

ANÁLISE DE RUPTURAS DE TETO IMEDIATO EM MINA DE CARVÃO, CAMADA BARRO BRANCO

Gabriel Augusto Tôrres PINTO¹; Marcelo Seggiaro ANDRADE; André Cesar ZINGANO³

¹UFRGS, gabriel.augusto@ufrgs.br; ²UFRGS, seggiaro.andrade@ufrgs.br; ³UFRGS, andrezin@ufrgs.br

RESUMO

A segurança, produtividade e vida útil de uma unidade mineira subterrânea dependem da estabilidade das escavações. Para isso, são utilizadas diversas ferramentas de projeto que possibilitam o entendimento do comportamento do maciço rochoso diante do avanço dos processos de lavra. Esse artigo contempla a análise de rupturas de teto imediato utilizando a classificação geomecânica *Rock Mass Rating* (RMR), uma ferramenta que auxilia na quantificação de determinadas características geológicas e geomecânicas do maciço rochoso, as quais podem afetar sua competência, e combina estas, em um único valor na escala de 0-100. Foram determinados os elementos básicos de um projeto de suporte; tais como: tipo de ancoragem, altura de carregamento, comprimento e pressão dos tirantes e o fator de segurança, para cada situação de RMR, baseados em relações empíricas. Os resultados mostraram que a mudança brusca de espessuras e composição do teto imediato no painel estudado, impactou diretamente na funcionalidade do suporte utilizado, levando a eventos de instabilidade e consequente rupturas do teto.

Palavras-chave: Ruptura de teto. RMR. Métodos empíricos de projeto.

ABSTRACT

Security, productivity and life of an underground mining unit depend on the stability of excavations. For this, several design tools are used that allow the understanding of the behaviour of the rock mass on the advancement of mining processes. This article contemplates the immediate roof fall analysis using geomechanics classification Rock Mass Rating (RMR), a tool that assists in the quantification of certain geological characteristics and geomecânicas of the rock mass, which can affect your competence, and combines these into a single value in the range of 0-100. Were determined the basic elements of a support project; such as: anchor type, height, length and bolt loading and safety factor for each situation of RMR, based on empirical relationships. The results showed that the sudden change of thickness and composition of immediate roof on the panel studied, impacted directly on support functionality used, leading to the events of instability and consequent roof falls.

Key-Words: Roof Falls. Rock Mass Rating. Bolt.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade das escavações em uma unidade mineira subterrânea é de fundamental importância para a segurança, produtividade e vida útil da mina. Para se buscar a estabilidade é necessário que os conhecimentos relativos ao maciço rochoso sejam corretamente utilizados e aplicados no processo de dimensionamento, objetivando, desta forma, atender as condições

solicitadas. A segurança de um projeto consiste, entre vários fatores, conhecer as características geológicas, geomecânicas, além do estado de tensões as quais o maciço a ser escavado encontra-se submetido. Só assim, poderá ser conduzida uma estimativa do seu comportamento perante a escavação.

Na região Sul do Estado de Santa Catarina, as minas subterrâneas de carvão, ali implantadas,

operam exclusivamente através do método Câmaras e Pilares e utilizam para a sustentação do teto imediato, tirantes resinados. As minas de carvão têm como característica de lavra, um rápido avanço linear das escavações e consequente elevado volume de tirantes instalados. Esses atributos se devem essencialmente à geometria, espessura do corpo de minério e das características geológicas e geomecânicas das rochas que compõem o ambiente carbonífero.

Durante a vida útil das galerias de uma mina, podem ocorrer eventos de instabilidade do teto imediato, os quais em situações mais graves podem levar a ruptura e colapso total do mesmo.

Vários fatores, isolados ou em conjunto, podem levar a uma situação de instabilidade do teto, portanto, é de extrema importância reconhecê-los, entendê-los e avaliar sua combinação, a fim de evitar, de forma antecipada futuros transtornos.

