

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas

ISSN 0104-0553

BT/PMI/061

**Estudo de Aspectos Geomecânicos
Aplicados ao Projeto de Minas
Subterrâneas**

**Eduardo César Sansone
Lineu Azuaga Ayres da Silva**

São Paulo - 1997

923711

PBF

O presente trabalho é parte da dissertação de mestrado apresentada por Eduardo César Sansone, sob a orientação do Prof. Dr. Lineu Azuaga Ayres da Silva: "Estudo de Aspectos Geomecânicos Aplicados ao Projeto de Minas Subterrâneas", defendida em 24/03/97.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição dos interessados com o autor e na Biblioteca do Depto. de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP.

Sansone, Eduardo César

Estudo de aspectos geomecânicos aplicados ao projeto de minas subterrâneas / E.C. Sansone, L.A.A. da Silva. -- São Paulo : EPUSP, 1997.

20p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/061)

1. Mineração subterrânea 2. Mecânica dos solos
3. Mineração I. Silva, Lineu Azuaga Ayres da II.
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas III. Título IV.
Série

ISSN 0104-0553

CDU 622.272
624.121
622

Eduardo César Sansone

***ESTUDO DE ASPECTOS
GEOMECÂNICOS APLICADOS AO
PROJETO DE MINAS SUBTERRÂNEAS***

*Resumo da Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Mestre em Engenharia*

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Lineu A. Ayres da Silva

*São Paulo
1997*

923711

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das mais antigas atividades da humanidade. Sua trajetória espelha mais do que qualquer outra prática o caminho trilhado pelo homem na utilização da natureza como uma fonte de recursos para sua subsistência. Desde os primeiros esforços para a utilização dos bens minerais até os nossos dias, as técnicas mineiras evoluíram bastante, e para que a indústria mineira continue a desempenhar seu papel, a busca de avanços técnicos que possibilitem a conjugação do binômio: segurança-produtividade, deve ser uma preocupação permanente, sendo tarefa de técnicos e pesquisadores trabalhar neste sentido. Desta forma, nosso trabalho tem por objetivo discutir e apresentar novas formas de abordagem a problemas comuns na exploração de minas subterrâneas.

Dentre os principais problemas com que o técnico se depara na elaboração do projeto de uma mina subterrânea destacamos dois aspectos:

- Incertezas quanto ao comportamento da rocha, em termos de deformações e capacidade de manutenção de sua integridade estrutural, quando sujeita à imposição de esforços externos.
- Incertezas quanto à definição da geometria mais adequada para a mina, em relação às características estruturais do maciço e às condições em que se processam a redistribuição de tensões e os deslocamentos como função do método de lavra adotado. Inclui-se aí, a disposição geral das escavações: galerias, poços e rampas; e o próprio dimensionamento destas escavações.

Desta forma procuramos em nosso estudo, analisar alguns temas relativos a estes dois aspectos levantados, através da discussão dos problemas e/ou do desenvolvimento de metodologias que possibilitem sua solução.

Nosso estudo se desenvolve através da abordagem dos 5 temas apresentados no diagrama que segue:

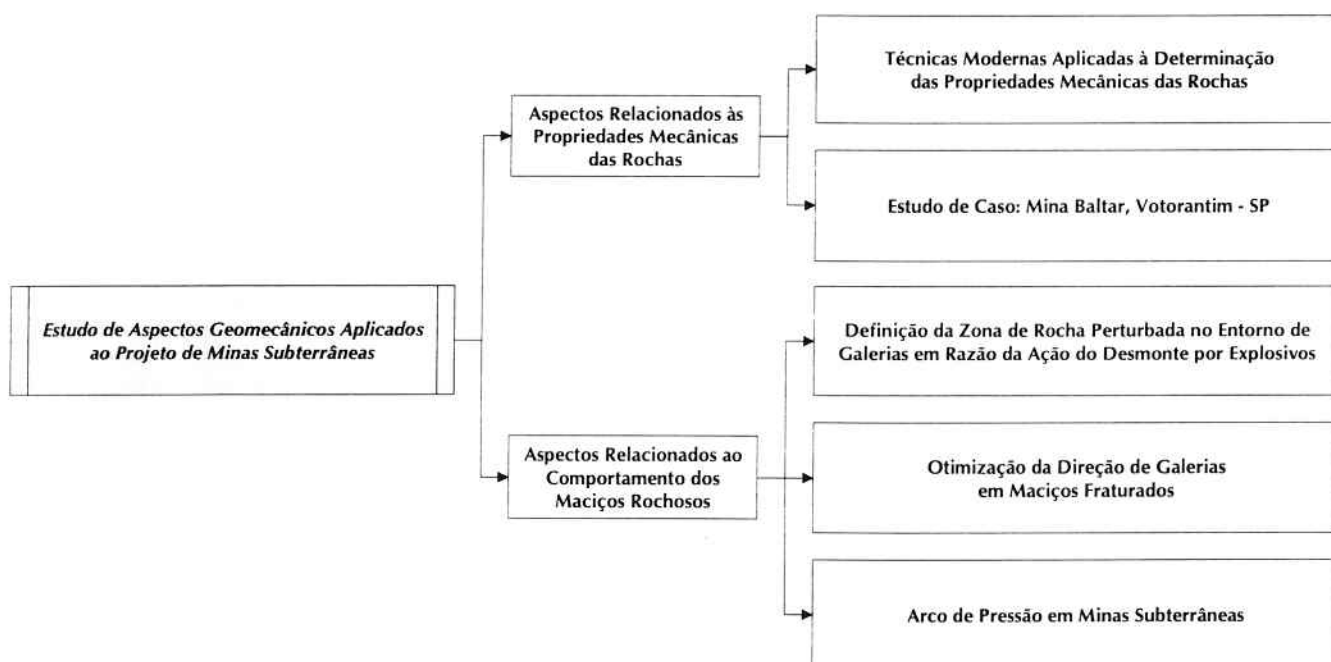


Figura 1 - Estudos desenvolvidos

O desenvolvimento de cada um dos temas será conduzido segundo abordagens particularizadas, e seus traços são delineados como segue:

- *Técnicas modernas aplicadas à determinação das propriedades mecânicas das rochas:*
As atuais técnicas para o dimensionamento de escavações subterrâneas bem como a elaboração de modelos que permitam a avaliação de tensões e deformações resultantes da imposição de esforços externos, exigem

em sua alimentação, informações precisas quanto aos valores numéricos que caracterizam as propriedades mecânicas. Assim sendo, discutiremos as tecnologias aplicadas na atualidade para a realização de ensaios mecânicos em rochas.

- *Estudo de caso: Mina Baltar (Votorantim, SP):*

A aplicação natural das técnicas de determinação dos valores numéricos das propriedades mecânicas das rochas, será feita através da realização de uma ampla campanha de ensaios sobre a rocha calcária da Mina Baltar. Como resultado será construído um modelo numérico do maciço rochoso visando a análise da situação geral da mina quanto às questões de estabilidade.

- *Definição da zona de rocha perturbada no entorno de galerias em razão da ação do desmonte por explosivos:*

Reduzindo a escala de observação, para a análise de uma abertura em particular, buscaremos relacionar a estabilidade da abertura com o dano imposto pelo método de escavação, o desmonte por explosivos. Proporemos uma metodologia para quantificação deste dano, que permita não só a análise do desempenho esperado para o plano de fogo, mas que também possibilite a busca de soluções técnicas que melhorem a condição da rocha no entorno das escavações.

- *Otimização da direção de galerias em maciços fraturados:*

Uma questão importante no projeto de uma mina subterrânea através do método de lavra por câmaras e pilares, é a adequação de seu “layout” às condições estruturais do maciço, de forma a minorar o problema da geração de cunhas instáveis nas paredes das escavações, em virtude da sua interseção com as famílias de descontinuidades presentes no maciço rochoso. Proporemos uma metodologia para a definição da melhor direção para o conjunto de galerias, maximizando a segurança das escavações e minimizando a demanda por trabalhos de estabilização de teto e paredes.

- *Arco de pressão em minas subterrâneas:*

Por fim, outro problema específico do projeto de minas que utilizem o método de lavra por câmaras e pilares é o do adequado dimensionamento das áreas lavradas e dos pilares barreira deixados remanescentes com objetivo de isolar estas áreas. Esta questão será discutida através da análise do fenômeno do arco de pressão, em termos teóricos e através da construção de um modelo numérico que permita sua visualização e o entendimento de seu mecanismo de atuação.

2. *TÉCNICAS MODERNAS APLICADAS À DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ROCHAS*

O conhecimento das características mecânicas das rochas e do maciço rochoso como um todo, se constitui em uma informação básica para o projeto de obras em rocha e em especial as escavações subterrâneas.

As máquinas rígidas servo-controladas permitem reproduzir em escala de laboratório condições de ruptura progressiva em ensaios de rocha, sendo esta ruptura nada mais do que a consequência da redistribuição das tensões, como ocorre na natureza. Além disto, estas máquinas possibilitam a obtenção de curvas tensão-deformação completas, pois não armazenam energia durante o processo de ruptura.

Um sistema básico de ensaios servo-controlados inclui uma estrutura de carga, um conjunto hidráulico, um controlador digital e acessórios para a realização de diferentes tipos de ensaios, tais como: ensaio de compressão simples, ensaio de compressão triaxial, ensaio de tração direta, ensaio de tração indireta, ensaio de flexão, ensaio de tenacidade de juntas e outros.

A ação do sistema de servo-controle se baseia na condução do ensaio através do monitoramento de um sinal alimentado em circuito fechado servo-hidráulico, este sinal pode ser a carga aplicada sobre a amostra de rocha, a deformação radial (circunferencial ou lateral), a deformação axial, a posição do atuador ou outro sinal lido durante o ensaio (cada um destes parâmetros, medido através de um transdutor apropriado). O sinal retroalimentado se torna a variável de controle do ensaio. O servo-controlador compara o sinal retroalimentado com um sinal padrão, programado previamente e fornecido por um gerador de funções digital, e calcula um sinal de erro proporcional à diferença entre eles. Este sinal de erro é amplificado de

modo a se tornar o sinal de comando da servo-válvula, e o atuador da estrutura de carga é acionado na direção apropriada para reduzir o erro até zero.

