



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

PÂMMELA CAROLINE PINAZZI DA SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES CAUSADA PELA EXPLOTAÇÃO DE
CROWN PILLAR A PARTIR DE MODELAMENTO MATEMÁTICO**

ARAXÁ/MG

2017

PÂMMELA CAROLINE PINAZZI DA SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES CAUSADA PELA EXPLOTAÇÃO DE
CROWN PILLAR A PARTIR DE MODELAMENTO MATEMÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer
Coorientador: Prof. MSc. Guilherme Alzamora
Mendonça

ARAXÁ/MG

2017

PÂMMELA CAROLINE PINAZZI DA SILVA RIBEIRO

TÍTULO:

**ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES CAUSADAS PELA
EXPLOTAÇÃO DE CROWN PILAR A PARTIR DE MODELAGEM
MATEMÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

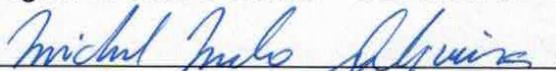
Araxá, 01 de maio de 2017



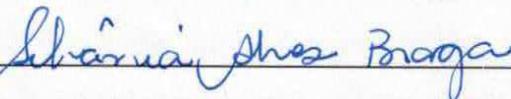
Presidente e Orientador: Dr. Hildor José Seer - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Coorientador: MsC. Guilherme Alzamora Mendonça - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: MsC. Michel Melo de Oliveira - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: MsC. Silvânia Alves Braga - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

DEDICO ESTE TRABALHO,

*Aos meus pais, Adriano Ribeiro do Nascimento e Irany de Oliveira da Silva Ribeiro,
pelo apoio durante toda a minha vida e pela dedicação e esforço para que eu alcance todos
os meus objetivos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida!

A toda minha família, meus pais Irany e Adriano e aos meus irmãos Hiago e Carlos Eduardo por sempre me apoiarem.

Aos meus orientadores e professores Hildor José Seer, Guilherme Alzamora Mendonça e Michel Melo Oliveira pela paciência e principalmente disponibilidade para que eu finalizasse com êxito esse trabalho, fico muito grata pela ajuda e dedicação.

Ao departamento do curso de Engenharia de Minas por sempre estarem a disposição para ajudar no desenvolvimento deste trabalho e durante o curso. Principalmente pelo empenho em sempre buscar qualidade para o curso de Engenharia de Minas e pelo comprometimento com a instituição.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá." Ayrton Senna

RESUMO

As escavações subterrâneas são um desafio para os engenheiros geomecânicos. Isso deve-se ao fato de que para analisar um maciço rochoso diversos parâmetros devem ser considerados. O objetivo deste trabalho foi analisar a distribuição de tensões geradas pela exploração do Crown Pillar e a definição de um dimensionamento ótimo de um realce para que a exploração do Crown Pillar não desestabilizasse o maciço rochoso. O método utilizado foi o modelamento numérico pelo método dos elementos finitos através do software RS². Foram realizadas análises de tensão-deformação em regime elástico de uma seção da mina em questão. O trabalho avaliou um estudo de caso desta mina na qual o método de lavra é o de Realces em Subníveis. A partir de uma seção da mina foram analisados nove cenários, nos quais variou-se a espessura do realce e o sentido de exploração. Para cada cenário foram definidas as tensões principais e o fator de segurança através do modelamento matemático. O cenário com a dimensão de 50 metros de altura na posição média, entre a cava a céu aberto e o segundo realce, mostrou-se ótimo com relação aos demais cenários. Este cenário apresentou o σ_1 de 10 a 41 MPa e σ_3 de 0 a 13 MPa. Neste cenário, o Fator de Segurança (FS) apresentou apenas valores maiores que 1.

Palavras-chave: Realce em Subníveis, Crown Pillar, Modelamento Numérico.

ABSTRACT

The underground excavations are a challenge to the geomechanical engineers, due to the different parameters that have to be considered in the rock mass analysis. This study aims to analyze the induced stress by the crown pillar exploitation and also to define an optimum excavation size to the crown pillar stope without influencing the rock mass stability. To achieve this objective a numerical model using Finite Elements Method (FEM) was used. This study is a case study of a sublevel open stoping mine. Analyses of stress-strain were conducted in an elastic behavior of a mine section. Nine scenarios with different thickness and exploitation direction were performed in the software for analysis. Thus, the principal stresses and the Strength Factor (SF) were defined from the numerical modeling. The optimum scenario chosen is the one with 50 meters thick. In this scenario, σ_1 varied from 10 to 41 MPa and σ_3 varied from 0 to 13 MPa. Also, the Strength Factor presented just values bigger than 1.

Keywords: Sublevel Open Stopping, Crown Pillar, Numerical Modeling.

ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Jumbo Drills.....	22
Figura 2 – Load Haul Trucks e caminhões.....	22
Figura 3 - Diluição não planejada. (Charbel <i>et al.</i> , 2016).....	23
Figura 4 – Medições de testemunho. (Oliveira, 2012 apud Brady & Brown, 2004).....	25
Figura 5 - Seção bidimensional da mina em estudo para análises de tensões através do modelamento matemático.....	35
Figura 6 - Distribuição de tensões no entorno do Crown Pillar, σ_1	38
Figura 7 - Distribuição de tensões no entorno do Crown Pillar, σ_3	38
Figura 8 - Distribuição do FS do Crown Pillar e entorno.....	39
Figura 9 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 100 m de altura, σ_1	39
Figura 10 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 100 m de altura, σ_3	40
Figura 11 - Distribuição do FS do realce com 100 m de altura e entorno.....	40
Figura 12 - Distribuição do FS do realce com 100 m de altura e entorno em detalhe.	40
Figura 13 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1	41
Figura 14 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_3	41
Figura 15 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1	42
Figura 16 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo em detalhe.	42
Figura 17 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1	43
Figura 18 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_3	43
Figura 19 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo.	44
Figura 20 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo em detalhe.	44
Figura 21 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1	45

Figura 22 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_3 .	45
Figura 23 - Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo.	46
Figura 24 - Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo em detalhe.	46
Figura 25 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_1 .	47
Figura 26 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_3 .	47
Figura 27 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima.	48
Figura 28 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima em detalhe.	48
Figura 29 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_1 .	49
Figura 30 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_3 .	49
Figura 31 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima.	50
Figura 32 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima em detalhe.	50
Figura 33 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_1 .	51
Figura 34 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_3 .	51
Figura 35 - Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima.	52
Figura 36 - Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima em detalhe.	52
Figura 37 - Distribuição de tensões no entorno do realce superior com 50 m de altura, σ_1 .	53
Figura 38 - Distribuição de tensões no entorno do realce superior com 50 m de altura, σ_3 .	54
Figura 39 - Distribuição de FS no entorno do realce superior com 50 m de altura.	54

Figura 40 - Distribuição de FS no entorno do realce superior com 50 m de altura em detalhe.	54
Figura 41 - Distribuição de tensões no entorno do realce médio com 50 m de altura, σ_1	55
Figura 42 - Distribuição de tensões no entorno do realce médio com 50 m de altura, σ_3	55
Figura 43 - Distribuição de FS no entorno do realce médio com 50 m de altura.	56
Figura 44 - Distribuição de FS no entorno do realce médio com 50 m de altura em detalhe. .	56
Figura 45 - Distribuição de tensões no entorno do realce inferior com 50 m de altura, σ_1	57
Figura 46 - Distribuição de tensões no entorno do realce inferior com 50 m de altura, σ_3	57
Figura 47 - Distribuição de FS no entorno do realce inferior com 50 m de altura.	57
Figura 48 - Distribuição de FS no entorno do realce inferior com 50 m de altura em detalhe.	58
Figura 49 – Análise do σ_1 para todos os cenários.	59
Figura 50 - Análise do σ_3 para todos os cenários.	60

TABELAS

Tabela 1 - Classificação RQD.	26
Tabela 2 - Classificação dos parâmetros e valores. (Oliveira, 2012)	27
Tabela 3 – Fatores de ajuste para orientação das descontinuidades. (Oliveira, 2012)	27
Tabela 4 - Classificação para a qualidade do maciço rochoso. (Oliveira, 2012)	27
Tabela 5 - Estimativa de parâmetros de resistência a partir da classe do maciço rochoso. (Oliveira, 2012)	28
Tabela 6 – Quantificação do parâmetro J_n . (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012).....	29
Tabela 7 - Quantificação do parâmetro J_r . (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012).....	29
Tabela 8 - Quantificação do parâmetro J_a . (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)	30
Tabela 9 - Quantificação do parâmetro J_w . (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)	31
Tabela 10 - Parâmetro SRF. (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012).....	32
Tabela 11 - Parâmetros SRF para rochas competentes e com problemas de tensões. (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012).....	32
Tabela 12 - Classificação dos maciços rochosos através do sistema-Q. (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012).....	33
Tabela 13 - Cenários analisados.	36
Tabela 14 - Parâmetros de resistência da rocha (Gnaisse)	36
Tabela 15 - Dados de cada cenário.	59

RMR – Rock Mass Rating

Q - Sistema-Q para a classificação de maciços rochosos

GSI – Geological Strength Index

UCS – Resistência à compressão uniaxial

RQD – Rock Quality Designation

Jn – Número de famílias de descontinuidade

Jr – Número da rugosidade da descontinuidade mais crítica

Ja – Número da alteração da descontinuidade mais crítica

Jw – Fator de redução pela presença de água na descontinuidade

SRF – Fator de redução das tensões

MEF – Método dos Elementos Finitos

FS – Fator de Segurança

m – metros

cm – centímetro

MPa – Megapascal

mm – milímetro

l – litros

min - minutos

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_1 – Tensão principal maior

σ_3 – Tensão principal menor

σ_c – Resistência à compressão

% - porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	MÉTODOS DE LAVRA SUBTERRÂNEA	19
3.2	REALCES EM SUBNÍVEIS	20
3.3	CROWN PILLAR	24
3.4	CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	24
3.4.1	Rock Quality Designation	25
3.4.2	Rock Mass Rating	26
3.4.3	Sistema NGI-Q desenvolvido por Barton	28
3.5	MODELAMENTO MATEMÁTICO – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	33
4	METODOLOGIA	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1	CENÁRIOS COM AVANÇO DE 25 METROS NO SENTIDO DE CIMA PARA BAIXO	41
5.1.1	Cenário 1.1 – 25 metros	41
5.1.2	Cenário 1.2 – 50 metros	43
5.1.3	Cenário 1.3 – 75 metros	44
5.2	CENÁRIOS COM AVANÇO DE 25 METROS NO SENTIDO DE BAIXO PARA CIMA	46
5.2.1	Cenário 2.1 – 25 metros	46
5.2.2	Cenário 2.2 – 50 metros	48
5.2.3	Cenário 2.3 – 75 metros	50
5.3	CENÁRIOS COM REALCE DE 50 METROS DE ALTURA EM DIFERENTES LOCALIZAÇÕES 52	
5.3.1	Cenário 3.1 - 50 metros de realce parte superior.....	53
5.3.2	Cenário 3.2 - 50 metros de realce parte média	55
5.3.3	Cenário 3.3 - 50 metros de realce parte inferior.....	56
5.4	ANÁLISE DE DADOS	58
6	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Os maciços rochosos são compostos pela rocha intacta, pelas descontinuidades do corpo rochoso, heterogeneidade, anisotropia e ainda pelas zonas de tensão que os compõem. Para realizar um estudo geomecânico deve-se levar em conta não só as características da rocha matriz como também as demais características que compõem o maciço rochoso. Outras características que influenciam o comportamento do maciço são a homogeneidade das propriedades da matéria, podendo essas serem físicas ou químicas, e a anisotropia da rocha. Levando em consideração as diversas características que possuem os maciços, a estabilidade das escavações subterrâneas é um desafio para os engenheiros e principalmente para os geomecânicos. Sendo assim, métodos empíricos e numéricos são muitos utilizados para analisar o comportamento das rochas e a partir de estudos são feitas uma série de projeções para definir a melhor solução para a problemática.

Os recursos minerais são abundantes em diversas regiões do mundo e diferenciam-se uns dos outros em características como o tipo de mineral, quantidade, teor, estrutura geológica, idade, dentre diversas propriedades. Quando um recurso é definido como reservas indicada, medida e inferida é feito um estudo de viabilidade para definir a extração do bem mineral. A escolha do tipo de lavra, subterrânea ou a céu aberto, depende, entre outros fatores, da posição, forma, e propriedades mecânicas do maciço. No presente trabalho a lavra subterrânea será abordada.

A extração subterrânea está muito relacionada às características do corpo mineral mas está também relacionada ao aumento da profundidade das minas a céu aberto. À medida em que depósitos, inicialmente lavrados a céu aberto, vão atingindo profundidades cada vez maiores, observa-se a tendência de que a sua lavra passe por mudanças, sendo então realizada a partir de métodos subterrâneos. Isso se deve ao súbito aumento da relação estéril/minério praticada, que acaba por inviabilizar a extração a céu aberto. Diante desse fato torna-se cada vez mais importante estudar esse tipo de lavra. A estabilidade das escavações subterrâneas é um desafio de extrema importância, pois está relacionada à boa recuperação de minério e ainda à segurança das operações da mina. Existem diversos tipos de lavra subterrânea sendo esses classificados como (Gama, 2008): auto-suportadas, cavidades artificialmente suportadas, e desabamento controlado do teto. O foco deste trabalho é o método Realce em Subníveis (*Sublevel Stopping*), um dos métodos com cavidades suportadas.

Este é o método de lavra subterrânea mais utilizado na América do Sul (Oliveira, 2012). Por isso a importância de pesquisar e analisar as atividades das minas em operação para que se possa otimizar tanto as escavações como os custos de extração. Segundo Oliveira (2012), esse método possui um alto custo de desenvolvimento.

No fechamento das minas é uma prática comum a recuperação de pilares. Algumas vezes Crown Pillars são parcialmente recuperados para maior aproveitamento do corpo mineral. Este trabalho é um estudo de caso de uma determinada mina na qual o método de lavra é o de realces em subníveis. Em determinado momento, a mina em questão apresentou indícios de que iria finalizar as suas operações. Dessa forma, decidiram recuperar em parte, o Crown Pillar da mina. No entanto, devido à mudanças no cenário da empresa, a mina continuou em operação. Segundo Tavakoli (1994), a espessura do Crown Pillar é o principal fato relacionado à estabilidade do mesmo. A estabilidade do Crown Pillar reflete diretamente nas demais escavações próximas a ele, e, se instável, pode comprometer a estabilidade dessas estruturas.

Diante dessa situação, foi elaborada o seguinte questionamento: quão grande pode ser o realce no Crown Pillar para que as distribuições de tensões geradas pela sua escavação não comprometam a estabilidade do maciço neste estudo de caso.

Para este trabalho optou-se fazer uma análise de modelamento matemático no *software* RS² da *RocScience*. A partir da análise de nove cenários foi definida uma dimensão ótima para o realce dentro dos cenários avaliados.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar a distribuição de tensões geradas pela exploração de um Crown Pillar através da análise de modelos numéricos. Busca-se ainda, definir um dimensionamento ótimo de um realce para que a exploração do Crown Pillar não desestabilize o maciço rochoso.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Métodos de Lavra Subterrânea

Antes de definir a metodologia da exploração de um bem mineral deve-se fazer um estudo de viabilidade. O principal objetivo de um planejamento mineiro é determinar metodologias de extrair as reservas de forma rentável e segura. Antes de determinar a viabilidade de um bem mineral são realizadas uma série de etapas. Quando uma reserva é classificada em indicada, medida e inferida, é feito um estudo de viabilidade do recurso. De acordo com Lee (1984) apud Hustrulid e Kuchta (2006), a fase de planejamento envolve três estágios de análise:

- Estudo conceitual ou preliminar: Nessa fase são levantadas as possibilidades de propor o investimento. O capital e os custos de operação são estimados com base no histórico de outros empreendimentos.
- Estudo de Pré-Viabilidade: Normalmente esse estudo ainda não é suficiente para determinar se o investimento vale a pena. Basicamente, nessa etapa é decidido se o projeto justifica uma detalhada análise através de um estudo de viabilidade e se o projeto necessita de um estudo aprofundado.
- Estudo de Viabilidade: Essa etapa determina a decisão técnica, se deve investir ou não no empreendimento. Identifica a capacidade de produção, tecnologia necessária, investimento e custos de produção, vendas e retorno de investimento.

Dentro do estudo de viabilidade é determinada a metodologia de lavra.

Segundo Gama (2008), os principais tipos de lavra subterrânea são: Câmaras e Pilares (*Room-and-Pillar*), Frente Longa (*Longwall Mining*), Recalque (*Shrinkage Stopping*), Realces em Subníveis (*Sublevel Stopping*), Corte e Enchimento (*Cut-and-Fill*), Abatimento em Subníveis (*Sublevel Caving*) e o Abatimento de Blocos (*Block Caving*).

De acordo com Okubo *et al.* (2002) os métodos de lavra subterrânea podem ser classificados como:

- Métodos de **cavidades suportadas**, possuem o suporte essencialmente natural e não requerem métodos artificiais para suportar o carregamento. Essa definição não inclui o uso de tirantes, madeiras ou ferro. Utilizar esse tipo de suporte não significa alterar a habilidade do maciço rochoso de suportar o carregamento

naturalmente. Os métodos abaixo são considerados métodos de cavidades suportadas:

- Câmaras e Pilares (*Room-and-pillar*)
- Recalque (*Shrinkage Stopping*)
- Realce em Subníveis (*Sublevel Stopping*)
- Métodos de **Cavidades Artificialmente Suportadas**, requerem suportes artificiais para manter a estabilidade das escavações. Esse tipo de suporte é utilizado quando as aberturas não são suficientemente estáveis durante as operações. São métodos considerados de cavidades artificialmente suportadas:
 - Corte e Enchimento (*Cut-and-fill Stopping*)
 - *Stull Stopping*
 - *Square-set Stopping*
- Métodos de **Desabamento Controlado de Teto** são definidos como aqueles associados com abatimento induzido e controlado do teto. As escavações são projetadas para que o minério e/ou a rocha encaixante, entrem em colapso. Os principais tipos de lavra são:
 - Frente Longa (*Longwall Mining*)
 - Abatimento em Subníveis (*Sublevel Caving*)
 - Abatimento de Blocos (*Block Caving*)

O método de Realces em Subníveis (*Sublevel Stopping*) é o foco deste trabalho e por isso será discutido no item 3.2 com mais detalhes.