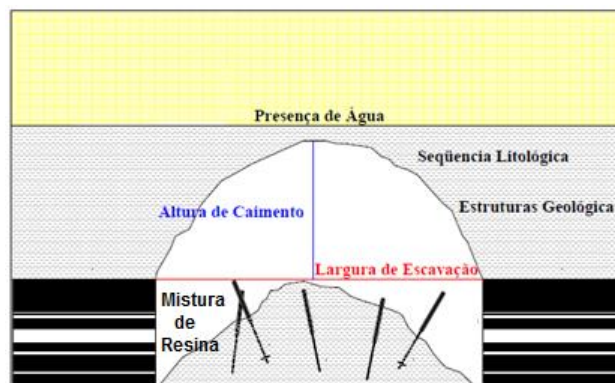
O objetivo do presente trabalho é obter dados geológicos, geomecânicos e operacionais de rupturas do teto imediato em mina de carvão subterrânea, instalada na camada Barro Branco, no intuito de compreender suas possíveis causas. A análise dos dados será realizada pela ótica dos métodos empíricos de projeto, auxiliados pela classificação geotécnica de maciços rochosos *Rock Mass Rating* (RMR).

2 METODOLOGIA

Para realizar uma avaliação dos locais em que ocorreram rupturas do teto imediato, foram levantadas informações geológicas, geomecânicas, geométricas e operacionais das áreas rompidas em quatro cruzamentos, entre as áreas estudadas.

Figura 1, além de dados geotécnicos obtidos a partir de um furo de sondagem realizado nas proximidades dessas quatro áreas. Essas informações técnicas coletadas auxiliaram na definição de um modelo geológico e geomecânico, alimentando o sistema de classificação de maciços rochosos, além de fornecer subsídios para estimativas empíricas, possibilitando assim à realização de comparações e possíveis correlações de processos desencadeadores de rupturas entre as áreas estudadas.

Figura 1 – Ilustração das informações coletadas nos locais de ruptura.



Fonte: Autor

Para auxiliar na avaliação dos eventos de ruptura foram aplicados os conceitos da classificação dos maciços rochosos, que representam sistemas cuja finalidade é determinar a qualidade do maciço através de determinadas características geológicas e geomecânicas. A partir da classificação do maciço rochoso (RMR) tornou-se possível estimar alguns elementos que compõem o projeto de suporte subterrâneo, tais como:

- Tipo de ancoragem
- Altura de Carregamento
- Comprimento do Tirante
- Pressão nos Tirantes
- Fator de Segurança

A classificação RMR, referida aqui neste trabalho como RMR clássico, foi obtida a partir da descrição das características geológicas e geomecânicas das rochas em testemunhos de sondagem, atribuindo pesos/taxas conforme, a tabela índice proposta por Bieniawski (1989). Nessa caracterização, considera-se a resistência da rocha (UCS ou PLT), índice RQD (*rock quality design*), espaçamento entre as descontinuidades, características das descontinuidades e a presença de água.

O RMR retro foi obtido a partir da Equação 1 e define a qualidade do maciço através da razão inversa entre a altura de caimento e a largura da escavação, proposto por Unal (1986).

$$RMR = 100 \left(1 - \frac{H_t}{L} \right) \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde, H_t é altura de caimento (m) ou carregamento e L a largura da escavação (m).

A partir modelo geológico/geotécnico e dos dois índices de qualidade de rochas obtidos (RMR clássico e RMR retro) foram determinado todos os elementos básicos de projeto; tais como:

• Tipo de Ancoragem

Segundo Mark & Barczak (2000), em se tratando de tirantes resinados existem basicamente dois tipos principais de ancoragem: ancoragem por coluna pontual (*pointed anchor*) ou coluna total (*fully grouted*). Os autores também ressaltam que ambos os tipos de ancoragem podem ser instalados com ou sem o emprego de tensão.