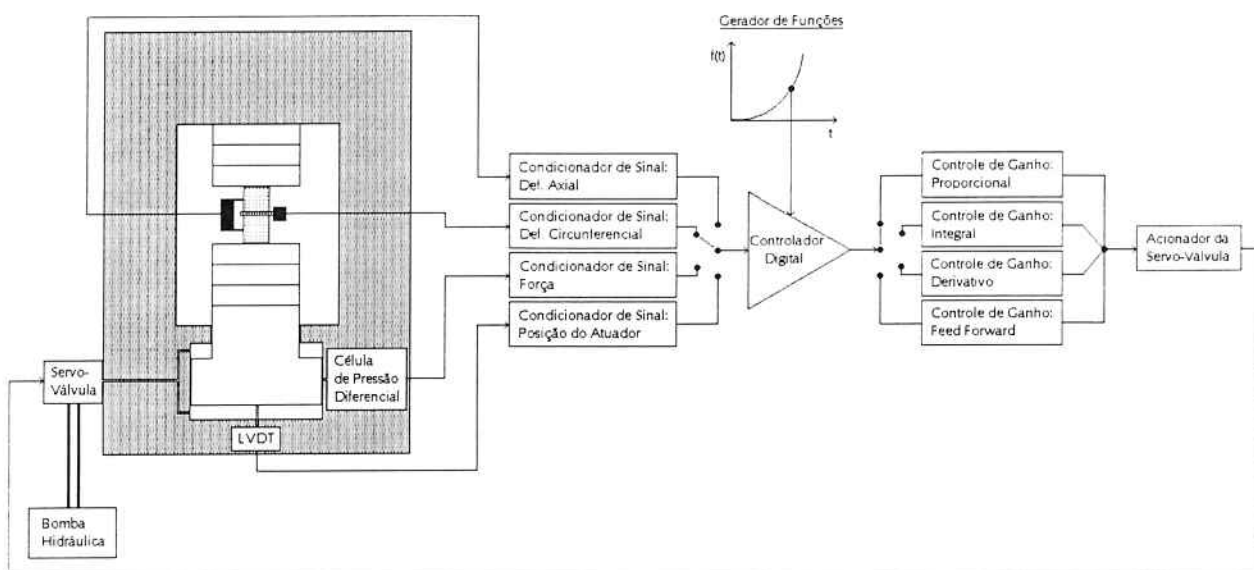


Figura 2 - Diagrama de funcionamento do sistema de servo-controle

O valor do sinal de erro será dado por:

$$\varepsilon = k(\varepsilon) \cdot (S_p - S_R)$$

onde:

ε = sinal de erro

$k(\varepsilon)$ = ganho (função de amplificação do sinal de erro)

S_p = sinal programado (gerador de funções)

S_R = sinal retroalimentado (transdutor)

Assim sendo:

Caso: $\varepsilon > 0 \Rightarrow$ servo-válvula aciona o atuador no sentido (+)

Caso: $\varepsilon < 0 \Rightarrow$ servo-válvula aciona o atuador no sentido (-)

Com o objetivo de fazer: $\varepsilon \rightarrow 0$

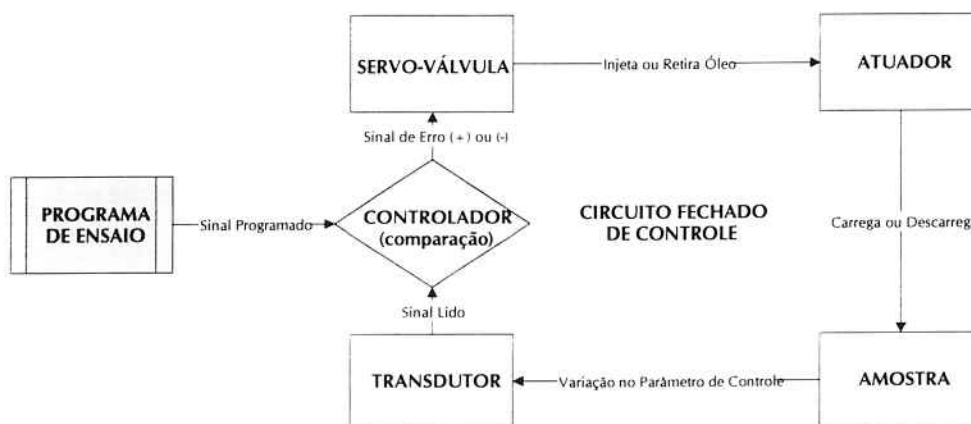


Figura 3 - Fluxograma simplificado do circuito fechado de controle

Por exemplo, caso se tenha escolhido a posição do atuador como variável de controle, o comparador eletrônico confronta o deslocamento obtido com o deslocamento programado. Se o deslocamento obtido for menor que o programado, o pistão comprime o corpo de prova com um deslocamento igual ao programado; no caso contrário, o sinal de erro será compensado com um recuo do pistão. Este procedimento é realizado repetidamente durante todo o transcorrer do ensaio.

O sinal de retroalimentação deve ser selecionado com cuidado para que se obtenha sucesso em ensaios de pós-ruptura, as características de ruptura da amostra (Classe I ou Classe II) devem ser antecipadas para a preparação de um programa de ensaio com crescimento linear (programa de rampa) de uma variável. Os três sinais de retroalimentação normalmente utilizados no controle destes ensaios são os seguintes:

- Força aplicada (a partir da célula de carga ou transdutor de pressão diferencial localizado no atuador).
- Deformação axial (a partir do transdutor de deformação axial).
- Deformação circunferencial ou lateral (a partir do transdutor apropriado).

Os transdutores utilizados para o controle destes ensaios devem possuir baixa histerese, e boa linearidade e repetibilidade possibilitando a obtenção de acurados dados de ensaio. Projeto robusto e alta frequência natural são requisitos importantes em razão das rápidas e violentas características da ruptura das amostras.

3. *ESTUDO DE CASO: MINA BALTAR, VOTORANTIM - SP*

A aplicação das técnicas de ensaio analisadas, se deu através da realização de um estudo sobre as condições de estabilidade da Mina Baltar, Votorantim - SP; em termos da distribuição de tensões no entorno das escavações subterrâneas, carregamento aplicado aos pilares e deformações esperadas. O método de estudo adotado foi o modelamento numérico e para tanto desenvolvemos a seqüência de etapas a seguir:

- Determinação das propriedades mecânicas.
- Definição de parâmetros geométricos.
- Adoção de modelo constitutivo para o maciço rochoso.

3.1. *MINA BALTAR*

A Fábrica de Cimento Votoran localiza-se em Santa Helena, município de Votorantim, distando cerca de 120 km da capital do Estado de São Paulo. A capacidade de produção instalada é de 7.700 toneladas/dia de clíquer e o consumo de calcário pode atingir um máximo de 4 milhões de toneladas/ano.

As fontes principais de calcário são: jazida Baltar (lavras à céu aberto e subterrânea), jazida Pastinho e jazida Placa.

Os trabalhos de abertura da mina subterrânea Baltar se iniciaram no segundo semestre de 1.975 e o início da produção ocorreu em julho de 1.981, produzindo inicialmente 1 milhão de toneladas/ano. A produção da mina deverá aumentar gradualmente até atingir a capacidade de lavra de 3 milhões de toneladas/ano.