3.2 Realces em Subníveis

Realces em Subníveis é um método de lavra subterrânea utilizado para depósitos com as seguintes características Hustrulid *et al.* (2001).

- Mergulho íngreme, a inclinação da lapa (*footwall*) tem que exceder o ângulo de repouso;
- Rocha estável tanto na lapa, quanto na capa (*hangwall*);
- Minério e rocha encaixante competentes;

- Limite de minério regular.

Neste método, o minério é extraído em realces. Estes realces possuem grandes dimensões e são suportados por pilares. O tamanho dos realces influencia na eficiência da mina, uma vez que, quanto maiores os realces mais material recuperado. No entanto, existem alguns limitantes com relação ao tamanho dos realces e dos pilares de sustentação devido à estabilidade do maciço que deve ser mantida afim de manter a segurança das operações da mina. (Hustrulid *et al.*, 2001).

Segundo Hartman *et al.* (2002), existem algumas variações deste método sendo essas:

- *Blasthole Method*: Este método cria uma abertura vertical radialmente no maciço rochoso.
- *Open-ended Method*: As aberturas verticais são criadas paralelamente, e o desmonte é feito em fatias verticais. Uma vantagem deste método é que permite fazer perfurações maiores e faz-se assim o uso mais eficiente dos explosivos.
- *Vertical Crater Retreat*: Este método é patenteado por uma empresa de explosivos canadense. O padrão de perfurações usado é similar ao método *Open-Ended*, porém o minério é explodido em fatias horizontais.

Apesar das variações apresentadas para o método, em uma lavra a partir do método de Realces em Subníveis o minério é perfurado em uma série de subníveis que se iniciam em uma elevação mais baixa e terminam em uma elevação mais alta. As perfurações são feitas acima de acessos nos quais circulam os equipamentos. *Jumbo Drills* (Figura 1) são usados para perfurar as escavações do teto das galerias e essas escavações são preenchidas por explosivos. Existe uma passagem de minério por onde o material detonado é direcionado e coletado por equipamentos. Esses equipamentos são conhecidos como *load haul trucks* (Figura 2) que transportam o material para outra passagem de minério. Neste local o material é britado e transportado até a superfície, geralmente por skips ou caminhões (Figura 2).



Figura 1 – Jumbo Drills.

Fonte: Atlas Copco Rocket Boomer L2c.



Figura 2 – Load Haul Trucks e caminhões.

Fonte: Mine Automation Clears Giant Hurdle.

Este processo se repete até que o realce esteja completamente explotado. O realce lavrado é então preenchido completamente para manter a estabilidade das paredes e teto do realce. O material utilizado para preencher o realce explotado é, na maioria das vezes, uma combinação de diversos materiais como areia, rochas, estéril, rejeito, cimento, dentre outros.

Segundo Potvin e Hadjigeorgou (2001) apud Oliveira (2012), o realce pode ser considerado estável se a diluição for menor que 5% e se não existir desmoronamento relacionado com problemas operacionais.

A diluição não planejada (diluição externa ou diluição secundária) é a contaminação do minério por material abaixo do teor de corte, que encontra-se além do limite de lavra. Esta contaminação decorre de deslocamentos ou sobre-escavação (*overbreak*) verificados nas rochas encaixantes aos realces de mina (Figura 3). (Charbel *et al.*, 2016)

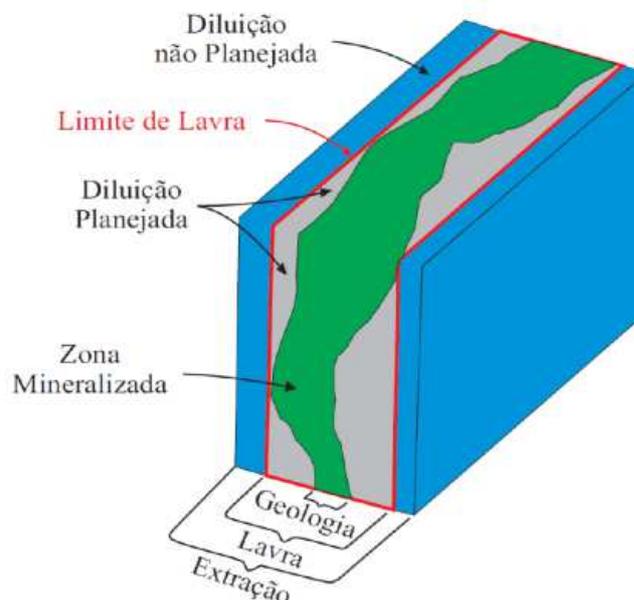


Figura 3 - Diluição não planejada. (Charbel *et al.*, 2016)

Existe uma única diluição aceitável para cada mina em operação, a diluição planejada que prevê a influência da presença de estéril junto ao minério e é definida em função do teor, custos de extração e preço do metal.

As seguintes características do método foram compiladas por Hartman e Mutmanský (2002), do material em Mitchell (1981), Hamrin (1982), Haycocks and Aelick (1992), e White (1992).

Vantagens:

- Moderada a alta produtividade.
- Moderado custo de operação (custo relativo: 20%).
- Moderada a alta taxa de produção.
- Método mecanizado.
- Baixo custo de desmonte e de transporte de material.
- Pequena exposição a condições de perigo, fácil para ventilação.
- Operações unitárias podem ser executadas simultaneamente.
- Boa recuperação (75%).
- Moderada Diluição (20%).

Desvantagens:

- Desenvolvimento complicado e caro.
- Planejamento de lavra inflexível.
- Requer precisão nas perfurações longas (<2% de desvio).
- Grandes desmontes podem causar vibrações, explosões de ar e danos à rocha.

3.3 Crown Pillar

Segundo Tavakoli (1994), um Crown Pillar é geralmente uma parte do corpo mineral deixado entre dois realces. Quando localizado próximo a superfície esse pode ser chamado de Crown Pillar superficial. Esse tipo de pilar e os Rib Pillars são considerados por muitos como os principais suportes para os realces durante a operação da mina. Sendo assim, a otimização do tamanho do Crown Pillar é muito importante para o desenvolvimento das operações. Pilares muito espessos, apesar de aumentar a estabilidade, resultam em perda de minério. Em contrapartida, pilares finos resultam em falta de segurança e podem gerar rompimentos e ainda falta de estabilidade das escavações.

Quando tem-se uma transição entre uma mina a céu aberto e uma mina subterrânea deixar um Crown Pillar é necessário para evitar problemas de estabilidade (Yardimci *et al.*, 2016). Para análise de otimização da espessura do Crown Pillar o modelamento numérico é uma técnica eficiente para entender o comportamento do maciço quando este está associado a cava a céu aberto. (Li *et al.*, 2013)

3.4 Classificação de Maciços Rochosos

Atualmente utilizam-se diversos métodos para classificar os maciços rochosos. Dentre eles, *NGI Tunneling Quality Index (Q)* desenvolvido por Barton *et al.* (1974) apud Brady e Brown (2004), *Rock Mass Rating (RMR)* desenvolvido por Bienaswski (1973) apud Brady e Brown (2004). O *Geological Strength Index (GSI)* é outro método também utilizado e recentemente apresentado por Hoek (1994) apud Brady e Brown (2004) e desenvolvido por Marinos e Hoek (2000) apud Brady e Brown (2004). Esse trabalho tem um enfoque no Sistema (Q), RMR e no RQD (*Rock Quality Designation*), sendo que este é um parâmetro muito utilizado na classificação dos maciços rochosos.

3.4.1 Rock Quality Designation

O Índice de Qualidade da Rocha também conhecido como RQD (*Rock Quality Designation*) foi proposto por Deere (1963) como um índice para determinar quantitativamente e qualitativamente os maciços rochosos. Segundo Hoek e Brown (1980), o RQD tem sido aplicado em muitas áreas de mecânica das rochas e também como parâmetro fundamental em engenharia geomecânica. Testemunhos de sondagem são utilizados para determinar este índice. O RQD é a razão entre o somatório das dimensões longitudinais dos blocos de rochas com mais que 10 cm de comprimento, e o comprimento do testemunho de sondagem, o qual está em análise. (Lucian e Wangwe, 2013)

A Figura 4 mostra um exemplo de como é feito o cálculo para determinação do RQD. Após a obtenção do testemunho, este é medido no eixo longitudinal assim como os fragmentos que o compõe. Esses valores são aplicados na Equação 1 de determinação do RQD. Segundo Brady e Brown (2004), a classificação do RQD é feita como mostra Tabela 1.

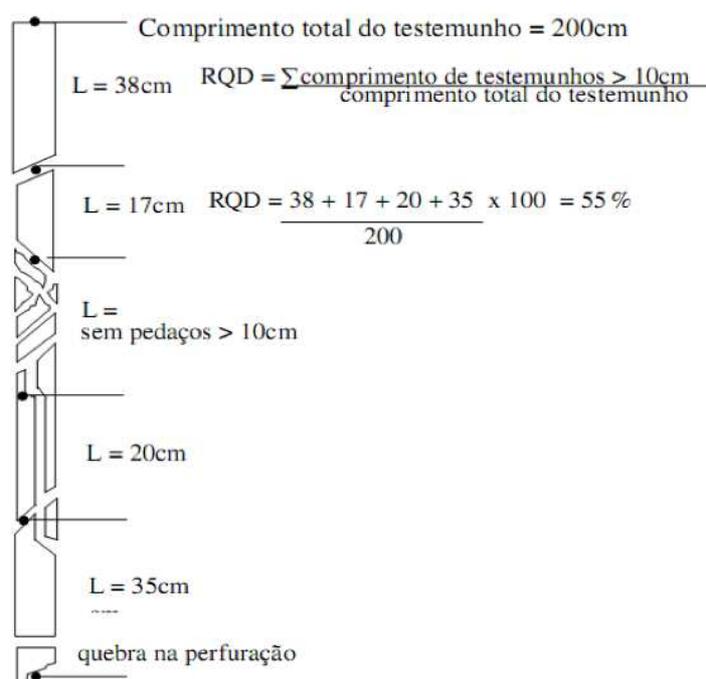


Figura 4 – Medições de testemunho. (Oliveira, 2012 apud Brady & Brown, 2004)

$$RQD = \frac{\sum \text{Comprimento dos pedaços do testemunho} > 10\text{cm}}{\text{Comprimento Total do Testemunho em Análise}} \quad (1)$$

Tabela 1 - Classificação RQD.

RQD	Descrição
0 – 25%	Muito Pobre
25-50%	Pobre
50-75%	Moderado
75-90%	Bom
90-100%	Excelente

3.4.2 Rock Mass Rating

O Rock Mass Rating (RMR) foi desenvolvido por Bieniawski (1973) para classificar os maciços rochosos. Utilizam-se cinco parâmetros para fazer a classificação (Brady & Brown, 2004):

- Resistência da rocha intacta: Para determinar esse parâmetro é realizado o teste de compressão uniaxial (*Uniaxial Compressive Strength (UCS)*); para rochas com baixa resistência utiliza-se o ensaio de compressão puntiforme (*Point Load Test*).
- *Rock Quality Designation*: definido no item 3.4.1.
- Espaçamento das descontinuidades.
- Características entre as descontinuidades.
- Condições da água subterrânea.

O valor do RMR é determinado a partir dos valores de cada um dos 5 parâmetros definidos na Tabela 2. Na Tabela 3, estão apresentados os fatores de ajuste para orientação das descontinuidades. Após a definição do valor do RMR, que é a somatória dos valores atribuídos a cada um dos cinco parâmetros, este é classificado como mostra a Tabela 4. Após definir-se a classe, é possível obter uma estimativa para os parâmetros de resistência do maciço, como mostra a Tabela 5.

Tabela 2 - Classificação dos parâmetros e valores. (Oliveira, 2012)

Parâmetros de classificação									
1	Resistência do material rochoso intacto	Índice de Compressão Puntiforme (MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Não Recomendável para abaixo de 1 Mpa		
		Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
		Pesos	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	Valores ponderais	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
			20	17	13	8	3		
3	Descontinuidades (m)	Valores ponderais	>2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	<0,06		
			20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades	Padrão das Descontinuidades	Superfície muito rugosa e sem alteração. Fechadas e sem persistência.	Superfícies pouco rugosas e levemente alteradas; abertura < 1mm.	Superfícies pouco rugosas e muito alteradas; abertura < 1mm.	Superfícies persistentes estriadas ou espessuras do preenchimento < 5 mm ou abertura > 1 a 5 mm.	Superfícies persistentes com preenchimento de material argiloso ou abertura > 5 mm.		
			Valores ponderais	30	25	20	10	0	
5	Presença de água	Vazão de infiltração por 10 m de túnel	nula	<10 l/min	10 a 25 l/min	25 a 125 l/min	> 125 l/min		
		ou relação $(\mu - \sigma)^2$	0	<0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,5	> 0,5		
		Condições gerais do maciço	Seco	Ligeiramente e húmido	Húmido	Escorrimentos	Fluxo abundante		
		Valores ponderais	15	10	7	4	0		

Tabela 3 – Fatores de ajuste para orientação das descontinuidades. (Oliveira, 2012)

Direção das descontinuidades em relação ao eixo das escavações							
Perpendicular				Paralela		Qualquer	
Mergulho Favorável		Mergulho Desfavorável		Mergulho		Mergulho	
45-90°		20-45°		45-90°		20-45°	
Muito favorável		Favorável		Moderado		Desfavorável	
Valor ponderativo para ajuste de RMR	Túneis	-2	-5	-10	-12	-5	-10
	Fundações	-2	-7	-15	-25	-7	-15
	Taludes	-5	-25	-50	-60	-25	-50

Tabela 4 - Classificação para a qualidade do maciço rochoso. (Oliveira, 2012)

Somatório dos pesos (fator RMR)	81 a 100	61 a 80	41 a 60	21 a 40	<20
Classe do Maciço	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco

Tabela 5 - Estimativa de parâmetros de resistência a partir da classe do maciço rochoso. (Oliveira, 2012)

Classe do Maciço	I	II	III	IV	V
Coesão (kPa)	>400	300 a 400	200 a 300	100 a 200	<100
Ângulo de atrito	>45°	35° a 45°	25° a 35°	15° a 25°	<15°

3.4.3 Sistema NGI-Q desenvolvido por Barton

Pesquisadores do Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Barton, Lien e Lunde (1974) propuseram o Sistema-Q para a classificação de rochas com base em 200 estudos de caso. O valor de Q é definido como (Equação 2):

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \left[\frac{J_w}{SRF} \right] \quad (2)$$

onde,

RQD = Rock Quality Designation

J_n – Número de famílias de descontinuidades,

J_r – Número da rugosidade da descontinuidade mais crítica,

J_a – Número da alteração da descontinuidade mais crítica

J_w – Fator de redução pela presença de água na descontinuidade, e,

SRF – Fator de redução das Tensões

3.4.3.1 Rock Quality Designation (RQD)

O RQD já foi tratado no item 3.4.1. Nesta classificação é utilizada sua porcentagem e quando o valor for menor que 10%, um valor mínimo de 10% deve ser utilizado.

3.4.3.2 Número de famílias de descontinuidade (J_n)

O J_n representa o número de famílias de descontinuidade. Este parâmetro é afetado por foliações, xistosidade, acamamento, dentre outras estruturas. Quando um considerável número de descontinuidades apresentam atitude e características parecidas, estas devem ser consideradas como uma única família de descontinuidades. Já se existem somente algumas

estruturas, distribuídas de forma ocasional, essas devem ser consideradas como aleatórias. O valor de J_n é aproximadamente igual ao quadrado do número de família de descontinuidades como apresenta a Tabela 6.

Tabela 6 – Quantificação do parâmetro J_n . (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)

Número de Famílias de Descontinuidades	J_n
Nenhuma ou poucas juntas	0,5 - 1,0
Uma família	2
Uma família mais juntas aleatórias	3
Duas famílias	4
Duas famílias mais juntas aleatórias	6
Três famílias	9
Três famílias mais juntas aleatórias	12
Quatro ou mais famílias, aleatórias, muito fraturada, "sugar cube"	15
Rocha fragmentada	20

(i) Para interseções de descontinuidades usar (3 x J_n)

(ii) Para portais usar (2 x J_n)

3.4.3.3 Índice da rugosidade (J_r) e Índice da alteração (J_a) das descontinuidades

O J_r e J_a representam respectivamente a rugosidade e o grau de alteração das descontinuidades da parede ou das zonas de preenchimento. Esses parâmetros podem ser classificados como mostram as Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Quantificação do parâmetro J_r . (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)

Condições de rugosidade nas paredes	J_r
A) Contato rocha-rocha e sem deslocamento relativo entre paredes < 10 cm	
Fratras não persistente	4
Fratras rugosas ou irregulares, onduladas	3
Fratras lisas, onduladas	2
Fratras polidas, onduladas	1,5
Fratras rugosas ou irregulares, planas	1,5
Fratras lisas, planas	1,0
Fratras polidas ou estriadas, planas	0,5
B) Sem contato rocha-rocha e com deslocamento relativo entre paredes	
Fratras preenchidas com material de natureza argilosa	1,0
Fratras preenchidas com material de natureza granular	1,0

(i) acrescentar 1,0 ao valor de J_r quando o espaçamento médio das fraturas relevantes for maior que 3 metros.