Efeito Viga (Coluna Total)

Segundo Dolinar & Bhatt (2000), o resultado da ancoragem coluna total é a maior rigidez do sistema de suporte, que significa incremento na resistência do movimento da rocha. Essa rigidez é alcançada pela rapidez em que as cargas são transferidas entre o tirante e a rocha, isso é possível porque a resina preenche todo o espaço vazio entre o maciço e o parafuso, favorecendo o maior contato entre ambos. Devido à rigidez do tirante, quando há carregamento do suporte, ocasionado pelo deslocamento da rocha, essa carga é distribuída ao longo do sistema, limitando o movimento.

Efeito suspensão (Coluna Pontual)

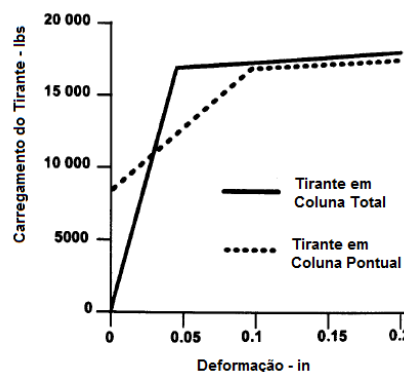
Esse tipo de ancoragem é utilizado quando a configuração das unidades geológicas, que compõem o teto imediato, permite que o tirante seja ancorado em uma camada forte e competente de modo que os extratos inferiores sejam suspensos, a partir da aplicação de um torque, cujo efeito é prender/apertar a porção próxima ao teto imediato formando assim um horizonte de maior rigidez.

Segundo Unal (1986), o teto em processo de deslocamento ou flexão das camadas, gera no tirante, em ancoragem pontual, uma força trativa. O parafuso responde a essa tensão de tração com aplicação de uma força normal na direção contrária.

Segundo Fairhurst & Singh (1974), o mecanismo por suspensão só deve ser utilizado em ambientes de baixas tensões, já que o esse tipo de efeito pode aumentar significativamente as tensões horizontais no teto imediato.

Segundo o gráfico obtido por Mark & Barczak (2000), utilizando os dados obtidos por Karabin and Hoch (1980), Figura 2, é possível fazer as seguintes afirmações:

Figura 2 - Gráfico comparativo entre os efeitos de coluna pontual e coluna total, retirado e modificado de Mark & Barczak (2000) *apud* Karabin & Hoch (1980).



- O tirante utilizando em coluna pontual possui inicialmente uma capacidade de carregamento maior que o tirante em coluna total. Esse último tem sua capacidade de carregamento aumentada de acordo com o deslocamento do maciço.

- De maneira geral, ambos os tipos de ancoragem permitem carregamentos iguais, porém, a ancoragem por coluna total apresenta menor deslocamento.

• Altura de Carregamento

Para estimar a altura de carregamento sob a escavação, foi proposto por Unal (1986) uma fórmula empírica (Eq. 2), a qual estima essa altura através do índice de qualidade do maciço e a largura da escavação, considerando o efeito viga.

$$H_t = \left(1 - \frac{RMR}{100}\right)L \quad [\text{Eq. 02}]$$

Onde, H_t : Altura de carregamento (m), RMR: índice de qualidade do maciço e L : Largura da galeria (m).

• Comprimento dos Tirantes

Com o intuito de estimar o comprimento mínimo dos tirantes, a serem utilizados no efeito

viga (coluna total), foi proposta por Unal (1983) a seguinte relação:

$$C = \left(\frac{H_t}{2} \right) \quad [\text{Eq. 03}]$$

Onde, C: Comprimento mínimo do tirante (m) e H_t : Altura de carregamento (m).