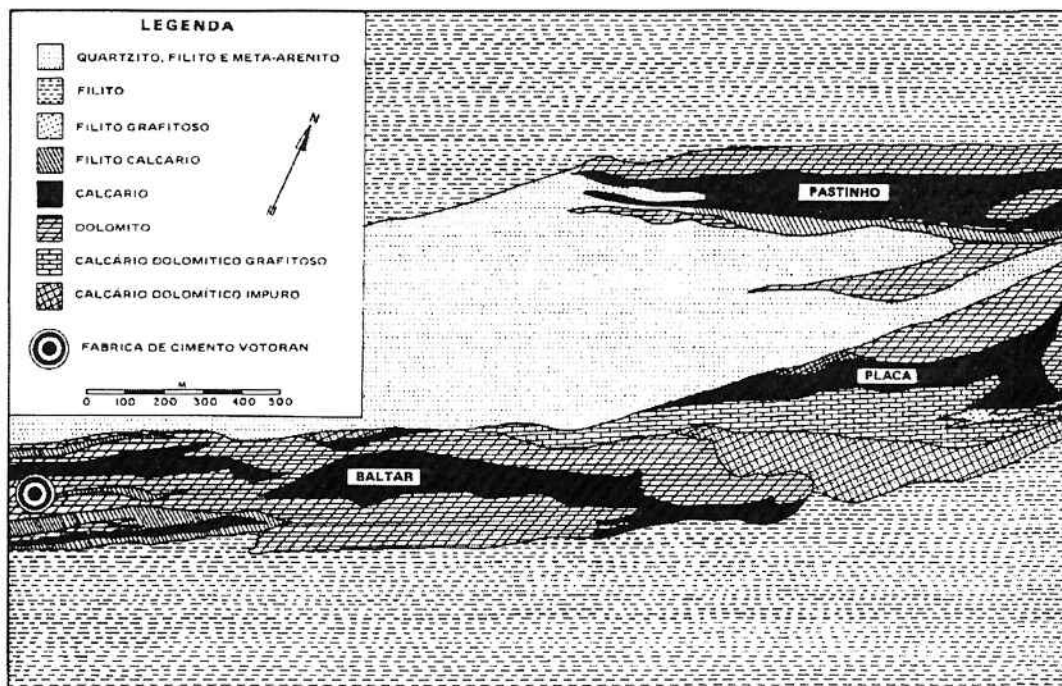


Figura 4 - Mapa geológico da região da mina

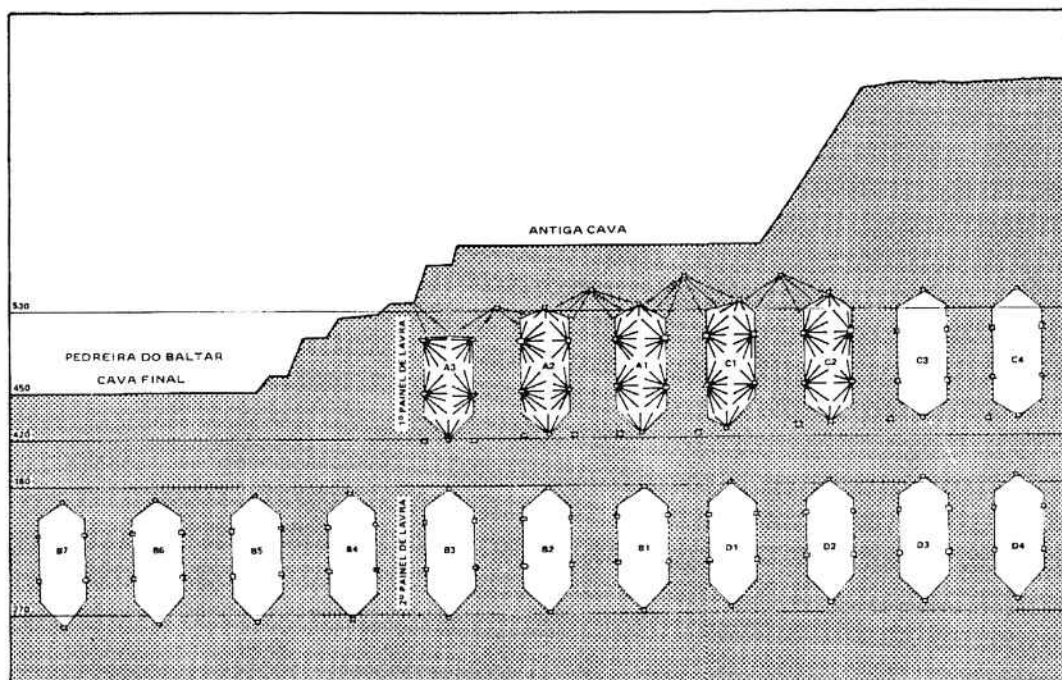


Figura 5 - Seção longitudinal da mina

3.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A caracterização mecânica da rocha calcária da mina Baltar envolveu etapas de preparação das amostras e de ensaio. Foram realizados três tipos diferentes de ensaios: ensaio de compressão uniaxial, compressão triaxial e tração indireta (Método Brasileiro). A sequência dos trabalhos executados seguiu o esquema a seguir:

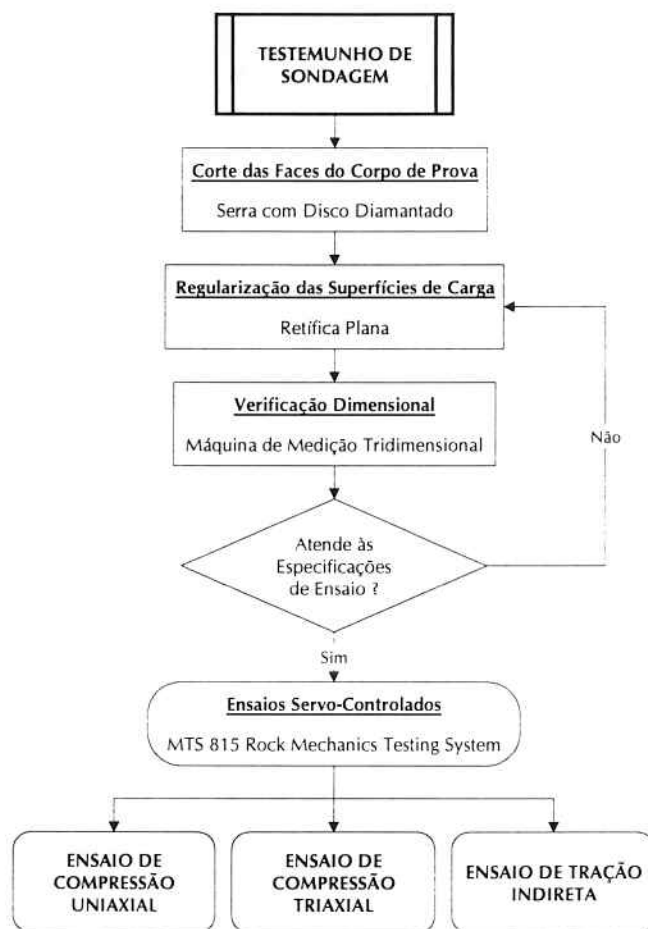


Figura 6 - Fluxograma geral dos trabalhos

O material utilizado no estudo foi obtido através de contatos com o Geólogo Nakamura da S. A. Indústrias Votorantim, que gentilmente, compreendendo o interesse de nossa pesquisa, se prontificou a nos fornecer as informações necessárias quanto à geologia local e operação da mina; além do próprio material para a realização dos ensaios. A amostragem se deu sobre testemunhos de sondagem do calcário calcítico em quatro diâmetros diferentes: AX (~32 mm), BX (~42 mm), NX (~54 mm) e 98 mm.

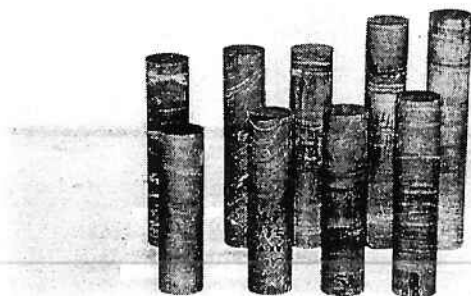


Figura 7 - Alguns corpos de prova AX

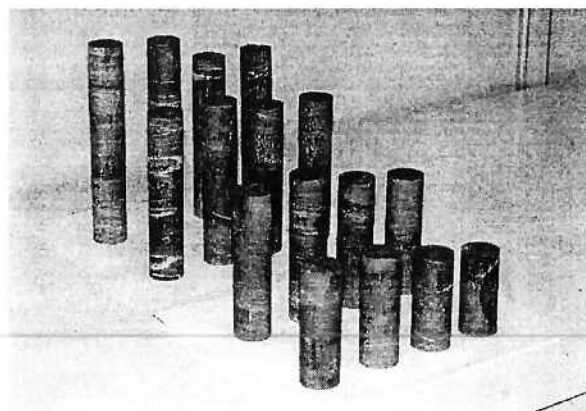


Figura 8 - Alguns corpos de prova BX



Figura 9 - Alguns corpos de prova NX

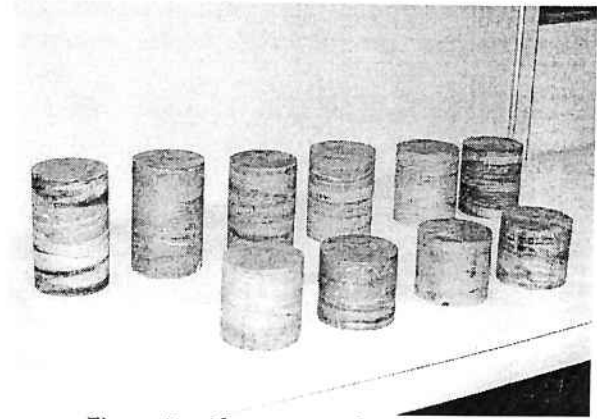


Figura 10 - Alguns corpos de prova 98 mm

Os ensaios de caracterização mecânica sobre as amostras de calcário foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP pelo autor, seguindo as sugestões de métodos de ensaio propostas pela ISRM - International Society for Rock Mechanics.

A seguir apresentamos o quadro geral de resultados da caracterização mecânica da rocha calcária da mina Baltar, Votorantim - SP:

Parâmetro	Valor
Resistência à Compressão Simples, σ_c	100,9 MPa
Módulo de Elasticidade, E	66.752 MPa
Coefficiente de Poisson, ν	0,26
Efeito de Forma sobre σ_c	$\sigma_c = 185,1 \left(0,922 + 0,078 \frac{D}{H} \right)$
Efeito de Forma sobre E	$E = 77.449 \left(0,929 + 0,071 \frac{D}{H} \right)$
Efeito de Forma sobre ν	$\nu = 0,29 \left(0,950 - 0,050 \frac{D}{H} \right)$
Efeito de Escala sobre σ_c	$\sigma_c = 17,0 \left(\frac{\frac{D}{1,5} + 12,4}{\frac{D}{1,5} - 1} \right)$
Resistência à Compressão Simples do Maciço Rochoso, C_M	17,0 MPa
Fator de Escala, m	12,4
Menor Distância entre Descontinuidades, b	1,5 cm
Resistência à Compressão Simples da Rocha Intacta, C_0	210,8 MPa
Efeito de Escala sobre E	$E = 86.468 D^{-0,134}$
Resistência à Tração, T	-6,2 MPa
Coesão, c	14,7 MPa
Ângulo de Atrito, φ	44,9 °
Constante m (Critério de Ruptura de Hoek & Brown)	12,5
Constante s (Critério de Ruptura de Hoek & Brown)	0,8
Constante m_b (Critério de Ruptura de Hoek & Brown Modificado)	15,3
Constante a (Critério de Ruptura de Hoek & Brown Modificado)	0,5

Tabela 1 - Resultados da caracterização mecânica

3.3. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA MINA VIA MODELAMENTO NUMÉRICO

O método dos elementos distintos simula a resposta de meios descontínuos, como os maciços rochosos fraturados, quando sujeitos a carregamentos estáticos e dinâmicos. O meio descontínuo é representado como um conjunto de blocos discretos.

As descontinuidades são tratadas como condições de fronteira entre blocos, sendo possível simular grandes deslocamentos ao longo de descontinuidades e rotações de blocos.