Tabela 8 - Quantificação do parâmetro Ja. (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)

Condições de alteração nas paredes	Ja	ϕ_r
A) Contato rocha-rocha e sem deslocamento relativo entre paredes		
Paredes duras, compactas, preenchimento impermeável	0,75	-
Paredes sem alteração	1.0	25- 35
Paredes levemente alteradas, películas de materiais arenosos ou abrasivos	2.0	25 - 30
Paredes com material silto-arenoso com pequena fração argilosa	3.0	20 - 25
Paredes de material mole (micas, talco, etc.), e/ou com material expansivos	4.0	8 - 16
B) Contato rocha-rocha e com deslocamento relativo entre as paredes < 10 cm		
Paredes com partículas arenosas, fragmentos de rochas etc	4.0	25 - 30
* Paredes com preenchimentos contínuos e pouco espessos (<5mm) de material argiloso fortemente sobreadensado	6.0	16 - 24
** Paredes com preenchimentos contínuos e pouco espessos (<5mm) de material argiloso mediamente sobreadensado	8.0	12 - 16
*** Paredes com preenchimentos de materiais argilosos expansivos, valores variáveis com a porcentagem dos de argilo-minerais expansivos presentes e com a ação conjugada da água intersticial	8.0 - 12	6 - 12
B) Sem contato rocha-rocha e com deslocamento relativo entre as paredes		
Zonas de preenchimento com fragmentos de rochas e material argiloso (ver *, **, *** para caracterizar as condições das argilas)	6.0, 8.0 ou 8.0 - 12	6 - 24
Zonas de preenchimento com material argiloso ou silto-argiloso	5.0 10,13 ou	-
Zonas de contínuas de preenchimento com material argiloso (ver *, **, *** para caracterizar as condições das argilas)	13 - 20	6 - 24

3.4.3.4 Fator de redução pela presença de água na descontinuidade (J_w)

O parâmetro J_w está relacionado com a pressão que a água exerce no maciço rochoso. Como se sabe, a água age no sentido de reduzir a pressão normal efetiva na zona de cisalhamento. Este fator pode ser definido a partir da Tabela 9.

Tabela 9 - Quantificação do parâmetro J_w . (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)

Condições de Influência da Água	Nível de Água(m)	J_w
Escavação a seco ou com pequena afluência de água (5l/min)	<10	1
Afluência média da água com eventual carreamento do preenchimento	10 - 25	0.66
Afluência elevada de água em rochas competentes de fraturas não preenchidas	25 - 100	0.5
Afluência elevada de água com carreamento significativo do preenchimento	25 - 100	0.33
Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), decaimento com o tempo	> 100	0.1 - 0.2
Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	> 100	0.005 - 0.1

3.4.3.5 Fator de Redução das Tensões (SRF)

O fator de redução das tensões (SRF) é o fator que indica a perda de pressão quando a escavação passa por uma zona de cisalhamento e maciços rochosos argilosos; tensões da rocha σ_c / σ_1 em um maciço competente onde σ_c é a resistência a compressão uniaxial e σ_1 é o maior tensão principal antes da escavação; confinamento ou relaxamento de tensões em maciços rochosos ditos incompetentes. (Singh e Goel, 1999) O parâmetro SRF pode ser definido a partir das Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Parâmetro SRF. (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)

Condições das tensões no maciço	SRF
A) Zonas de baixa resistência interceptando a escavação	
Ocorrências múltiplas contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (qualquer profundidade)	10
Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação <50 m)	5,0
Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação >50 m)	2,5
Ocorrências múltiplas de zonas de material cisalhado em rochas competentes isentas de argila e com blocos desagregados de rochas (qualquer profundidade)	7,5
Ocorrências específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de argila e com blocos desagregados de rochas (profundidade da escavação <50m)	5,0
Ocorrências específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de argila e com blocos desagregados de rochas (profundidade da escavação >50m)	2,5
Ocorrência de juntas abertas e intenso fraturamento do maciço (qualquer profundidade)	5,0

- (i) No caso de ocorrência de zonas de baixa resistência relevantes, mas não interceptando a escavação, recomenda-se a redução dos valores de SRF de 25 a 50%.

Tabela 11 - Parâmetros SRF para rochas competentes e com problemas de tensões. (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)

Condições de tensões no maciço	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	SRF
B) Rochas competentes (comportamento rígido às deformações)			
Tensões baixas, subsuperficiais	>200	> 13	2.5
Tensões moderadas	200 - 10	13 - 0.66	1.0
Condições moderadas de rocha explosiva (Rockburst)	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10
Condições intensas de rocha explosiva (Rockburst)	<2.5	< 0.16	10 - 20

- (i) No caso de tensões subsuperficiais adotar SRF = 5.0 quando a profundidade da abóboda da escavação abaixo da superfície do terreno for menor que sua dimensão característica (largura do vão).
- (ii) Para maciços muito anisotrópicos, introduzir correções de σ_c e σ_t de acordo com os seguintes critérios: se $\sigma_1/\sigma_3 < 10$ reduzir σ_c para 0.8 σ_c e σ_t para 0.6 σ_t ; se $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ reduzir σ_c para 0.6 σ_c e σ_t para 0.6 σ_t .

A classificação do maciço rochoso através do Sistema-Q pode variar de 0,0001 a 1000. A Tabela 12 apresenta a classificação de acordo com os valores definidos.

Tabela 12 - Classificação dos maciços rochosos através do sistema-Q. (Aguiar, 2002 apud Oliveira, 2012)

Qualidade geomecânica do maciço	Q
Péssimo (excepcionalmente ruim)	< 0.01
Extremamente ruim	0.01 - 0.1
Muito ruim	0.1 - 1.0
Ruim	1.0 - 4.0
Regular	4.0 - 10.0
Bom	10.0 - 40.0
Muito Bom	40.0 - 100.0
Ótimo (extremamente bom)	100.0 - 400.0
Excelente (Excepcionalmente bom)	> 400.0

3.5 Modelamento Matemático – Método dos Elementos Finitos (MEF)

Os modelamento numérico pode ser aplicado em diferentes ramos da ciência para solução de problemas, inclusive no ramo da mecânica das rochas. A chegada dos computadores permitiu solucionar uma maior demanda desses problemas e ainda desenvolver este método. Segundo Nikolic *et al.* (2016), o modelamento numérico pode ser classificado em contínuo, descontínuo e híbrido contínuo/descontínuo. Este trabalho aborda com mais enfoque o método contínuo, uma vez que o software utilizado usa este método, em específico o Método de Elementos Finitos (MEF). Este conceito de contínuo implica que domínios de interesse não podem ser separados e a continuidade entre pontos deve ser preservada.

O MEF pode ser definido como um método aproximado onde a variável de estado (incógnita do problema) é aproximada dentro de pequenas regiões que subdividem, ou discretizam, o domínio do problema. Estas pequenas regiões são chamadas de elementos finitos e estão conectadas entre si pelos pontos nodais, os quais são pontos estratégicos utilizados para aproximar a variável do problema. (Nogueira, 2014)

Segundo Zienkiewicz et. al (1983), Bettess (1977) e Cheng (1996) apud Nikolic *et al.* (2016), uma das vantagens mais utilizadas do MEF é a possibilidade de representar rochas heterogêneas, onde é possível atribuir propriedades materiais diferentes a diferentes elementos finitos. Atualmente, existem muitas formas diferentes de elementos finitos com número diferente de nós para casos 1D, 2D e 3D. Foi desenvolvido um caso especial de elementos denominados "elementos infinitos" para simular o domínio de campo distante em aplicações geotécnicas.

Segundo Ibrahimbegovic (2009), devido aos pressupostos da continuidade, os métodos MEF habituais têm restrições na aplicação eficiente da análise de falhas, rachaduras e dano causados por descontinuidades ou singularidades. Uma vez que a rocha é um material descontínuo e MEF é um método contínuo, tem havido muitas tentativas para melhorá-lo, a fim de simular a propagação da fratura e outros efeitos descontínuos com ele.

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi a análise das tensões geradas pela exploração parcial de um Crown Pillar através de modelamento matemático. Para o modelamento matemático foi utilizado o software RS² da RocScience. Os dados utilizados para as análises são de uma empresa de mineração que utiliza o método de lavra de realces em subníveis (Sublevel Open Stopping).

Utilizou-se uma seção da mina em questão para efetuar essas análises (Figura 5). A metodologia empregada determinou o campo de tensões induzido no maciço devido a exploração do Crown Pillar de uma seção bidimensional. Para cada cenário foram determinados o σ_1 , σ_3 e o Fator de Segurança (FS).

σ_1 (Sigma 1) = maior tensão no plano principal.

σ_3 (Sigma 3) = menor tensão no plano principal.

FS (Strength Factor/ Fator de Segurança) = razão entre a resistência da rocha e a tensão induzida.

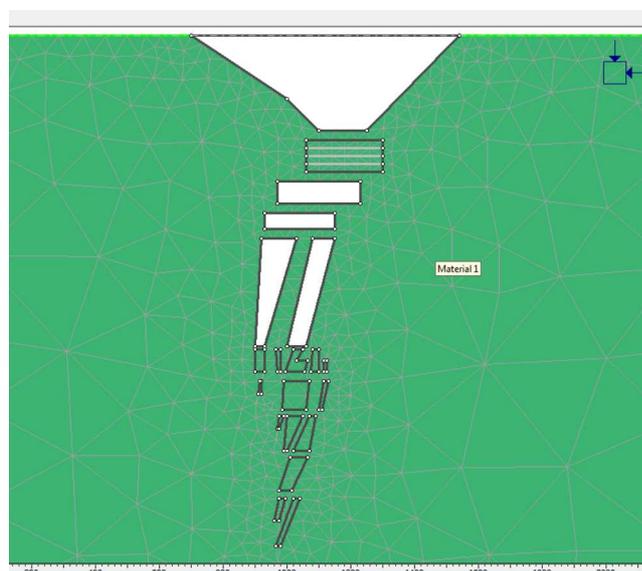


Figura 5 - Seção bidimensional da mina em estudo para análises de tensões através do modelamento matemático.

O modelamento matemático no software foi realizado de forma a comparar nove possíveis cenários para recuperação parcial do Crown Pillar (Tabela 13). Os cenários foram projetados para entender como a mudança de dimensionamento do avanço e o sentido de exploração do Crown Pillar podem influenciar na estabilidade do realce executado e dos demais realces dentro da zona de influência da escavação. Os cenários 1.1 a 1.3 indicam uma exploração realizada de cima para baixo, enquanto os cenários 2.1 a 2.3 indicam uma extração

de baixo para cima. Em ambos cenários a escavação foi efetuado de 25 em 25 metros de espessura. Já nos cenários 3.1 a 3.3, a escavação realizada foi de 50 metros de espessura e variou-se somente uma posição para cada cenário.

Tabela 13 - Cenários analisados.

Cenário	Sentido da Exploração / Dimensão Realce (m)	Posição
1.1	Cima para Baixo	25
1.2	Cima para Baixo	50
1.3	Cima para Baixo	75
2.1	Baixo para Cima	25
2.2	Baixo para Cima	50
2.3	Baixo para Cima	75
3.1	Superior	50
3.2	Médio	50
3.3	Inferior	50

Para o modelamento matemático foram imputados no programa os parâmetros de resistência da rocha apresentados na Tabela 14, sendo a rocha em questão o Gnaisse. Para as análises foi utilizado o critério de fraturamento de Hoek-Brown e as análises foram executadas em regime elástico.

Tabela 14 - Parâmetros de resistência da rocha (Gnaisse)

Parâmetros	Valor
Peso Específico (MN/m ³)	0,027
Módulo de Young (MPa)	53.062,8
Coefficiente de Poisson	0,25
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)	162
Parâmetro mb (Pico)	11,056
Parâmetro s	0,0622

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Definidos os cenários a serem analisados, foi realizado o modelamento matemático em análise elástica de tensão-deformação do maciço em estudo. Esse modelamento foi desenvolvido com o intuito de analisar as tensões induzidas causadas pela escavação do Crown Pillar. Para todos os cenários foram analisadas as distribuições de σ_1 , σ_3 e FS. Para σ_1 e σ_3 valores positivos representam esforços de compressão e valores negativos representam esforços de tração. Para a avaliação do fator de segurança, considerou-se que para o $FS < 1$ o maciço rochoso apresenta resistência menor que a tensão nele induzida, ou seja, há ruptura, enquanto que para os casos nos quais $FS > 1$, o maciço rochoso mostrou-se mais resistente que a tensão nele induzida, indicando condições favoráveis à estabilidade do mesmo.

A ruptura das escavações em rochas resistentes está diretamente relacionada às tensões *in situ*, as características dos maciços rochosos, resistência da rocha e as zonas de fraturas. Quando se trata de tensões *in situ* de baixa magnitude, o processo de ruptura é controlado pelas descontinuidades e a distribuição de fraturas no maciço rochoso. Entretanto, quando a magnitude das tensões aumenta o processo de ruptura é dominado pelas fraturas paralelas a escavação induzidas pelas tensões geradas. Isso agrava quando a operação ocorre em profundidades maiores. E as zonas de tração geradas pelo aumento das tensões principais pioram o cenário, pois os esforços de tração irão colaborar para que sejam geradas mais zonas de fraturas aumentando a probabilidade de ruptura do maciço.

A Figura 6, Figura 7 e Figura 8 apresentam o modelo de tensões antes da escavação parcial do Crown Pillar. Se o Crown Pilar não tivesse sido explotado este seria o estado de tensão do maciço atuando na mina atualmente.

Este é o cenário ótimo, do ponto de vista da estabilidade da mina, no qual o Crown Pillar é deixado para sustentar a escavação e foi utilizado para calibrar o modelo matemático. Os valores de σ_1 para essa situação variam de 10 MPa a 29 MPa, em média, no Crown Pillar.

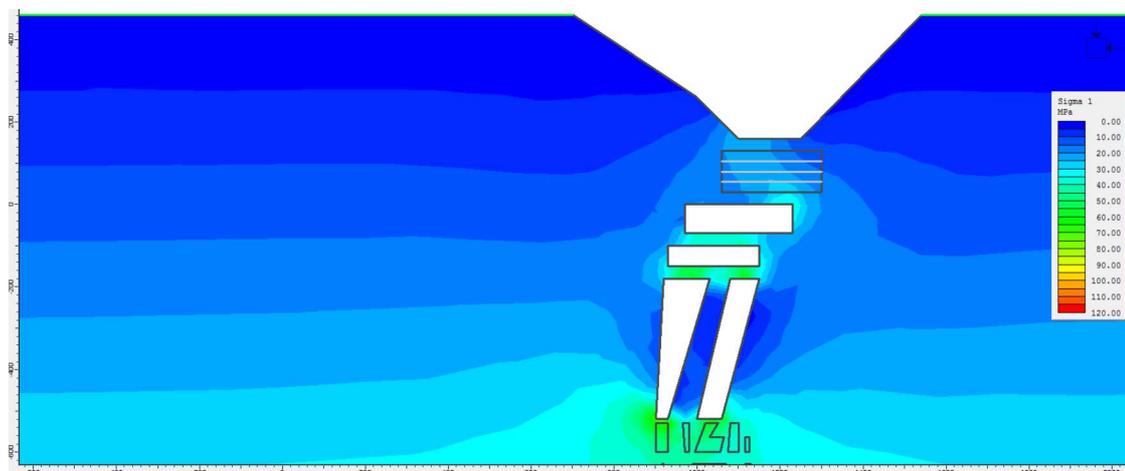


Figura 6 - Distribuição de tensões no entorno do Crown Pillar, σ_1 .

Como mostra a Figura 7, o σ_3 apresentou apenas valores positivos (0 a 12 MPa), ou seja, não apresenta zonas de tração em volta ou próximo ao Crown Pillar.

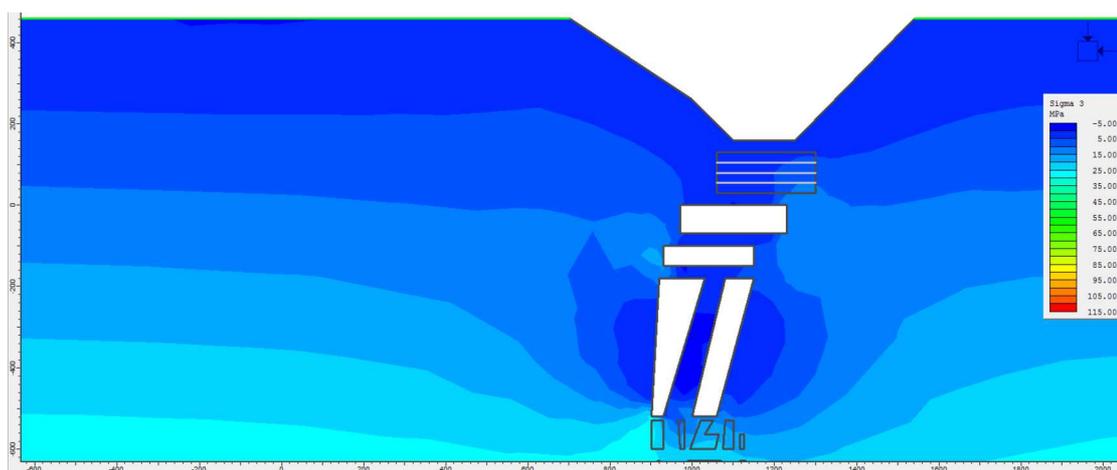


Figura 7 - Distribuição de tensões no entorno do Crown Pillar, σ_3 .

O mesmo ocorre para o fator de segurança (FS) que apresentou somente valores acima de 1 no maciço, o que significa que a rocha em questão é mais resistente que as tensões nela exercidas.