• Pressão nos Tirantes

Para estimar o carregamento nos tirantes através do coeficiente de qualidade de rocha (RMR), foi proposta por Unal (1986), para mineração de carvão, a seguinte equação 4:

$$P = \left(\frac{100 - \text{RMR}}{100} \right) * Ld \quad [\text{Eq. 04}]$$

Onde P: Pressão nos tirantes (kN), RMR: Coeficiente de qualidade de rocha, L: Largura da galeria (m) e d: Densidade do maciço rochoso (Kg/m^3).

• Fator de Segurança

O fator de segurança é uma relação entre forças (forças resistentes/forças atuantes) que indica a proporção entre a carga total suportada, perante as solicitações. Neste trabalho, o termo Fator de Segurança (FS) é utilizado para expressar a relação entre a capacidade de suporte de um tirante ou de um conjunto de tirantes diante da situação de carregamento solicitada pela escavação (equação 5).

$$FS = \left(\frac{C}{S} \right) \quad [\text{Eq. 05}]$$

Onde, FS: Fator de segurança, C: Carga suportada pelo tirante e S: Solicitação de carregamento do tirante.

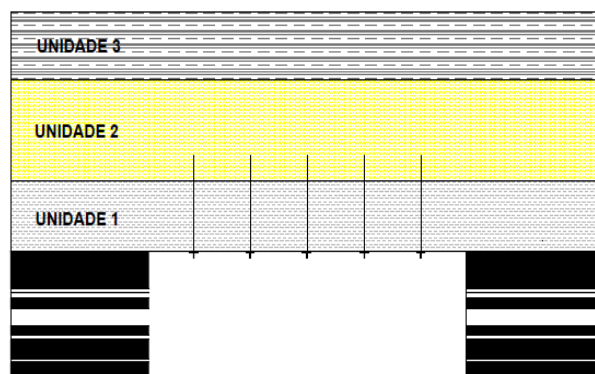
3 ESTUDO DE CASO

3.1 ESCORAMENTO UTILIZADO

Para o escoramento de teto do painel em estudo foram utilizados tirantes com 1,50 m de comprimento total, sendo que o mesmo apresenta 10 cm de rosca em sua porção inferior, restando 1,40 m de tirante efetivo. O parafuso é composto de aço, com 16 mm de diâmetro, capacidade 10.000 Kg, e utiliza na instalação um cartucho de resina rápida de 600 mm, que forma uma coluna pontual de resina com aproximadamente 0,75 m. O torque

mínimo aplicado é de 12 Kg/m^2 , a Figura 3, ilustra a situação proposta para o suporte do painel.

Figura 3 - Perfil geológico proposto para o suporte do painel, alvo do estudo.



Fonte: Autor

A unidade 1, situada na base da sequência de teto pode ser definida petrograficamente como quartzo-mica siltito arenoso, é sobreposta pela unidade 2, formada por quartzo-mica arenito com granulometria média e por fim, completando o teto imediato, a unidade 3, no topo da sequência, é composta por quartzo-mica siltito maciço.

3.2 RMR CLÁSSICO

Conforme esclarecido anteriormente, o RMR clássico foi obtido a partir da caracterização de testemunhos de sondagem, atribuindo os pesos proposto por Bieniawski (1989) (Tabela 1).

Tabela 1—Caracterização geomecânica de sondagem geotécnica vertical do teto imediato.

Furo Geotécnico - RMR Clássico		
Parâmetro	Valor	Coefficiente
Resistência	43 Mpa	+4
RQD	52,25%	+13
Espaçamento	8,85 cm	+8
Descontinuidades	-	+11
Presença de Água	Seco	+15
RMR		+51

Fonte: Autor

3.3 RMR RETRO

Obtido através da razão entre parâmetros geométricos (altura de carregamento (H_t) e largura da escavação (L) para os quatro casos estudados, aplicando a equação 1, com resultados conforme a Tabela 2.

Tabela 2– Resumo dos cálculos do índice RMR retro.