Blocos individuais podem apresentar comportamento de material rígido ou de material deformável. Os blocos deformáveis são subdivididos em uma malha de elementos de diferenças finitas e cada elemento responde a leis tensão-deformação lineares ou não-lineares previamente definidas. O movimento relativo em descontinuidades é também governado por relações força-deslocamento lineares ou não-lineares nas direções tangencial e normal.

Em nosso modelo visamos simular a evolução da lavra no tempo, através da escavação sucessiva dos 18 salões previstos no projeto original da Mina Baltar e observamos a situação final da mina em termos de tensões e deformações.

No próximo gráfico temos a distribuição das tensões verticais atuantes na região da mina. Observamos o carregamento crescente imposto aos pilares no sentido do incremento de sua profundidade (esquerda para direita e cima para baixo).

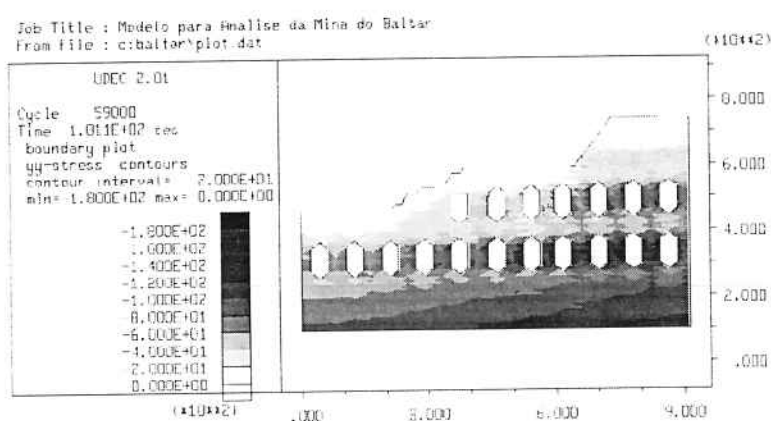


Figura 11 - Distribuição das tensões verticais ($\times 10^1$ MPa)

A seguir temos o gráfico dos valores da tensão principal maior atuante no centro dos pilares numerados de 1 a 16 (pilares de 1 a 6 no nível superior da esquerda para a direita e pilares de 7 a 16 no nível inferior, no mesmo sentido):

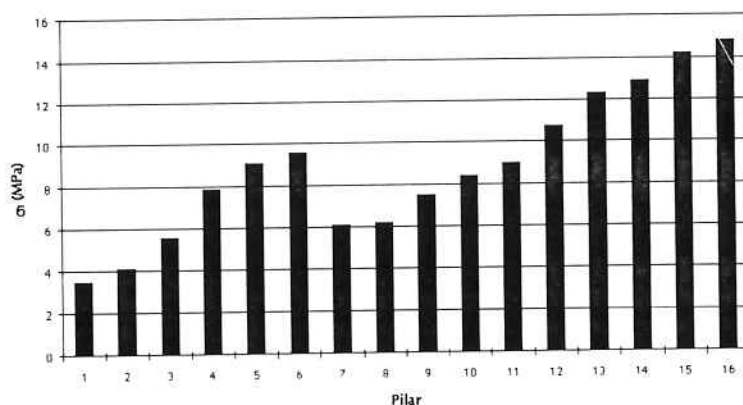


Figura 12 - Tensão principal maior atuante nos pilares (compressão)

4. *DEFINIÇÃO DA ZONA DE ROCHA PERTURBADA NO ENTORNO DE GALERIAS EM RAZÃO DA AÇÃO DO DESMONTE POR EXPLOSIVOS*

O projeto de minas subterrâneas deve envolver preocupações voltadas a análise não só do comportamento da mina como um todo, de acordo com sua condição estrutural e independentemente dos métodos de escavação, mas também a análise da estabilidade de escavações de forma particularizada em função do processo produtivo. Este tipo de estudo deve ser conduzido levando-se em consideração as condições estruturais do maciço e os problemas advindos de seu método construtivo.

Neste sentido, o aspecto com o qual nos preocupamos é o da quantificação do enfraquecimento estrutural do maciço, quando da escavação de galerias, em razão da ação do desmonte por explosivos.

No método convencional de desmonte de rochas, a reação de detonação converte explosivo sólido em gases a altas temperaturas em um curto intervalo de tempo. A rápida expansão destes gases gera um pulso de pressão que atravessa as paredes do furo de mina e se propaga pela rocha. Nas vizinhanças do furo a tensão induzida por este pulso excede o limite elástico da rocha provocando a abertura de fraturas. Além desta vizinhança imediata não ocorrem deformações permanentes, ao invés, a rápida perda de energia da onda de choque possibilita que a rocha exiba propriedades elásticas, fazendo com que as partículas de rocha retornem à sua posição original após passagem da onda, isto é, as partículas vibram com a passagem da onda de choque.

Quando se utiliza o desmonte por explosivos na abertura de escavações subterrâneas, o fraturamento da rocha além da linha final de delimitação do túnel se constitui em um fator de diminuição da qualidade do maciço rochoso e por conseguinte contribui para a instabilização da escavação subterrânea.

O índice mais utilizado para quantificar a intensidade de vibração induzida no terreno é a velocidade de partícula, ou seja, o maior valor da velocidade de oscilação que uma partícula atinge em torno de seu estado de repouso quando da passagem da onda de choque; e sua principal aplicação prática reside na verificação do nível de dano imposto às construções vizinhas.

Os principais fatores que afetam o desempenho do desmonte são o tipo litológico, qualidade do maciço rochoso, tipo de explosivo, carga detonada instantaneamente, reflexão da onda em faces livres, esperas, direção de iniciação e geometria do plano de fogo associada a afastamento, espaçamento, tamponamento e sub-perfuração. Um plano de fogo bem dimensionado deve associar a maximização do aproveitamento da energia do explosivo à minimização da vibração induzida nas vizinhanças do ponto lavrado.

Buscando contribuir para um maior conhecimento destes fenômenos, bem como para auxiliar seu equacionamento desenvolvemos aqui utilizações do índice velocidade de partícula na delimitação da zona de rocha perturbada na vizinhança de uma escavação subterrânea e como um parâmetro para avaliação do desempenho de planos de fogo em subterrâneo. A metodologia aqui proposta baseia-se na análise do campo vetorial tridimensional de velocidades de partícula aplicando-se a lei de atenuação que expressa a dependência da velocidade de partícula em relação à carga e a distância.

Qualquer tentativa de simulação matemática direta do processo de fragmentação da rocha devido à detonação de uma carga explosiva deve passar pelo equacionamento dos vários mecanismos de fragmentação:

- Trituração por altas pressões.
- Gretamento.
- Ação dos gases.
- Reflexão da onda de choque.
- Expulsão da rocha.
- Colisão.

Estes são mecanismos bastante complexos, envolvem parâmetros de difícil quantificação e seu equacionamento não está completamente formulado. Desta forma, a confecção de um modelo matemático

que abarque todos estes mecanismos só se faz possível através da adoção de hipóteses simplificadoras e da estimação de parâmetros, prejudicando a consistência do modelo.

Uma solução é a formulação de um modelo baseado em um índice indireto cujo levantamento possa ser realizado com boa precisão e que represente de forma geral o processo. A proposta de nosso estudo é que a “*velocidade de partícula*” possa desempenhar este papel. Nosso interesse imediato é a delimitação da zona de rocha perturbada no entorno de escavações subterrâneas em virtude do desmonte, e o principal mecanismo gerador deste enfraquecimento do maciço é o gretamento produzido pela passagem da onda de choque. Assim, acreditamos que o índice velocidade de partícula, como uma medida da velocidade até a qual as partículas do maciço são impulsadas quando da passagem da onda de choque, pode representar bem o fenômeno.

As ondas de choque que transportam a energia liberada na detonação da carga explosiva manifestam-se principalmente sob duas formas: ondas de superfície e ondas interiores. Entre as ondas de superfície estão as ondas Rayleigh e as ondas Love, estas são responsáveis pelos possíveis danos causados a construções vizinhas; e entre as ondas interiores estão as ondas de compressão e as ondas de cisalhamento, estas provocam deformação e fragmentação da rocha, sendo portanto as ondas que devem ser levadas em consideração em nosso estudo.

A quantidade de energia transportada por estas ondas de choque depende diretamente da massa de explosivo detonado, já que esta energia é derivada da reação química de decomposição do material explosivo. A energia transportada depende também inversamente da distância do ponto considerado, já que esta energia é dissipada durante o percurso da onda sob a forma de deformação e fragmentação da rocha, além da própria diminuição da densidade de energia na superfície da frente da onda em razão de sua expansão. A expressão matemática destas dependências é denominada “*Lei de Atenuação*”.

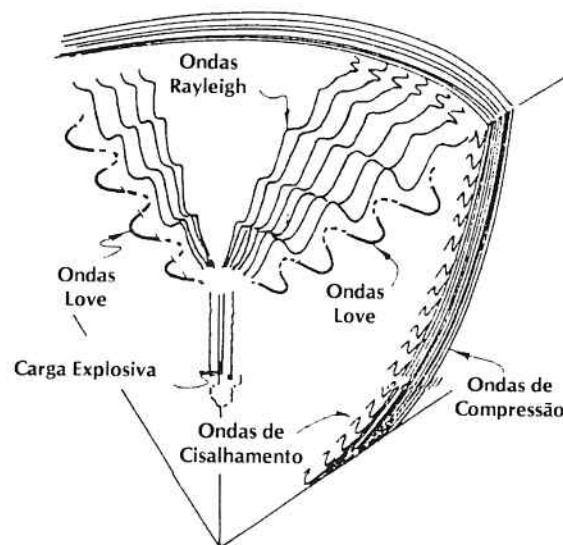


Figura 13 - Ondas sísmicas geradas na detonação de uma carga explosiva

Uma expressão geral para a “*Lei de Atenuação*”, utilizando constantes empíricas advindas da caracterização de cada situação em particular foi apresentada por Holmberg e Persson em 1.980 e também por Shoop e Daemen em 1.983:

$$V = k Q^a DS^b$$

Onde k, a e b são constantes empíricas que variam em função do tipo de explosivo, tipo de iniciação e litologia.

