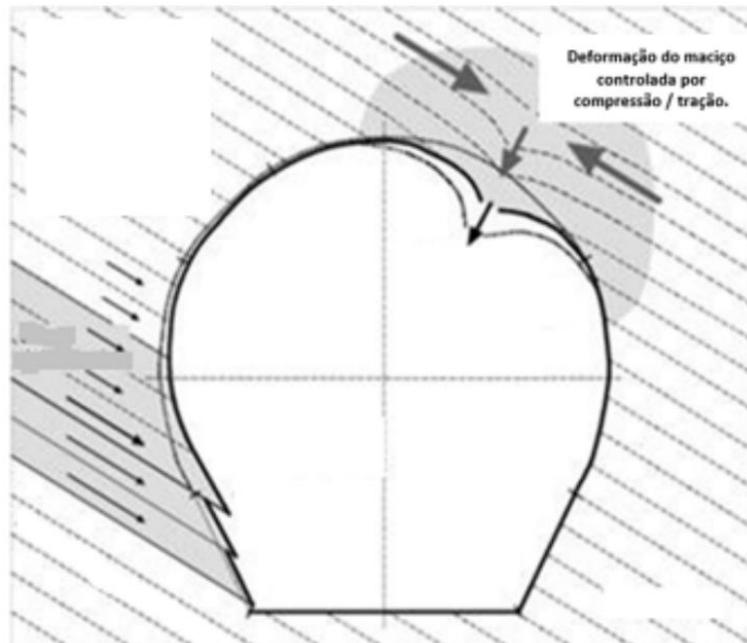
Fonte: Barbosa (2011), apud Vial, (1980); Vieira, (1988)

5.1.2 COMPETÊNCIA DO MACIÇO ROCHOSO

O maciço rochoso onde está localizada a mineralização da Mina Cuiabá é formado por rochas altamente competentes, com resistência acima de 180 MPa, entretanto a rocha encaixante é extremamente foliada, o que provoca um comportamento anisotrópico ao maciço. Essa presença de foliações provoca a ruptura por flexão, também conhecida como *buckling*, nas faces das escavações.

Essa é a principal característica estrutural que reflete na estabilidade das escavações. Como pode ser visto nas figuras 16 e 17, as rupturas por *buckling* tendem a acontecer principalmente quando as escavações são realizadas paralelas ou subparalelas em relação à foliação.

Figura 16 - Mecanismo de Ruptura da Rocha Foliada



Fonte: Oliveira, (2013) apud Pereira (2016)

Figura 17 - Flexão em uma Rocha Foliada na mina Cuiabá



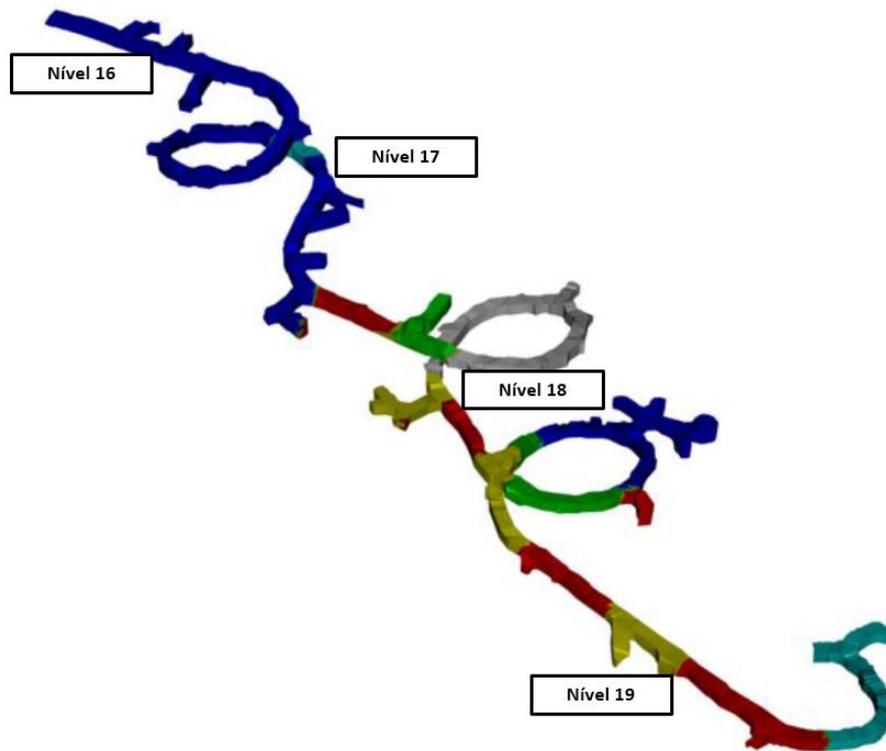
Fonte: Trópia (2013)

5.1.3 RAMPA SERROTINHO

A rampa Serrotinho, figura 18, é uma das principais rampas da Mina Cuiabá, por esse motivo o estudo da mesma é muito importante. A rampa chega a profundidades de 1300 metros e está localizada em uma região de alterações hidrotermais. A região

onde está localizada a rampa Serrotinho é constituída de rochas competentes, contudo há dois fatores que afetam de maneira decisiva a sua estabilidade, sendo eles: alta presença de foliações no maciço rochoso e a lavra pelo método *sublevel stoping* ocorrendo nas proximidades da rampa.