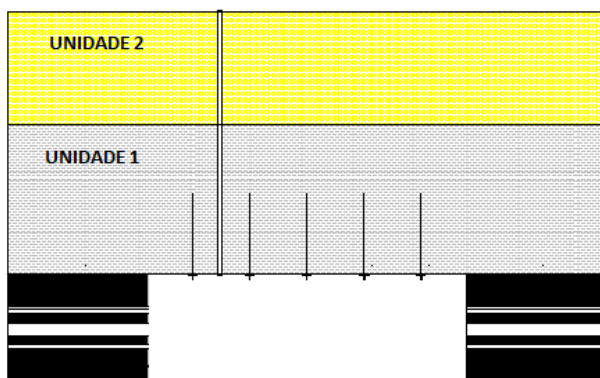
RMR Retro				
Situações	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
Comprimento médio do Vão (m)	8,18 m	8,97 m	8,14 m	7,89 m
Altura do Caimento (H_t) (m)	2,35 m	2,55 m	2,98	3,10 m
RMR _{retro}	+71	+72	+63	+61

Fonte: Autor

3.4 MODELO GEOLÓGICO

O furo de sondagem vertical de teto executado contribuiu para a definição de um perfil geológico (Figura 5) e consequentemente, forneceu as informações necessárias para a criação do modelo geológico e geotécnico do painel.

Figura 4 - Perfil geológico obtido através da sondagem vertical no teto imediato.



Fonte: Autor

A unidade 1, situada na base da sequência de teto, pode ser definida petrograficamente como quartzo-mica siltito de coloração cinza escura, maciço, com intercalações de lâminas de arenito fino. Esse pacote apresenta-se sobreposto pela unidade 2, formada por quartzo-mica arenito fino, intercalado com lâminas de siltito cinza escuro completando a sequência de teto imediato.

Em todos os locais onde se desenvolveram rupturas a sequência litológica do caimento se mostrou semelhante, sendo petrograficamente composta por quartzo-mica siltito, cinza escuro, maciço, com lentes de arenito fino (20 cm) com estratificações cruzadas, que corresponde à unidade 1.

Nas proximidades das escavações não foram identificadas a presença de água ou estruturas geológicas (falhas e/ou diques).

Visualmente ou em consulta a plantas da superfície topográfica, não foram constatados relevos acidentados ou vales encaixados em superfície próximos a região do painel em estudo.

Vistorias *in loco* dos tirantes nas áreas rompidas não indicaram falha na mistura da resina ou qualquer outra feição que permita suspeitar de problemas na instalação dos suportes.

3.5 ELEMENTOS DE PROJETO

A partir dos índices de qualidade de rocha (RMR clássico e retro) foram calculados os elementos de projeto, Tabela 3.

Na estimativa desses elementos, especialmente o tipo de ancoragem, foi considerada somente por efeito viga (coluna total), já que a espessura da unidade 1 (camada fraca) é muito elevada, chegando a atingir até 3,10 m, o que torna operacionalmente inviável a utilização de tirantes com tais dimensões na área em estudo.

Tabela 3 - Comparação entre os parâmetros obtidos a partir do RMR clássico e RMR retro.

Comparativo - Vão 8,30m			
RMR clássico (+51)		RMR retro (+69)	
Elementos de Projeto		Elementos de Projeto	
H_t	4,06 m	H_t	2,57 m
Tirante	2,03 m	Tirante	1,29 m
Pressão	10.150 kg	Pressão	6.425 Kg
FS	0,98	FS	1,56

Fonte: Autor

4 DISCUSSÕES

Como exemplificado na Tabela 3, foram estimados dois valores de qualidade de maciço para o arcabouço geológico que compõe o teto imediato do painel em estudo. Os valores para RMR clássico +51 e RMR retro +69. O valor clássico foi determinado pela descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem e o valor retro através da equação 1, na qual o índice é obtido pela razão inversa da altura de caimento pela largura da escavação. Nota-se que o valor estimado para o índice clássico é mais conservador que o índice retro, sendo classificado como classe III (regular) e classe II (bom), respectivamente, pela classificação de Bieniawski (1989).

A altura de carregamento pode ser estimada pela classificação de maciços rochosos, através da equação 2 e também pode ser estabelecida de maneira real e direta, através da medição *in loco* da altura de caimento. A altura média estimada partir do RMR clássico (equação 2) é de 4,06 m e a média das alturas de caimento reais (medidas) apresenta-se na faixa de 2,75 m. Novamente o índice obtido pela descrição do furo geotécnico se mostrou mais conservador, o que já era de se esperar, em função do índice RMR clássico (+51) ser utilizado diretamente no cálculo da altura carregamento (H_t).

Em todas as situações de ruptura, a altura de caimento apresenta-se relacionada à espessura da primeira unidade, ou seja, em todos os quatro casos a ruptura ocorreu junto ou muito próximo ao contato da primeira unidade (siltito) com a segunda unidade (arenito). A ruptura nessa zona anisotrópica (contato) pode ser explicada pela diferença de propriedades mecânicas e reológicas entre as duas unidades que compõe o teto imediato, além do contato entre as duas litologias ocorrer de maneira abrupta, o que gera uma superfície de fraqueza, suscetível ao descolamento/separação.

A determinação da altura de carregamento a partir de método empírico utilizando o valor de RMR clássico propôs uma altura de carregamento superior à altura de carregamento real (observada). Essa diferença se deve ao fato da classificação geomecânica (RMR) traduzir o maciço rochoso de forma uniforme, não apresentando sensibilidade a diferenças reológicas entre os pacotes litológicos. Seguindo a mesma linha se observarmos a equação 2, escrita por Unal (1986) para determinação da altura de carregamento (H_t), observa-se também

que a mesma estabelece apenas uma relação entre o valor de RMR e a largura da escavação, não considerando o efeito de qualquer anisotropia/descontinuidade existente no maciço que venha a afetar sua condição de estabilidade.

O RMR clássico (+51) sugere para o vão médio de 8,30 m um tirante com comprimento de 2,03 m que difere da situação real, onde foram utilizados tirantes com comprimento útil de 1,40 m e com ancoragem pontual (0,75 m de coluna de resina).

Nos casos estudados o efeito de ancoragem pontual utilizando tirante de 1,40 m não se aplica, já que, se observarmos a variação da espessura da camada de siltito (2,35 m - 3,10 m), não permite a ancoragem na camada competente. Isso significa que em todos os quatro casos, os tirantes encontram-se sob efeito de ancoragem pontual dentro da própria camada fraca.

Nesse caso devem ser aplicados tirantes de 2,03 m, com maior capacidade de carga (15.000 Kg – 19 mm) conforme os elementos de projeto sugeridos pelo RMR clássico, utilizando o efeito viga, ou seja, coluna total onde todo comprimento útil do tirante é envolvido pela coluna de resina, favorecendo, segundo Mark & Barczak (2000) uma maior rigidez do mecanismo de suporte. Em outras palavras, no projeto inicial de suporte da mina, foi proposto um efeito suspensivo da primeira camada (ancoragem pontual na camada forte), ou seja, a unidade 1 (siltito) seria suspensa e ancorada na unidade 2 (arenito), porém, a partir do espessamento do siltito, na região estudada, houve a perda de função do efeito desejado, já que, a camada de arenito migrou para fora da área de cobertura do tirante de 1,40 m.

5 CONCLUSÃO

O RMR retro, obtido pela relação entre a altura de carregamento (H_t) e largura da escavação (L), (equação 1) estimou um índice mais conservador quando comparado ao RMR clássico obtido a partir da descrição geomecânica dos testemunhos de sondagem.

O projeto de suporte subterrâneo utilizado na mina mostrou-se insatisfatório pela ótica dos métodos empíricos de projeto, com o emprego do RMR, já que o tipo de ancoragem aplicada (coluna pontual) não é adequado para a situação estudada.