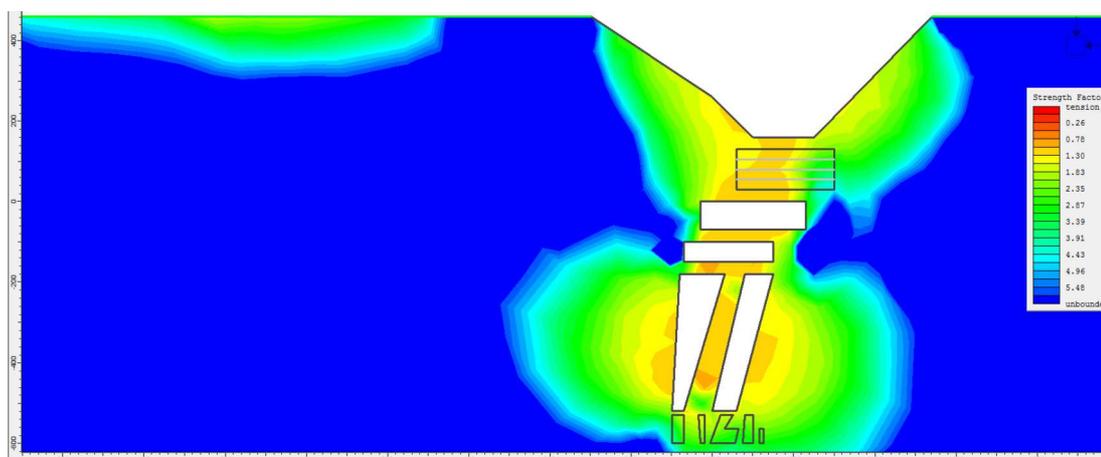


Figura 8 - Distribuição do FS do Crown Pillar e entorno.

O cenário em que o realce executado no interior do crown pillar possui 100 metros de espessura é o cenário final e real, sendo a dimensão que a mina em questão executou. E portanto é o cenário mais crítico, já que possui maior dimensão, além de apresentar mais zonas de tração. Como este realce se encontra muito próximo ao realce 2, a zona de influência da escavação é muito maior para este cenário. Com isso, o valor de σ_1 aumentou consideravelmente nestas condições (Figura 9), variando de 5 MPa a 51 MPa.

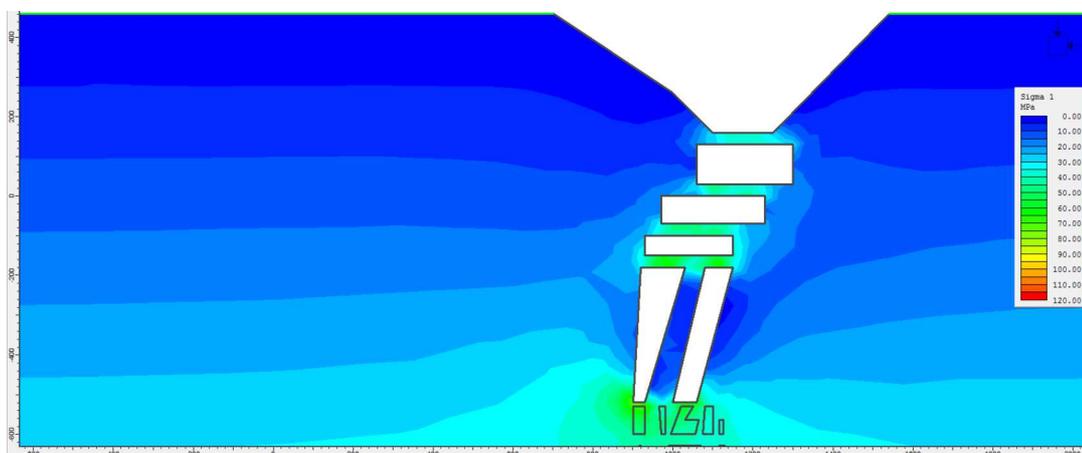


Figura 9 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 100 m de altura, σ_1 .

Para a análise do σ_3 este é o pior cenário e apresenta zonas de tração em todos os lados da escavação e principalmente no *footwall* (Figura 10). Os valores de σ_3 variam de -3,6 MPa a 9 MPa.

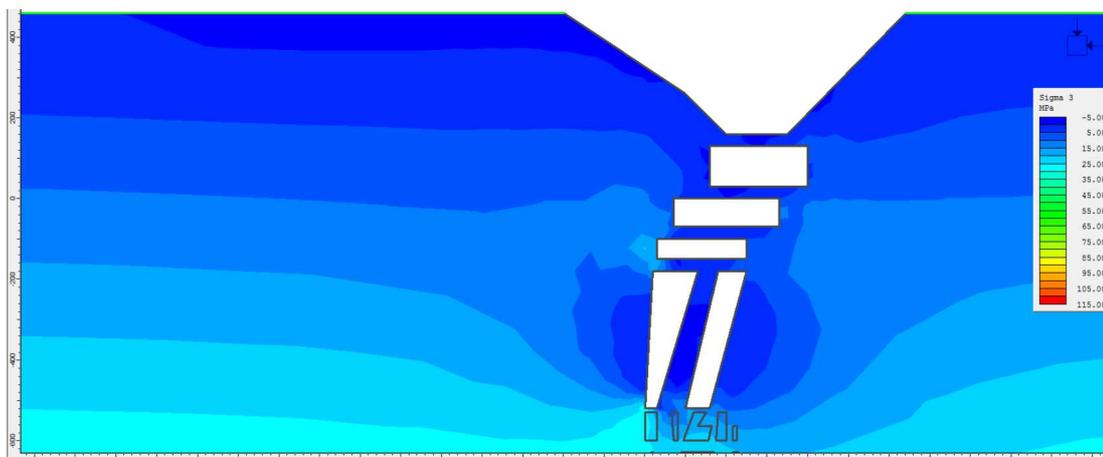


Figura 10 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 100 m de altura, σ_3 .

A distribuição de fator de segurança para este cenário apresentou-se crítica, já que no entorno da escavação, em vários pontos, a tensão sobre o maciço rochoso excede a sua resistência, como pode ser observado nas Figuras 11 e 12 em maior detalhe. Além de afetar no entorno da escavação este cenário afeta a estabilidade da cava a céu aberto.

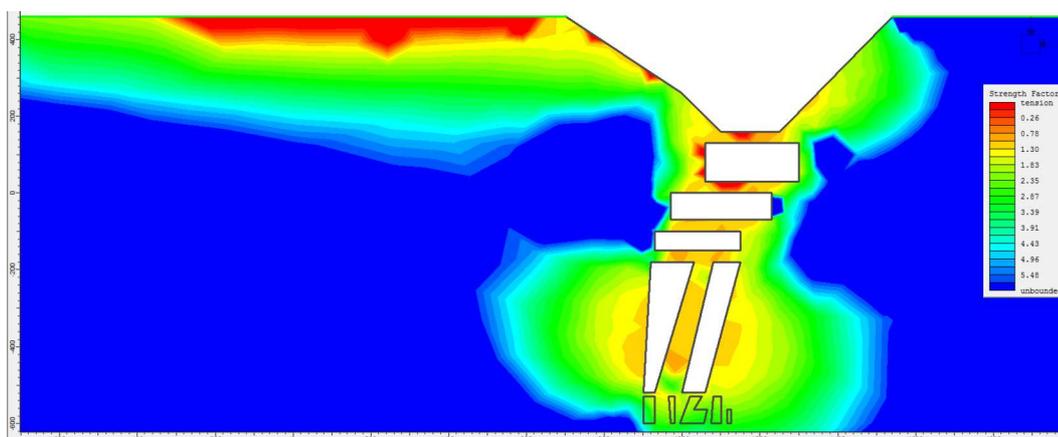


Figura 11 - Distribuição do FS do realce com 100 m de altura e entorno.

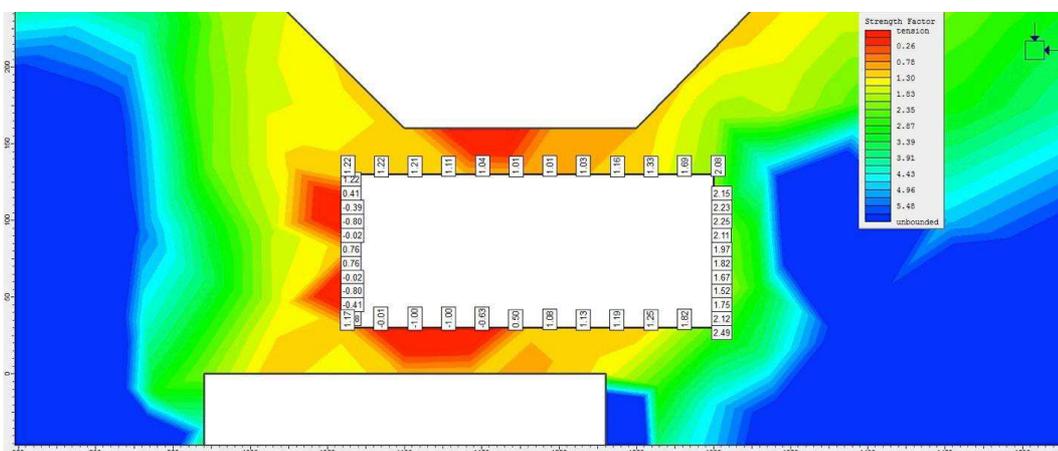


Figura 12 - Distribuição do FS do realce com 100 m de altura e entorno em detalhe.

5.1 Cenários com avanço de 25 metros no sentido de cima para baixo

5.1.1 Cenário 1.1 – 25 metros

No cenário 1.1, no qual o realce possui 25 metros de altura, ocorreu uma redistribuição de tensões e a escavação do Crown Pillar começou a influenciar na distribuição de tensões do realce (Realce 2) subsequente. Como pode ser observado no modelo o σ_1 (Figura 13) apresenta um valor que varia de 10 MPa a 32 MPa, aproximadamente.

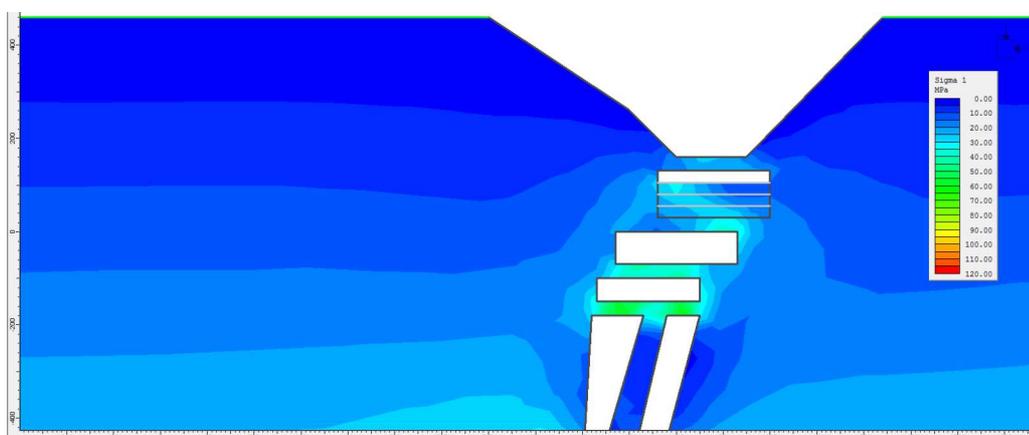


Figura 13 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1 .

O σ_3 apresenta um estado de tensões no qual há algumas zonas de tração, no entorno da escavação esse valor varia de -0,6 MPa a 13 Mpa (Figura 14). As zonas de tração estão localizadas em azul escuro na região logo abaixo da cava a céu aberto e no *footwall* do realce, entre o primeiro e o segundo realce (Realce 2).

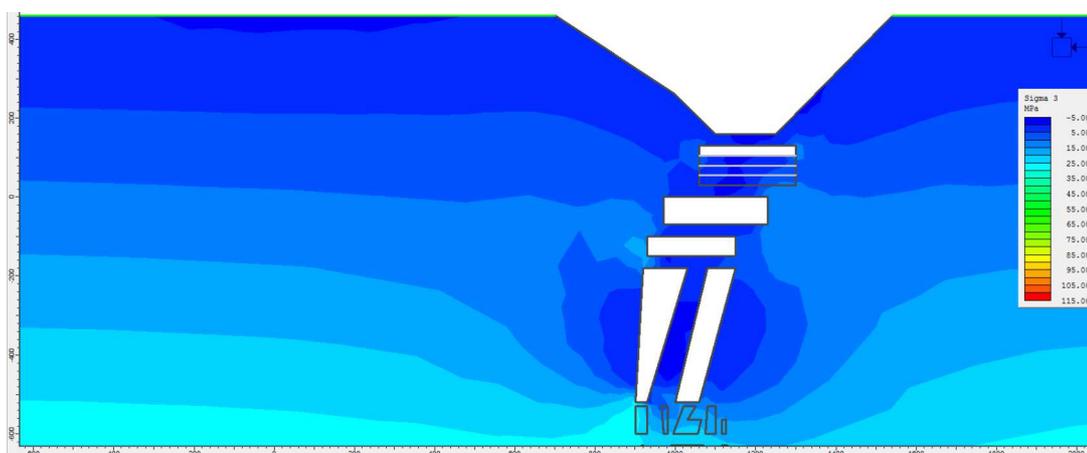


Figura 14 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_3 .

Como apresenta a Figura 15, no entorno da escavação já existe uma perturbação no maciço. Quanto mais próximo de outras escavações o realce é executado, maior a perturbação

causada nessas estruturas, e à medida que ele se afasta destas escavações, essa influência diminui. A Figura 15 apresenta como o FS se comporta no entorno da escavação. Neste cenário, o maciço rochoso demonstrou maior resistência em alguns locais no entorno da escavação. No entanto, observou-se que a escavação comprometeu o *hangwall* e conseqüentemente a parte inferior da cava a céu aberto. O *footwall* da escavação também começou a apresentar menor resistência a tensão referente a cor laranja claro tendendo ao amarelo, onde o valor de FS é menor que 1.

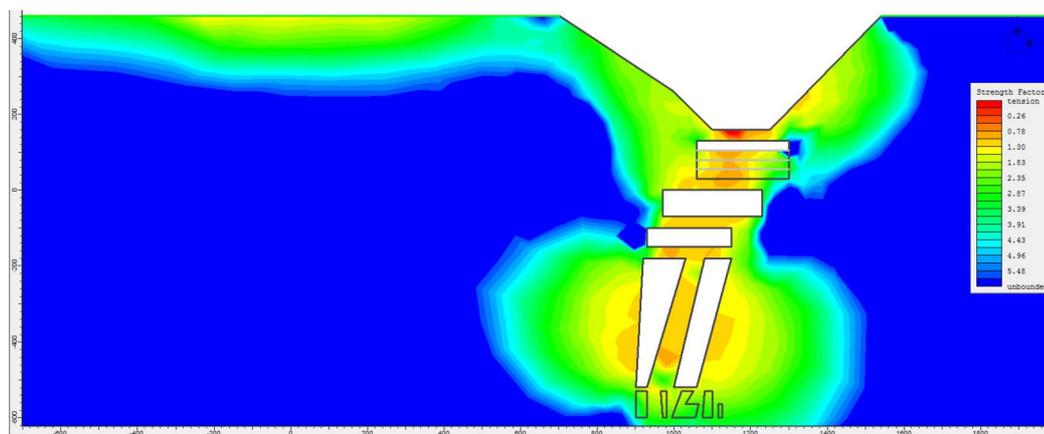


Figura 15 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1 .

No gráfico da Figura 16 em detalhe, observou-se que os valores no entorno da escavação não excedem o limite, <1 , no entanto entre o realce 1, realce 2 e cava a céu aberto houveram zonas de fraqueza.

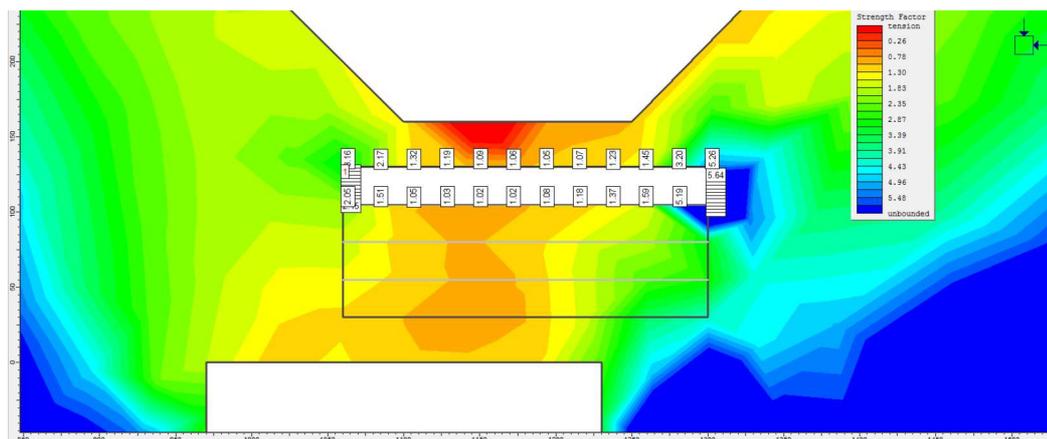


Figura 16 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de cima para baixo em detalhe.

5.1.2 Cenário 1.2 – 50 metros

No cenário 1.2, o valor de σ_1 teve um aumento, este variou de 10 a 38 MPa. Com o aumento do realce para 50 metros de altura, obteve-se o aumento na distribuição de tensões como pode ser visto na Figura 17, na qual o σ_1 apresentou maior valor próximo ao vértice inferior esquerdo do realce 1 e ao vértice superior direito do realce 2. Neste caso, houve um pequeno aumento das zonas de tração quando comparado ao cenário anterior, os valores de σ_3 variaram de -1 MPa a 13 MPa (Figura 18).