Figura 18 - Layout da Rampa Serrotinho



Fonte: Anglogold Ashanti (2019)

As foliações fazem com que ocorra a ruptura por *buckling* principalmente quando as escavações ocorrem paralelas ou subparalelas em relação à foliação. Além disso, devido à proximidade com que a lavra foi realizada nos arredores da rampa, cerca de 20 metros de distância, houve uma redistribuição das tensões da região o que dificulta a estabilização geotécnica da mesma. A proximidade da lavra juntamente com a presença das foliações fez com que o sistema de suportes e reforços utilizados até então não fosse suficiente para a estabilização da rampa.

5.1.4 Sistema de Suportes e Reforços da Mina Cuiabá

Em consequência do somatório das características geológicas do maciço, grande presença de foliações, com a proximidade das frentes de lavra, foi necessário alterar

a maneira como o sistema de suportes e reforços era utilizado na mina, objetivando estabilizar as movimentações das faces da rampa Serrotinho. Uma das principais mudanças foi a implementação da utilização de telas metálicas no sistema, contudo, ainda se faz necessária uma melhor compreensão e escolha de uma tela que se adapte as características do maciço rochoso.

Atualmente o sistema de escoramento da rampa Serrotinho é composto por uma camada de concreto projetado com espessura que varia entre 5 cm e 7,5 cm, tirantes com 3 metros de comprimento e seção nominal de 22 mm² formando uma malha quadrada de 1,2 m x 1,2 m, chapas metálicas de 15 cm x 15 cm com espessuras de 8 mm e telas metálicas soldadas com malha de 10 cm x 10 cm e fios de 5,6 mm de diâmetro. A tabela 1 resume todas as características citadas.

Tabela 1 - Sistema de Suporte e Reforços da Mina Cuiabá

Tirantes	Chapas	Telas	Concreto Projetado
Comprimento (m): 3	Espessura (mm): 8	Diâmetro dos Fios (mm): 5,6	Espessura (cm): 5 - 7
Dimensão Nominal: (mm): 22	Dimensões (cm x cm): 15 x 15	Espaçamento (cm): 10 x 10	
Espaçamento (m x m): 1,2 x 1,2			

Fonte: AngloGold Ashanti (2019)

Mesmo com o atual sistema de contenção, em algumas regiões da rampa Serrotinho, ainda podem ser observados movimentações na casa de 15 cm nas faces da rampa. Por esse motivo, busca-se uma tela metálica ou não metálica que seja capaz de suportar deslocamentos dessa ordem de grandeza sem que ocorra o colapso do sistema de suportes e reforços.

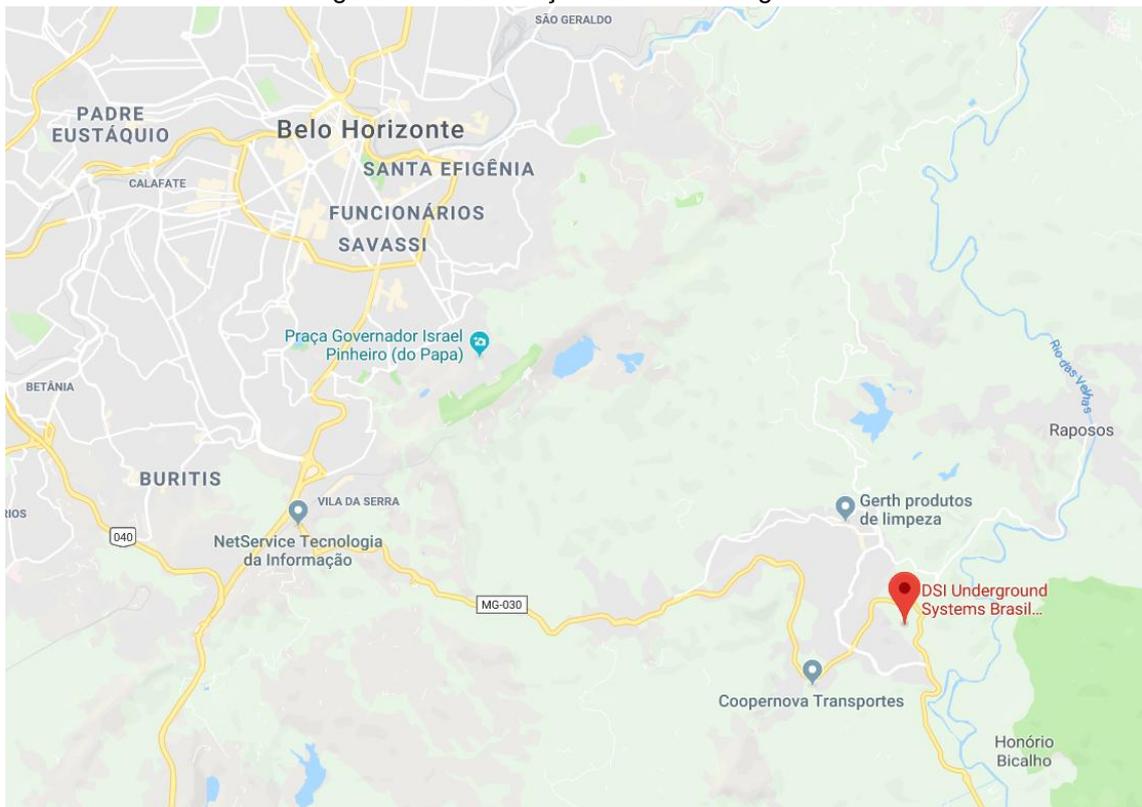
6. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados a metodologia e os materiais utilizados no trabalho, que iniciou-se com a revisão bibliográfica, passado aos ensaios realizados para determinar as tensões de ruptura e os deslocamentos das telas testadas.