4.1. PROGRAMA DE CÁLCULO

Foi desenvolvido especialmente para este estudo um programa que usa como suporte o sistema de processamento matemático Mathematica v. 2.2.1 da Wolfram Research, Inc.

O programa por nós desenvolvido baseia-se no mapeamento do campo vetorial de velocidades de partícula máximas no espaço tridimensional, geradas na detonação de um furo carregado de explosivo, tanto para desmontes a céu aberto como em subterrâneo.

Conhecida a lei de atenuação para uma dada combinação de maciço rochoso, tipo de explosivo e sistema de desmonte, a distribuição de velocidades de partícula será mapeada de acordo com as seguintes hipóteses simplificadoras implícitas no modelo adotado:

- Continuidade e isotropia do meio.
- Detonação instantânea da carga explosiva.
- Atuação apenas da onda primária.
- As contribuições de cada elemento infinitesimal de carga atingem os pontos do maciço rochoso no mesmo instante de tempo.
- Não são considerados efeitos de estruturas singulares, como falhas e inclusões.
- Não são considerados efeitos de reflexão e refração em superfícies livres.

Os benefícios práticos da aplicação da metodologia desenvolvida se concentram em três aspectos básicos, a saber:

- Melhor compreensão da distribuição espacial do campo de velocidades de partícula gerado pela detonação de uma ou mais cargas explosivas.
- Definição da zona de rocha perturbada no entorno de uma escavação subterrânea em razão do desmonte por explosivos. Zona esta, que deverá receber reforço estrutural, tal como chumbadores, ou injeção de calda de cimento.
- Análise da eficiência de planos de fogo em superfície e em subterrâneo.

A seguir apresentamos respectivamente a representação do campo vetorial de velocidades de partícula para a detonação de uma carga singular, e o diagrama com a distribuição de velocidades no plano médio da carga (a região branca corresponde a velocidades maiores que 700 mm/s, caracterizando a zona de rocha fragmentada):

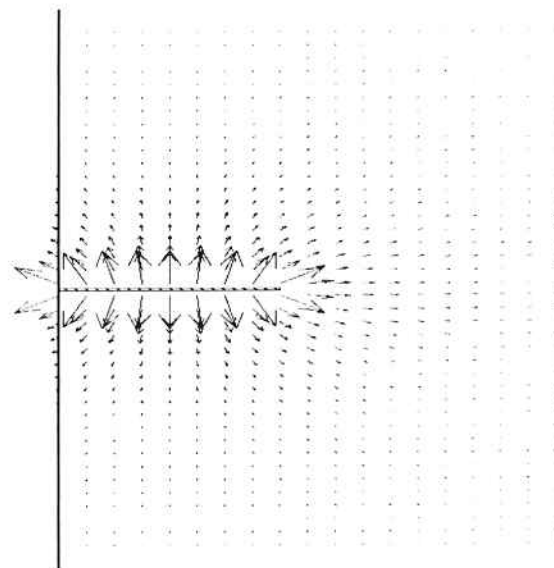


Figura 14 - Campo de velocidades de partícula ($v_{\max} = 2.326 \text{ mm/s}$)

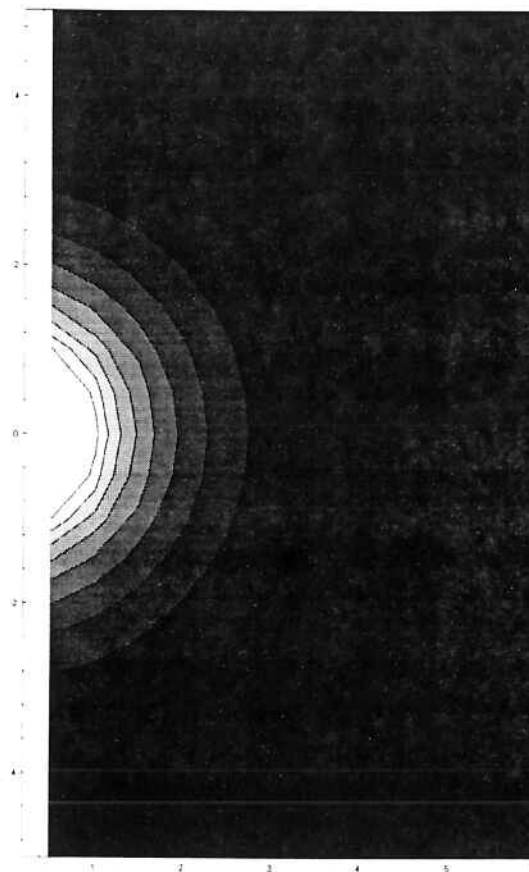


Figura 15 - Intensidade de velocidade de partícula no plano médio da carga

4.2. CONCLUSÕES

O campo de aplicação para a metodologia apresentada é bastante amplo e complexo, este trabalho pretende ser um primeiro passo na direção do equacionamento de um problema bastante comum na mineração e nas obras civis, ficando o abarcamento de casos particulares e peculiaridades estruturais do maciço rochoso para esforços futuros de matematização e programação computacional.

Salientamos que apesar do equacionamento matemático empregado basear-se na utilização de um modelo de comportamento contínuo do maciço rochoso, este na verdade se constitui em um contínuo equivalente, já que através da lei de atenuação, engloba-se a heterogeneidade do maciço rochoso. Assim sendo, a confiabilidade dos resultados obtidos dependerá diretamente da qualidade do levantamento da curva de atenuação.

O Laboratório de Mecânica de Rochas - LMR, do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP, dispõe de sismógrafo de engenharia, com o qual é possível levantar curvas de distribuição da velocidade de partícula em maciços rochosos de diferentes litologias e proceder-se à determinação das constantes características. O passo seguinte no prosseguimento dos trabalhos aqui iniciados, deverá se constituir na aplicação da metodologia a casos práticos, levantando curvas de atenuação para diferentes maciços rochosos e comparando os resultados do desmonte com as predições do modelo.

5. OTIMIZAÇÃO DA DIREÇÃO DE GALERIAS EM MACIÇOS FRATURADOS

Um aspecto importante e específico do projeto de minas subterrâneas utilizando-se o método de lavra por câmaras e pilares é a definição da adequada geometria do conjunto de escavações em relação às condições estruturais do maciço. Estudaremos aqui a adequação do "layout" do conjunto de escavações em relação ao

problema do aparecimento de cunhas instáveis nas paredes das escavações, propondo uma metodologia baseada na “Teoria do Bloco Chave”.

O método de lavra por câmaras e pilares é um dos sistemas mais utilizados na exploração subterrânea de corpos mineralizados tabulares com pequena inclinação, em razão de permitir seletividade e flexibilidade operacional.

A constante demanda por aumento de produtividade e segurança em minerações utilizando este método de lavra conduz a esforços de otimização no campo do projeto e da operação. Um dos principais problemas enfrentados nestas minerações são os deslizamentos e quedas de blocos nas paredes e no teto de galerias escavadas em minério ou estéril, implicando em risco de acidentes, quebras de produção e possibilidade de colapso estrutural de regiões da mina, tudo isto incorrendo em custos materiais e humanos não-previsíveis. Sabe-se que a maior ou menor incidência de queda de blocos em galerias está associada ao seu direcionamento em relação ao fraturamento do maciço. Neste sentido um dos mais importantes fatores na otimização do “layout” de minas lavradas através do método de câmaras e pilares, deverá ser a definição do adequado direcionamento do conjunto galerias/pilares.

Uma das metodologias que permite a avaliação “a priori” da segurança de escavações a céu aberto e em subterrâneo, levando em consideração características geométricas e mecânicas das descontinuidades é a Teoria do Bloco Chave e procuraremos aqui exemplificar sua aplicação na otimização da orientação das escavações utilizadas no método de lavra por câmaras e pilares.

No método de lavra por câmaras e pilares aplicamos dois sistemas de galerias paralelas formando um ângulo α entre si que varia nas proximidades de 90° , o cruzamento dos dois sistemas de galerias define as câmaras e os pilares, como pode ser visto na figura a seguir:

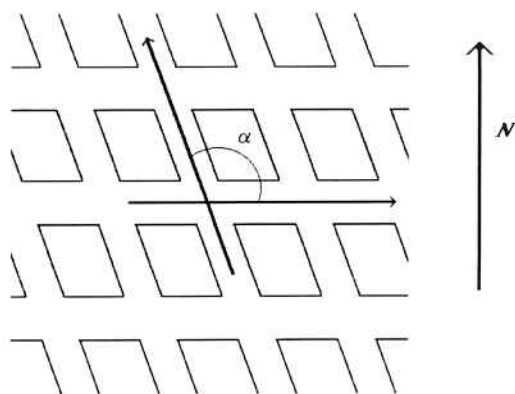


Figura 16 - Conjunto de galerias utilizadas no método de lavra por câmaras e pilares

Nossa metodologia para a otimização da direção de uma galeria aplicando-se a teoria do bloco chave, se constitui na minimização do volume de cunhas geradas na simulação da escavação das galerias segundo diferentes direções, como pode ser visto no fluxograma apresentado a seguir:

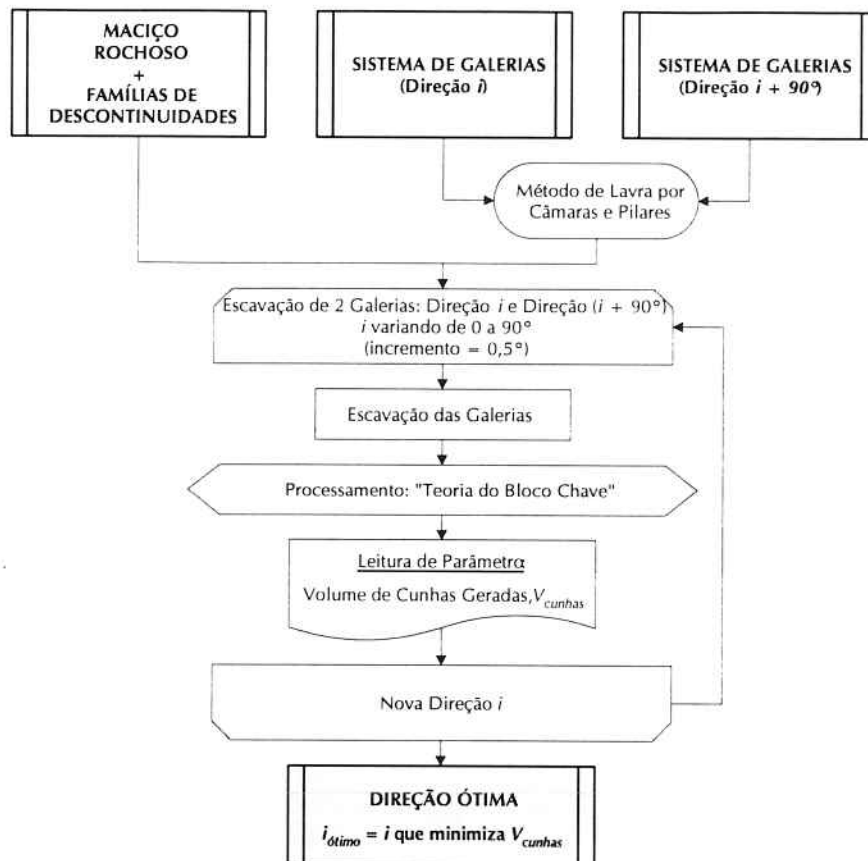


Figura 17 - Metodologia para a otimização da direção das galerias utilizadas no método de lavra por câmaras e pilares

A aplicação da metodologia será exemplificada através da análise de um caso real, como veremos a seguir.

5.1. ESTUDO DE CASO: MINA DO URUCUM, MS

A mina de minério sedimentar de manganês do Urucum situa-se no Estado do Mato Grosso do Sul no denominado Grupo Jacadigo, uma seqüência de rochas sedimentares de ambiente glaciomarinho, sobreposta a um embasamento precambriano complexo, de alto grau de metamorfismo, constituído de gnaisses e granitos.

A Formação Urucum é caracterizada pela predominância de arcósios grosseiros, sobre uma brecha sedimentar na base, constituída de fragmentos de gnaisses, granito, xisto, calcário, etc.; com espessura da ordem de 200 a 250 metros.

Atribuí-se predominância da tectônica de falhamento ao Grupo Jacadigo, representada por dois sistemas principais de falhas, um nordeste e outro leste-oeste. A região da Mina do Urucum mostra tanto na camada de manganês quanto em toda a seqüência sedimentar fraturamento com atitudes variadas, porém quase sempre subverticais. Sua disposição não mostra grande continuidade ou tendência a assumir determinado padrão. Seus rejeitos são da ordem de centímetros, não tendo sido registrado nenhum rejeito maior do que 3 metros. Se encontram de forma geral preenchidas por material argiloso branco ou vermelho proveniente de dissolução da seqüência arcósia e jaspilítica acima.

Segundo dados de mapeamento de descontinuidades realizado pela empresa na região do nível 5E da mina temos as direções predominantes para as famílias de descontinuidades apresentadas sob a forma de estereograma na figura que segue:

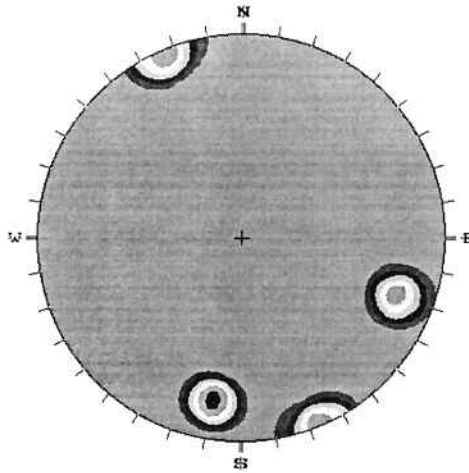


Figura 18 - Estereograma para as famílias de descontinuidades

Para o caso de escavações utilizadas no método de lavra por câmaras e pilares dispostas a ângulos de 90° , aplicando a metodologia proposta, temos as direções mais e menos favoráveis caracterizadas no gráfico que segue:

$$\begin{aligned} i_{\text{mais favorável}} &\approx 62,5^\circ \\ i_{\text{menos favorável}} &\approx 27,5^\circ \end{aligned}$$

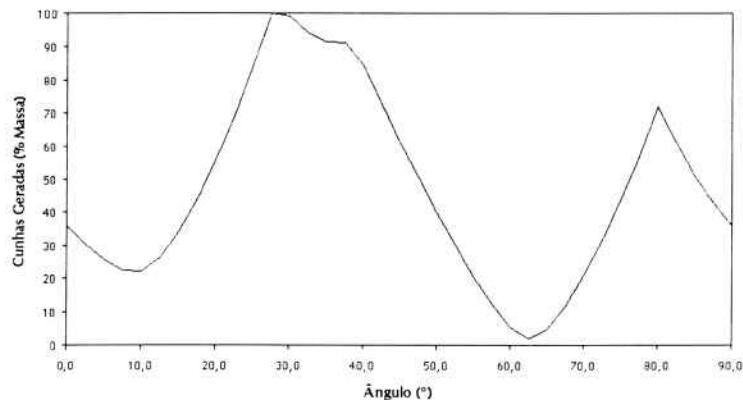


Figura 19 - Cunhas geradas em função da direção das escavações para lavra por câmaras e pilares ($\alpha = 90^\circ$)

5.2. CONCLUSÕES

A direção realmente praticada para o conjunto de galerias na região do nível 5E na Mina do Urucum corresponde a um ângulo de aproximadamente 45° , como pode ser visto na figura que segue; esta direção fornece 61 % do volume máximo de cunhas para esta região do maciço, este valor é bastante desfavorável quando comparado à direção ótima determinada através da Teoria do Bloco Chave, $i = 62,5^\circ$, que fornece apenas 2% do volume máximo de cunhas.

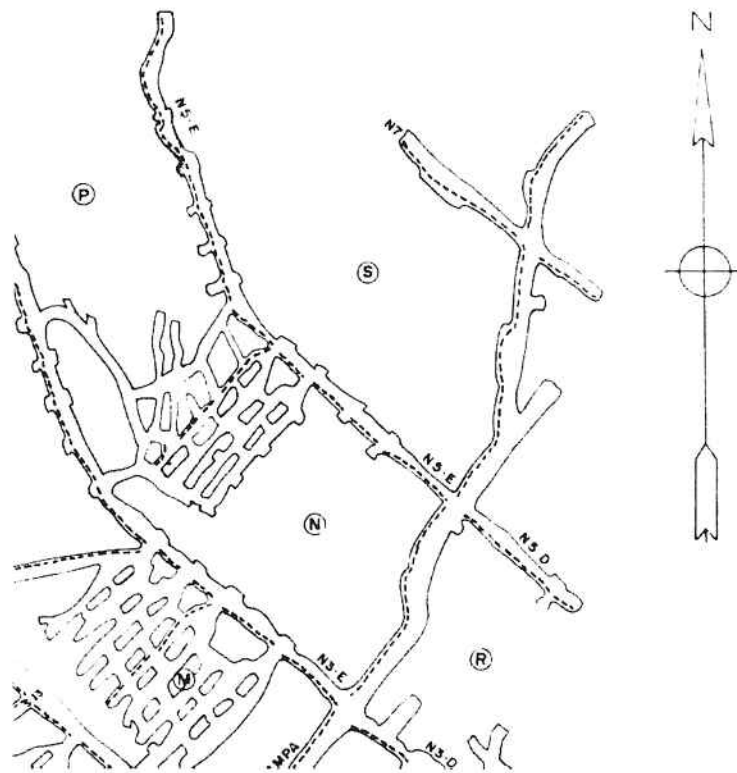


Figura 20 - "Layout" da mina na região do nível 5E

A solução operacional para a minimização dos problemas de teto desta região da mina, seria a alteração na direção do conjunto de galerias em $17,5^\circ$, contribuindo para o incremento da segurança na lavra e para uma diminuição dos gastos com o sistema de estabilização de teto.

6. O ARCO DE PRESSÃO EM MINAS SUBTERRÂNEAS

Segundo as hipóteses da teoria da área tributária, todo o carregamento imposto pela rocha sobrejacente à camada de minério lavrada através do método de câmaras e pilares, é suportado pelos pilares da mina, e a distribuição da carga é uma função da geometria da área lavrada. Entretanto, observações de tensões atuantes em pilares e deformações em teto e piso tem mostrado que a distribuição destas tensões e deformações pode variar com a dinâmica da lavra, de acordo com a disposição e dimensões adotadas em projeto para as galerias, pilares e pilares barreira, condicionada ao estabelecimento dos "arcos de pressão".

O arqueamento é um processo de redistribuição das tensões, produto do relaxamento das camadas de rocha imediatamente superiores a uma escavação; ocorrendo aumento das tensões sobre os pilares e sobre as extremidades da região, no maciço não-lavrado. Esta zona de compressão se ramifica ou "arqueia" a partir dos pilares ou da região do maciço não-lavrado, com seu topo situado acima das escavações, nas camadas de rocha sobrejacentes.

Na ilustração apresentada a seguir, observa-se o efeito de deformabilidade de teto, piso e pilar, o último representado por um macaco hidráulico. Se o macaco for abaixado lentamente, teto e piso irão convergir, aumentando a carga nas extremidades, F_x , e reduzindo o carregamento no pilar, F_p . Se o teto for forte o suficiente para fletir e suportar a carga entre suas extremidades, o macaco poderá ser removido. Tal situação reproduz a condição de ruptura progressiva de um pilar. A resistência de pós-ruptura residual do pilar pode ser muito baixa, entretanto, o teto adjacente e as paredes das escavações continuam estáveis caso as camadas do teto sejam fortes o suficiente para transferir o carregamento para outros pilares ou para as extremidades da região lavrada. A carga total, $2 F_x + F_p$, permanece constante, mas o carregamento em cada pilar pode variar de acordo com suas propriedades de deformação.