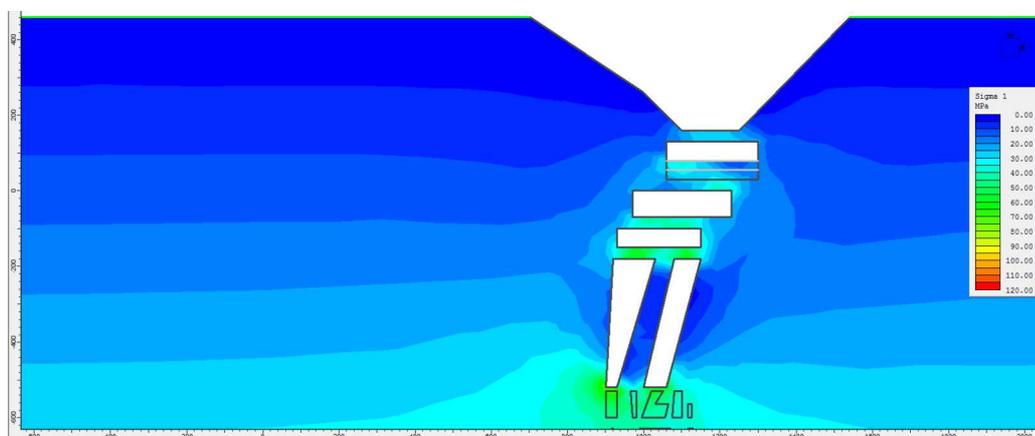


Figura 17 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1 .

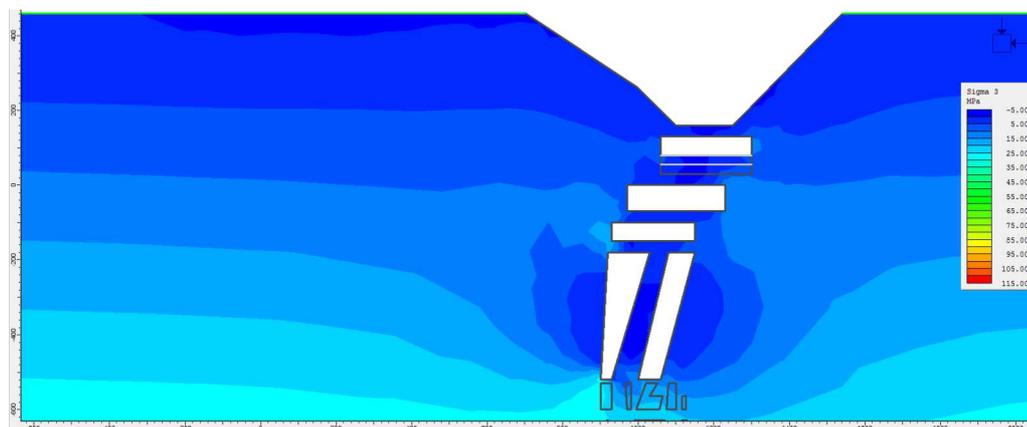


Figura 18 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_3 .

Na análise do modelamento da Figura 19, as zonas onde o valor de FS é menor que 1 aumentaram se comparada ao cenário anterior. O que caracteriza uma maior susceptibilidade à ruptura do maciço rochoso diante deste cenário. No entorno da escavação os valores são superiores ou próximos a 1.

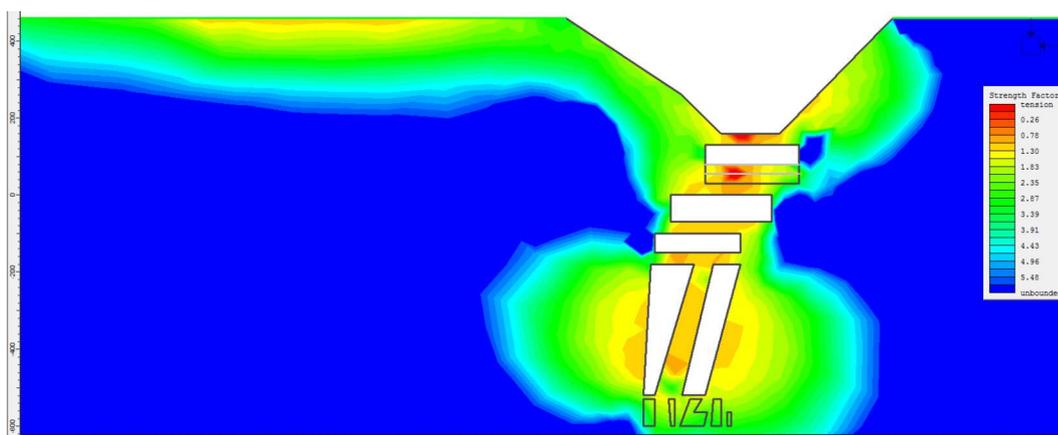


Figura 19 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo.

No entanto, ao se distanciar das escavações este valor diminui. A Figura 20 mostra em maior detalhe essas áreas em tons de laranja a vermelho. Estes valores de FS abaixo de 1 podem apresentar risco à escavação, na qual pode haver ruptura.

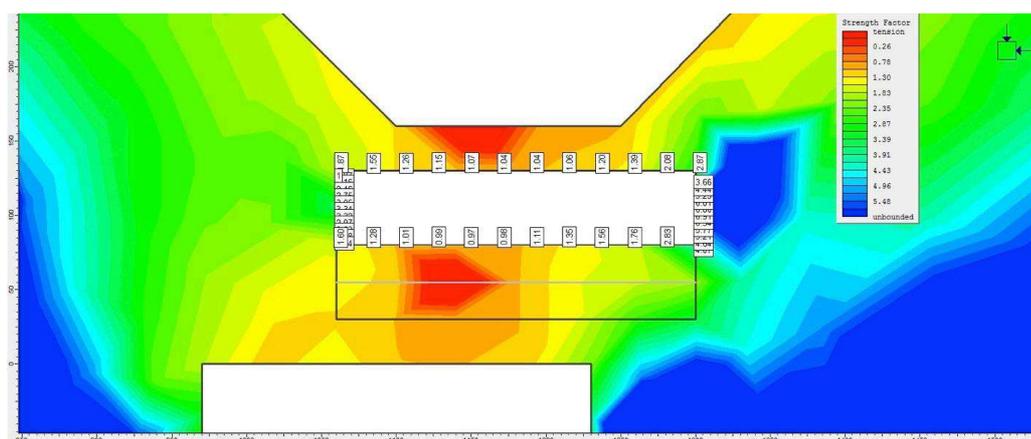


Figura 20 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de cima para baixo em detalhe.

5.1.3 Cenário 1.3 – 75 metros

O cenário 1.3, no qual 75% do realce final é explorado, o σ_1 apresenta altos valores que variam de 10 MPa a 45 MPa e possui uma área de influência maior, como pode ser observado na Figura 21. Isso ocorre principalmente devido a maior proximidade do realce 1 ao realce 2, que faz com que a zona de influência da escavação do realce 1 atue de forma mais efetiva na zona do realce 2.

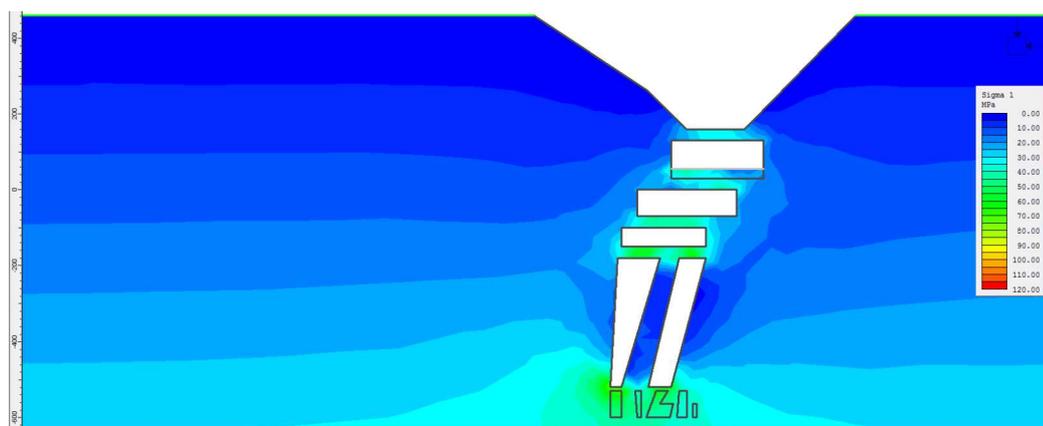


Figura 21 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_1 .

Como apresentado na Figura 22, existem poucas zonas de tração no entorno do realce neste cenário como mostra a distribuição do σ_3 . Então, essas zonas de tração são menores que no cenário 1.2. Os valores de σ_3 variam de -0,6 a 10 MPa. No entanto, entre as escavações ou realce houveram maiores zonas de tração como mostra na Figura 22 em azul escuro.

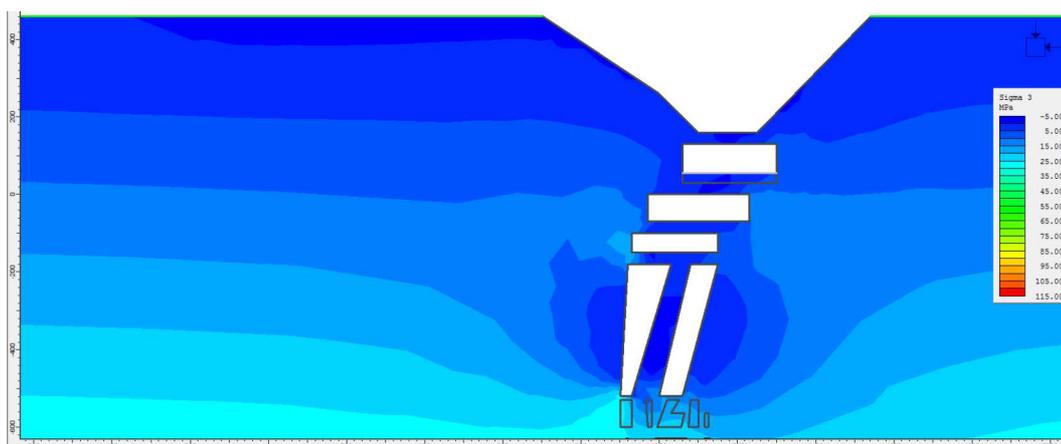


Figura 22 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo, σ_3 .

No entorno da escavação o FS apresenta valores maiores que 1 (Figura 23). Mas como nos outros modelos à medida que se afasta da escavação ocorre uma diminuição nesse valor. Para esse cenário foram encontradas poucas zonas onde o valor de FS é menor que 1.

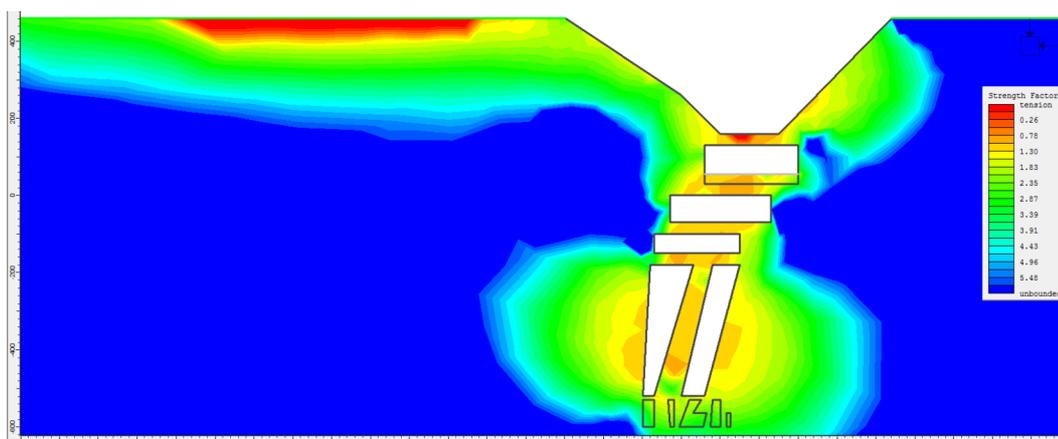


Figura 23 - Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo.

Como apresenta a Figura 24 em maior detalhe, pode-se destacar para este cenário o *hangwall* da escavação, o qual apresenta-se com risco de instabilidade para a escavação.

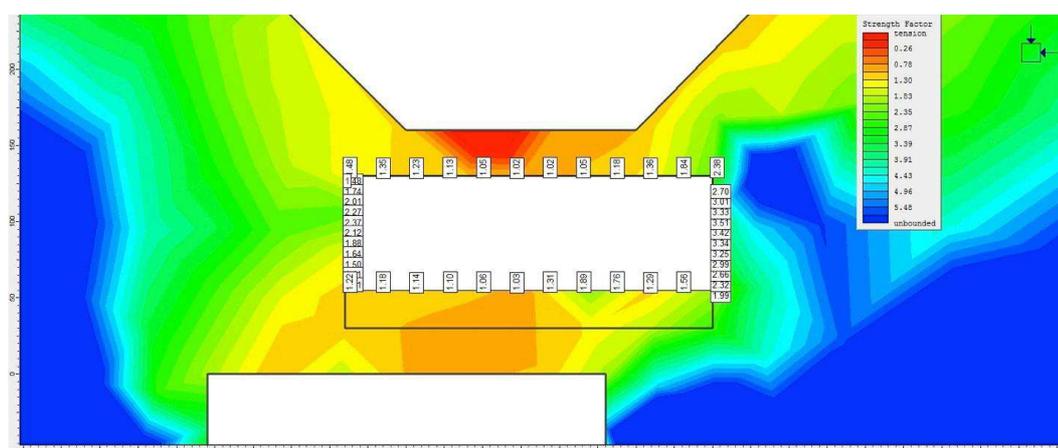


Figura 24 - Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de cima para baixo em detalhe.

5.2 Cenários com avanço de 25 metros no sentido de baixo para cima

5.2.1 Cenário 2.1 – 25 metros

No cenário 2.1 as escavações do realce são feitas com avanço de 25 em 25 metros de baixo para cima. Neste cenário, a escavação já inicia-se próxima ao segundo realce. Sendo assim, a operação começa em uma fase mais crítica na qual a zona de influência do primeiro realce já interfere na estabilidade do *hangwall* do segundo realce. O σ_1 apresenta uma variação de 14 MPa a 37 MPa no entorno da escavação (Figura 25). Alguns pontos como os vértices da escavação e o *footwall* apresentam maiores valores.

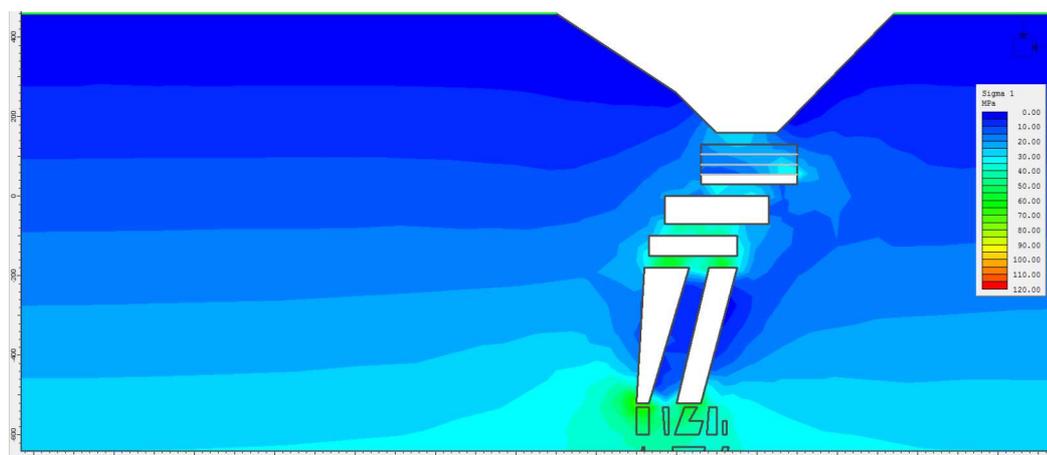


Figura 25 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_1 .

Este cenário apresenta grandes zonas de tração se comparados aos demais, no entorno da escavação, variam de -2,5 MPa a 19 MPa. Essas zonas de tração, como mostra a Figura 26, estão localizadas no *hangwall* em maior dimensão e também estão localizadas no *footwall* em menor dimensão. Zonas de tração também foram geradas na parte inferior direita da cava a céu aberto.

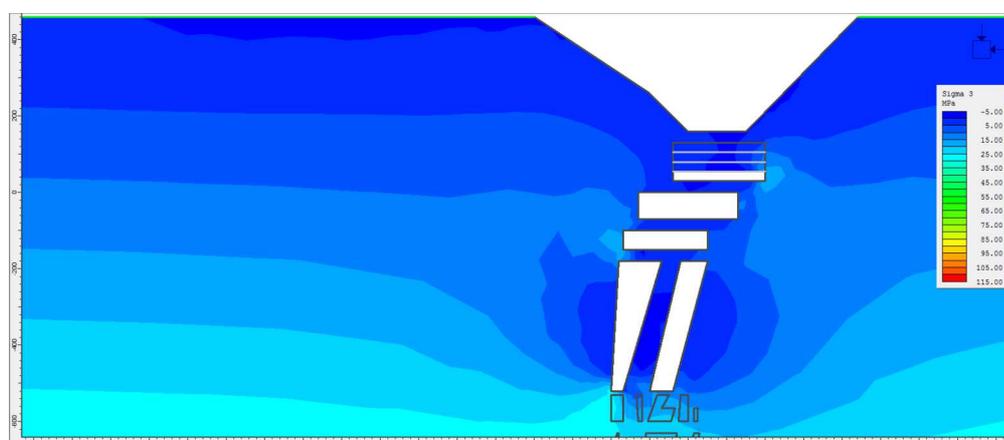


Figura 26 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_3 .

O maciço rochoso em referência apresentou-se mais susceptível à ruptura no *footwall*, principalmente. Isso ocorreu devido à proximidade ao segundo realce, como já discutido. Neste cenário, o *footwall* do primeiro realce se mostra crítico, como mostra a Figura 27. O que compromete significativamente o *hangwall* do segundo realce. No entorno do realce e no *hangwall* a rocha demonstrou-se mais competente diante das tensões. A Figura 28 mostra em maior detalhe esta análise.

