

**ANA PAULA SATUDI**

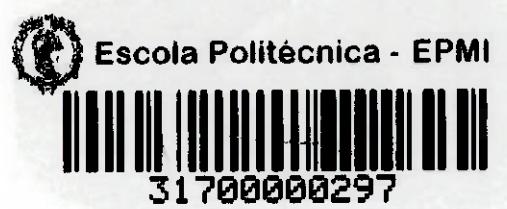
**ANÁLISE DE TENSÕES EM DIFERENTES ARRANJOS GEOMÉTRICOS PARA  
LAVRA EM PILAR E SALÃO**

**São Paulo  
2018**

TF-2018  
Sa 84a  
Sefno 2928572

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

H20/81



Catalogação-na-publicação

Satudi, Ana Paula

ANÁLISE DE TENSÕES EM DIFERENTES ARRANJOS GEOMÉTRICOS  
PARA LAVRA EM PILAR E SALÃO / A. P. Satudi -- São Paulo, 2018.  
41 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. Lavra Subterrânea I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

TF-2018  
Sa 84a  
Sefaz 2928572

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

H20/81



Escola Politécnica - EPMI



31700000297

Catalogação-na-publicação

Satudi, Ana Paula

ANÁLISE DE TENSÕES EM DIFERENTES ARRANJOS GEOMÉTRICOS  
PARA LAVRA EM PILAR E SALÃO / A. P. Satudi -- São Paulo, 2018.  
41 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. Lavra Subterrânea I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais pelo carinho e  
apoio incansável.*

## **RESUMO**

O método de lavra pilar e salão é utilizado em minas com características geológicas favoráveis. Porém, para o dimensionamento das galerias e pilares, e consequentemente da taxa de recuperação daquela operação, ainda são muito utilizados métodos empíricos mais simplificados, que tendem a ser bastante conservadores para garantir a segurança do empreendimento. Com o avanço dos microcomputadores e suas capacidades de processamento, os métodos numéricos se tornaram uma alternativa aos métodos tradicionais, com modelos matemáticos que aproximam o comportamento do maciço. Esses métodos podem ser utilizados tanto para verificar os modelos desenvolvidos, como monitorar a mina em atividade e uma análise retrospectiva ao fim das operações. Neste trabalho, para que a análise teórica esteja mais próxima da realidade, são utilizados parâmetros relacionados a mina de Urucum de propriedade da VALE. Neste trabalho são avaliadas tensões de pilares com 5,75 m x 5,75 m x 2,4 m e galerias de 4 m, e a viabilidade de aumentar a porcentagem das taxas de recuperação e diminuir a diluição da produção. É claro que há outros critérios para serem avaliados além da tensão, como fraturamento da rocha encaixante, ângulo de atrito, coesão, resistência a compressão da rocha intacta e resistência a tração dependendo do critério de ruptura utilizado. Porém, as a modelagem das tensões são os passos iniciais para a implantação de projeto.

## **ABSTRACT**

The room and pillar mining method is used in mines with favorable geological characteristics. However, for the sizing of rooms and pillars, and consequently the recovery rate of that operation, more simplified empirical methods are still used, which tend to be quite conservative to guarantee the security of the enterprise. With the advancement of microcomputers and their processing capacities, numerical methods have become an alternative to traditional methods, with mathematical models that approximate the behavior of the rock mass. These methods can be used both to verify the models developed, such as for monitoring the active mine and a retrospective analysis at the end of operations. In this paper, for an accurate theoretical analysis, parameters related to the Urucum mine owned by VALE are used. The paper evaluates pillar tensions with 5.75m x 5.75m x 2.4m and 4m galleries, if they were feasible, would increase recovery rates and decrease the dilution of production. Of course, there are other criteria to be evaluated in addition to stress, such as embedding rock fracture, friction angle, cohesion, compressive strength of the intact rock and tensile strength depending on the breaking criterion used. However, stress models are the initial steps for project implementation.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	6
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	7
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	7
3.1. MECÂNICA DE ROCHAS: DEFINIÇÃO, OBJETIVOS E APLICAÇÕES....	7
3.2. LAVRA SUBTERRÂNEA: MÉTODOS E SUA SELEÇÃO .....	8
3.3. TENSÕES ATUANTES NO INTERIOR DA ROCHA.....	10
3.4. MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES .....	12
3.5. MÉTODO DE LAVRA SUBTERRÂNEA: CÂMARAS E PILARES .....	14
3.6. DIMENSIONAMENTO DE PILARES E PILARES BARREIRA.....	15
<b>4. TRABALHO DESENVOLVIDO .....</b>	16
4.1. MODELO DO MÉTODO DE LAVRA POR CÂMARAS E PILARES. ....	16
4.4.1. Caso 1 - 19 Galerias e 20 Pilares.....	18
4.4.2. Caso 2 - 18 Galerias, 18 Pilares e 1 Pilar Barreira .....	22
4.4.3. Caso 3 - 16 Galerias, 16 Pilares e 1 Pilar Barreira .....	27
<b>5. DISCUSSÃO .....</b>	32
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	33
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	34
<b>8. APÊNDICES .....</b>	36
APÊNDICE A. Caso 1 - 19 Galerias e 20 Pilares .....	36
APÊNDICE B. Caso 2 - 18 Galerias, 18 Pilares e 1 Pilar Barreira .....	38
APÊNDICE C. Caso 3 - 16 Galerias, 16 Pilares e 1 Pilar Barreira.....	41

## 1. INTRODUÇÃO

Esse trabalho de formatura trata-se de uma análise das tensões principais, em diferentes arranjos geométricos, de um pilar que utiliza o método de lavra pilar e salão.

Tem como objetivo utilizar modelos computacionais para o estudo e a simulação de uma operação de lavra subterrânea visando à análise das tensões redistribuídas na rocha resultante.

Os modelos desenvolvidos possibilitarão uma melhor compreensão dos mecanismos de instabilização das obras de mineração, uma vez que consideram as tensões em diferentes planos.

## 2. METODOLOGIA

Como metodologia serão seguidos os seguintes passos:

- Construção do modelo no programa correspondente, especificando a geometria e a disposição das escavações, bem como, os parâmetros relativos ao comportamento mecânico das rochas e as malhas desejadas;
- Geração dos resultados relativos à distribuição das tensões principais e deformações, resultantes da execução das escavações;
- Realização das análises e comparações convenientes, verificando a condição de estabilidade das escavações;
- Redação do relatório a partir dos resultados e sua análise.

No desenvolvimento do relatório serão usados modelos seguindo o Método dos Elementos Finitos e do Método dos Elementos de Contorno para aplicações específicas no projeto de obras em rocha, bem como, Métodos Estatísticos para avaliar a variabilidade natural.

Os parâmetros relativos ao comportamento mecânico das rochas utilizados no primeiro estudo do painel lavrado por câmaras e pilares correspondem aos da Mina de Urucum de propriedade da Vale S. A. localizada em Corumbá no estado do Mato Grosso do Sul.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. MECÂNICA DE ROCHAS: DEFINIÇÃO, OBJETIVOS E APLICAÇÕES**

Na mineração é de fundamental importância o conhecimento e o bom emprego da Mecânica de Rochas no estudo da estabilidade das escavações realizadas no processo de lavra. Este estudo visa garantir a segurança dos operadores e do maquinário envolvido, bem como, a continuidade da operação.

Definida inicialmente em 1964 pelo Comitê Nacional dos Estados Unidos de Mecânica de Rochas:

"Mecânica de Rochas é a ciência teórica e aplicada dedicada ao estudo do comportamento mecânico das rochas e dos maciços rochosos; é o ramo da mecânica que estuda as respostas das rochas e maciços rochosos aos campos de forças de seu ambiente físico" (BRADY e BROWN, 2005)

Seus estudos, entretanto, começaram muito antes, pois há registros de testes mecânicos com rochas datados de 1773 (BRADY e BROWN, 2005). Todavia o real desenvolvimento da Mecânica de Rochas foi impulsionado na década de 1960, pois até então esta era empregada prioritariamente na mineração, sendo depois aplicada na área de fundações, em função da relação que alguns problemas típicos das rochas estabelecidas com a Mecânica dos Solos. Hoje, a Mecânica de Rochas é largamente empregada na realização de obras em rocha, desde a abertura de túneis até a produção de petróleo.

A Mecânica de Rochas lida com a caracterização das rochas e dos maciços rochosos (meios essencialmente descontínuos, em função da presença das fraturas e heterogeneidades), bem como, com as metodologias empregadas no projeto e análise de obras de engenharia realizadas nestes.

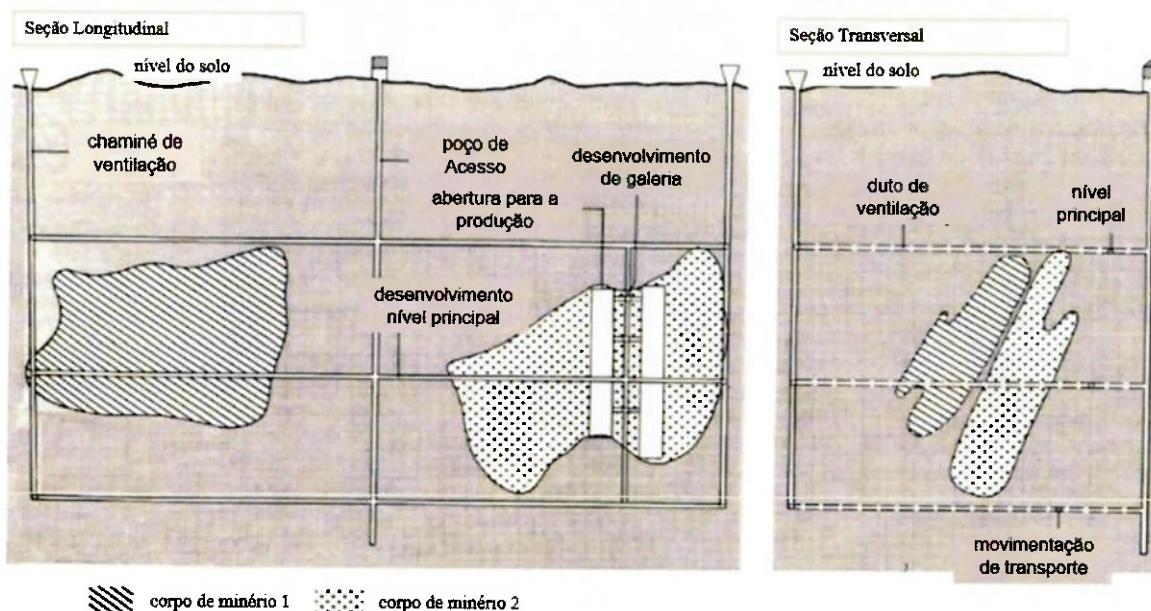
A Mecânica de Rochas fornece técnicas que visam garantir o bom desempenho das obras de engenharia realizadas em rocha, por meio do estudo do comportamento dos materiais rochosos através de testes em campo e laboratório, incorporando a influência de condições como temperatura e presença de água, aliado a um desenvolvimento contínuo que é apoiado na experiência acumulada a partir de obras prévias.

### 3.2. LAVRA SUBTERRÂNEA: MÉTODOS E SUA SELEÇÃO

A escolha do método de lavra mais adequado a uma jazida mineral está ligada diretamente a fatores técnicos como: formato geral da jazida, espessura e orientação do corpo de minério, profundidade, distribuição de teor, características mecânicas do maciço rochoso e tensões naturais atuantes (BRADY e BROWN, 2005).

Em função do método de lavra escolhido, a extração do minério em subterrâneo envolverá diferentes tipos de aberturas, que durante a atividade da mina exercerão funções específicas, como ilustrado na figura 1.

Figura 1 - Representação de uma mina com dois corpos de minério



Fonte: Adaptado de BRADY e BROWN (2005)

A execução destas escavações provoca distúrbios no maciço rochoso na forma da redistribuição das tensões e consequentes deformações, tanto nas proximidades do corpo de minério como a distâncias maiores, podendo chegar até a superfície. Esta redistribuição das tensões naturais do maciço pode causar graves problemas em relação à estabilidade da mina.

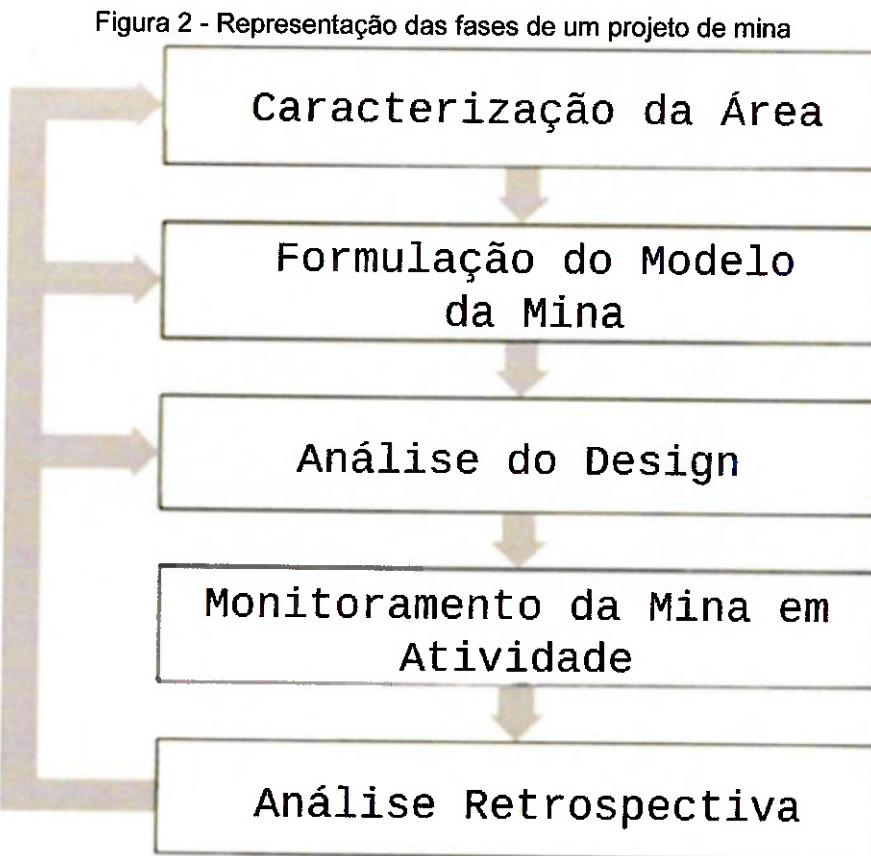
Desta forma, deve-se selecionar um método de lavra que confira estabilidade à mina de forma localizada e global, durante todo o seu período de atividade, assim como bom aproveitamento econômico de acordo com as características da jazida.

Existem dois tipos de estratégias básicas empregadas nos métodos de lavra, podendo caracterizá-los como: suportados, como por exemplo, no método de Câmaras e Pilares; e abatidos, como por exemplo, nos métodos de Desabamento por Blocos e de Frentes Longas. Estes atuam de modos diferentes nos maciços rochosos, com relação à concentração de energia e sua redistribuição durante a operação da mina.

Nos métodos suportados ocorre aumento da energia de deformação elástica nos elementos de suporte e arredores, e para garantir a segurança deve-se assegurar que não haverá liberação repentina de tal energia acumulada. Nos métodos abatidos, para garantir a segurança, previne-se um acúmulo da energia de deformação elástica por meio da dissipação contínua da energia existente no maciço.

Além destes problemas, ocorrências como escorregamento de blocos, movimentação de cunhas e rupturas localizadas no contorno de escavações podem estar sempre presentes.

A escolha do método de lavra mais adequado, sob o ponto de vista da Mecânica de Rochas, deve seguir uma metodologia como a ilustrada na figura 2. Cinco etapas podem ser distinguidas: caracterização da área onde são coletados parâmetros geomecânicos do campo; formulação de um modelo para a mina onde os parâmetros estabelecidos na caracterização são avaliados e então propostos projetos para a mina; análise por métodos matemáticos e computacionais para avaliar os projetos formulados, bem como, diferentes lay-outs e estratégias de lavra; monitoramento, durante a operação deve ser avaliada a resposta do maciço as escavações realizadas, e retro análise. Estas devem ser aplicadas em uma articulação lógica e a ausência de qualquer uma delas pode comprometer a operação como um todo (BRADY e BROWN, 2005).



Fonte: Adaptado de BRADY e BROWN (2005)

Duas razões principais podem ser apontadas para a necessidade da retroalimentação das informações. Em primeiro lugar, a fase de caracterização de campo nunca gera dados suficientemente confiáveis para que seja desenvolvido um planejamento único e fixo para toda vida útil da mina. Em segundo lugar, a lavra de minas é por si próprio um processo evolutivo no qual as soluções de engenharia são formuladas no sentido de responder às respostas observadas da estrutura da mina segundo condições operacionais reais. Por estas razões, o processo pode não se dar de forma linear. Por vezes, algumas das atividades devem ser executadas em paralelo (BRADY e BROWN, 2005).

### 3.3. TENSÕES ATUANTES NO INTERIOR DA ROCHA

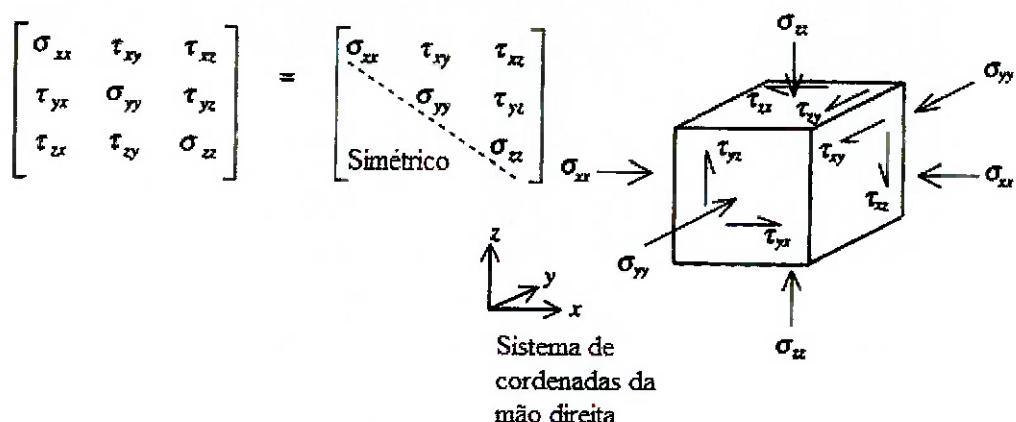
Segundo Hudson e Harrison (2000) tensão para a Mecânica pode ser entendida como a resultante dos esforços que atuam sobre um ponto material no interior de um corpo ou de um meio contínuo.

Neste sentido, possui algumas características importantes:

- A tensão atuante pode variar de ponto a ponto no interior do corpo;
- A tensão não está associada a uma direção, esta atua em todas as direções;
- A tensão pode ser decomposta em componentes que atuam em direções escolhidas de forma conveniente;
- Força é uma grandeza vetorial, mas a tensão é uma grandeza tensorial.

A tensão em um ponto interior ao maciço rochoso pode ser decomposta em componentes normais e cisalhantes atuando sobre as faces de um elemento cúbico infinitesimal representando um ponto no interior da rocha, como mostra a figura 3.

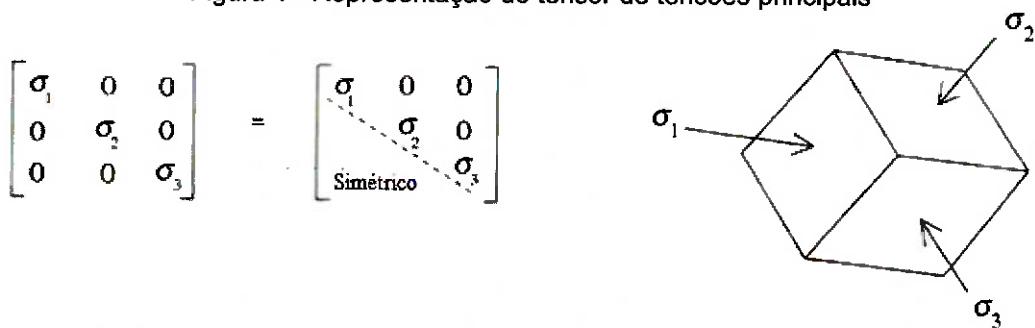
Figura 3 - Representação das componentes de tensões atuantes sobre um ponto material



Fonte: Adaptado de HUDSON e HARRISON (2000)

O sistema de coordenadas xyz escolhido é arbitrário, não influenciando a natureza física da tensão atuante. Demonstra-se que é possível escolher certo sistema de coordenadas onde as componentes cisalhantes são nulas e as componentes de tensão normais são então chamadas de tensões principais (HUDSON e HARRISON, 2000).

Figura 4 - Representação do tensor de tensões principais



Fonte: Adaptado de HUDSON e HARRISON (2000)

Tensões *in situ* são as tensões naturais atuantes no maciço rochoso. São identificadas com base nas características geológicas do maciço ou a partir de testes realizados em campo. São causadas por três principais fatores: o peso da rocha (principal responsável pelo componente vertical da tensão), esforços tectônicos (principais responsáveis por altas tensões horizontais), e por fim, esforços relacionados ao processo de gênese do maciço rochoso.

Todas contribuem para o estado de tensões *in situ*, mesmo que outros fatores possam alterá-lo, como erosão e fraturamento. Uma escavação altera o estado de tensões naturais do maciço rochoso, pois cria um vazio que causa a redistribuição das tensões.

As tensões são redistribuídas de acordo com a geometria das escavações, o que por vezes pode causar a ruptura da rocha a partir da concentração das tensões em certas regiões. Para identificar tais ocorrências são utilizados os Critérios de Ruptura, como, por exemplo, os critérios de Mohr-Coulomb e Hoek-Brown (HUDSON e HARRISON, 2000).

### 3.4. MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

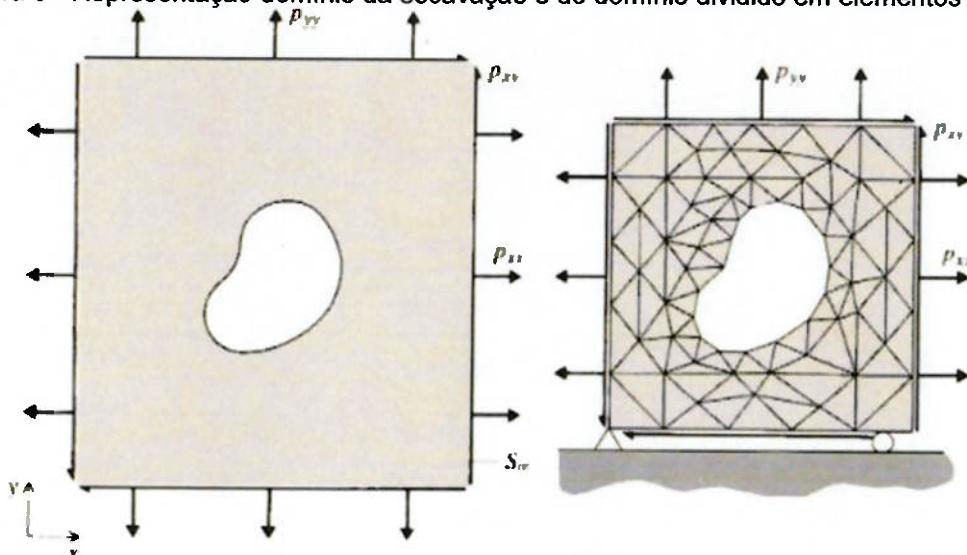
Diferentes metodologias de projeto podem ser utilizadas no planejamento das escavações a serem realizadas nos distintos métodos de lavra. Estas envolvem a análise das tensões e deformações atuantes no contorno das escavações e se baseiam em conceitos matemáticos, físicos e empíricos.

Os métodos mais utilizados são os analíticos, de equilíbrio limite, empíricos, analogias e modelos físicos. Cada um destes possui aplicabilidade diferente relacionada ao nível de detalhe que se deseja para a análise e às informações requeridas para a sua aplicação.

Os atuais recursos computacionais permitem que no projeto de uma obra em rocha sejam empregados modelos matemáticos que simulem comportamentos complexos dos maciços rochosos, segundo abordagens do tipo Equilíbrio Limite e Analítica aproximada numericamente. Desta forma, com o desenvolvimento dos microcomputadores, bem como, da própria Mecânica de Rochas, os Métodos Numéricos têm se tornado uma forma eficaz de representar problemas complexos e testar múltiplas alternativas de projeto.

Os Métodos Numéricos são baseados em soluções aproximadas das equações diferenciais que descrevem o comportamento do maciço rochoso. Tem como base a análise de um meio contínuo ou descontínuo, definido no entorno da escavação em rocha, subdividido em elementos discretos que interagem (BRADY e BROWN, 2005). É utilizado para analisar a distribuição de tensões e deformações causados pela escavação em um dado domínio.

Figura 5 - Representação domínio da escavação e do domínio dividido em elementos finitos



Fonte: Adaptado de BRADY e BROWN (2005)

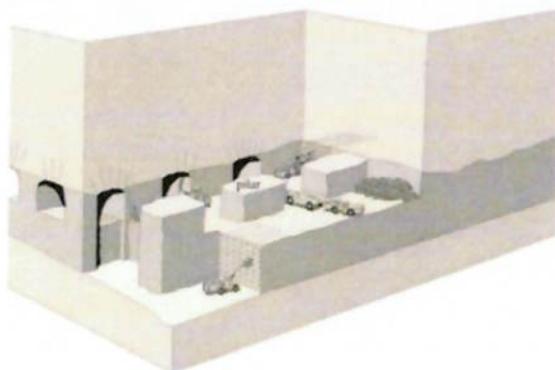
No caso do Método dos Elementos Finitos, tais resultados são obtidos por meio de um conjunto de funções que definem o deslocamento de qualquer ponto pertencente ao domínio dos elementos finitos, em relação aos deslocamentos dos nós. A partir do campo de deslocamentos gerado, são realizados os vários passos do processo de solução.

A análise realizada por meio de Modelos Numéricos é uma ferramenta de projeto de grande importância, e em um programa de Mecânica de Rochas, deve envolver a caracterização da área, a formulação do modelo da mina, a verificação do modelo desenvolvido, o monitoramento da mina em atividade e a análise retrospectiva ao fim das operações.

### 3.5. MÉTODO DE LAVRA SUBTERRÂNEA: CÂMARAS E PILARES

Dentre as várias alternativas de métodos de lavra, destaca-se como um dos mais comuns aplicados à lavra de corpos tabulares de minério, o método de Câmaras e Pilares. Neste método, a partir da escavação do minério, o teto é mantido estável sustentado por pilares, como ilustrado na figura 6.

Figura 6 - Representação de uma mina que utilizada câmaras e pilares



Fonte: Adaptado de BRADY e BROWN (2005)

O método fornece produções de médias a grandes, pois a lavra é realizada tipicamente em um ciclo de operações: perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Podendo ainda haver operações como o saneamento do teto.

Para que o método seja aplicado, o corpo de minério deve ser tabular ou estratificado e com baixa inclinação, com uma espessura mínima adequada aos equipamentos a serem empregados, considerável extensão em área e capaz de suportar a redistribuição das tensões ocasionadas pela escavação das câmaras.

Dentre as variantes do método estão: lavra com pilares não sistemáticos, frente plena com pilares contínuos, frente plena com pilares sistemáticos e frente plena com bancadas. Sua aplicabilidade varia com o formato dos corpos de minério e distribuição de teores, cada um com suas próprias restrições, sendo que a maioria das minas que utiliza o método de Câmaras e Pilares é lavrada com o uso de pilares sistemáticos.

O método de dimensionamento tradicional do método ainda é muito por uma abordagem empírica simplificada, tal abordagem tende a ser bastante conservativa e não incluir o conhecimento efetivo do comportamento geomecânico do maciço.

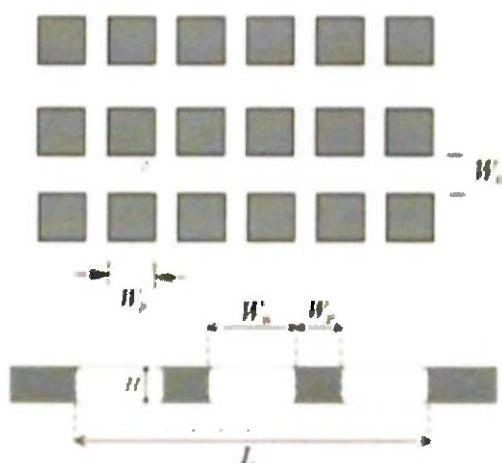
Assim, o uso de método computacionais que modelam as distribuições das tensões podem otimizar tais dimensionamentos, definindo as taxas de recuperação potenciais e geometrias admissíveis, mantendo sempre a segurança do empreendimento (BRADY e BROWN, 2005).

No Brasil, minas de pilar e salão estão presentes em operações de carvão no sul do país e de ferro e manganês no centro-oeste, como a mina de Urucum localizada em Corumbá-MS.

### 3.6. DIMENSIONAMENTO DE PILARES E PILARES BARREIRA

Geralmente, os pilares são regularmente espaçados apresentando seção circular ou retangular. No dimensionamento de um arranjo geométrico de uma pilares e salões é geralmente conduzido de forma que, primeiramente, são determinadas as dimensões dos vãos. Para dimensionar os pilares se leva em conta o carregamento total ou a tensão média atuante no pilar, uma estimativa das resistências do pilar em função de suas dimensões, forma e das propriedades geomecânicas do maciço, por fim, se considera um fator de segurança como critério de projeto. (FIGUERO e CURI, 2004)

Figura 7: Configuração geral de pilares uniformes e regularmente espaçados



Fonte: FIGUERO e CURI (2004)

Em uma primeira análise as tensões podem ser calculadas com base na teoria da área tributária com o uso de métodos analíticos como de viga sobre base elástica e o método de Coates ou métodos numéricos. Já a resistência dos pilares, em geral, é avaliada por meio de métodos empíricos (LOPEZ, 2017).

Os pilares estão presentes em todas as minas subterrâneas, podem ser pilares de proteção para garantir a segurança de instalações, pilares temporários que garantem suporte durante um certo período e pilares barreira que devem se manter estáveis durante toda a operação da mina. Especificamente, nas operações que usam o método de pilar e salão pilares barreira atuam para aliviar as concentrações de tensão nos demais pilares. Estes podem ser empregados com diferentes funções como isolar áreas da operação, evitando que acidentes se propaguem na operação tanto para falhas estruturais como possíveis inundações, e auxiliam a prevenir a subsidência do solo. (NEWMANN, 2017)

#### **4. TRABALHO DESENVOLVIDO**

##### **4.1. MODELO DO MÉTODO DE LAVRA POR CÂMARAS E PILARES.**

Os parâmetros característicos do comportamento mecânico da rocha e da encaixante referentes à Mina de Urucum de propriedade da Vale S. A. localizada em Corumbá no estado de Mato Grosso do Sul, estão detalhados na tabela 1.