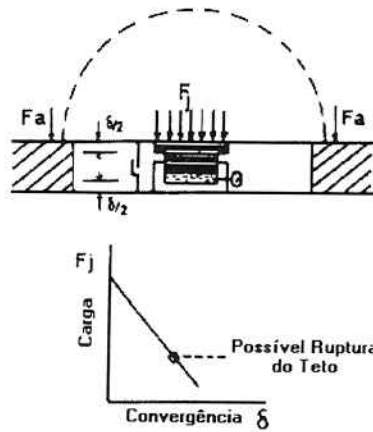


Figura 21 - Redistribuição do carregamento dos pilares

6.1. ANÁLISE VIA MODELAMENTO NUMÉRICO

A observação da manifestação do fenômeno do arco de pressão em minas subterrâneas envolve muitas dificuldades, sendo esta uma das razões para o pouco estudo deste fenômeno. Esta tarefa inclui por um lado, procedimentos observacionais, onde através do acompanhamento da condição de integridade de teto, piso e pilares, é possível inferir seu estado de carregamento e as tendências de deformação. De outro lado temos procedimentos caros, trabalhosos e de difícil interpretação consistindo na instalação de instrumentação composta de medidores de tensões "in situ" para a leitura das tensões nos pilares e registradores de convergência teto-piso. De qualquer forma estes dois métodos implicam na observação da condição posterior à abertura das escavações, fornecendo apenas elementos para projetos futuros.

Uma alternativa para o estudo do problema é a representação do maciço rochoso sob a forma de um modelo numérico que permita a simulação de diferentes condições de lavra. O estudo de modelos deste tipo nos possibilita uma melhor compreensão do fenômeno físico em si, já que podemos ter controle sobre todas as variáveis envolvidas; além também de fornecer importantes subsídios para o projeto de novas instalações mineiras ou a exploração de áreas ainda não lavradas em minas já em operação.

Estudaremos a forma de manifestação do arco de pressão, simulando a lavra de uma camada tabular de minério situada a 350 m de profundidade através do método de câmaras e pilares, segundo várias condições geométricas, utilizando o método dos elementos distintos através do programa UDEC - Universal Distinct Element Code, versão 2.01 desenvolvido pela Itasca Consulting Group Inc.

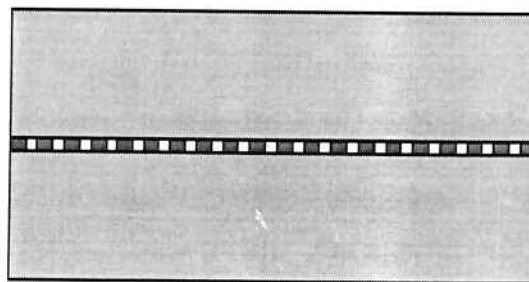


Figura 22 - Configuração final da área lavrada (situação 1: 19 galerias e 20 pilares)

A seguir apresentamos a sobreposição das curvas de distribuição de tensões sobre os pilares para a escavação das 19 galerias.

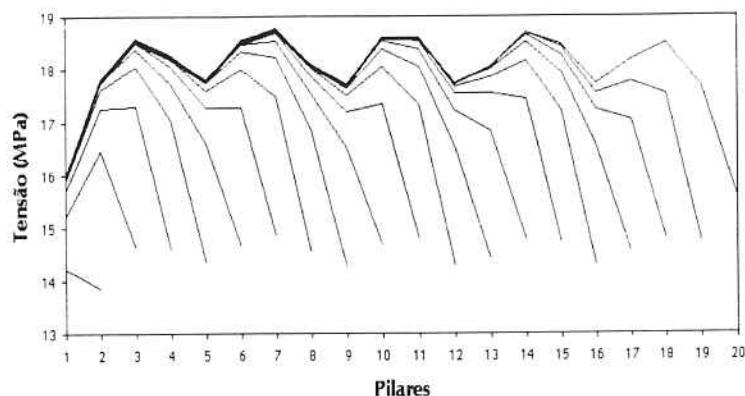


Figura 23 - Curvas de distribuição de tensões nos pilares (situação 1)

Observamos que a distribuição das tensões atuantes sobre os pilares, ao contrário da hipótese adotada na formulação da teoria da área tributária, não permanece constante com a evolução da lavra. O carregamento imposto aos pilares possui caráter dinâmico, com tendência a acréscimo até um certo valor limite de acordo com a abertura das novas galerias.

Com o avanço da lavra e o alargamento da região sob solicitação do carregamento da rocha sobrejacente, os pilares vão sofrendo aumento de carga, até um limite máximo, a partir do qual a escavação de uma nova galeria e a mobilização de um incremento de carga, não fornece acréscimo de tensão aos pilares anteriormente escavados e um novo ciclo com o carregamento dos pilares subsequentes é iniciado.

Este fenômeno pode ser observado nas curvas de tensão atuante sobre os pilares, na seqüência de escavação das galerias 1 a 5. A partir da escavação da galeria 6 e subsequentes, inicia-se um novo processo que se desenvolve até a escavação da galeria 9; neste momento observa-se picos de tensão sobre os pilares 3 e 7, caracterizando-os como os pontos de apoio do arco de pressão, concomitantemente é estabelecida uma zona de descompressão sobre os pilares 4, 5 e 6. Este procedimento se repete e ao final do processo de lavra temos picos de tensão sobre os pilares 3, 7, 10 (os pilares 10 e 11 apresentam mesma carga), 14 e 18.

Na situação 2 temos a escavação sucessiva de 16 galerias paralelas na camada de minério, definindo 16 pilares e 1 pilar barreira, com as características apresentadas a seguir:

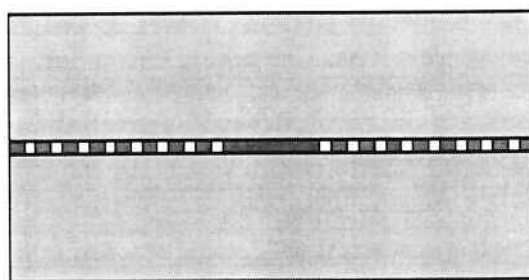


Figura 24 - Configuração final da área lavrada (situação 2)

A seguir apresentamos a sobreposição das curvas de distribuição de tensões sobre os pilares para a escavação das 16 galerias.

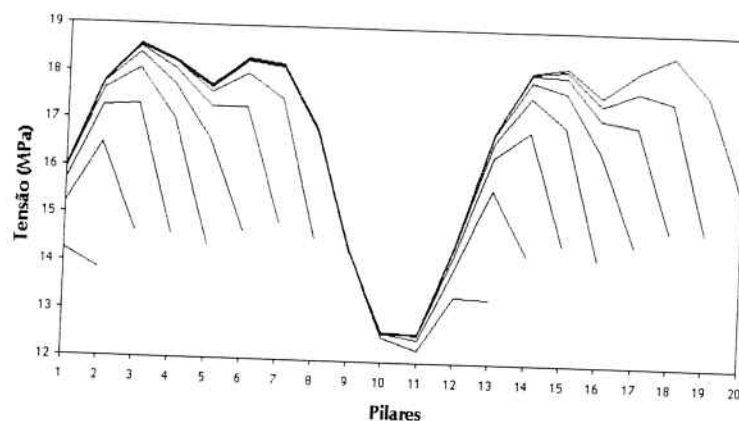


Figura 25 - Curvas de distribuição de tensões nos pilares (situação 2)

6.2. CONCLUSÕES

A partir do discutido e do modelo numérico desenvolvido foi possível a observação da forma de manifestação do arco de pressão quanto ao sobrecarregamento de pilares a intervalos regulares e geração de zonas de alívio de tensões.

Deve-se notar que as características do arco de pressão são função de parâmetros intrínsecos do maciço rochoso e da geometria das áreas lavradas, tais como:

- Características mecânicas da rocha encaixante e da camada de minério.
- Ocorrência de famílias de juntas.
- Campo de tensões naturais do maciço rochoso.
- Profundidade da camada de minério.
- Dimensão das galerias e pilares.

O estabelecimento de equações gerais que descrevam adequadamente o fenômeno é uma tarefa complexa, pois deve levar em consideração todos estes fatores. Este é um campo de pesquisa onde a caracterização de maciços, a instrumentação de campo e o modelamento numérico devem caminhar juntos na busca do incremento da operacionalidade e da segurança das minas subterrâneas lavradas através do método de câmaras e pilares.

7. CONCLUSÕES FINAIS

A dependência do homem em relação aos bens minerais, já a longo tempo estabelecida, perdurará enquanto prosseguir sua luta pela subsistência. As necessidades ditadas pelo progresso tecnológico e por questões ambientais continuará pressionando a indústria mineral por aumentos de produtividade e pela oferta de novos produtos. Estas necessidades só poderão ser supridas por uma melhora nas técnicas de exploração; melhora esta, que deve ser promovida através de um melhor entendimento do comportamento das rochas e dos maciços rochosos.