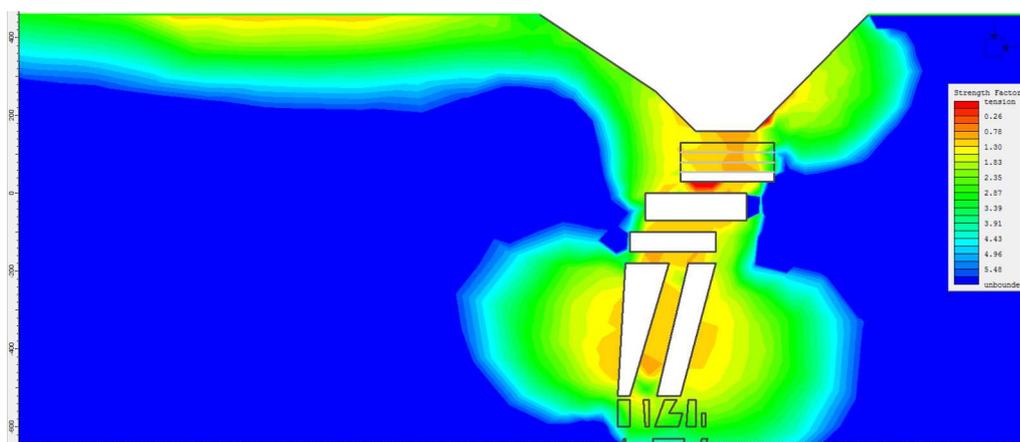


Figura 27 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima.

Como se observa na Figura 28 aproximada, o avanço de lavra com as configurações utilizadas iniciando-se de baixo para cima comprometeu significativamente o talude final da cava na parte inferior. Área na qual o FS se apresentou crítico. Sendo assim, foi comprometida a estabilidade do *footwall* do realce 1 e conseqüentemente o *hangwall* do realce 2, e além disso comprometeu a estabilidade da seção direita da cava a céu aberto.

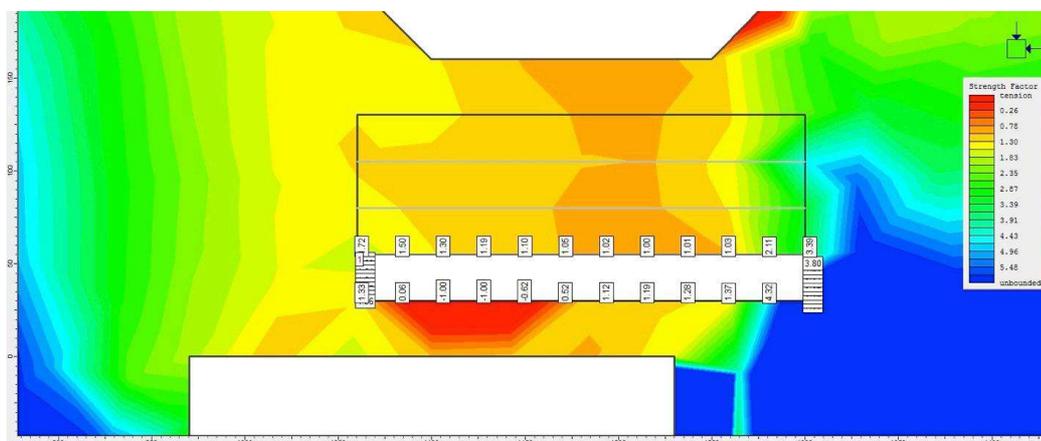


Figura 28 - Distribuição de FS no entorno do realce com 25 m de altura no sentido de baixo para cima em detalhe.

5.2.2 Cenário 2.2 – 50 metros

No cenário 2.2, no qual o avanço alcançou 50 metros, o σ_1 aumentou em algumas áreas como nos dois vértices da escavação. No entorno da escavação este valor não mudou significativamente quando comparado ao cenário 2.1. O valor de σ_1 variou de 9 a 46 MPa (Figura 29).

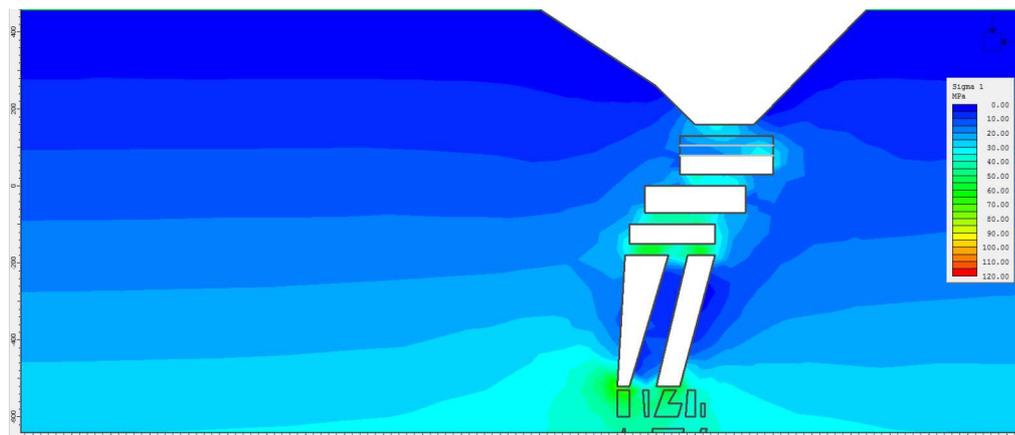


Figura 29 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_1 .

Para este cenário as zonas de tração foram redistribuídas como pode ser observado no *hangwall* do realce 1, como mostra a Figura 30. Entretanto, no *footwall* as tensões permanecem as mesmas. O valor de σ_3 MPa variou de -3 a 13 MPa. Como no cenário anterior zonas de tração foram geradas na parte inferior direita da cava a céu aberto.

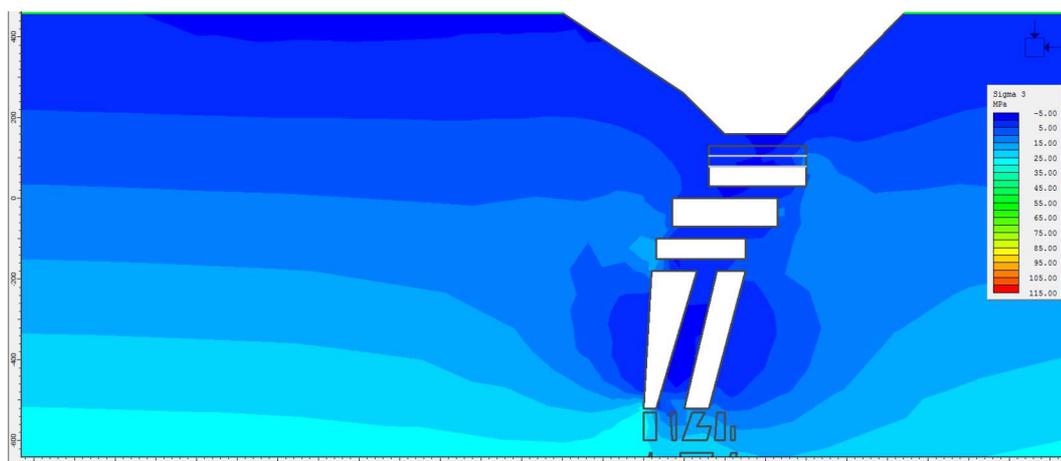


Figura 30 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_3 .

Na análise do FS a rocha apresentou-se mais resistente se comparada ao cenário anterior (Figura 31). Mas, da mesma forma que para o σ_3 o *footwall* continua crítico com relação a resistência da rocha.

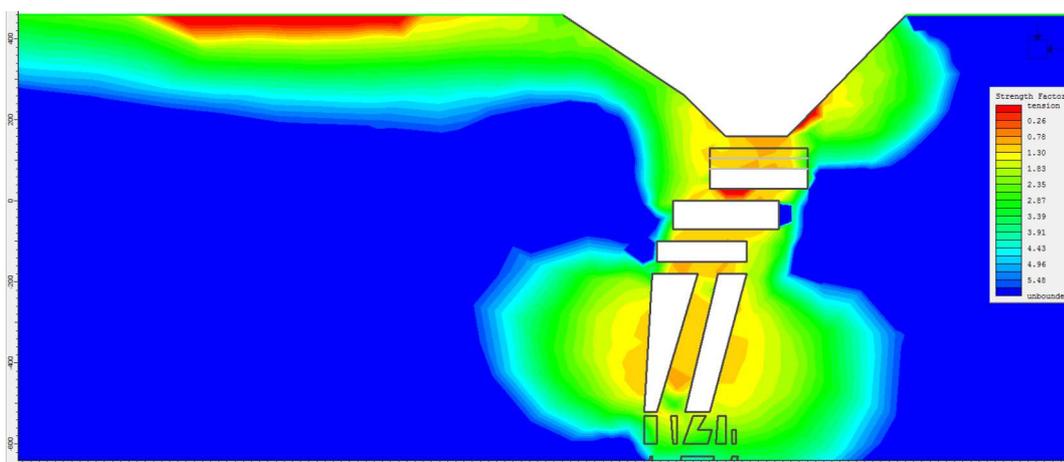


Figura 31 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima.

Como no cenário anterior este também comprometeu significativamente a seção inferior direita da cava a céu aberto (Figura 32).

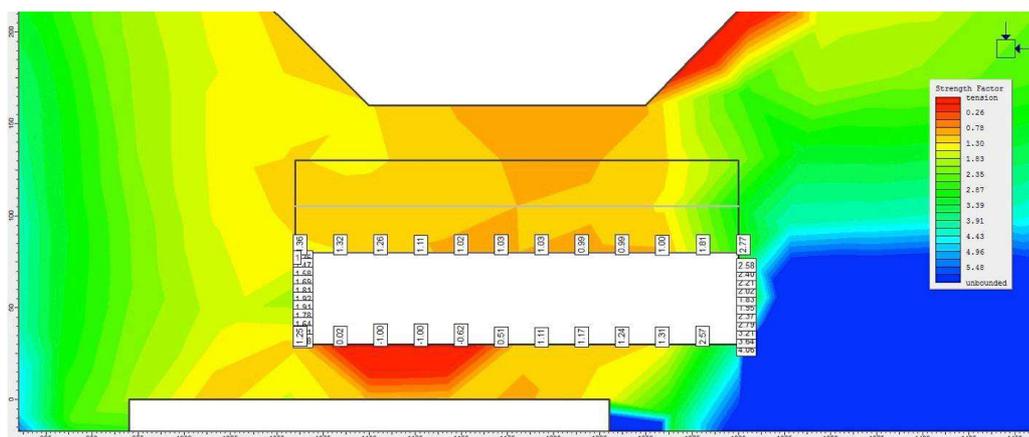


Figura 32 - Distribuição de FS no entorno do realce com 50 m de altura no sentido de baixo para cima em detalhe.

5.2.3 Cenário 2.3 – 75 metros

No cenário 2.3, o σ_1 apresentou-se maior no *hangwall*, já que neste cenário a escavação do realce começa a influenciar a cava a céu aberto. No *footwall* a tensão principal permaneceu a mesma e variou de 9 a 46 MPa, sendo que o maior valor encontra-se no *footwall* (Figura 33).

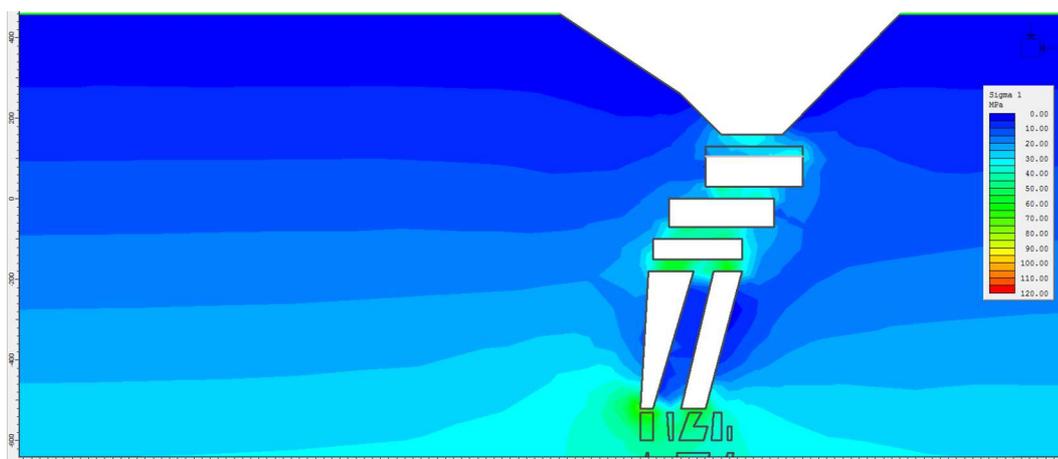


Figura 33 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_1 .

Para a análise do σ_3 , as zonas de tração diminuíram no *hangwall* e permaneceram as mesmas no *footwall*. Os valores variaram de -3,5 a 12 MPa. Da mesma forma que nos cenários de extração de baixo para cima, foi gerada uma área de tração na parte inferior direita da cava a céu aberto (Figura 34).

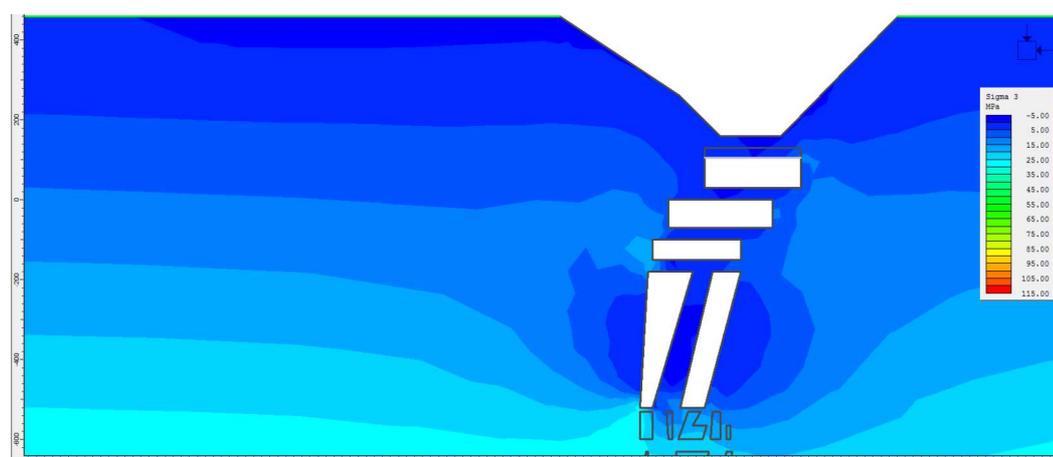


Figura 34 - Distribuição de tensões no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima, σ_3 .

O mesmo ocorreu para o FS, no qual o *footwall* continuou crítico (Figura 35). E novamente como apresenta a Figura 36 ampliada, a seção da cava a céu aberto na parte inferior esquerda, mostrou-se com baixa estabilidade e conseqüentemente chances de ruptura.

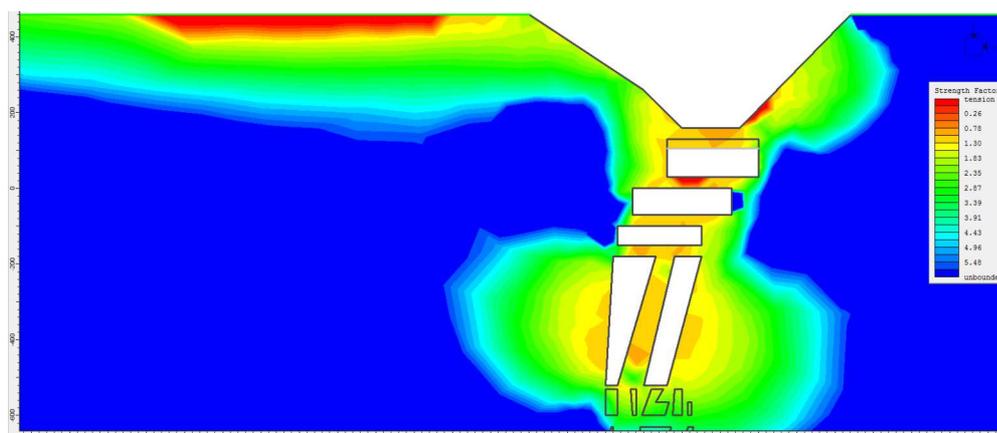


Figura 35 – Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima.

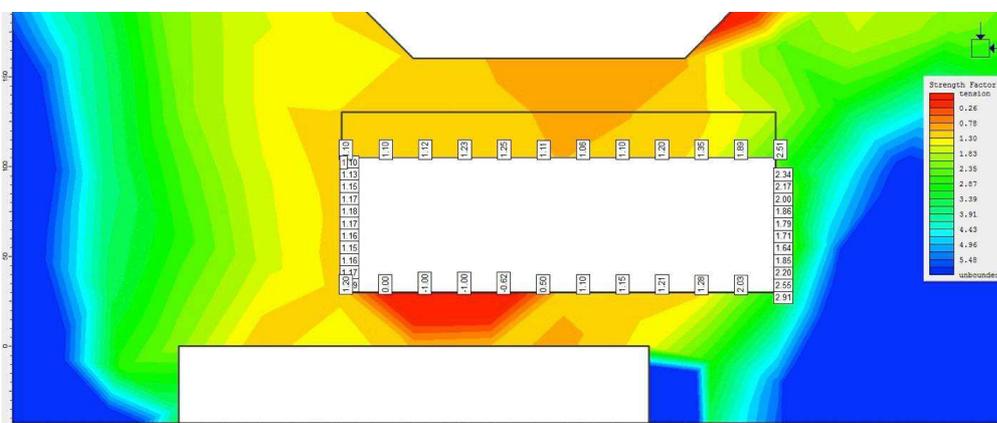


Figura 36 - Distribuição de FS no entorno do realce com 75 m de altura no sentido de baixo para cima em detalhe.