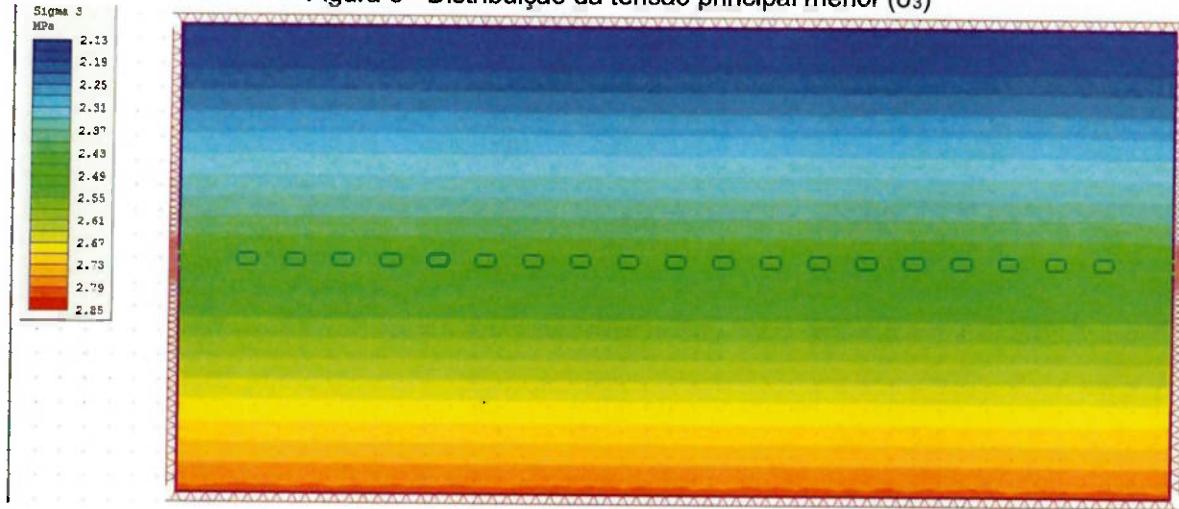
Tabela 1 - Propriedades mecânicas do maciço rochoso

PROPRIEDADE MECÂNICA	ENCAIXANTE	MINÉRIO
Peso Específico, $\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	0,032	0,037
Módulo de Elasticidade, E ( MPa)	17.500	35.000
Coeficiente de Poisson, $\nu$	0,18	0,25

O estudo concentra-se em uma área do maciço rochoso, onde a superfície do terreno está localizada a 350 m acima do topo da camada de minério.

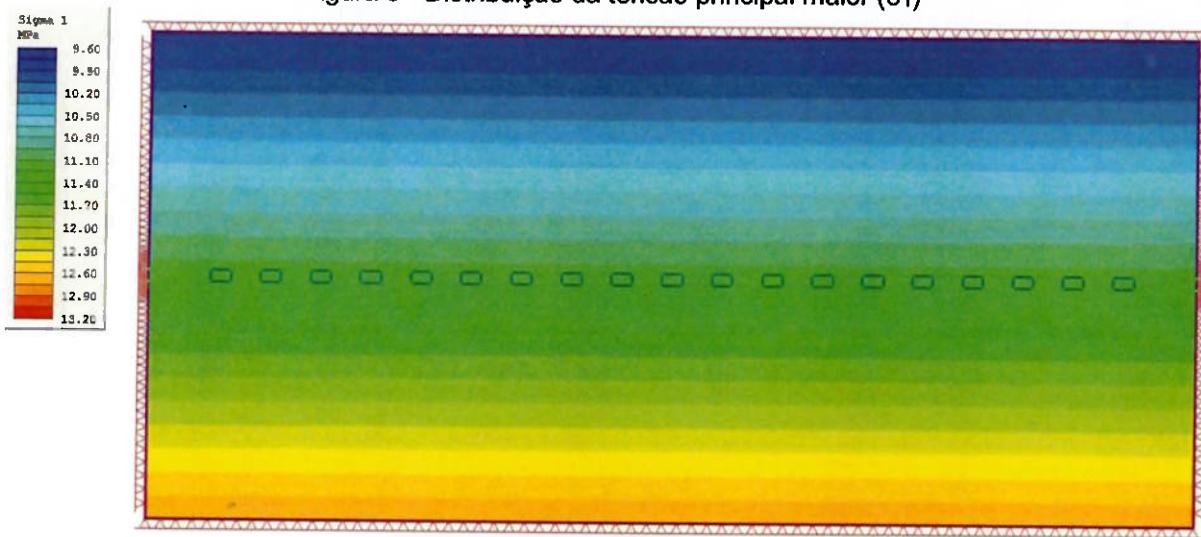
Antes da realização das escavações, as tensões principais maior e menor estão representadas nas figuras 8 e 9.

Figura 8 - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ )



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 9 - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ )



Fonte: Arquivo Pessoal

Observa-se que a tensão principal menor é cerca de 2,5 MPa na área a ser escavada, enquanto, a tensão principal maior é, aproximadamente, de 11 MPa.

A tensão vertical, devido ao peso próprio do maciço encaixante, é dada pela relação do peso específico do maciço com a profundidade:

$$\sigma_v = \gamma \times H$$

$$\sigma_v = 0,032 \times 350 = 11,2 \text{ MPa}$$

A maior componente da tensão principal maior é o peso da rocha encaixante.

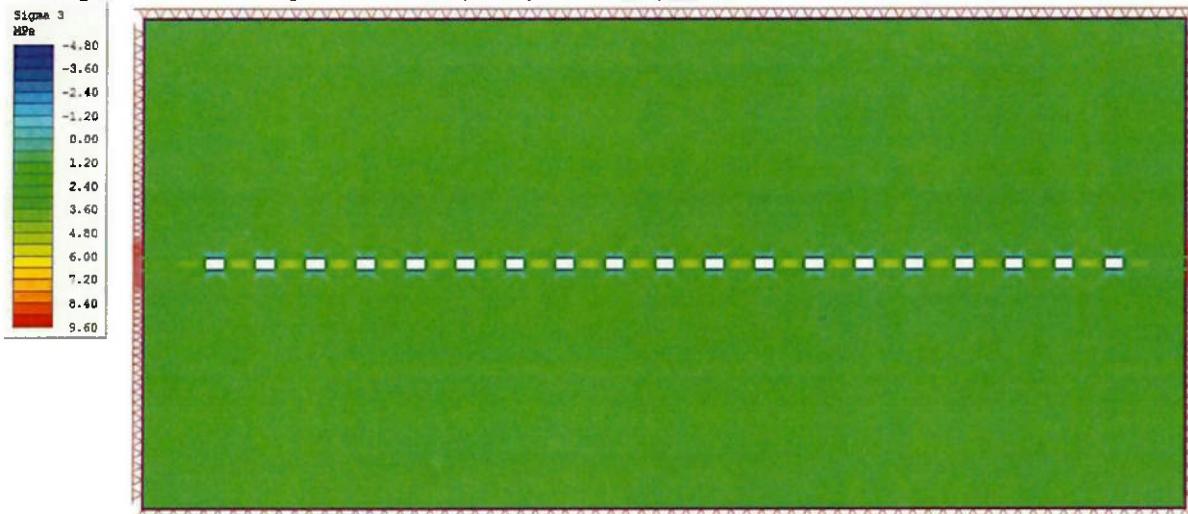
#### 4.4.1. Caso 1 - 19 Galerias e 20 Pilares

No caso 1 é analisada a lavra sequencial de 19 galerias, dando origem a 20 pilares, representando a evolução da lavra pelo método de Câmaras e Pilares. Cada galeria tem 4 m de largura e 2,4 m de altura; enquanto cada pilar tem 5,75 m de largura e 2,4 m de altura.

##### Tensão Principal Menor ( $\sigma_3$ )

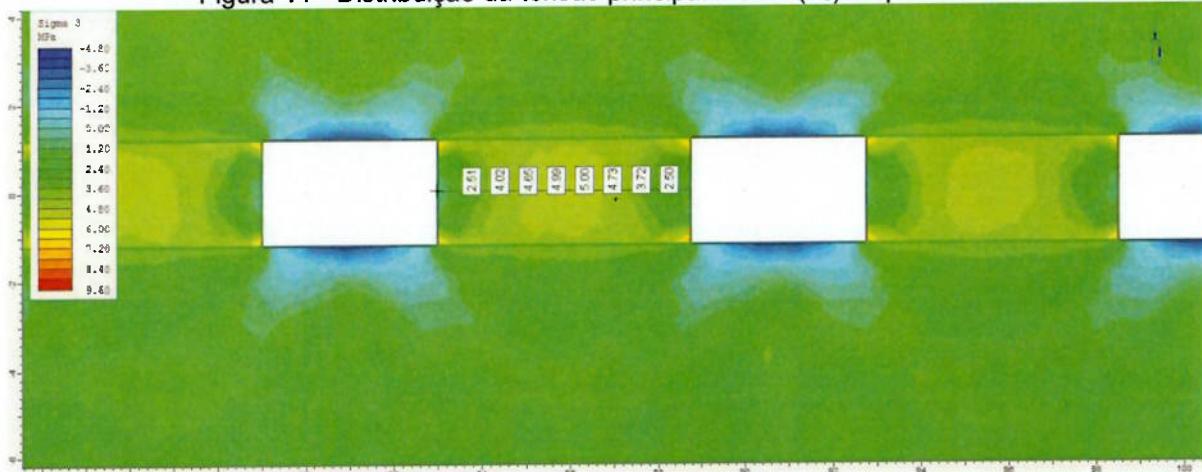
Ao fim da escavação das 18 galerias, a tensão principal menor assume valores entre -4,8 MPa e 9,6 MPa, como mostra a figura 10. A figura 11 mostra o detalhe da tensão principal menor no pilar central.

Figura 10 - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 11 - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) no pilar central

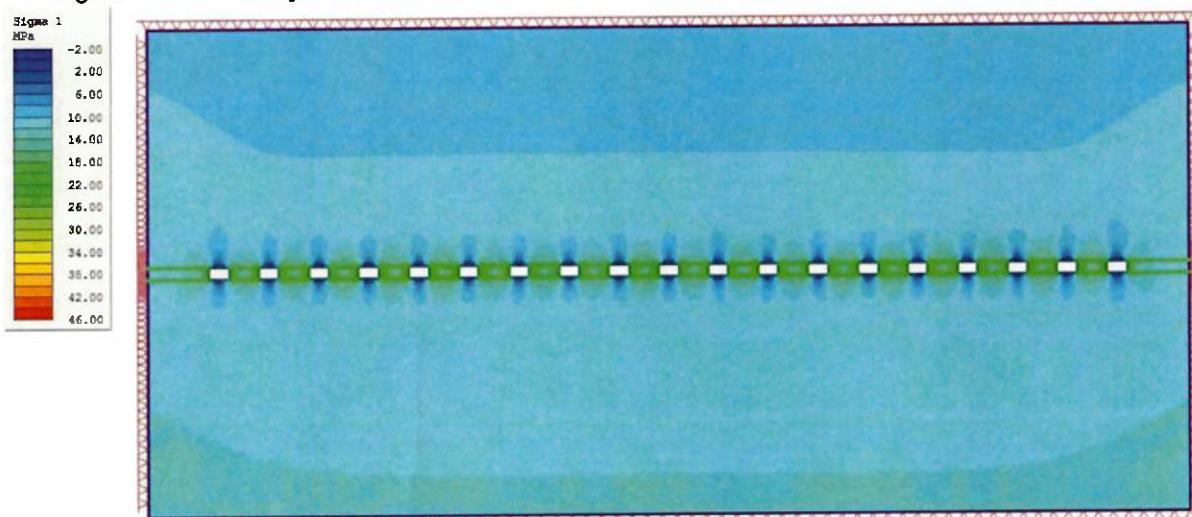


Fonte: Arquivo Pessoal

### Tensão Principal Maior ( $\sigma_1$ )

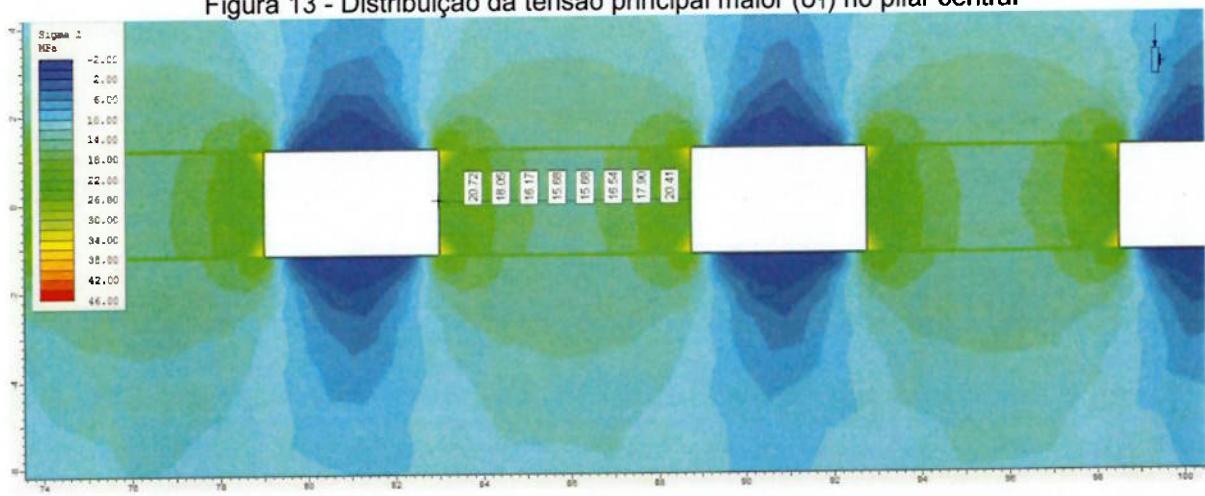
Ao fim da escavação das 18 galerias, a tensão principal menor está distribuída como mostra a figura 12. A figura 13 mostra o detalhe da tensão principal menor em no pilar central.

Figura 12 - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

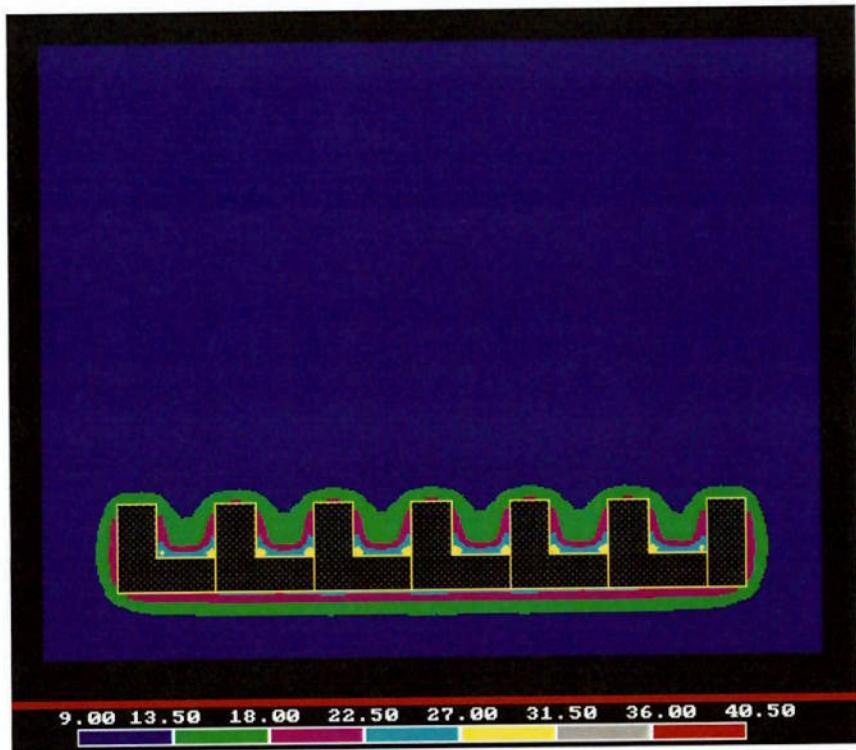
Figura 13 - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) no pilar central



Fonte: Arquivo Pessoal

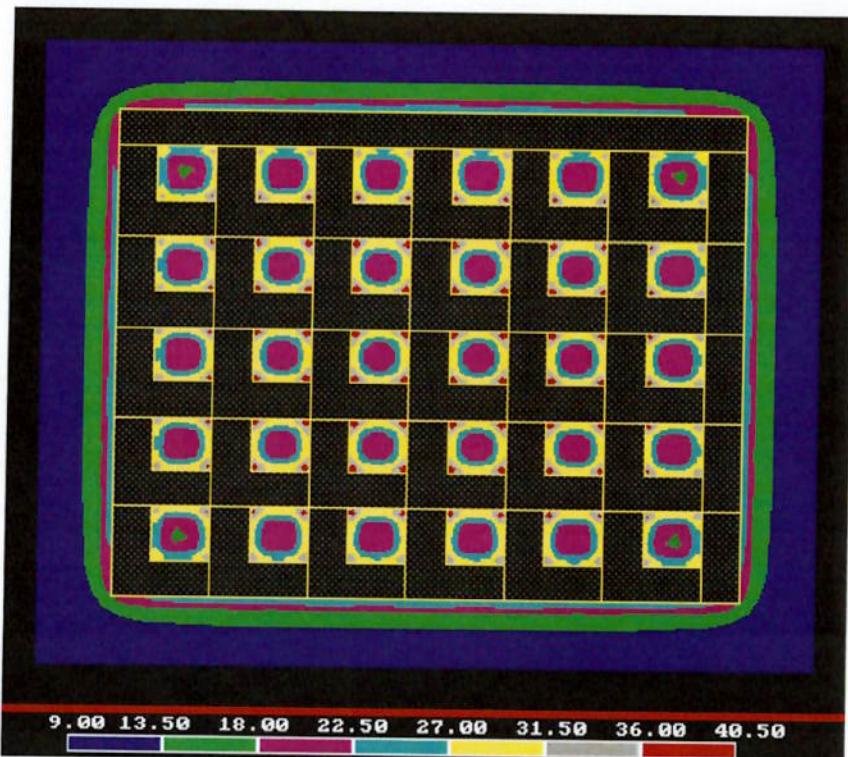
As figuras 14 e 15 representam a tensão vertical, que neste caso é a tensão principal maior vista em planta, redistribuída após a escavação, representando um zoom nos pilares e salões centrais da mina. Nos pilares a tensão vertical assume valores entre 16 e 40,5 MPa.

Figura 14 - Distribuição da tensão vertical



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 15 - Distribuição da tensão vertical

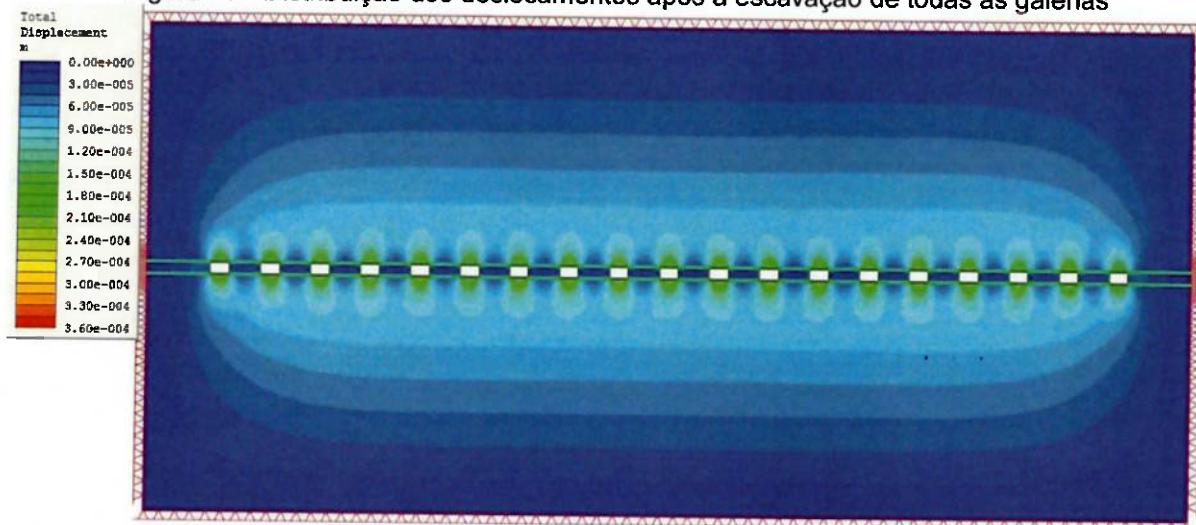


Fonte: Arquivo Pessoal

### Deslocamentos Totais

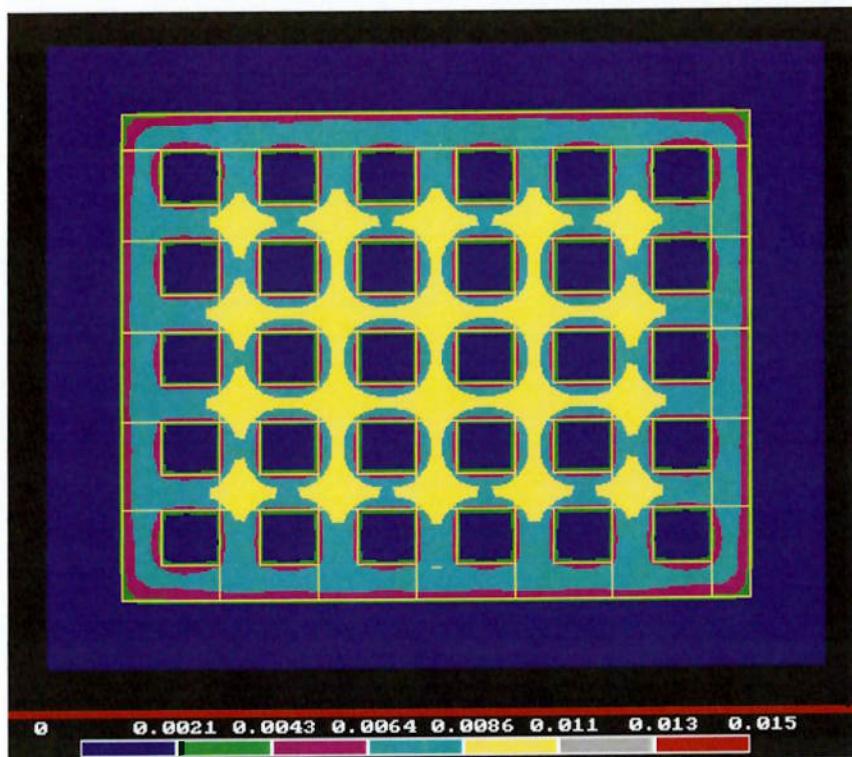
Após a escavação das galerias, são registrados deslocamentos totais entre 0,03 mm e 0,36 mm.

Figura 16 - Distribuição dos deslocamentos após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 17 – Vista superior dos deslocamentos após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

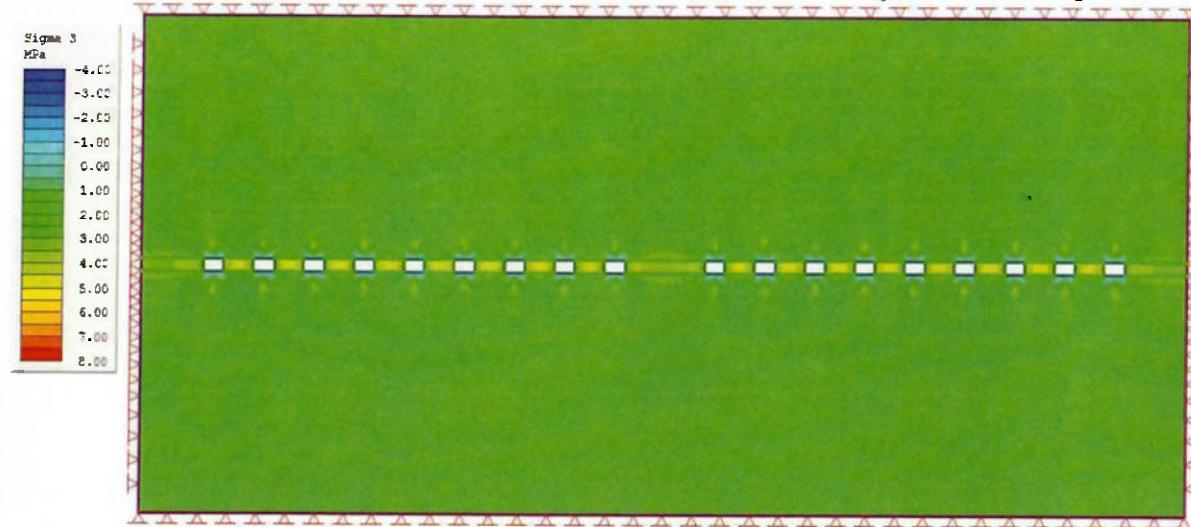
#### **4.4.2. Caso 2 - 18 Galerias, 18 Pilares e 1 Pilar Barreira**

No caso 2 é analisada a lavra sequencial de 18 galerias, dando origem a 18 pilares e 1 pilar barreira ao centro da região, representando a evolução da lavra pelo método de Câmaras e Pilares. Cada galeria tem 4 m de largura e 2,4 m de altura; também há 16 pilares de 5,75 m de largura e 2,4 m de altura e 1 pilar barreira de 15,5 m de largura e 2,4 m de altura.

##### Tensão Principal Menor ( $\sigma_3$ )

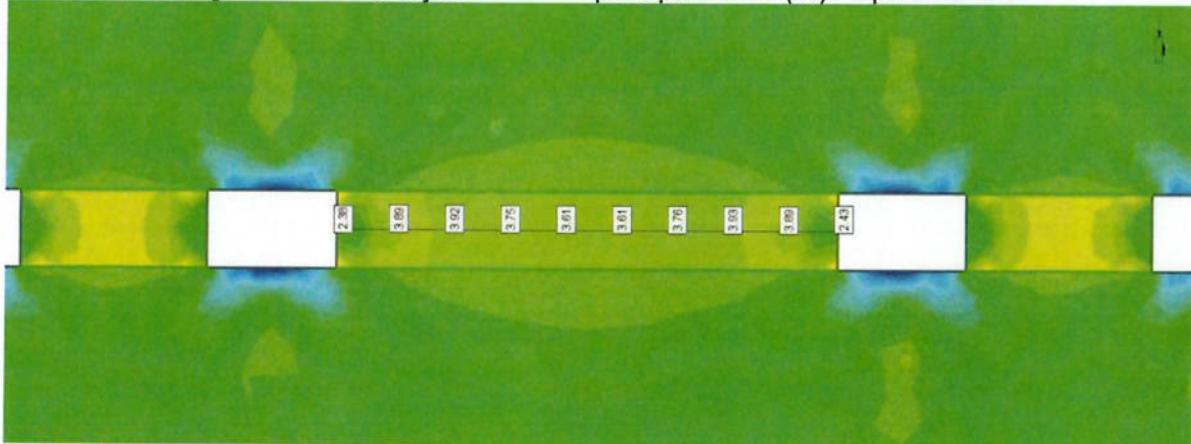
Ao fim da escavação das 18 galerias, a tensão principal menor está distribuída como mostra a figura 18. A figura 19 mostra o detalhe da tensão principal menor no pilar barreira.

Figura 18 - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 19 - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) no pilar barreira

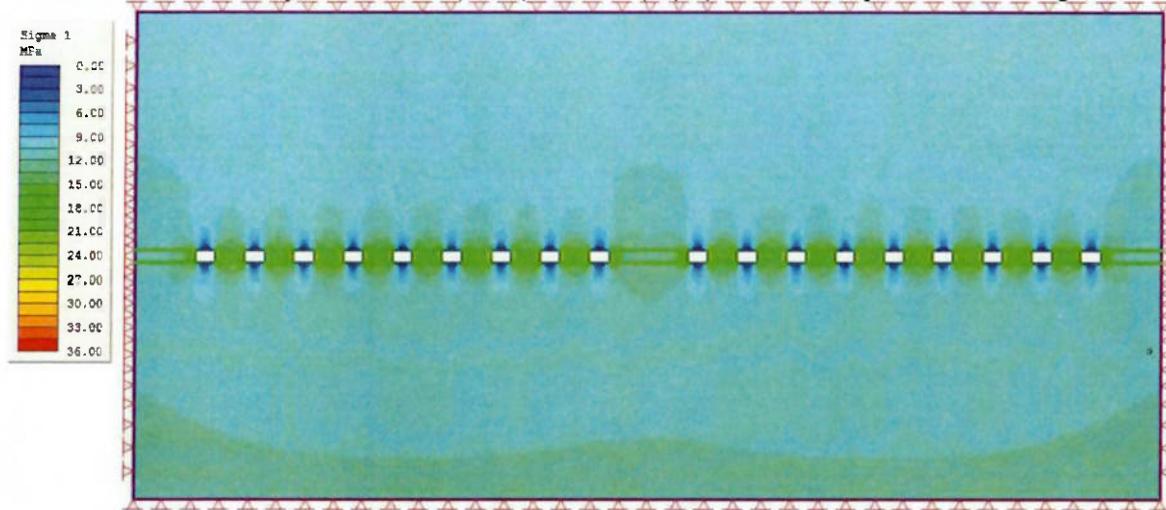


Fonte: Arquivo Pessoal

### Tensão Principal Maior ( $\sigma_1$ )

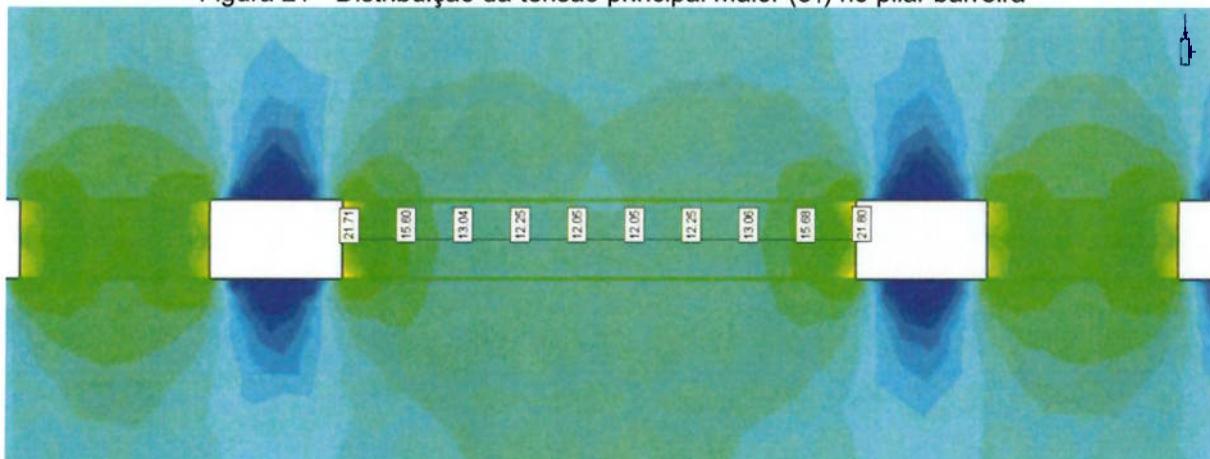
Ao fim da escavação das 18 galerias, a tensão principal maior está distribuída como mostra a figura 20. A figura 21 mostra o detalhe da tensão principal maior no pilar barreira.