6.1 LOCAL DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados nas instalações da DSI Underground, empresa multinacional que fornece produtos de sustentação para mineração subterrânea e para túneis em geral. A empresa está localizada na cidade de Nova Lima, Minas Geras como pode ser visto na figura 19.

Figura 19 - Localização da DSI Underground



Fonte: Google Maps (2019)

6.2 TELAS ANALISADAS

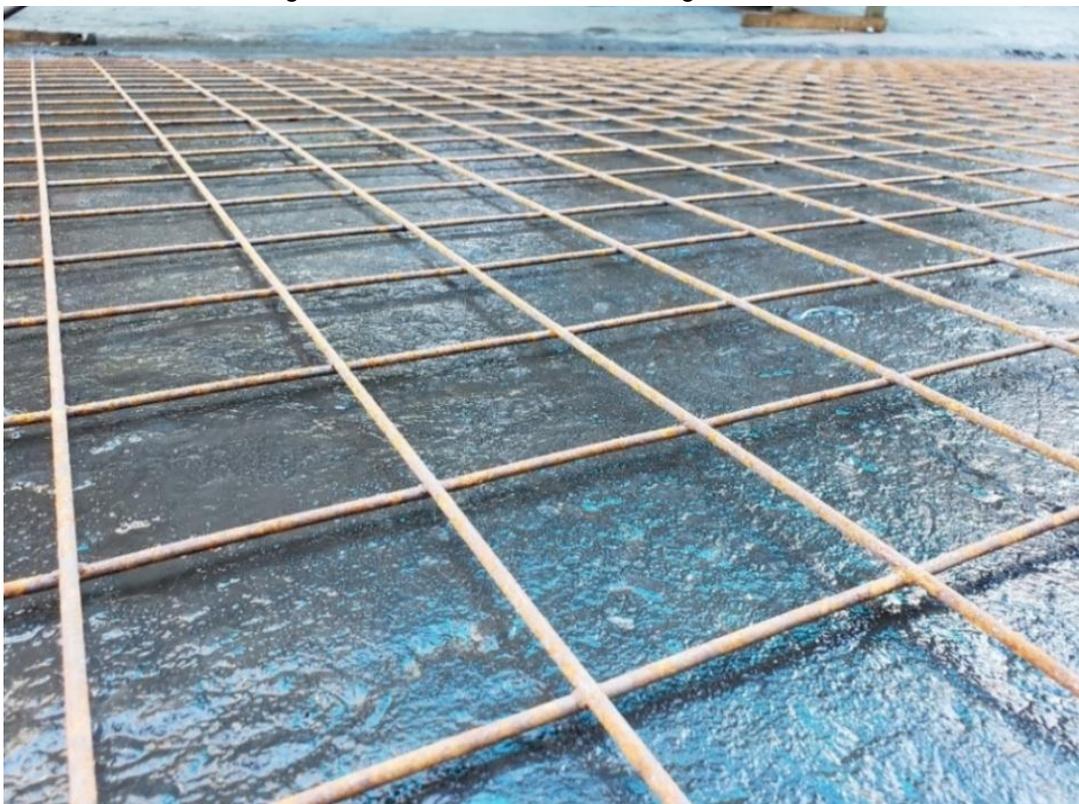
Foram analisados quatro tipos de telas nos ensaios, sendo elas: eletro fundidas não galvanizadas, eletro fundidas galvanizadas, poliméricas e soldadas metálicas. As telas são mostradas nas figuras 20, 21, 22 e 23. As especificações dos fios das telas são descritas na tabela 2.

Tabela 2 - Diâmetro e espaçamento dos fios

	Diâmetro dos fios (mm)	Espaçamento entre fios (mm)
Eletro fundida não galvanizada	4,2	100 x 100
Eletro fundida galvanizada	4,2	100 x 100
Polimérica	-	59,5 x 56,5
Soldada metálica	3,8	100 x 100

Fonte: DSI Underground (2019) e Arcelormittal (2019)

Figura 20 - Tela eletro fundida não galvanizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 21 - Tela eletro fundida galvanizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 22 - Tela polimérica