Para o cenário no qual a escavação começa de um nível inferior, tem-se uma situação crítica e de maior risco. Isso ocorre porque a escavação do primeiro realce já sofre inicialmente a influência do segundo realce, o que afeta consideravelmente a estabilidade do *footwall* do realce 1 e, conseqüentemente, o *hangwall* do realce 2. Em contrapartida, as zonas de tração tendem a diminuir pois as tensões sobre a escavação subsequente são aliviadas com a retirada do material.

5.3 Cenários com realce de 50 metros de altura em diferentes localizações

Com base nas análises realizadas nos itens anteriores, foi definido que o melhor cenário para essa exploração do Crown Pillar seria um realce com 50 metros de altura. Este atenderia a operação levando em conta custos e segurança. Ao fazer a escavação são geradas tensões no maciço rochoso e essas tensões podem resultar no rompimento da escavação. As tensões são geradas antes que qualquer suporte seja instalado ou que o preenchimento do

realce (*backfill*) seja executado. Esses procedimentos de suporte como ancoragens (*rock bolts*) e preenchimento (*backfill*) são uma prática comum para manter a estabilidade do maciço a longo prazo.

Caso a resistência da rocha seja menor que a tensão gerada ao fazer a escavação, o peso gerado pelo preenchimento do realce (*backfill*) pode comprometer a estabilidade dos realces inferiores, já que a rocha em questão se encontra no limite de resistência. Isso pode fazer com que o maciço entre em um estado crítico de tensões e romper.

Para fazer estas análises considerou-se 3 cenários com a dimensão de 50 metros de altura, variou-se a posição dos realces na parte superior, média e inferior do Crown Pillar.

5.3.1 Cenário 3.1 - 50 metros de realce parte superior

Como constatou-se anteriormente, quanto mais próximo à cava em superfície maior a tensão gerada entre esta e o realce 1. Nesta situação com o realce de 50 metros na parte superior e mais próximo à cava a céu aberto, obteve-se através do modelo matemático o σ_1 de 12 a 38 MPa (Figura 37) Para este caso foram geradas algumas zonas de tração que variaram de -1 a 13 MPa. Essas zonas de tração estão localizadas no *footwall* do realce (Figura 38).

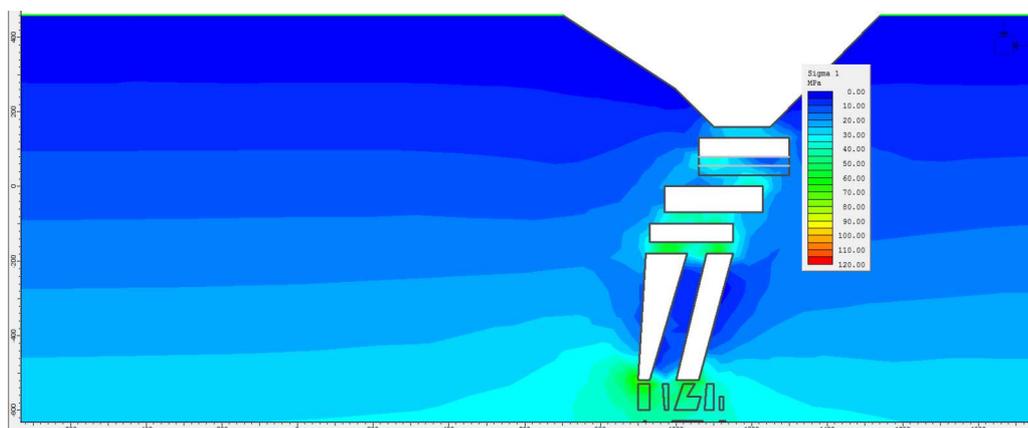


Figura 37 - Distribuição de tensões no entorno do realce superior com 50 m de altura, σ_1 .

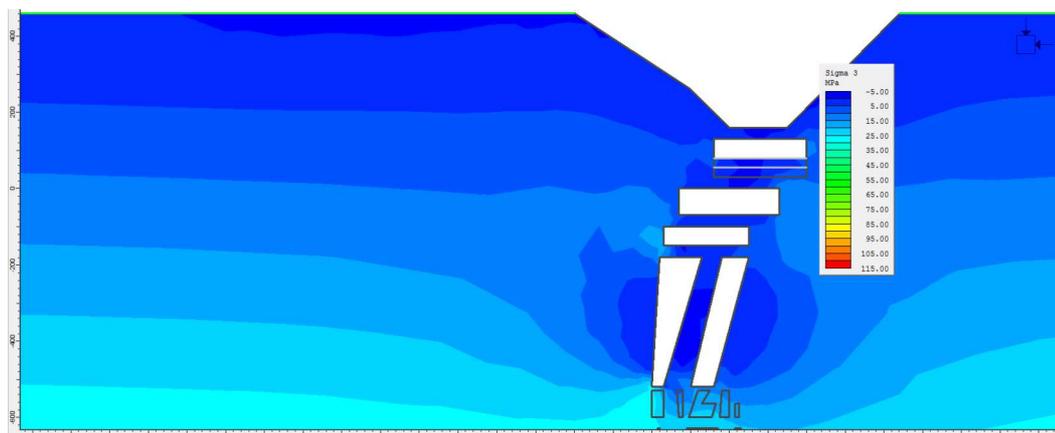


Figura 38 - Distribuição de tensões no entorno do realce superior com 50 m de altura, σ_3 .

A resistência da rocha apresentou-se baixa, em relação aos esforços solicitados, como pode ser observado principalmente no *hangwall* e *footwall* (Figura 39). No entorno da escavação o *footwall* apresentou-se crítico. E, tanto entre a cava a céu aberto e o realce 2 houveram grandes áreas onde a resistência da rocha é menor que a tensão nela submetida (Figura 40).

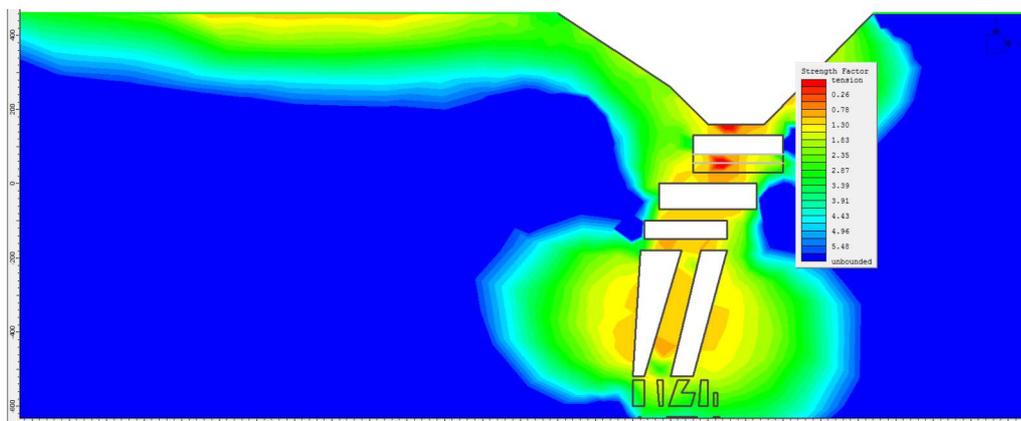


Figura 39 - Distribuição de FS no entorno do realce superior com 50 m de altura.

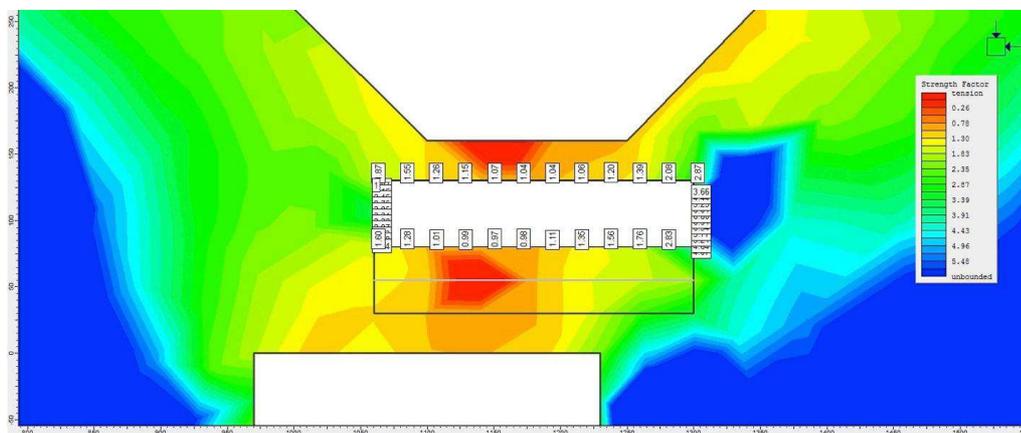


Figura 40 - Distribuição de FS no entorno do realce superior com 50 m de altura em detalhe.

5.3.2 Cenário 3.2 - 50 metros de realce parte média

O cenário médio apresentou valores de σ_1 de 10 a 41 MPa (Figura 41). As zonas de maior valor estão localizadas próximas aos vértices do realce 1 e *hangwall* do realce 2. Diferentemente dos outros modelos este não apresentou zonas de tração, os valores de σ_3 variaram no entorno da escavação de 0 MPa a 13 MPa (Figura 42). Além disso, como em outros cenários a estabilidade da seção da cava a céu aberto foi afetada.

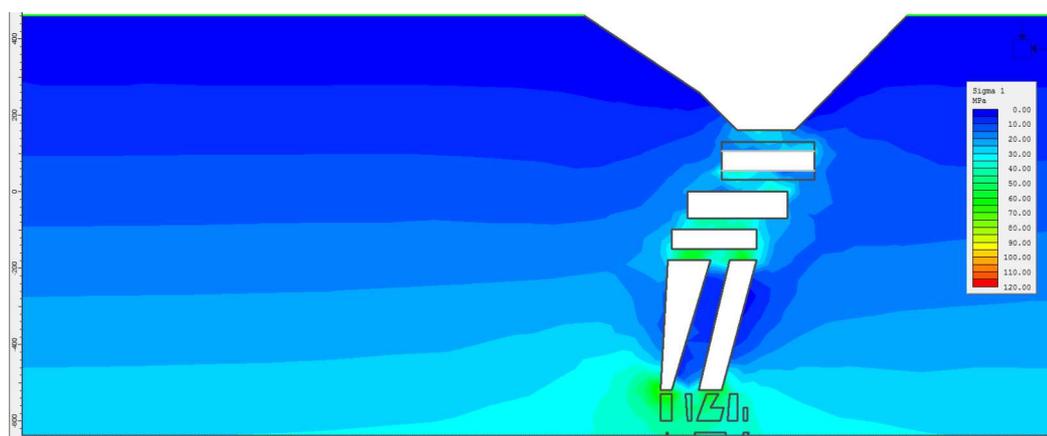


Figura 41 - Distribuição de tensões no entorno do realce médio com 50 m de altura, σ_1 .

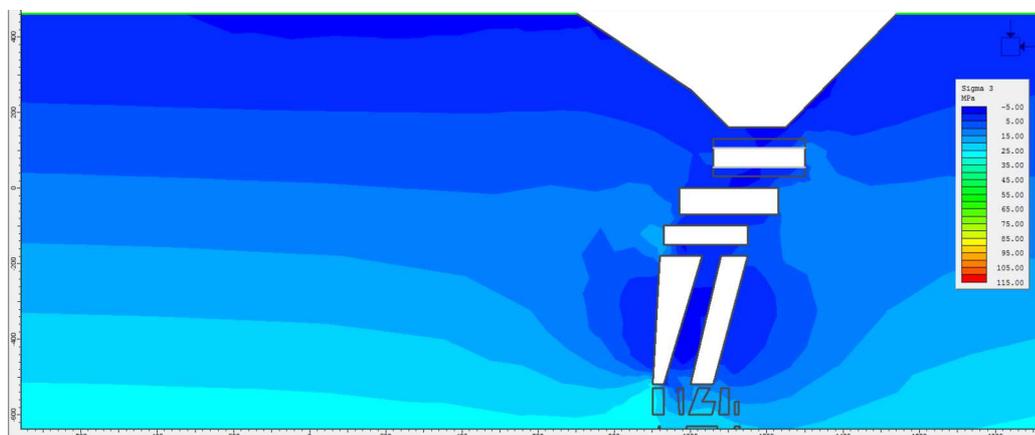


Figura 42 - Distribuição de tensões no entorno do realce médio com 50 m de altura, σ_3 .

O FS deste cenário também se mostrou melhor já que não apresenta regiões onde o FS possui valores menores que 1. Dessa forma, no entorno da escavação e nas áreas próximas o maciço rochoso demonstrou-se resistente (Figura 43 e Figura 44).

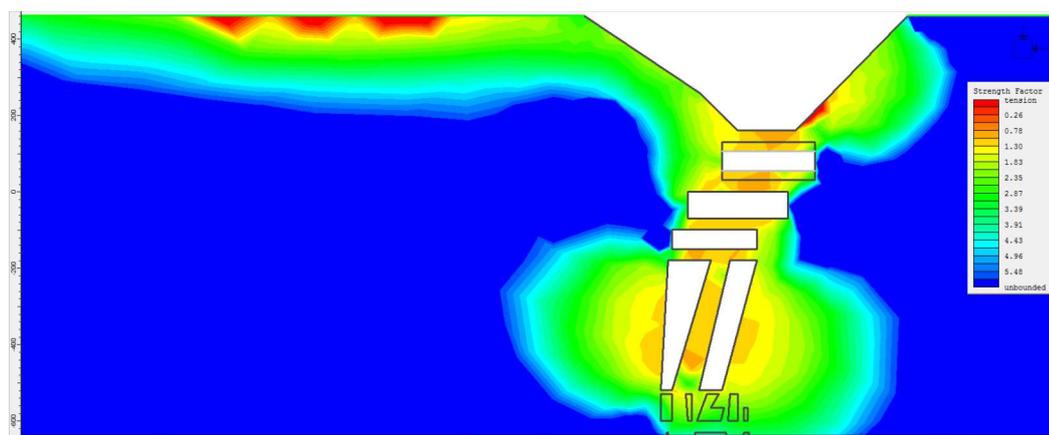


Figura 43 - Distribuição de FS no entorno do realce médio com 50 m de altura.

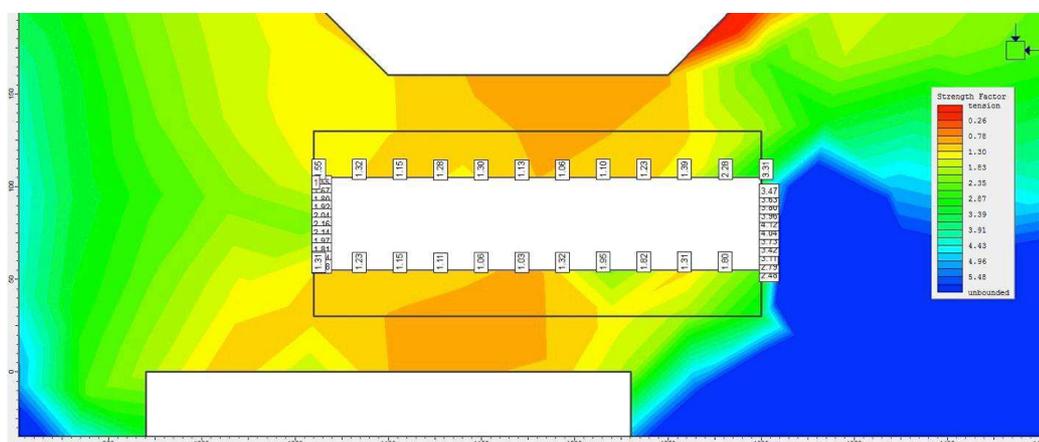


Figura 44 - Distribuição de FS no entorno do realce médio com 50 m de altura em detalhe.

5.3.3 Cenário 3.3 - 50 metros de realce parte inferior

Como em outros cenários, a configuração próxima ao realce 2 demonstrou-se ineficiente e como citado anteriormente a zona de influência das escavações começa a interceptar, e isso faz com que os parâmetros sejam mais críticos. Como se observa no *footwall* do realce 1 o σ_1 possui maior intensidade e no entorno esses valores variam de 10 a 42 MPa. Entretanto, entre os realces esse valor é maior como apresentam as cores na Figura 45. Com relação ao σ_3 , este apresentou zonas de tração que variaram de -3 a 13 MPa (Figura 46).

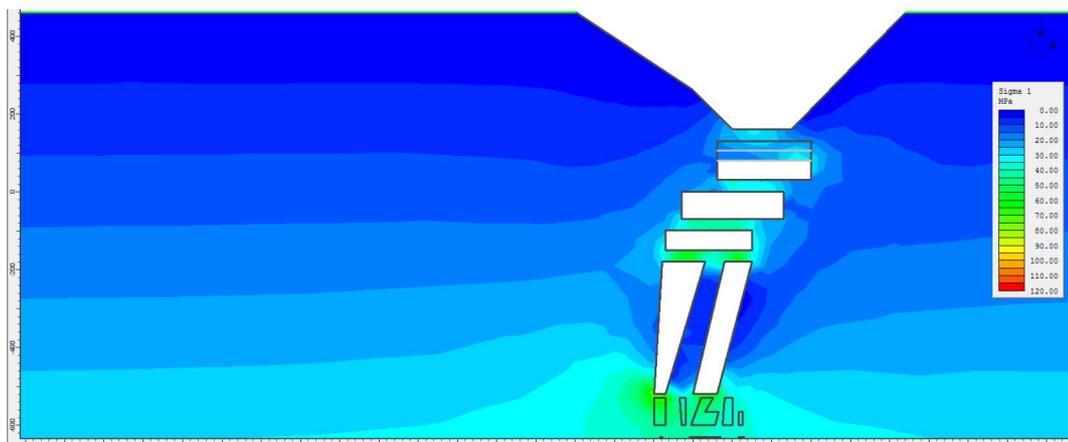


Figura 45 - Distribuição de tensões no entorno do realce inferior com 50 m de altura, σ_1 .