Figura 20 - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

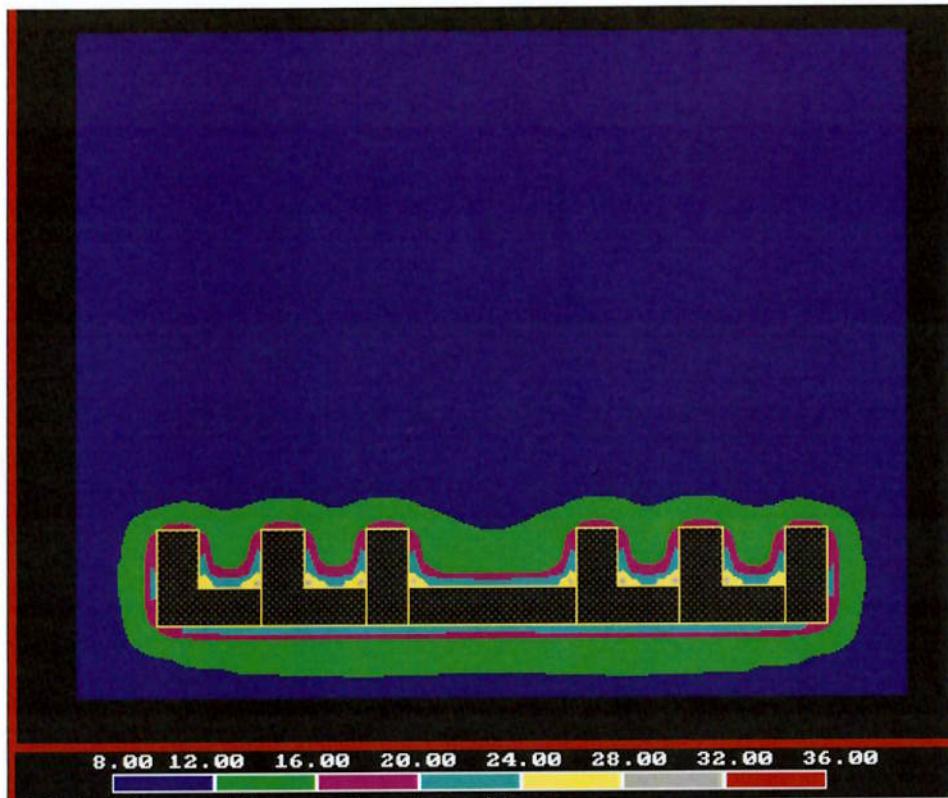
Figura 21 - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) no pilar barreira



Fonte: Arquivo Pessoal

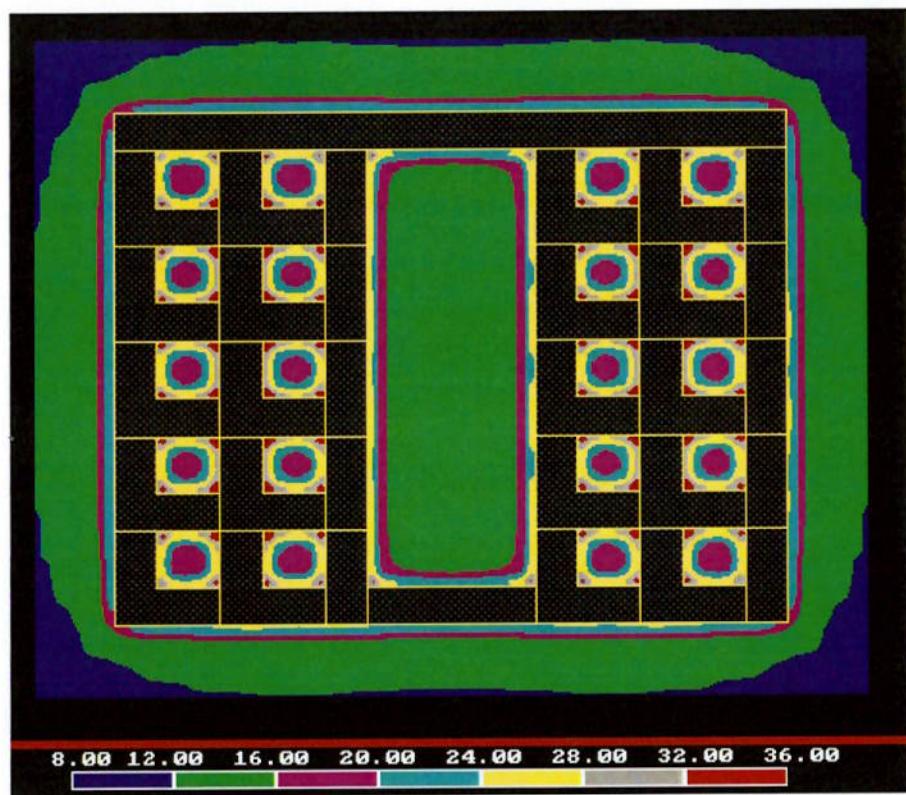
As figuras 22 e 23 representam a tensão principal maior vista em planta, redistribuída após a escavação, representando um zoom nos pilares e salões centrais da mina. Nos pilares a tensão vertical assume valores entre 9 e 40,5 MPa.

Figura 22 - Distribuição da tensão vertical



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 23 - Distribuição da tensão vertical

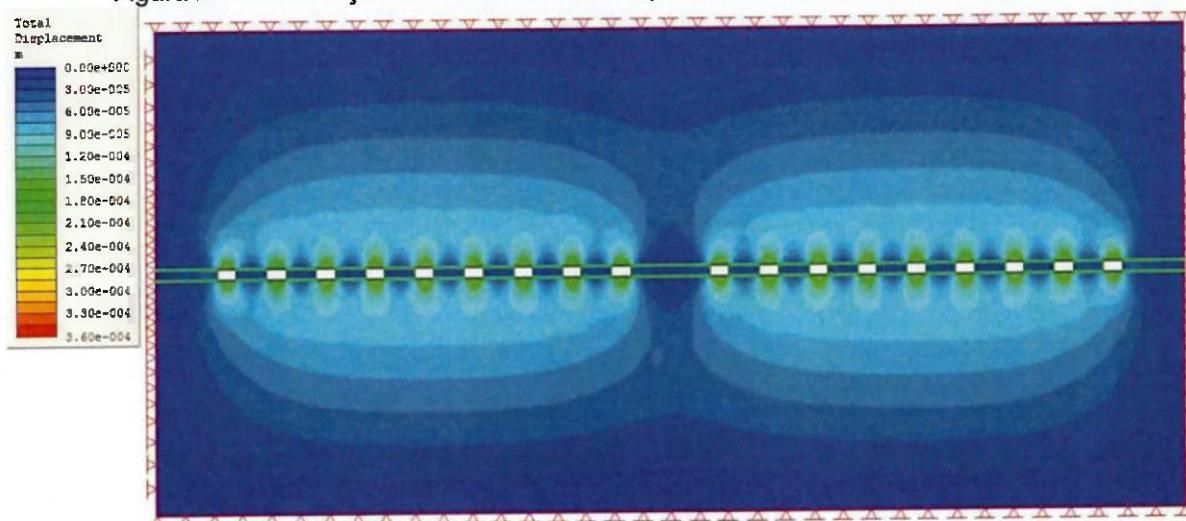


Fonte: Arquivo Pessoal

### Deslocamentos Totais

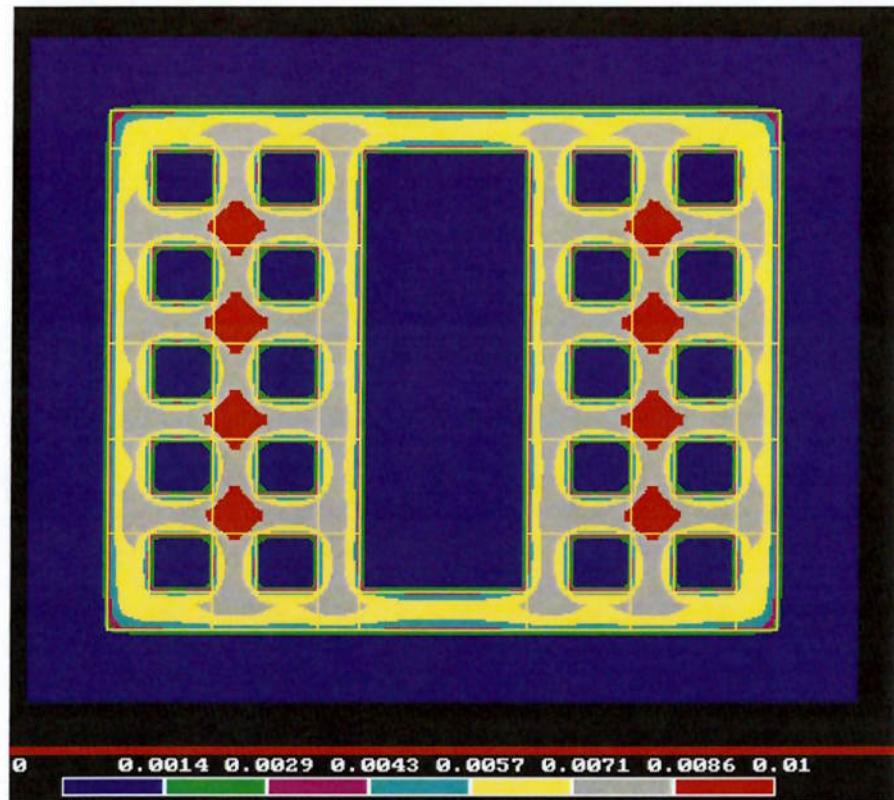
Após a escavação das galerias são registrados deslocamentos totais entre 0 e 0,36 mm. Ou seja, bastante pequenos em relação ao tamanho das galerias.

Figura 24 - Distribuição dos deslocamentos após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 25 – Vista superior dos deslocamentos após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

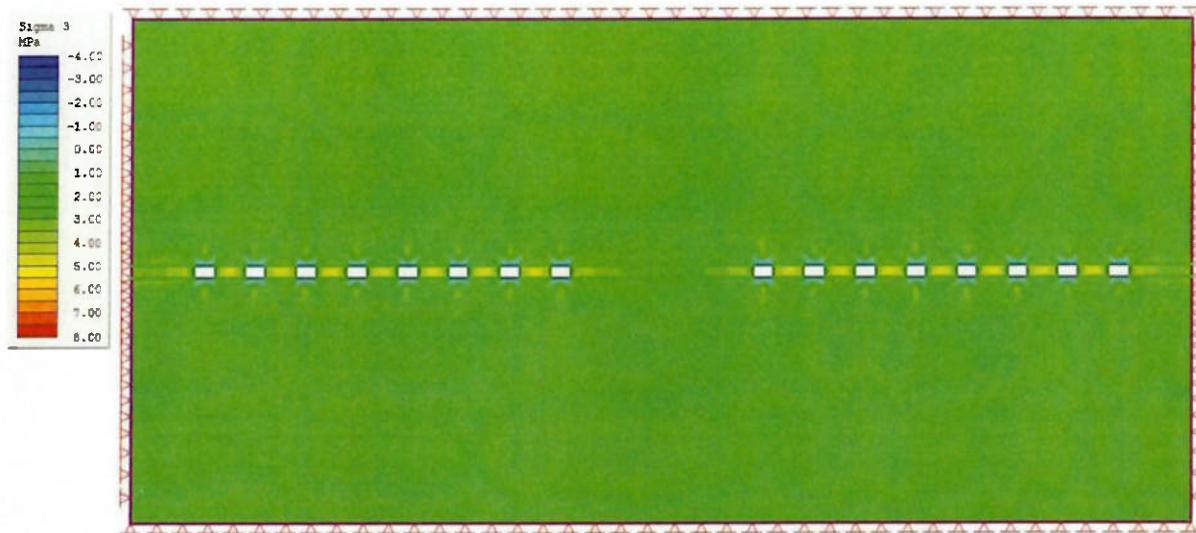
#### **4.4.3. Caso 3 - 16 Galerias, 16 Pilares e 1 Pilar Barreira**

No caso 3 é analisada a lavra sequencial de 16 galerias, dando origem a 16 pilares e 1 pilar barreira ao centro da região, representando a evolução da lavra pelo método de Câmaras e Pilares. Cada galeria tem 4 m de largura e 2,4 m de altura; também há 16 pilares de 5,75 m de largura e 2,4 m de altura e 1 pilar barreira de 23,5 m de largura e 2,4 m de altura.

##### Tensão Principal Menor ( $\sigma_3$ )

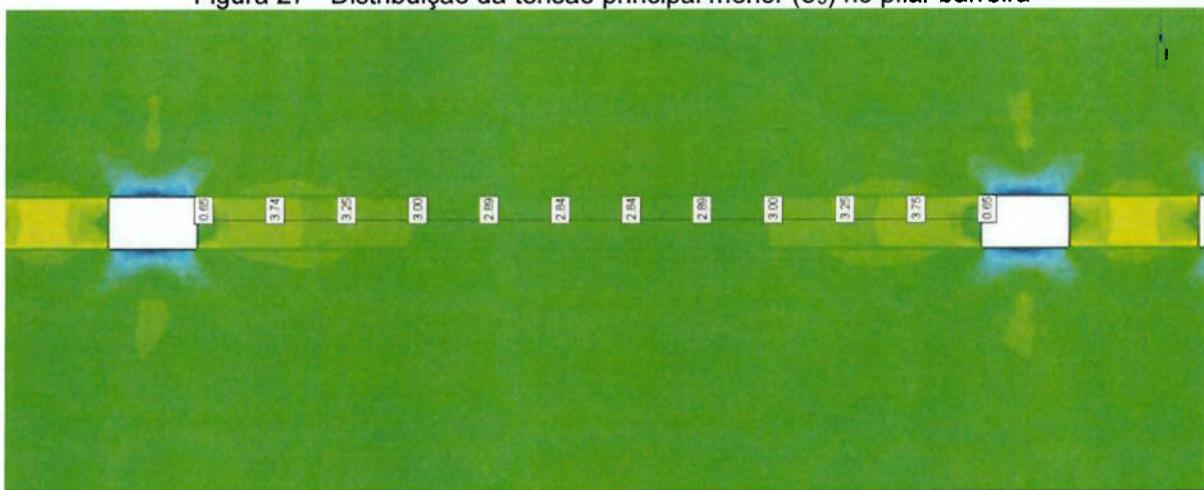
Ao fim da escavação das 16 galerias, a tensão principal menor está distribuída como mostra a figura 26. A figura 27 mostra o detalhe da tensão principal menor no pilar barreira.

Figura 26 - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 27 - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) no pilar barreira

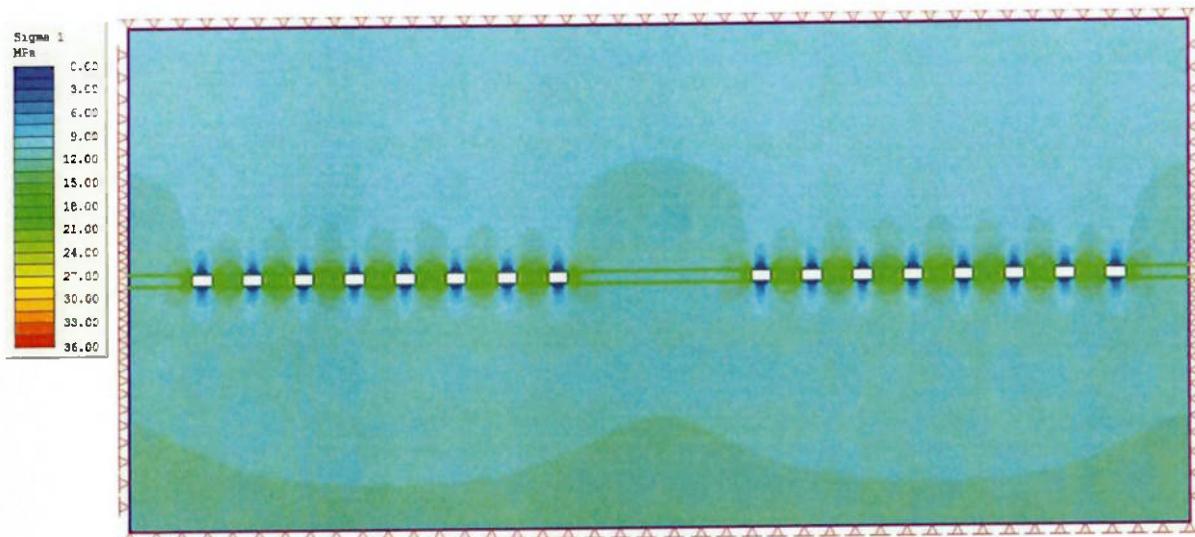


Fonte: Arquivo Pessoal

### Tensão Principal Maior ( $\sigma_1$ )

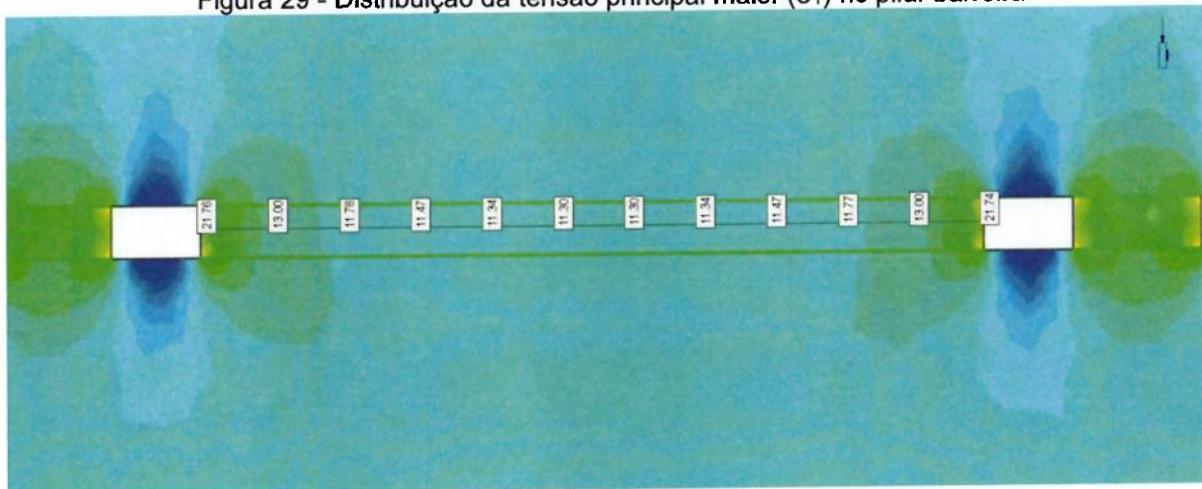
Ao fim da escavação das 16 galerias, a tensão principal maior está distribuída como mostra a figura 28. A figura 29 mostra o detalhe da tensão principal maior no pilar barreira.

Figura 28 - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

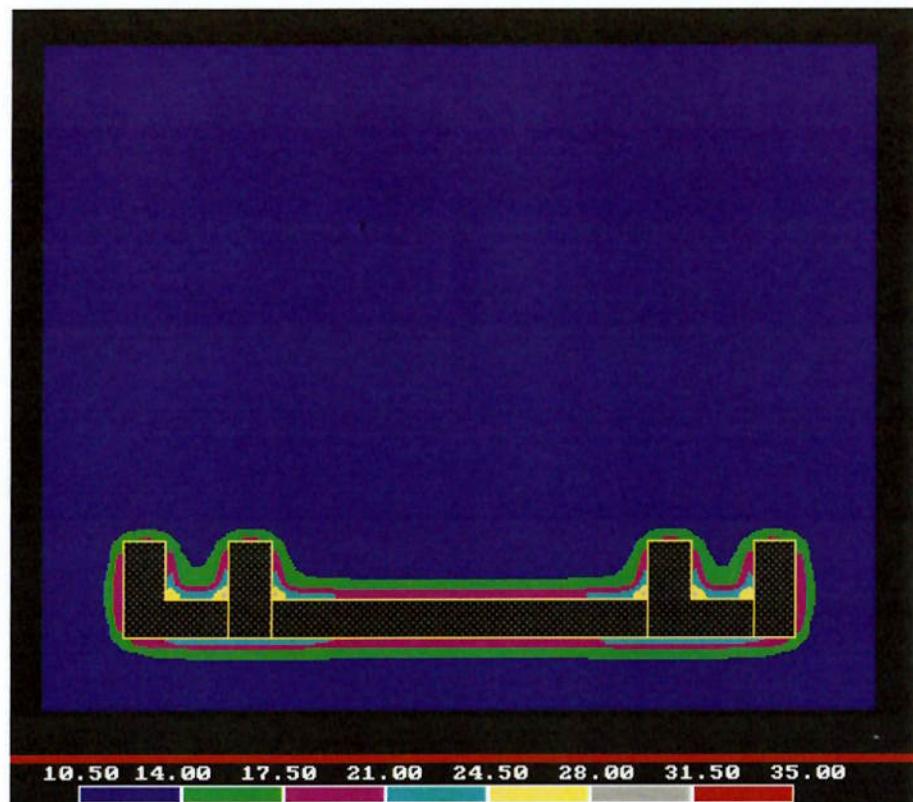
Figura 29 - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) no pilar barreira



Fonte: Arquivo Pessoal

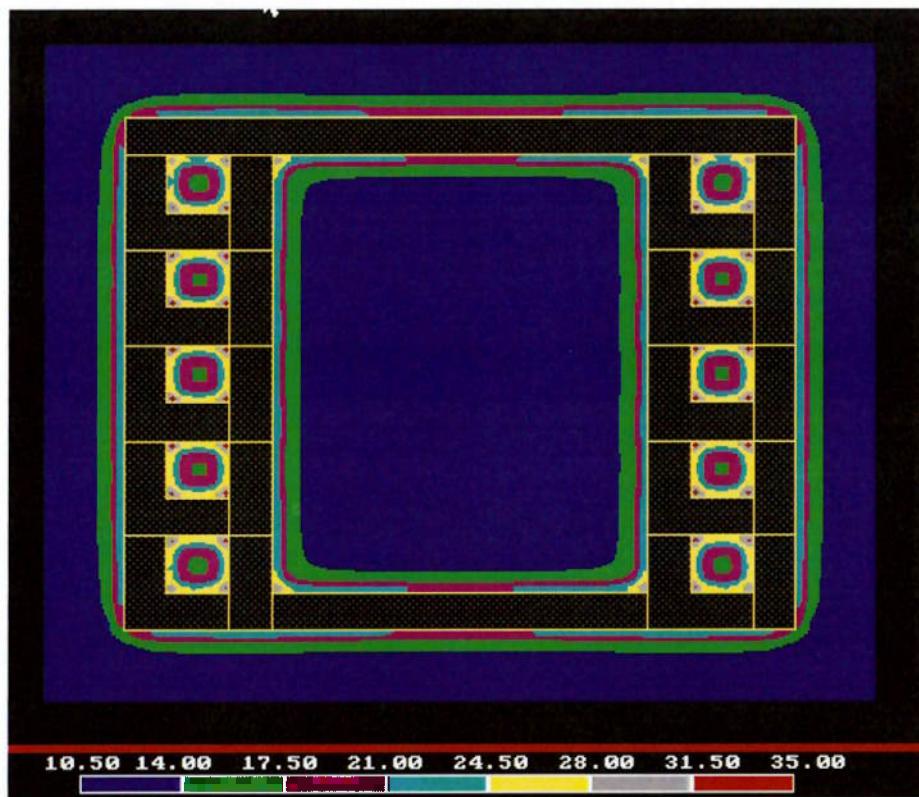
As figuras 30 e 31 representam a tensão principal maior vista em planta, redistribuída após a escavação, representando um zoom nos pilares e salões centrais da mina. Nos pilares a tensão vertical assume valores entre 10 e 27,5 MPa.

Figura 30 - Distribuição da tensão vertical



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 31 - Distribuição da tensão vertical

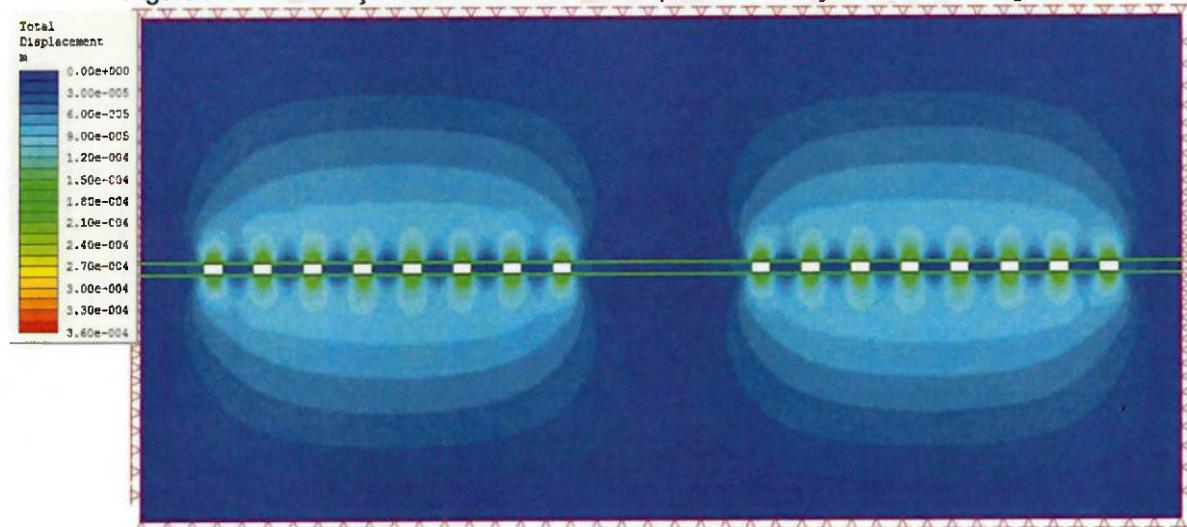


Fonte: Arquivo Pessoal

### Deslocamentos Totais

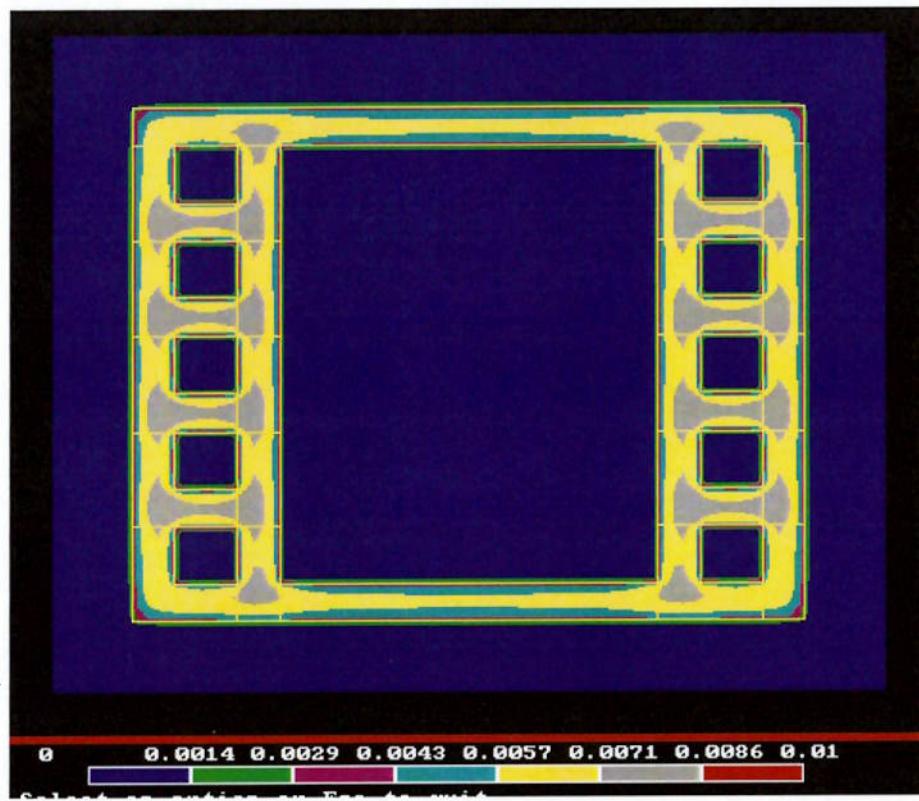
Após a escavação das galerias são registrados deslocamentos totais entre 0 e 0,36 mm. Ou seja, bastante pequenos em relação ao tamanho das galerias.

Figura 31 - Distribuição dos deslocamentos após a escavação de todas as galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 32 – Vista superior dos deslocamentos após a escavação das galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

## 5. DISCUSSÃO

Pela análise dos modelos criados é possível observar que em todos os casos há concentração de tensões nos cantos das galerias, gerando lá os maiores valores de  $\sigma_1$  em todos os casos. Também em todos se pode observar as menores trações  $\sigma_3$  ao longo das paredes mais longas, teto e piso.

A grande diferença dos modelos está nos valores de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  e na influência entre as galerias e pilares. Os modelos permitem a análise do potencial de um desabamento de uma galeria, afetar outras galerias ao seu redor, e a possibilidade de contaminar até mesmo toda a área lavrada.

Observa-se dos modelos, que o caso 1 apresenta os maiores valores de trações e compressões. A tração tem uma ligeira queda, de 4,8 MPa no caso 1 para 4 MPa nos demais casos. Por sua vez, a compressão tem um decréscimo de 48 MPa para 24 MPa, demonstrando que há menor concentração de tensões devido a presença do pilar barreira.

Na distribuição das deformações totais, é possível observar a interação entre as galerias, já que a deformação de cada uma das galerias influí sobre as demais vizinhas. No caso 1 estão todas fortemente interligadas, ou seja, uma instabilidade em alguma parte da mina poderia comprometer toda a sua estabilidade.

No caso 2 já há alívio das tensões nos pilares e maior isolamento entre as duas regiões do painel separadas pelo pilar barreira, demonstrando que uma instabilidade localizada poderia afetar apenas parte da mina. Já no caso 3 se mantém os mesmos valores de tensões principais do caso 2, contudo, há separação completa do painel pelo pilar barreira.

No caso 3, as tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  na região central do pilar barreira se aproximam dos valores das tensões naturais, mostrando que este contribui para o isolamento dos dois painéis, à esquerda e à direita. Do ponto de vista dos painéis laterais, quando se olha para o pilar barreira enxerga-se maciço rochoso com tensões naturais, ou seja, a condição de maior estabilidade.

Quanto a tensão vertical nos pilares é possível calcular o seu novo valor com o uso da área tributária. No caso, vale:

$$\sigma_{Pilar} = \frac{\gamma \times H \times \text{Área}_{Suportada}}{\text{Área}_{Pilar}} = \frac{0,032 \times 350 \times (9,75)^2}{(5,75)^2} = 32,2 \text{ MPa}$$

No caso 1, as tensões obtidas são bastante próximas do esperado, chegando a valores maiores nas quinas onde há acumulo de tensão, e tendem a aumentar ainda nos pilares centrais com a expansão das galerias escavadas.

Já nos casos 2 e 3 o pilar barreira atua como suporte principal, aliviando a tensão dos demais pilares. Resultando em tensões mais próximas de 25 MPa, e amenizando as áreas de concentração de tensões.

Em termos da produção, considerando que os pilares são quadrados, cada salão tem um volume desmontado de 55,2 m<sup>3</sup>. Assim, para cada linha de pilares do nível a produção é de 1048,8 m<sup>3</sup>, para o caso de 993,6 m<sup>3</sup>, para o caso 2, e de 883,2 m<sup>3</sup> para o caso 3. Logo, há uma redução de cerca de 5% e de 16% para os casos 2 e 3, respectivamente.

## 7. CONCLUSÕES

O método de pilar e salão é, e deve continuar sendo, muito utilizado em lavra subterrânea, principalmente, focada em médias a grandes produções. Sendo assim, os métodos computacionais são grandes aliados nas análises de tensões, pois permitem avaliar as distribuições das mesmas em contraponto com teorias clássicas que levam em conta valores médios, também visualizar melhor áreas de concentração e alívio de tensões e visualizar os efeitos de pilares barreira.

Por fim, é válido ressaltar o uso de pilares barreiras auxilia aliviando as tensões que foram redistribuídas pelas escavações, mantendo pilares de suporte menores e isolando diferentes áreas do nível em operação. E tais comparações são facilitadas pelo uso de métodos numéricos que permitem modelar diferentes arranjos geométricos para uma mesma mina, buscando aumentar a produção mantendo a estabilidade do maciço e segurança da operação.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics: For underground mining.** 3. ed. Nova York, Boston, Dordrecht, Londres, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2005.
- HOEK, E. **Rock Engineering: The application of Modern Techniques to Underground Design.** 1. ed. São Paulo: [s.n.].
- FIGUEIREDO, R. P.; CURI, A. **Dimensionamento ótimo de realces abertos câmaras inclinadas.** Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas - SBMR, p. 15–21, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2004.
- FIGUEIREDO, R. P.; CURI, A. **Dimensionamento ótimo de painéis, câmaras e pilares com programação não-linear.** I SIAEM (I Simpósio Ibero Americano de Engenharia de Minas), pp 565-573, São Paulo, 2004.
- FRANKLIN, J. A.; DUSSEAUT, M. B. **Rock Engineering Applications.** 1. ed. United Kingdom: McGraw-Hill Publishing Co., 1985.
- HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering rock mechanics: An introduction to the principles.** United Kingdom: Elsevier Science, 2000.
- LOPÉZ, M. I. M.; **Modelação numérica para o dimensionamento de pilares de minas subterrâneas.** Dissertação (Dissertação de mestrado em geotecnia) – UFOP. Ouro Preto, 2017.
- NEWMAN, D.; **Roof control, pillar stability and ground control issues in underground stone mines.** Mining Engineering, Littleton Vol. 69, Iss. 8, (Aug 2017): 53-58. Lexington, KY, USA



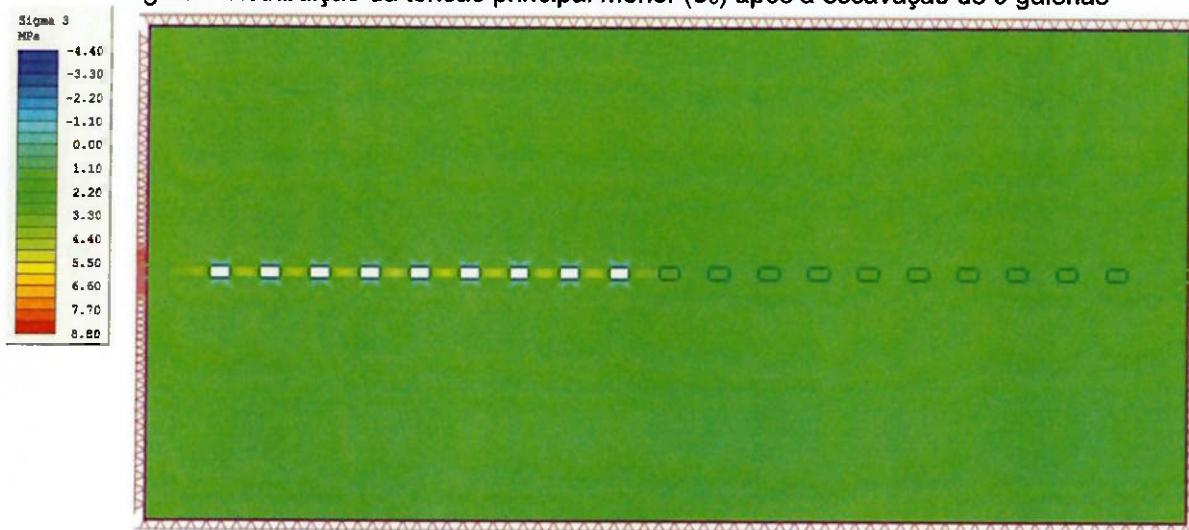
## 9. APÊNDICES

### APÊNDICE A. Caso 1 - 19 Galerias e 20 Pilares

#### Tensão Principal Menor ( $\sigma_3$ )

Após a escavação das 9 primeiras galerias, a tensão principal menor assume valores entre -4,4 MPa e 8,8 Mpa.

Figura - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) após a escavação de 9 galerias

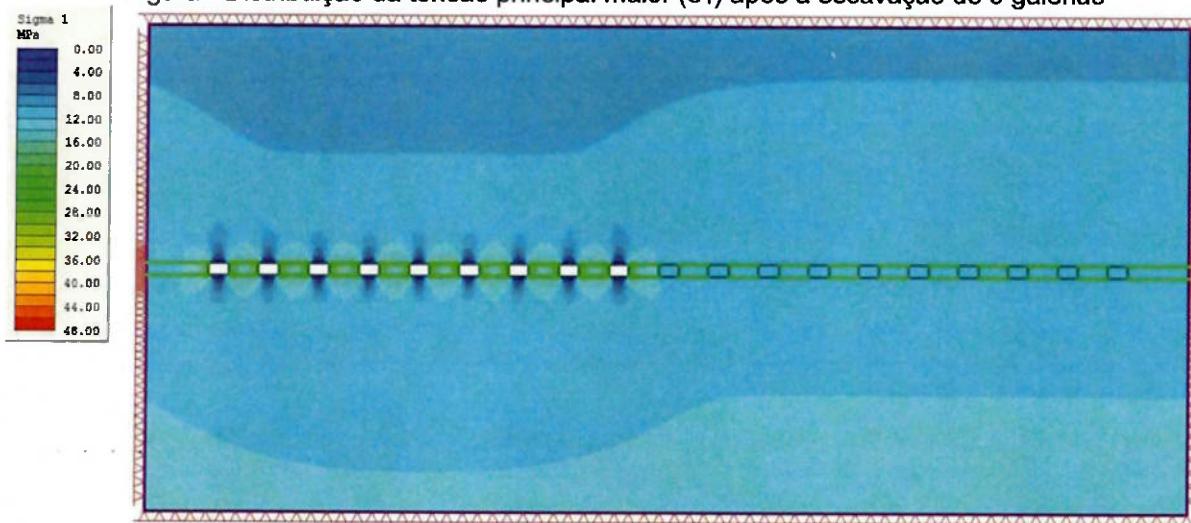


Fonte: Arquivo Pessoal

#### Tensão Principal Maior ( $\sigma_1$ )

Após a escavação das 9 primeiras galerias, a tensão principal maior assume valores entre 0 e 48 Mpa.

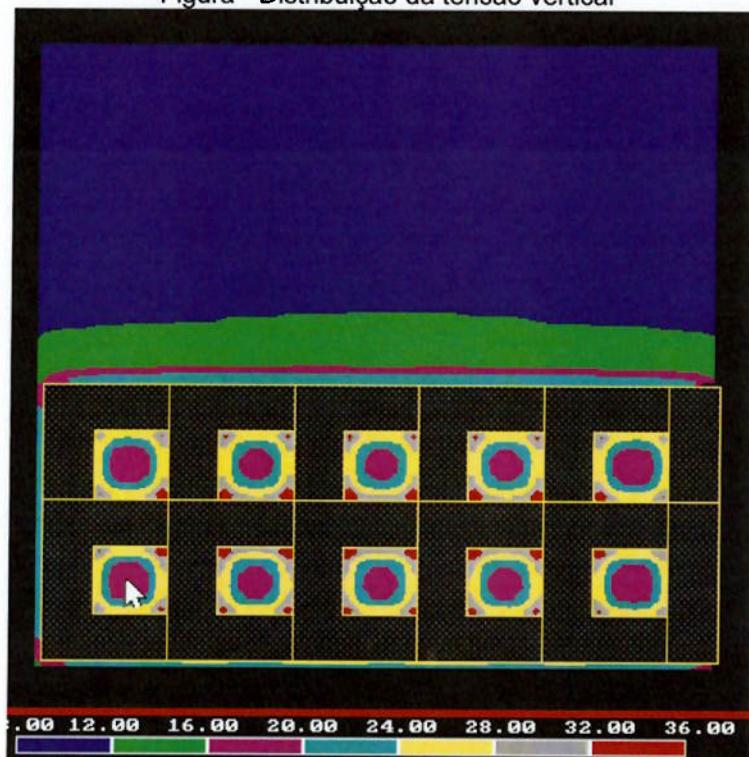
Figura - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) após a escavação de 9 galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

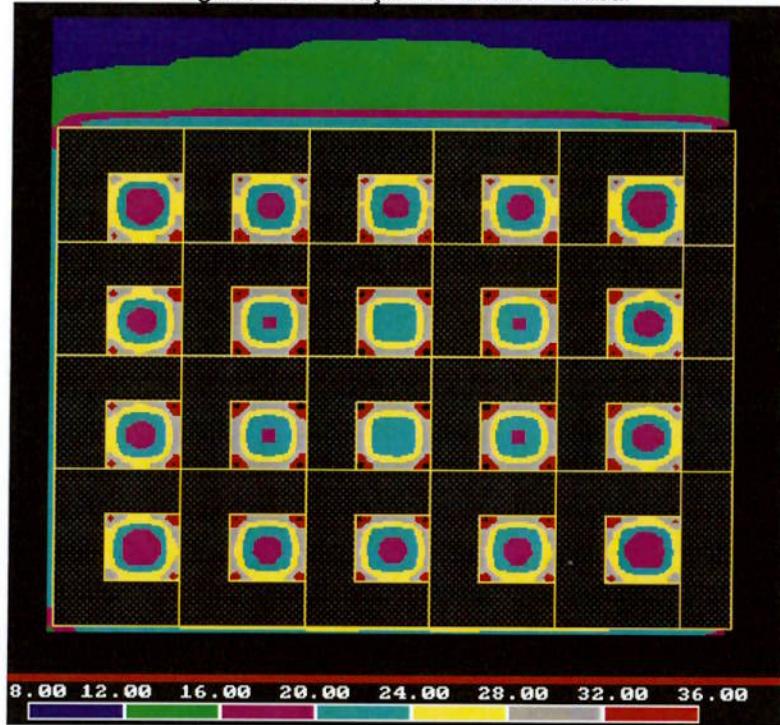
As figuras 3 e 4 representam a tensão principal maior vista em planta, redistribuída após as escavações intermediárias.

Figura - Distribuição da tensão vertical



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura - Distribuição da tensão vertical

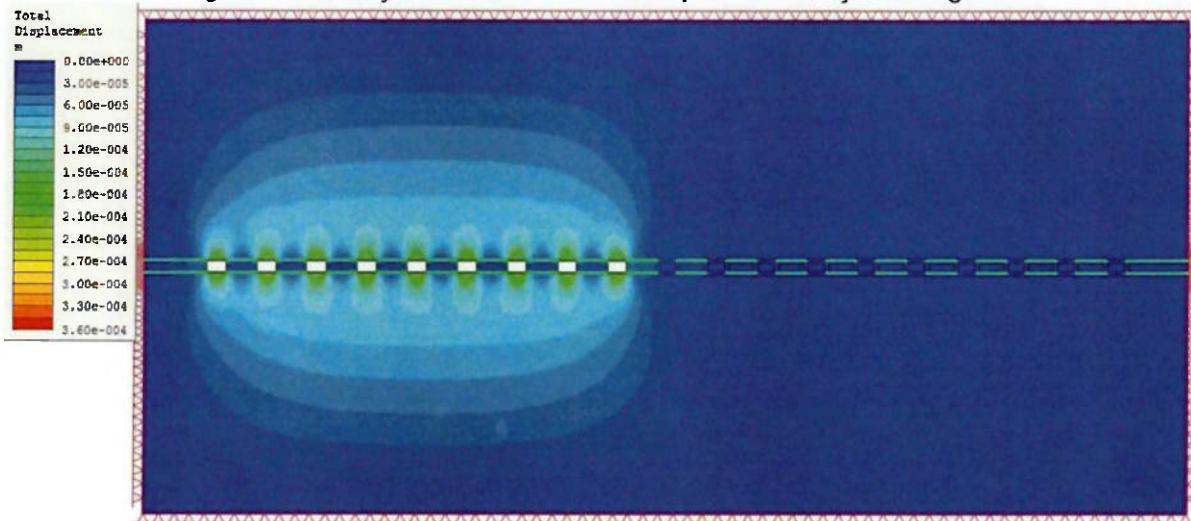


Fonte: Arquivo Pessoal

### Deslocamentos Totais

Após a escavação das galerias, são registrados deslocamentos totais entre 0,03 mm e 0,36 mm. Ou seja, bastante pequenos em relação ao tamanho das galerias.

Figura - Distribuição dos deslocamentos após a escavação de 9 galerias



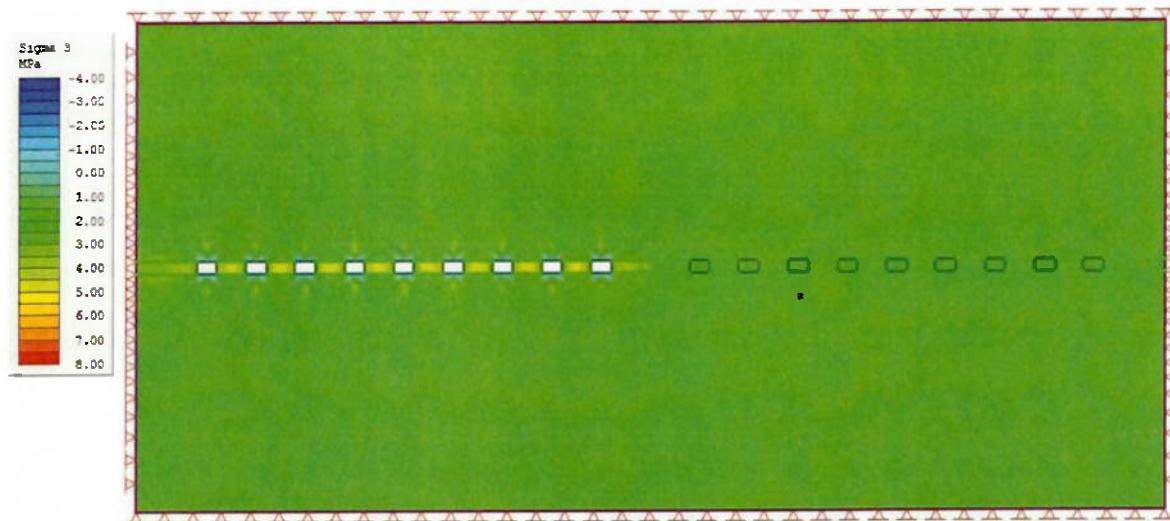
Fonte: Arquivo Pessoal

### APÊNDICE B. Caso 2 - 18 Galerias, 18 Pilares e 1 Pilar Barreira

#### Tensão Principal Menor ( $\sigma_3$ )

Após a escavação das 9 primeiras galerias, a tensão principal menor assume valores entre -4 MPa e 8 MPa, como mostra a figura 23.

Figura - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) após a escavação de 9 galerias

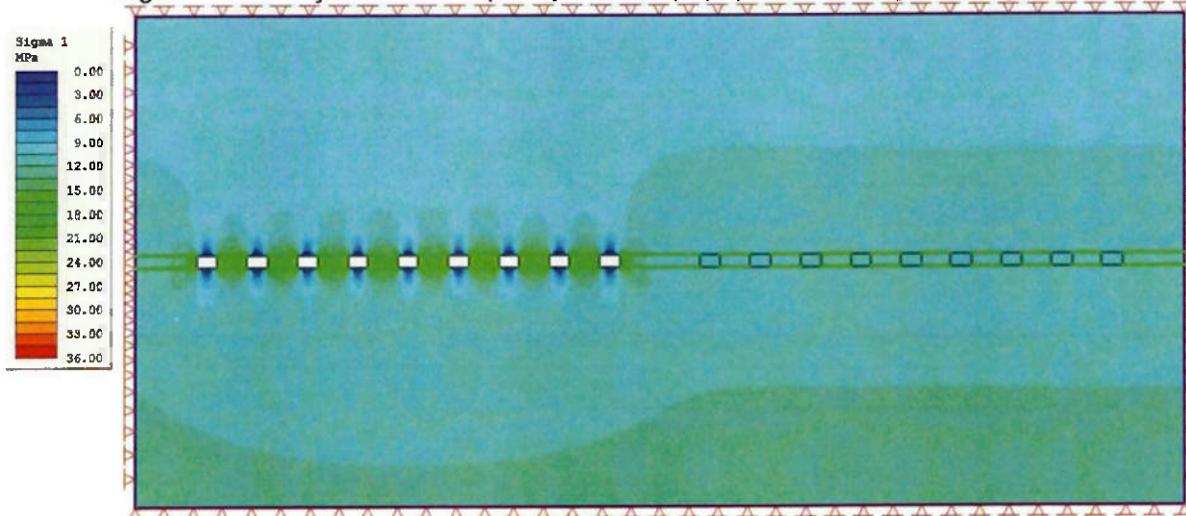


Fonte: Arquivo Pessoal

### Tensão Principal Maior ( $\sigma_1$ )

Após a escavação das 9 primeiras galerias, a tensão principal maior assume valores entre 0 e 36 MPa, como mostra a figura 26.

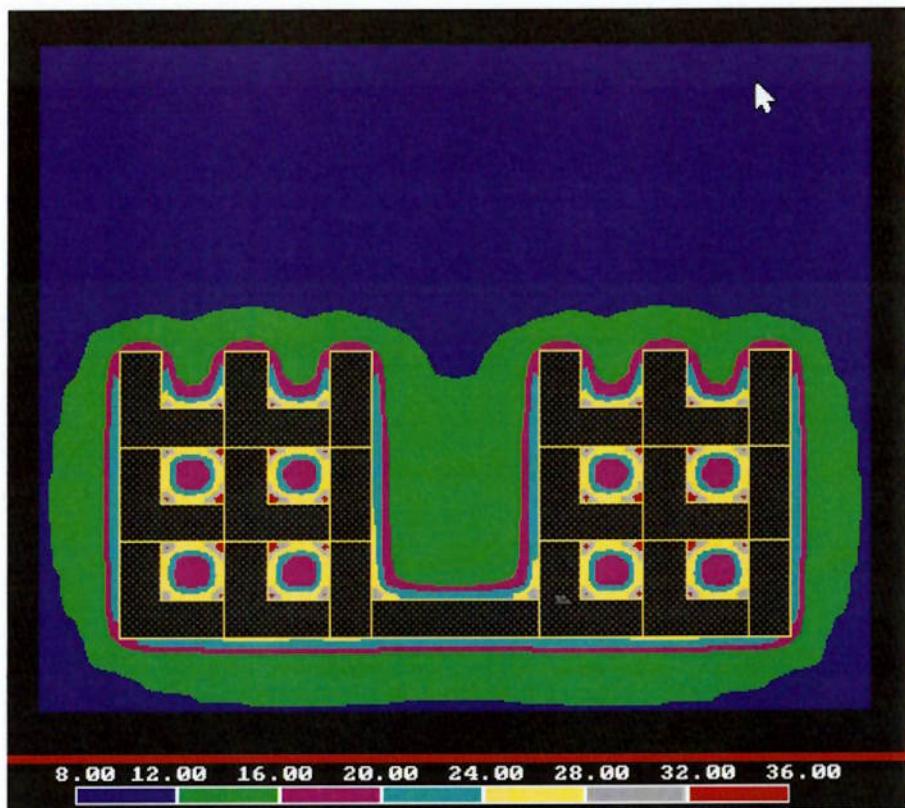
Figura - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) após a escavação de 9 galerias



Fonte: Arquivo Pessoal

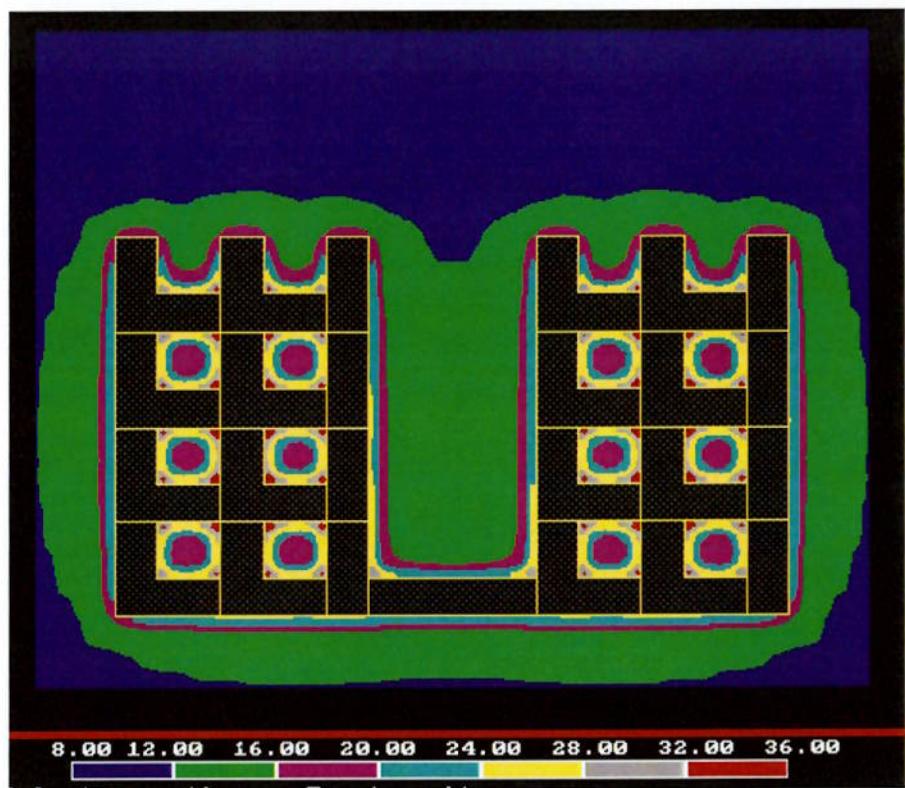
As figuras 29, 30, 31, 32 e 33 representam a tensão principal maior vista em planta, redistribuída após a escavação, representando um zoom nos pilares e salões centrais da mina.

Figura - Distribuição da tensão vertical



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura - Distribuição da tensão vertical

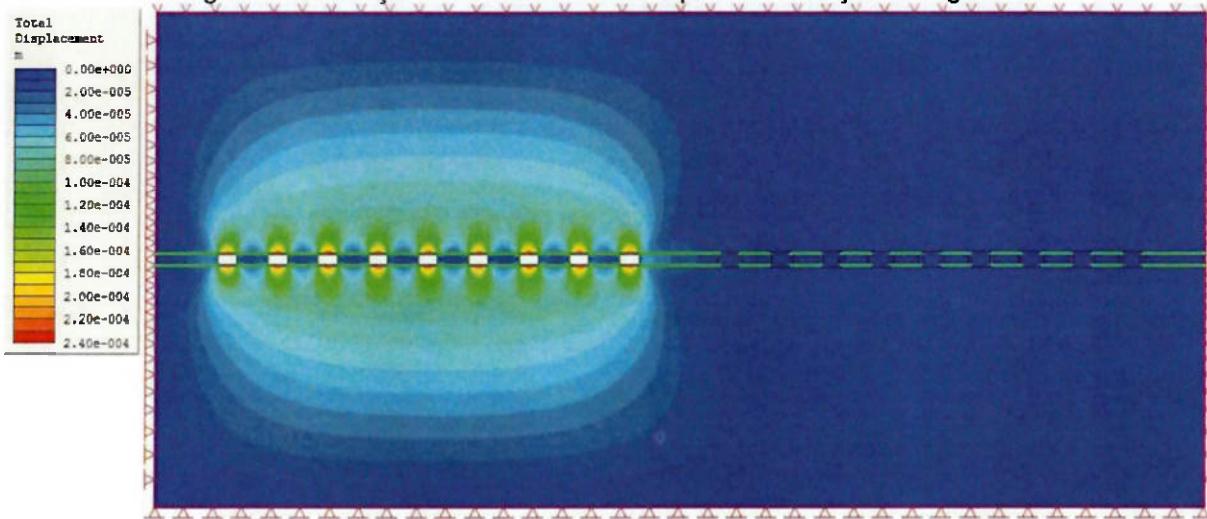


Fonte: Arquivo Pessoal

### Deslocamentos Totais

Após a escavação das galerias são registrados deslocamentos totais entre 0 e 0,36 mm. Ou seja, bastante pequenos em relação ao tamanho das galerias.

Figura - Distribuição dos deslocamentos após a escavação de 9 galerias



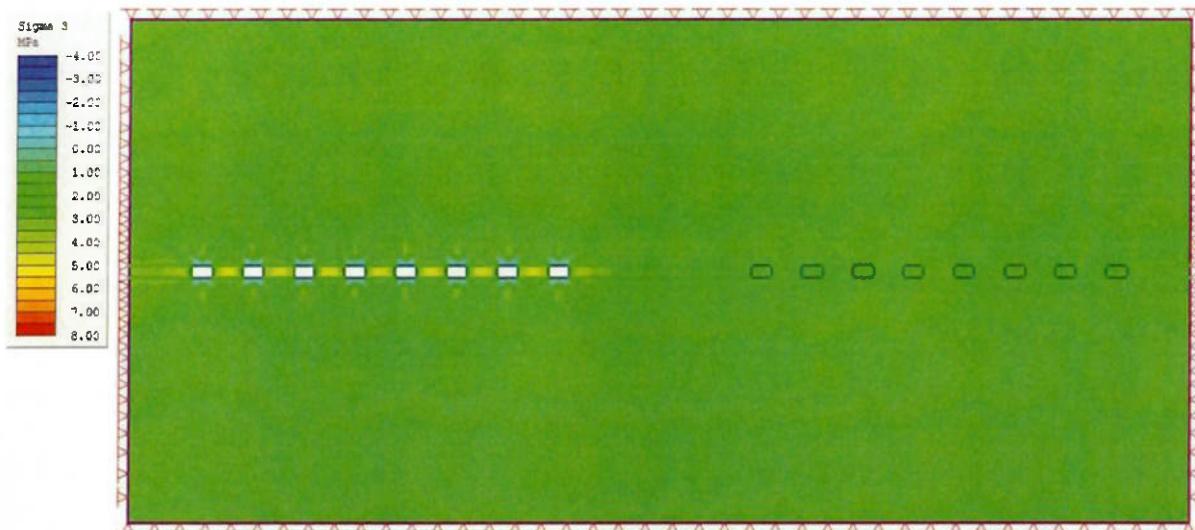
Fonte: Arquivo Pessoal

### APÊNDICE C. Caso 3 - 16 Galerias, 16 Pilares e 1 Pilar Barreira

#### Tensão Principal Menor ( $\sigma_3$ )

Após a escavação das 8 primeiras galerias, a tensão principal menor assume valores entre -4 MPa e 8 MPa, como mostra a figura 38.

Figura - Distribuição da tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) após a escavação de 8 galerias

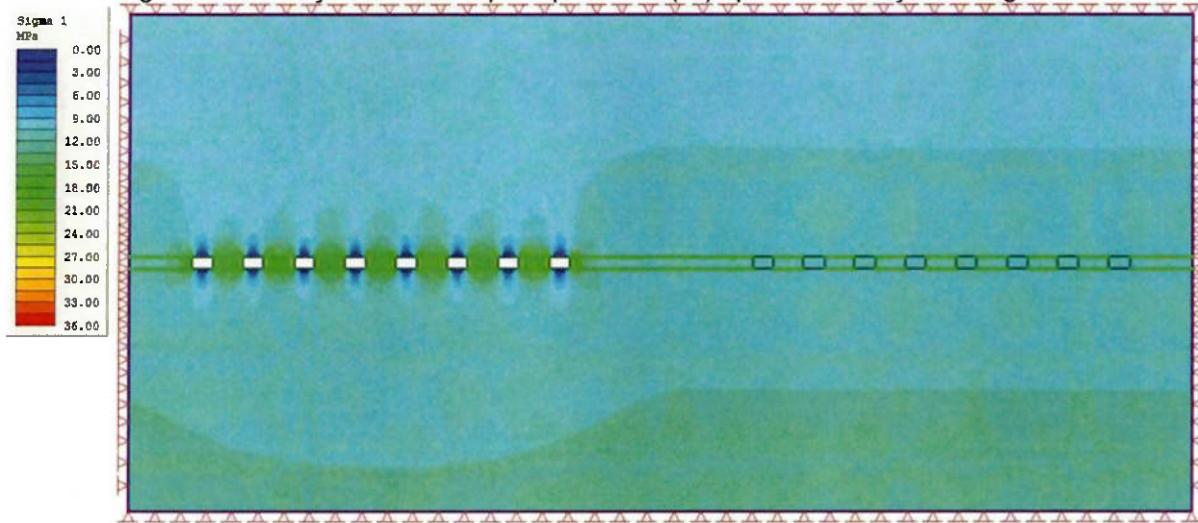


Fonte: Arquivo Pessoal

### Tensão Principal Maior ( $\sigma_1$ )

Após a escavação das 8 primeiras galerias, a tensão principal maior assume valores entre 0 e 24 MPa, como mostra a figura 41.

Figura - Distribuição da tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) após a escavação de 8 galerias

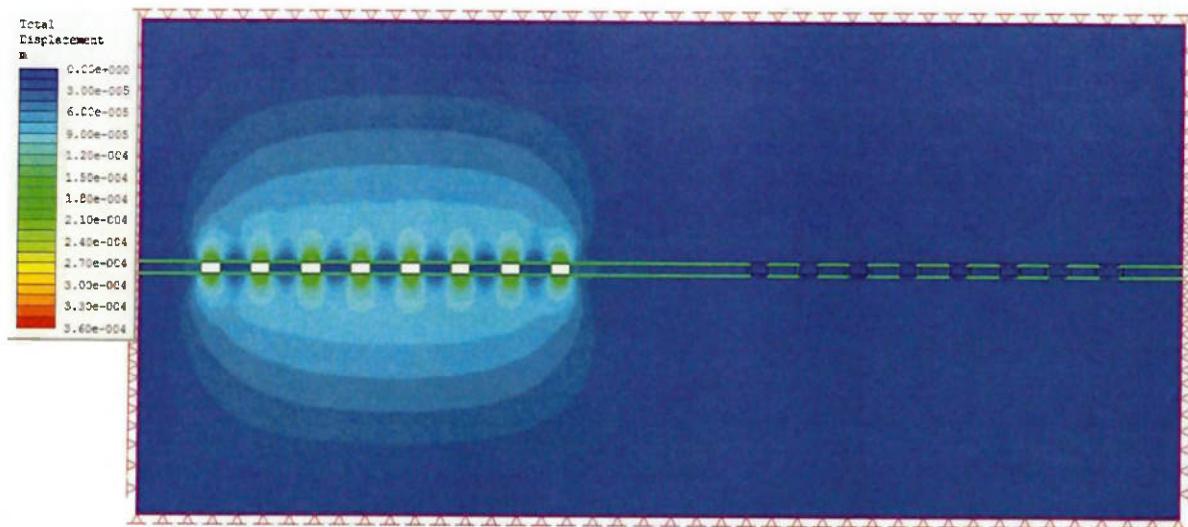


Fonte: Arquivo Pessoal

### Deslocamentos Totais

Após a escavação das galerias são registrados deslocamentos totais entre 0 e 0,36 mm. Ou seja, bastante pequenos em relação ao tamanho das galerias.

Figura - Distribuição dos deslocamentos apóas a escavação de 8 galerias



Fonte: Arquivo Pessoal