Assim sendo, a busca da compreensão dos fenômenos físicos e o desenvolvimento de novas tecnologias deve ser uma preocupação constante. Em nosso trabalho procuramos dar uma pequena contribuição nesse sentido, através da discussão de técnicas modernas e de preocupações atuais quanto ao comportamento dos maciços rochosos. As conclusões que apareceram como fruto de nossos estudos foram explicitadas no decorrer do trabalho e apresentamos agora suas principais idéias:

- O conhecimento das propriedades mecânicas das rochas é um elemento fundamental no projeto de minas subterrâneas, e seu sucesso é extremamente dependente da confiabilidade dos dados alimentados. A variabilidade nos resultados de ensaios em rocha é uma característica que distingue o material rochoso dos materiais artificiais, como o concreto e os metais, em virtude da heterogeneidade sempre presente. Assim sendo, trabalhos de caracterização mecânica de rocha devem envolver um número de amostras corretamente dimensionado para garantir a representatividade dos resultados. Outro dado importante é a maior acurácia dos equipamentos atualmente utilizados, disponíveis agora, inclusive no Brasil; permitindo que nossa comunidade técnica disponha de serviços confiáveis e que pesquisas técnico-científicas de alta qualidade possam ser desenvolvidas.
- A conjugação das operações de abertura de vias subterrâneas e estabilização do maciço deve ter sua base no conhecimento da influência de fatores como método construtivo, geometria das escavações e configuração geral da área lavrada. A otimização de fatores como planos de fogo, dimensão de escavações e relação entre a geometria das escavações, pilares e áreas de segurança deve ser realizada com base no conhecimento do comportamento mecânico do maciço rochoso e das condições de redistribuição de tensões e deformações.

Nosso objetivo futuro é o prosseguimento e a ampliação do estudo dos conceitos discutidos em nosso presente trabalho, através da realização de pesquisa em áreas como a otimização dos processos de ensaio em rocha, aperfeiçoamento de metodologias utilizadas no modelamento numérico do comportamento mecânico dos maciços rochosos e nas técnicas de observação em campo dos fenômenos envolvendo rochas e descontinuidades.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PMI/001 - Características Geométricas da Escavação Mecânica em Mineração: Exemplo de Escavadora de Caçamba de Arraste - ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/002 - Prospecção Geoquímica Experimental na Ocorrência de Ouro Tapera Grande - PAULO BELJAVSKIS, HELMUT BORN
- BT/PMI/003 - Estudo de Processo de Dupla Flotação visando o Beneficiamento do Minério Carbonático de Fosfato de Jacupiranga - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/004 - Desenvolvimento de um Equipamento Não-Convencional em Beneficiamento Mineral: A Célula Serrana de Flotação Pneumática - RICARDO NEVES DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/005 - Aluste de Modelos Empíricos de Operação de Ciclones - HOMERO DELBONI JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/006 - Contribuição ao Estudo dos Explosivos Permissíveis - AMILTON DOS SANTOS ALMEIDA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/007 - Contribuição ao Dimensionamento de Pilares em Minas Subterrâneas de Manganês - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/008 - Exploração Mineral: Conceitos e Papel do Estado - LUIZ AUGUSTO MILANI MARTINS, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/009 - Otimização do Projeto de Pátios de Homogeneização através do Método da Simulação Condicional - FLAVIO MOREIRA FERREIRA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/010 - Considerações Gerais sobre Desmonte de Rocha: Análise de Custo - Índice de Produtividade e Otimização da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/011 - Aglomeração de Rejeitos de Fabricação de Brita para sua Reciclagem - ARTHUR PINTO CHAVES, BRADDLEY PAUL
- BT/PMI/012 - Método de Dimensionamento de Peneiras para a Classificação Granulométrica de Rochas ou Minérios - FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/013 - Processo de Beneficiamento para Obtenção de uma Carga Mineral Nobre a partir do Fosfogesso - WALTER VALERY JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/014 - Estudo da Carboxi-Metil-Celulose como Aglomerante para Pelotização - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/015 - A Influência do Amido de Milho na Eficiência de Separação Apatita/Minerais de Ganga Via Processo Serrana - LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/016 - Beneficiamento de Criolita Natural - Estado da Arte - HENRIQUE KAHN, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/017 - Estudo da Variação do Índice Energético Específico - W_i , segundo a Granulometria do Ensaio, Obtida através de um Moinho de Bolas Padrão, em Circuito Fechado - MARIO SHIRO YAMAMOTO, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/018 - Fluorita - FERNANDO FUJIMURA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/019 - O Aproveitamento de Recursos Minerais: Uma Proposta de Abordagem a Nível Nacional - CELSO PINTO FERRAZ, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/020 - Comparação de duas Metodologias - A de Bieniawski e a de Panek, para Dimensionamento de Tirantes em Galerias Subterrâneas de Seção Retangular em Camadas Estratificadas - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/021 - Caracterização de Maços Rochosos através de Envoltórios de Resistência por Tratamento Estatístico utilizando Dados de Laboratório do IPT Simulando Condições Geotécnicas do Maço - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/022 - Avaliação de Impactos Ambientais na Mineração de Combustíveis Fósseis Sólidos - GILDA CARNEIRO FERREIRA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/023 - O Lado Nocivo do Elemento Quartzo no Desgaste Abrasivo de Mandíbula de Britadores - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/024 - Conceitos Básicos de Iluminação de Minas Subterrâneas - SÉRGIO MEDICI DE ESTON, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/025 - Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico - ANTONIO CARLOS NUNES, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/026 - Caracterização Mineralógica/Tecnológica das Apatitas de alguns Depósitos Brasileiros de Fosfato - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN

BT/PMI/027 - Classificação de Maciços quanto à Escarificabilidade - GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, LINDOLFO SOARES

BT/PMI/028 - Análise Comparativa de Métodos de Amostragem de Depósitos Auríferos - FÁBIO AUGUSTO DA SILVA SALVADOR, HELMUT BORN

BT/PMI/029 - Avaliação da Qualidade de Corpos Moedores para o Minério Fosfático de Tapira - MG - GERALDO DA SILVA MAIA, JOSÉ RENATO B. DE LIMA

BT/PMI/030 - Contribuição ao Estudo da Cominuição Inicial à Partir da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/031 - Análises Químicas na Engenharia Mineral - GIULIANA RATTI, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/032 - Usos Industriais da Atapulga de Guadalupe (PI) - SALVADOR LUIZ MATOS DE ALMEIDA, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/033 - Minerais Associados às Apatitas: Análise de sua Influência na Produção de Ácido Fosfórico e Fertilizantes Fosfatados - ROBERTO MATTIOLI SILVA, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES

BT/PMI/034 - Beneficiamento dos Caulins do Rio Capim e do Jari - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/035 - Dimensionamento de Suportes em Vias Subterrâneas - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/036 - Estudos da Modelagem Matemática da Moagem com Seixos para Talco de Diversas Procedências - MARIO VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA

BT/PMI/037 - Mecânica de Rochas Aplicada ao Dimensionamento do Sistema de Atirantamento em Minas Subterrâneas - LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO

BT/PMI/038 - Geometria de Minas a Céu Aberto: Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral - FÁBIO JOSÉ PRATI, ANTÔNIO JOSÉ NAGLE

BT/PMI/039 - Substituição do Aço por Polímero e Compósitos na Indústria Automobilística do Brasil: Determinantes e Consequências para o Mercado de Minério de Ferro - WILSON TRIGUEIRO DE SOUSA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, ANTONIO JOSÉ NAGLE

BT/PMI/040 - Aplicação de uma Metodologia que Simule em Moinho de Laboratório Operações Contínuas de Moagem com Seixos para Talco - REGINA COELI CASSERES CARRISSO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA

BT/PMI/041 - A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará - FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO STELLIN JÚNIOR

BT/PMI/042 - A Produção de Fosfato no Brasil: Uma Apreciação Histórica das Condicionantes Envolvidas - GILDO DE A. DE SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/043 - Flotação em Coluna - Estado de Arte - JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO SALIES LEAL FILHO

BT/PMI/044 - Purificação de Talco do Paraná por Flotação e Alvejamento Químico - IVAN FALCÃO PONTES, LAURINDO SALLES LEAL FILHO

BT/PMI/045 - Pequena Empresa - A Base para o Desenvolvimento da Mineração - GILSON EZEQUIEL FERREIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/046 - Máquinas de Flotação - ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES

BT/PMI/047 - Aspectos Tecnológicos do Beneficiamento do Carvão de Candiota (RS) - ANTONIO RODRIGUES DE CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/048 - Efeito das Dimensões de Provetas no Dimensionamento de Espessadores - ELDON AZEVEDO MASINI, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/049 - Água no Processamento Mineral - RODICA MARIA TEODORESCU SCARLAT, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/050 - Drenagens Ácidas do Estéril Piiritoso da Mina de Urânio de Poços de Caldas: Interpretação e Implicações Ambientais - VICENTE PAULO DE SOUZA, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ

BT/PMI/051 - "Caracterização Tecnológica de Minérios Auríferos. Um Estudo de Caso: O Minério Primário da Jazida de Salamangone, AP." - MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI, HENRIQUE KAHN

BT/PMI/052 - Ensino de Engenharia de Minas - WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/053 - Redistribuição de Tensões e Desenvolvimento da Zona Clástica em Túneis Circulares - FERNANDO FUJIMURA

- BT/PMI/054 - Projeto de Barragem para Reservação de Mistos de Minerais Pesados Rejeitados pelo Beneficiamento de Cassiterita na Mina do Pitinga - MARCELO PIMENTEL DE CARVALHO, EDER DE SILVIO, LINDOLFO DE SILVIO
- BT/PMI/055 - A Segurança e a Organização do Trabalho em uma Mineração Subterrânea de Carvão da Região de Criciúma - Santa Catarina - DORIVAL BARREIROS, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/056 - Diagnóstico de Lixiviação para Minérios de Ouro - VANESSA DE MACEDO TORRES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/057 - O Estado da Arte em Tratamento de Minérios de Ouro - RONALDO DE MOREIRA HORTA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/058 - Vias Subterrâneas em Rocha - Escavação por Explosivos - WILDOR THEODORO HENNIES, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/059 - Aumento da Seletividade na Separação da Fluorita/Calcita/Barita/Apatita por Flotação. Jazida de Mato Preto - PR - MONICA SPECK CASSOLA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMC/060 - Desenvolvimento de Processo para Extração de Gálio do Licor de Bayer por Resinas de Troca-Iônica de Poli (Acrilamidoxima) - WALDEMAR AVRITSCHER, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO