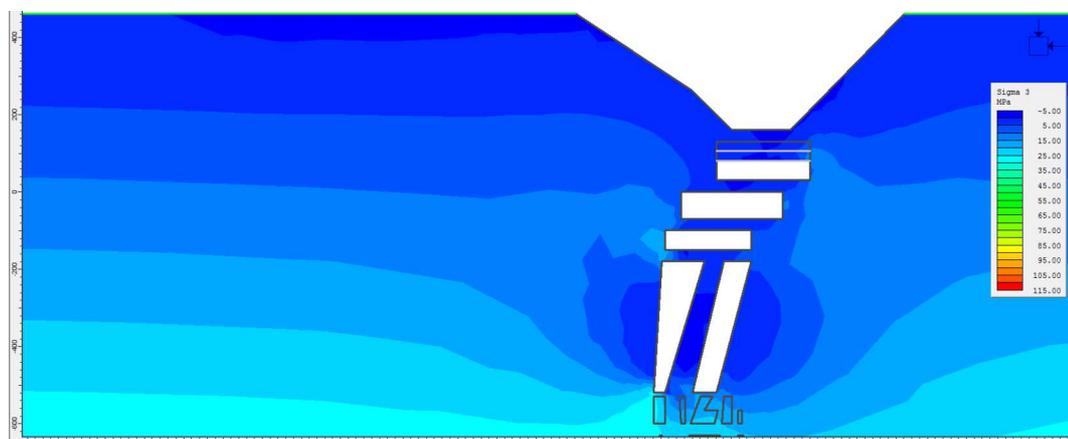


Figura 46 - Distribuição de tensões no entorno do realce inferior com 50 m de altura, σ_3 .

Como esta escavação se encontra mais próxima ao segundo realce, o *footwall* se apresenta menos resistente às tensões nele geradas o que pode levar ao rompimento da escavação. Como em outros cenários a resistência da rocha é baixa no *footwall* e novamente na parte inferior direita da cava a céu aberto como na Figuras 47 e 48.

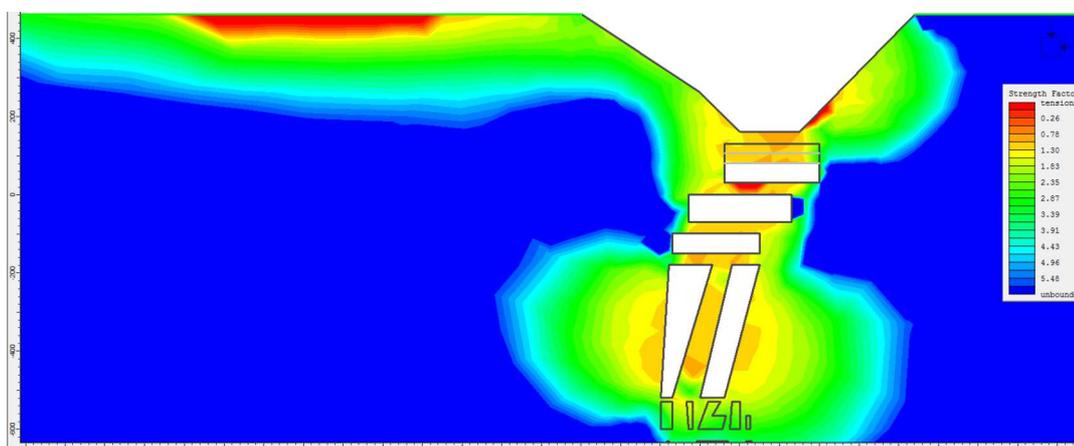


Figura 47 - Distribuição de FS no entorno do realce inferior com 50 m de altura.

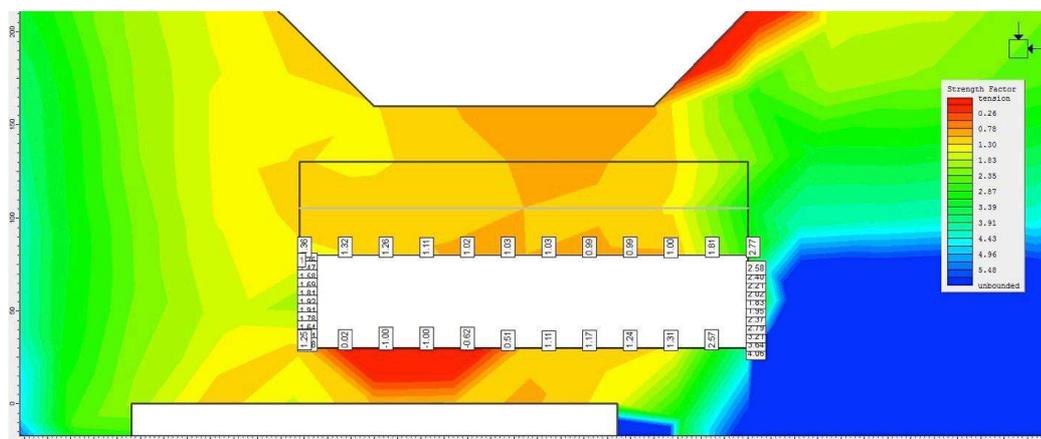


Figura 48 - Distribuição de FS no entorno do realce inferior com 50 m de altura em detalhe.

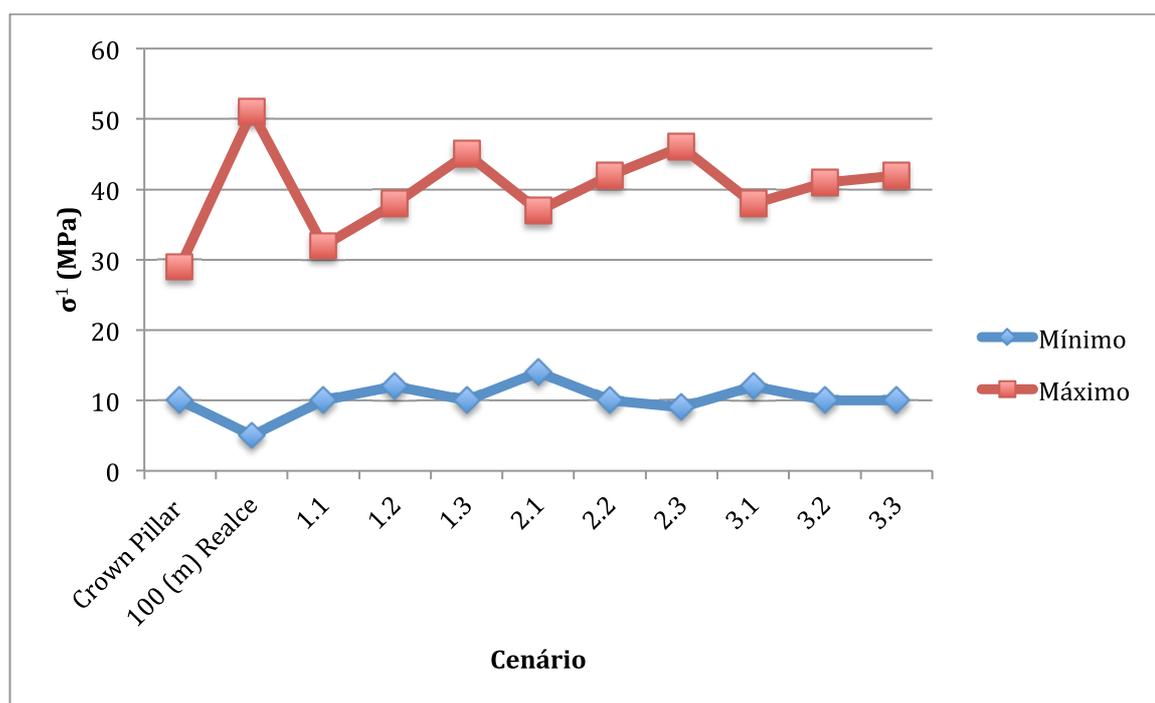
5.4 Análise de Dados

Os dados levantados pelo modelamento matemático dos cenários estão apresentados na Tabela 15 que possui os valores mínimos e máximos de σ_1 e σ_3 , assim como o Fator de Segurança (FS) e as zonas no modelo onde o FS é < 1 .

A partir desses dados foram gerados gráficos para comparar os valores mínimos e máximos de σ_1 (Figura 49) e σ_3 (Figura 50). Os cenários 1.3 e 2.3 apresentaram altos valores de σ_1 e os cenários 2.1 e 2.3 apresentaram os menores valores de σ_3 . O cenário 1.3, que é o cenário no qual a escavação iniciava-se de cima para baixo com um realce de 75 metros de altura, também apresentou alto valor de σ_1 . Isso se deve ao fato de que com esta dimensão a zona de influência da escavação gerada e da escavação do realce 2 provavelmente se interceptaram. Os cenários com o início 2 representam escavação que iniciaram-se de baixo para cima, uma situação na qual a escavação é influenciada pelo realce 2 e por isso é o cenário mais crítico de operações. O σ_3 apresentou-se mais crítico para os cenários 2.1, 2.2 e 2.3 como previsto. O cenário 3.2 apresentou-se ótimo diante dos outros cenários analisados já que mantém uma relação de dimensão do realce e estabilidade considerável. Para este cenário o FS afetou apenas a cava a céu aberto, o maciço rochoso em volta da escavação mostrou-se competente diante das tensões nele induzidas.

Tabela 15 - Dados de cada cenário.

Cenários	σ_1	σ_3	FS <1	Zonas FS < 1
Crown Pillar	10 a 29 MPa	0 a 12 MPa	Não	
100 (m) Realce	5 a 51 MPa	-3,6 a 9 MPa.	Sim	Footwall, Hangwall e Lateral da escavação
1.1	10 a 32 MPa	-0,6 a 13 MPa	Sim	Hangwall
1.2	12 a 38 Mpa	-1 a 13 MPa	Sim	Footwall e Hangwall
1.3	10 a 45 MPa	-0,6 a 10 MPa	Sim	Hangwall
2.1	14 a 37 MPa	-2,5 a 19 MPa	Sim	Footwall e Cava
2.2	10 a 42 MPa	-3 a 13 MPa	Sim	Footwall e Cava
2.3	9 a 46 MPa	-3,5 a 12 MPa	Sim	Footwall e Cava
3.1	12 a 38 MPa	-1 a 13 MPa	Sim	Footwall e Hangwall
3.2	10 a 41 MPa	0 a 13 Mpa	Sim	Cava
3.3	10 a 42 MPa	-3 a 13 MPa	Sim	Footwall e Cava

Figura 49 – Análise do σ_1 para todos os cenários.

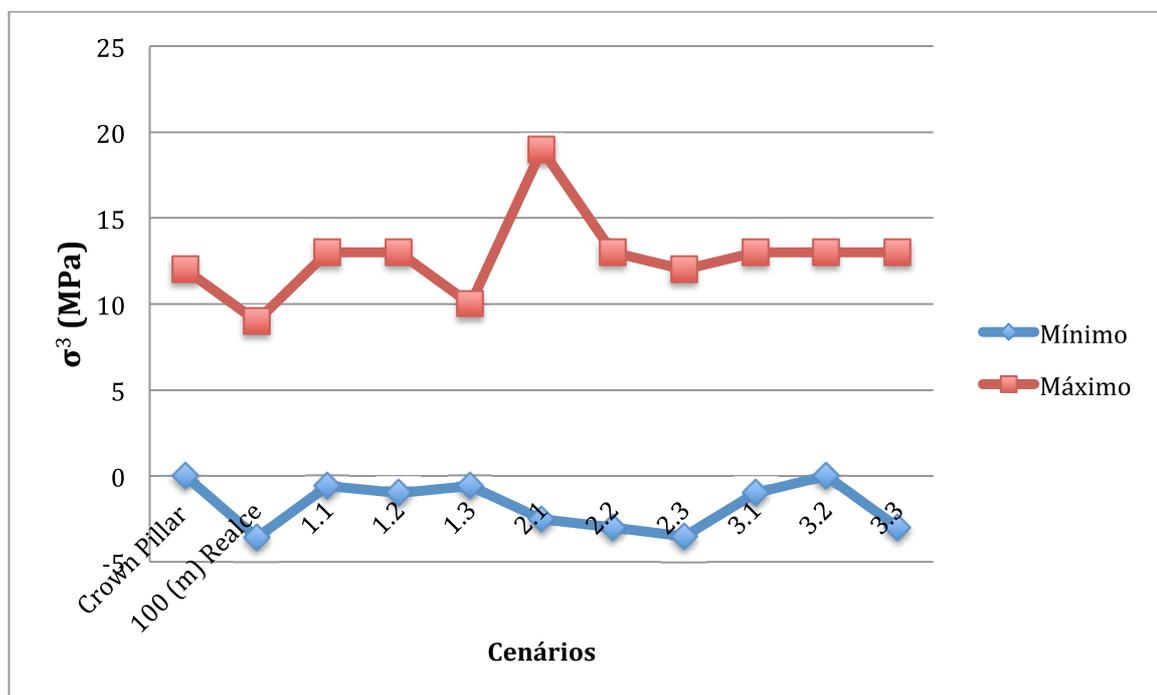


Figura 50 - Análise do σ_3 para todos os cenários.

6 CONCLUSÕES

As escavações subterrâneas são um desafio para os engenheiros. Para analisar um maciço rochoso, deve-se levar em conta as diversas características da rocha como sua heterogeneidade, anisotropia e zonas de tensão. Diante de tantas variáveis são utilizados métodos empíricos e numéricos para essas análises. Este trabalho utilizou o modelamento matemático baseando no Método dos Elementos Finitos através do Software RS² RocScience.

A problemática levantada neste trabalho foi o dimensionamento de um realce escavado no Crown Pillar de uma mina, a qual utiliza o método de realces em subníveis (Sublevel Open Stopping). Como definido anteriormente, a espessura do Crown Pillar está diretamente relacionada à sua estabilidade. Diante dos nove cenários analisados o cenário ótimo foi o cenário 3.2 no qual o realce foi dimensionado em 50 metros de altura e está localizado na posição intermediária entre a cava e ao segundo realce. Este cenário apresentou o σ_1 de 10 a 41 MPa. Não foram constatadas zonas de tração no entorno e próximo a escavação, o σ_3 encontrado variou de 0 a 13 MPa. E por fim, o maciço rochoso apresentou-se competente nessa configuração já que o FS apresentou apenas valores maiores que 1 no entorno da escavação.

REFERÊNCIAS

ATLAS COPCO ROCKET BOOMER L2C. **Toreuse: Machinery, Equipment and Tools**. Disponível em: < <http://www.toreuse.com>> . Acesso em 15 de Maio de 2017.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. **Engineering Classification of Rock Masses for the design of Tunnel Support**. *Rock Mechanics*, v. 6, n. 4, pp. 189- 236, 1974.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock Mechanics for Underground Engineering**, Londres, 2004.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering Classification of Jointed Rock Masses**. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*, v. 15, n. 12, pp. 335 – 344, 1973.

CHARBEL, P. A.; CARVAJAL, H. E. M.; FARIAS, M. M.; ASSIS, A. P. **Caracterização Geológico-Geotécnica da Mina Subterrânea de Vazante**. *Anais: Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR*, Belo Horizonte, 2016.

DEERE, D.U. **Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes**. *Rock mechanics and Engineering Geology*, v. 1, n. 1. Vienna, 1963.

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

HARTMAN, L. H.; MUTMANSKY, M. J. **Introductory Mining Engineering**. John Wiley and Sons, 2002.

HOEK, E.; BROWN, E.T. **Underground Excavation in Rock**. Institution of Mining and Metallurgy. Londres, 1980.

HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. L. **Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Cases Studies**. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME). Colorado, 2001.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M. **Open Pit Mine: Planing & Design**, 2. ed. London: Taylor & Francis, 2006.

IBRAHIMBEGOVIC, A. **Nonlinear Solid Mechanics**. London: Springer, 2009.

LI, X.; LI, D.; LIU, Z.; ZHAO, G.; WANG, W. **Determination of the Minimum Thickness of Crown Pillar for Safe Exploitation of a Subsea Gold Mine based on Numerical Modeling**. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. China, v. 57, pp. 42 – 56, 2013.

LUCIAN, C.; WANGWE, E. M. **The Usefulness of Rock Quality Designation (RQD) in Determining Strength of the Rock**. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, v. 2, pp. 36-40, 2013.

MINE AUTOMATION CLEARS GIANT HURDLE. **Mining Technology**. Disponível em: <<http://www.mining-technology.com>> . Acesso em 15 de Maio de 2017.

NIKOLIC, M.; ROJE-BONACCI, T.; IBRAHIMBEGOVIC, A. **Overview of the Numerical Methods for the Modelling of Rock Mechanics Problems**. Pregled numeričkih metoda za modeliranje u mehanici stijena, pp. 627-637, 2016.

NOGUEIRA, C. **Notas de Aula: Método dos Elementos Finitos Aplicados à Engenharia de Minas**, 2014.

OKUBO, S.; YAMATOMI, J. **Underground Mining Methods and Equipment**. Encyclopedia of Life Systems (EOLSS), v. 2, 2002. Disponível em: <<http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-37-06-02.pdf>> . Acesso em 01 de Novembro de 2016.

OLIVEIRA, M. M. **Dimensionamento Empírico de Realce em Sublevel Stopping**. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/CMBC-8V7GV3/disserta__o_michel.pdf?sequence=1> . Acesso em 10 de Outubro de 2016.

SINGH, B.; GOEL, R.K. **Rock mass classification. A Practical Approach in Civil Engineering**. Oxford, UK: Elsevier, 1999.

TAVAKOLI, M. **Underground Metal Mine Crown Pillar Stability Analysis**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Engenharia de Minas, Universidade de Wollongong. Austrália, 1994.

YARDIMCI, A. G.; TUTLUOGLU, L.; KARPUZ, C. **Crown Pillar Optimization for Surface to Underground Mine Transition in Erzincan/Bizmisen Iron Mine**. American Rock Mechanics Association – ARMA, 2016.