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 23 - Tela Soldada metálica



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

6.3 MATERIAIS UTILIZADOS

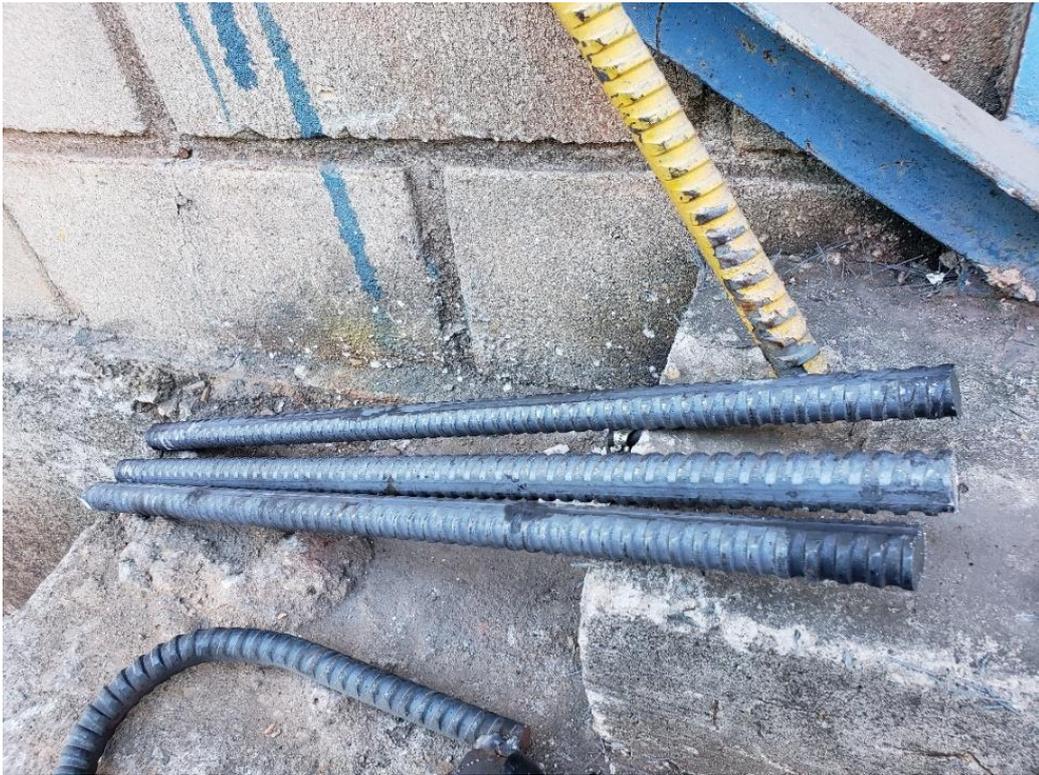
Durante os ensaios foram utilizados os seguintes materiais: um equipamento de carga, tirantes, chapas metálicas circulares, uma chapa metálica quadrada e uma balança de carga. As imagens 24, 25, 26, 27 e 28 mostram os materiais utilizados.

Figura 24 – Equipamento de carga



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 25 – Tirantes



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 26 - Chapas circulares



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 27 - Balança de carga



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 28 - Chapa central de carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

6.4 MÉTODO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados baseando-se no trabalho feito por Dolinar (2009) em parceria com o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), agência federal dos EUA encarregada pela execução de pesquisas e recomendações para a prevenção de acidentes em locais de trabalho. A imagem 29 mostra o sistema de testes utilizado por Dolinar.

Figura 29 - Sistema utilizado por Dolinar



Fonte: Dolinar (2009)

Nos ensaios foram utilizados quatro modelos de telas, sendo elas: eletro fundidas não galvanizadas, eletro fundidas galvanizadas, poliméricas e soldadas metálicas. As telas foram instaladas no solo em formato quadrado com dimensões de 1,0 m x 1,0m. Quatro extremidades foram presas por quatro tirantes e quatro chapas metálicas circulares em forma de domo. Os tirantes utilizados nos ensaios são os mesmos utilizados pela AngloGold Ashanti na Mina Cuiabá. Além disso, foi utilizada uma placa metálica quadrada de dimensões de 30 cm x 30 cm na área central da tela com o objetivo de haver uma maior distribuição do carregamento exercido pelo equipamento de carga. A força exercida foi medida utilizando uma balança de carga. Todo o sistema pode ser visualizado na figura 30.

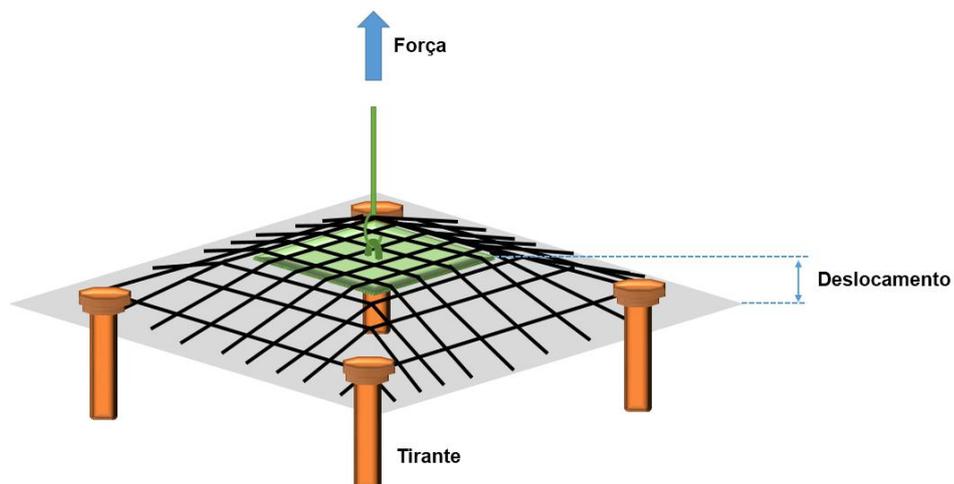
Figura 30 - Sistema utilizado nos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Uma força foi exercida no sentido vertical ascendente de maneira que as telas se deformaram como pode ser visto na imagem 31. A força era exercida até o momento da ruptura total das telas. Foi utilizada câmeras filmadoras para gravar todos os ensaios realizados. Com base nas gravações foram coletados os valores das cargas aplicadas e dos deslocamentos sofridos pelas telas.

Figura 31 - Desenho esquemático do deslocamento das telas



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Todos os ensaios seguiram os mesmos padrões de execução, sendo alteradas apenas as telas testadas

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos ensaios realizados.

7.1 TIPOS DE RUPTURA

7.1.1 Telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas

As rupturas nas telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas ocorreram da mesma maneira. A ruptura aconteceu com o colapso dos fios principalmente na zona próxima das soldas, figura 32. Esse tipo de ruptura já era esperado devido a existência de uma zona de fraqueza decorrente do processo de soldagem. Além disso, como pode ser visto nas figuras 33 e 34, foi observado que as rupturas sempre ocorreram no contato entre a tela e a chapa circular/tirante. Isso se deve à transferência de carga ao longo dos fios no sentido da placa de carga até os tirantes. Não houve nenhum tipo de ruptura no contato entre a chapa de carregamento central e as telas.

Figura 32 - Ruptura da tela eletro fundida não galvanizada e eletro fundida galvanizada na zona das soldas



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 33 - Ruptura da tela eletro fundida não galvanizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 34 - Ruptura da tela eletro fundida galvanizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

7.1.2 Telas poliméricas

As rupturas nas telas poliméricas ocorreram em duas regiões, sendo elas no contato entre as telas e as chapas circulares/tirantes e no contato entre as telas e a chapa de carregamento central. O primeiro tipo de ruptura, novamente, é explicado pela transferência de cargas ao longo dos fios no sentido da placa de carga até os tirantes. Já o segundo tipo ocorreu devido ao atrito entre a chapa de carregamento e as telas. A figura 35 mostra a ruptura entre a chapa central de carregamento e a tela.

Figura 35 - Ruptura entre a tela e a chapa central de carregamento



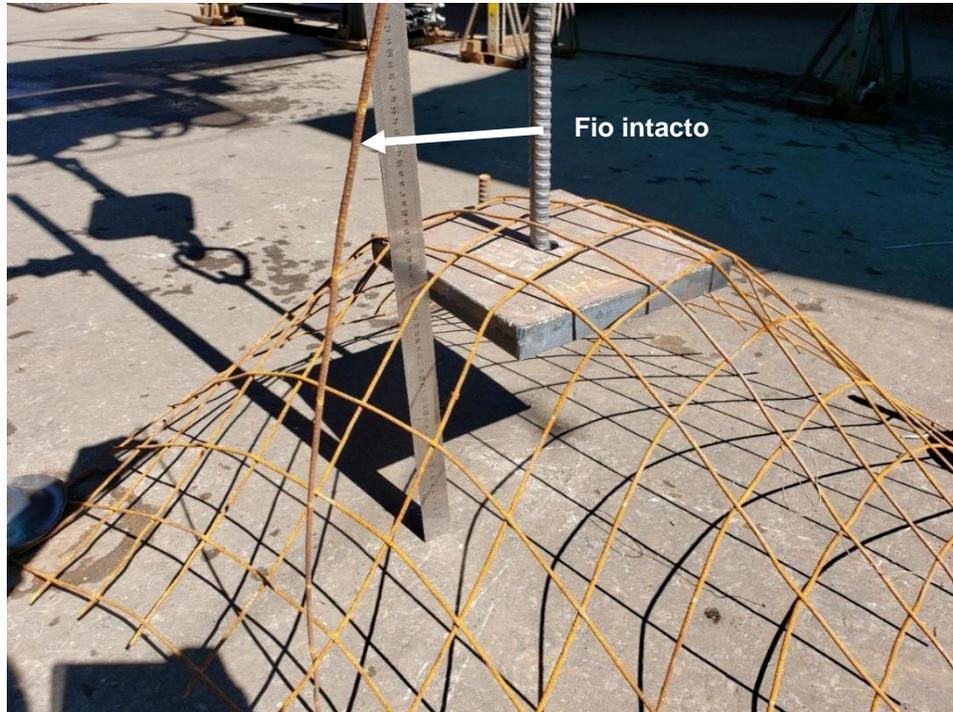
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

7.1.3 Telas soldadas metálicas

Diferentemente das demais telas, nas soldadas metálicas não houve ruptura dos fios e sim da solda. Foi notado que mesmo em baixos carregamentos, se comparado com a carga máxima suportada pela tela, as soldas entravam em colapso. É importante salientar que essa tela testada é fabricada para a construção civil, entretanto, muitas vezes é adaptada para ser utilizada em minas subterrâneas. Como pode ser analisado

nas figuras 36 e 37, os fios permaneceram intactos no contato entre a tela e as chapas circulares/tirantes, apenas as soldas se romperam.

Figura 36 - Ruptura da solda



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 37 - Ruptura da solda no contato tela/tirante



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

7.2 VALORES ENCONTRADO NOS TESTES DE CARGA

Durante os ensaios foram coletados seis tipos de dados, sendo eles: carregamento máximo antes da ruptura do primeiro fio, deslocamento antes da ruptura do primeiro fio, carregamento após a primeira ruptura, deslocamento após a primeira ruptura, carregamento máximo do teste e o deslocamento máximo do teste. Todos os valores coletados podem ser visualizados na tabela 2.

Tabela 3- Dados coletados nos ensaios

	Carrega- mento máximo antes da ruptura do primeiro fio (Kgf)	Desloca- mento antes da ruptura do primeiro fio (cm)	Carrega- mento após a primeira ruptura (Kgf)	Desloca- mento após a primeira ruptura (cm)	Carrega- mento máximo do teste (Kgf)	Desloca- mento máximo do teste (cm)
Tela eletro fundida não galvanizada	2350		900		2450	75
	2300	53	1050	53	2250	76
	1700	58	1250	58	2400	75
Tela eletro fundida galvanizada	2000	52	1350	52	2150	75
	2100	46	950	46	2250	63
	1850	45	1300	45	2500	70
Tela polimérica	200	43	200	43	200	43
	270	43	270	43	300	43
	320	38	180	38	200	38
Tela soldada metálica	450	32	400	32	800	50
	700	28	220	28	780	47
	600	38	250	38	620	52

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

7.2.1 Telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas

As telas eletro fundidas não galvanizadas e as eletro fundidas galvanizadas foram as telas que suportaram os maiores carregamentos e que sofreram as maiores deformações. Os valores de carregamento e de deformação encontrados em ambos os modelos foram muito similares. Esse resultado já era esperado, pois, o processo de galvanização não altera a capacidade de carga das telas. O processo apenas

oferece uma maior proteção contra oxidação, o que gera benefícios a médio e longo prazo devido ao aumento na durabilidade em ambientes oxidantes.

Ambas as telas demonstraram alta resistência residual após a ruptura do primeiro fio, de maneira que os maiores picos de carga foram coletados durante essa fase na maioria dos testes.

7.2.2 Telas poliméricas

As telas poliméricas testadas apresentaram os menores resultados em relação ao carregamento suportado. Além disso, foi notado que diferentemente dos demais modelos, esse tipo de tela foi a única que não apresentou resistência residual considerável após o início da ruptura. Com isso, a carga máxima suportada foi encontrada durante a primeira ruptura.

7.2.3 Telas Soldadas metálicas

Os valores de cargas encontrados nas telas soldadas metálicas são superiores que os encontrados nas poliméricas, contudo inferiores às telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas. As telas soldadas metálicas apresentaram os menores valores de deslocamento antes que a primeira ruptura ocorresse, o que é uma consequência da baixa resistência das soldas.

Analisando os resultados encontrados nos ensaios das telas soldadas metálicas, percebe-se que elas possuem comportamento similar às telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas. Os três tipos de telas apresentam carregamentos de pico antes da ruptura do primeiro fio relativamente maiores que os carregamentos após a primeira ruptura. Tal variação no carregamento é consequência da acomodação das telas no sistema de testes.

Na maioria dos ensaios, as telas soldadas metálicas apresentaram resistência residual capazes de suportar carregamentos superiores às cargas máximas que antecederam a ruptura do primeiro fio.

7.3 CARREGAMENTO X DESLOCAMENTO

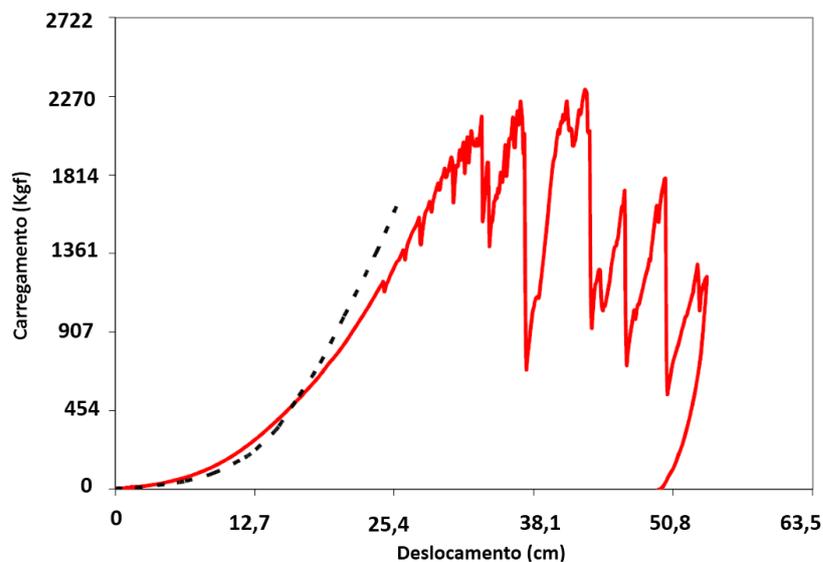
A figura 38 mostra os valores máximos de carregamento e deslocamento coletados nos ensaios realizados neste trabalho. Para efeito comparativo, a imagem 39 mostra os valores encontrados por Dolinar (2009) no trabalho *Performance characteristics for welded wire screen used for surface control in underground coal mines*. Como pode ser analisado, os dados apresentados pelas telas eletro fundidas galvanizadas e eletro fundidas não galvanizadas possuem valores semelhantes aos encontrados por Dolinar.

Figura 38 – Carregamento máximo x Deslocamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

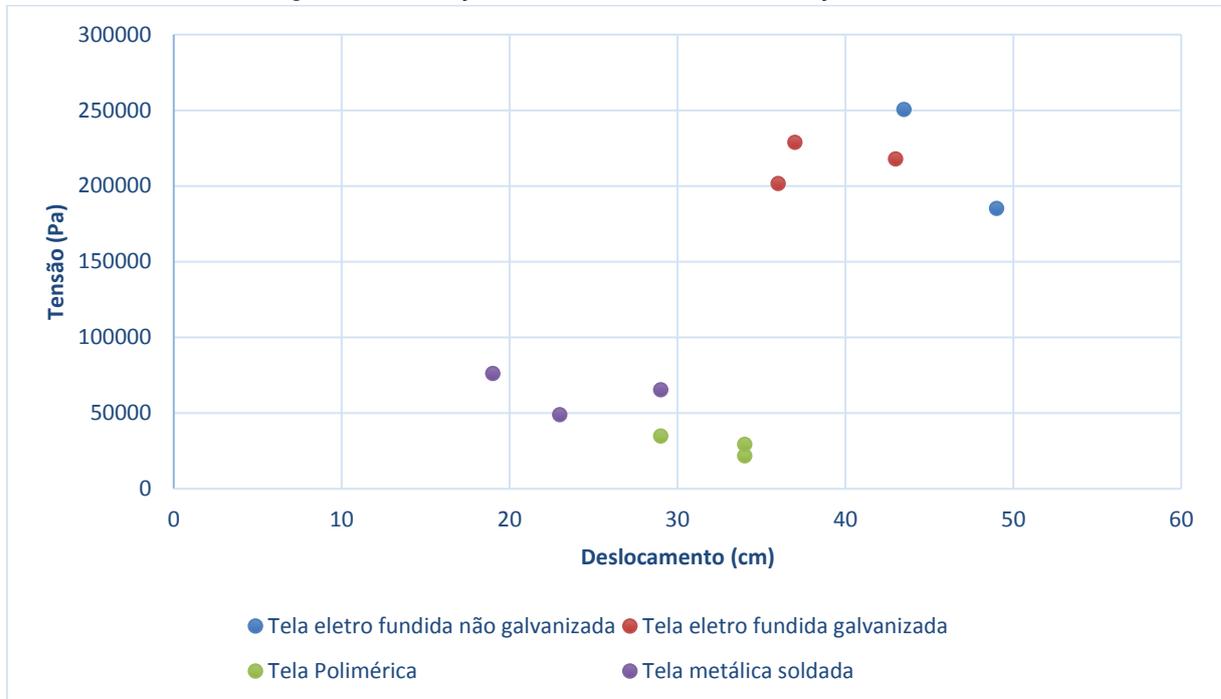
Figura 39 - Carregamento x Deslocamento Dolinar



Fonte: Dolinar (2009)

As figuras 40 e 41 mostram as relações de tensão por deformação encontradas nos ensaios.

Figura 40 - Relação tensão máxima x deformação máxima



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 41 - Relação tensão x deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

8. CONCLUSÕES

Para este estudo, o arranjo dos testes foi projetado para avaliar o desempenho das telas em uma configuração que é similar a utilizada na mina Cuiabá. Como resultado, as telas foram colocadas em uma configuração quadrada com quatro extremidades presas por tirantes e chapas circulares metálicas. O carregamento foi aplicado nas telas através de uma chapa metálica central com dimensões de 30 cm por 30 cm.

As telas eletro fundidas não galvanizadas e as eletro fundidas galvanizadas obtiveram os maiores valores para o carregamento máximo antes do primeiro fio se romper, carregamento após a primeira ruptura e carregamento máximo do teste. Além disso, obtiveram os maiores valores para os deslocamentos antes da ruptura do primeiro fio, para o deslocamento após a primeira ruptura e para o deslocamento máximo.

Ambas as telas obtiveram valores muito similares em todos os testes, o que leva a concluir que a galvanização não afeta a resistência da tela no curto prazo, ou seja, para telas recém-fabricadas. Entretanto, para ambientes com alta humidade que favoreçam a oxidação, é provável que a tela galvanizada tenha um resultado mais favorável devido a maior resistência às intempéries do ambiente.

As telas poliméricas analisadas suportaram as menores cargas em todos os carregamentos. Todavia obtiveram uma maior deformação antes do primeiro fio se romper se comparadas com as telas metálicas soldadas. Foi observado que as mesmas foram guilhotinadas no contato com a chapa central de carregamento. Não foi observada resistência residual considerável nas telas poliméricas.

As telas soldadas metálicas obtiveram os menores picos de carga antes da ruptura do primeiro fio da tela. Conclui-se que a precoce ruptura é uma consequência do tipo de solda utilizada. É importante salientar que essas telas são fabricadas com a função de serem utilizadas na construção civil, contudo são aplicadas como suportes em minas subterrâneas.

Conclui-se que as telas eletro fundidas não galvanizadas e eletro fundidas galvanizadas apresentaram os melhores resultados de resistência ao carregamento e

de deformação. Dentre as telas testadas, as eletro fundidas possuem o comportamento mais adequado para a estabilização da rampa Serrotinho. Possuem alta resistência ao carregamento, sofrem consideráveis deformações antes da primeira ruptura, além de apresentarem resistência residual capaz de suportar picos máximos de carregamento.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função das limitações no número de testes e análises realizados, recomenda-se a execução de mais ensaios com uma variação maior de telas, de maneira que os conhecimentos obtidos através do desenvolvimento deste estudo possam ser ampliados através de uma análise estatística dos resultados. Além disso, este estudo limitou-se a análise de uma situação específica de carregamento a qual não abrange todas as situações de carga de um maciço rochoso. Por isso recomenda-se que testes com carregamentos estáticos e dinâmicos sejam realizados e os resultados sejam expandidos através da modelagem numérica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arcelormittal. Telas Soldadas Nervuradas. Disponível em: <<http://longos.arcelormittal.com.br/pdf/produtos/construcao-civil/telas-soldadas-nervuradas/catalogo-telas-soldadas-nervuradas.pdf>>. Acesso em: 14 de julho de 2019.

BARBOSA, K. J. Avaliação Geotécnica de Lavra Subterrânea do Corpo Serrotinho da Mina Cuiabá Através de Modelagem Numérica Tridimensional. p.54. 2011. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3123>>. Acesso em: 10 de junho de 2019.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Resistência dos Materiais. 3.ed. São Paulo: Pearson Makron Books,1995.

BRADY, B. H. G.; BROWN E. T. Rock Mechanics for Underground Mining: 3 ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher,1985.

DOLINAR, D.R. Performance characteristics for welded wire screen used for surface control in underground coal mines. The National Institute for Occupational Safety and Health. Pittsburgh. 2009. Disponível em : <<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/pcfww.pdf>>. Acesso em: 25 de abril de 2019.

DSI Underground. Sistemas de Mineração - Tela Eletrosoldada. Disponível em: <<https://www.dsiunderground.com.br/produtos/sistemas-de-mineracao/telas/tela-eletrosoldada/>>. Acesso em: 28 de abril de 2019.

DSI Underground . Polymer Grid. Disponível em: <<https://www.dsiunderground.ca/products/mining/mesh-straps-plate-washers/polymer-mining-grid/>>. Acesso em: 14 de julho de 2019.

Google Maps. DSI Underground. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/DSI+Underground+Systems+Brasil+Ind%C3>

%BAstria+e+Com%C3%A9rcio+Ltda./@-19.9658963,-
43.9475505,12.58z/data=!4m5!3m4!1s0xa6a2abae379b5:0xacb429410fba289f!8m
2!3d-20.000587!4d-43.839542> Acesso em: 18/06/2019.

Google Maps. Mina Cuiabá Anglogold Ashanti. Disponível em:
<<https://www.google.com.br/maps/place/Mina+Cuiab%C3%A1+Anglogold+Ashanti/@-19.8471523,-43.9811294,11.5z/data=!4m5!3m4!1s0xa428e589707893:0x2bfa7d73772b10c!8m2!3d-19.8680452!4d-43.7397084>> Acesso em: 08/06/2019.

HUTCHINSON, D. J.; DIEDERICHS, M. S. Cablebolting in underground mines. Vancouver: BiTech. 1996. p. 406.

IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração. Informações sobre a Economia Mineral Brasileira. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em 20 de abril de 2019. p.8 a 10.

IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração. Trends in the mining and metals industry. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002639.pdf>>. Acesso em: 28 de abril de 2019.

KARAMPINOS,E.; HADJIGEORGIOU.,J; HAZZARD.,J; TURCOTTE,P. Discrete element modelling of the buckling phenomenon in deep hard rock mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.80, p.346-356. 2015.

LOUCHNIKOV V,; SANDY M. P.; WATSON O.; ORUNESU M.; EREMENKO V. An Overview of Surface Rock Support for Deformable Ground Conditions 12º AUSIMM Underground Operators Conference. Adelaide. 2014.

MME - Ministério de Minas e Energia. Secretário fala sobre a importância da mineração em evento nos EUA. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/secretario-fala-sobre-a-importancia-da-mineracao-em-evento-nos-eua?redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpagina-

inicial%2Foutras-
 noticias%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_32hLrOzMKwWb%26p_p_lifecycle%3D0%2
 6p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-
 1%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D5>. Acesso em 1 de maio de 2019.

PARIS, W. Propriedades Mecânicas dos Materiais. Coeficiente de Poisson
 <<http://www.cronosquality.com/aulas/ms/ms11.pdf>>. Acesso em: 27 de maio de 2019.

PEREIRA, F. B.; Interpretação do Overbreak da Rampa Fonte Grande Sul (Mina
 Cuiabá) e sua interação com o Sistema de Suporte. Disponível em: <
https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/7186/1/DISSERTA%C3%87%C3%82O_Interpreta%C3%A7%C3%A3oOverbreakRampa.pdf>. Acesso em: 11 de
 maio de 2019.

ROSA, E. Análise de Resistência Mecânica da Fratura. Disponível
 em:<<https://www.ebah.com.br/content/ABAAABCXwAL/mecanica-fratura-fadiga#>>.
 Acesso em: 27 de maio de 2019.

SILVA, J.M. Estabilidade de Escavações Subterrâneas. Universidade Federal de Ouro
 Preto. Ouro Preto. 2018a.

SILVA, J.M. Introdução à Lavra Subterrânea. Universidade Federal de Ouro Preto.
 Ouro Preto. 2018c.

SILVA, J.M. Notas de Aulas - Lavra de Mina Subterrânea. Universidade Federal de
 Ouro Preto. Ouro Preto. 2018b.

Tensar. Mining Applications. Disponível em:
 <<https://www.tensarcorp.com/Applications/Mining>>..Acesso em: 22 de abril de 2019.

THOMPSON, A.G.; WINDSOR C.R.; CANDBY G.W. Performance assessment of
 mesh for ground control applications. The International Symposium on Rock Support
 and Reinforcement Practice in Mining. Kalgoorlie. 1999.

TRÓPIA, I. R. Análise das Tensões in situ em Ambiente de Lavra Subterrânea – Mina Cuiabá – Sabará/MG. 2013. Disponível em: <https://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/dissertacao-analisetensoesinsitu.pdf> Acesso em: 20 de junho de 2019.

VILLAESCUSA E. Laboratory testing of weld mesh for rock support. The International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining. Kalgoolie. 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/269932060_Laboratory_testing_of_weld_mesh_for_rock_support>. Acesso em 26 de abril de 2019

VILLAESCUSA E.; THOMPSON A.G.; PLAYER J.R. Static and dynamic testing of welded and woven mesh for rock support. Seventh International Symposium on Ground in Mining and Underground Construction. Perth. 2013.

VILLAESCUSA E.; WINDSOR C.R.; THOMPSON A.G. Rock Supporte and Reinforcement Practice in Mining. A.A. Balkema. Roterdão.1999.

WATSON B.P.; NIEKERT D.V.; PAGE M. An improved method of testing tendon straps and weld mesh. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Dezembro de 2017.

WINDSOR, C. R.; THOMPSON, A. G. Comprehensive Rock Engineering: 1. ed. Oxford: Pergamon Press,1993.

ZHU, W.; Zhao, J. Stability Analysis and Modelling of Underground Excavations in Fractured Rocks: 1. ed. Oxford: Elsevier, 2004.