Nos casos estudados, o efeito suspensivo foi utilizado dentro da própria camada fraca (siltito), uma vez que houve o espessamento dessa unidade e consequente impedimento da ancoragem na camada forte (arenito).

Esse fato mostra que o desenvolvimento de rupturas nas áreas em enfoque não está somente associado à qualidade do maciço (valor de RMR), e sim, associado também ao efeito do suporte aplicado, já que, foram utilizados na mina, de forma sistemática, tirantes (1,40 m) com efeito de coluna pontual a fim de obter a suspensão da unidade mais fraca (siltito) em uma unidade mais competente (arenito).

Analisando/comparando as informações coletadas *in loco* (dados reais), juntamente com os parâmetros de suporte estimados empiricamente, a partir do valor de RMR real, vislumbramos uma situação mais conservadora, sendo indicado, para esse cenário o uso de tirantes mais longos, conforme estimado pelo RMR clássico, com maior capacidade de carga, utilizando o efeito coluna total, onde todo comprimento útil do tirante é envolvido pela coluna de resina.

O emprego dessa sugestão de suporte poderia ter evitado as situações de instabilidade de teto estudadas, já que a análise desses casos indica a aplicação de um sistema de contenção mais robusto.

A classificação geotécnica RMR, a partir da descrição de testemunhos de sondagens mostrou-se, pelas situações estudadas, uma grande aliada na investigação e elaboração de projetos de suporte subterrâneo. Essa ferramenta deve servir como parâmetro de referência, tendo que ser analisada em conjunto com outros fatores: geológicos, geomecânicos, geométricos e operacionais que envolvem o projeto. A interação entre informações de campo, sondagem e dados empiricamente estimados, mostrou-se muito positiva para o entendimento das reais condições e necessidades operacionais de uma unidade mineira subterrânea. A busca de informações geológicas e geomecânicas sobre o teto imediato, sequência litológica e parâmetros empíricos estimados deve ser uma rotina no ambiente de mineração subterrânea. As mesmas podem ser obtidas a partir de testemunhos de sondagem ou através da observação de áreas rompidas. Esse acompanhamento geotécnico do maciço deve ser executado de forma sistemática a

fim de identificar qualquer alteração dos fatores que envolvem o projeto, como observado no estudo, em que o aumento da espessura da camada que compõe o teto imediato invalidou o efeito dos suportes aplicados, gerando situações de instabilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIENIAWSKI, Z.T. **ENGINEERING ROCK MASS CLASSIFICATION**, JOHN WILEY & SONS, EUA, 251P. 1989.

DOLINAR, D.R; BHATT, S.K. **TRENDS IN ROOF BOLT APPLICATION**. IN: NEW TECHNOLOGY FOR COAL MINE ROOF SUPPORT. INFORMATION CIRCULAR IC 9453. PITTSBURGH: NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. 43-51 P. 2000.

FAIRHURST, C; SINGH, B. **ROOF BOLTING IN HORIZONTALLY LAMINATED MINE ROOF**, ENGINEERING AND MINING JOUR. 80-90 P, 1974.

KARABIN G. J; HOCH M. T. **CONTEMPORARY ROOF SUPPORT SYSTEMS PROVIDE A DIVERSIFIED APPROACH TO MODERN GROUND CONTROL**. VPI ANNUAL INSTITUTE ON COAL MINE SAFETY AND HEALTH. BLACKSBURG, VA: VIRGINIA POLYTECHNIC INSTITUTE AND STATE UNIVERSITY, 249-267 P, 1980.

MARK, C; BARCZAK T. M. **FUNDAMENTALS OF COAL MINE ROOF SUPPORT**. IN: NEW TECHNOLOGY FOR COAL MINE ROOF SUPPORT. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, PUBLIC HEALTH SERVICE, CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, DHHS (NIOSH). PITTSBURGH, PA. EUA 2000.

UNAL, E. **EMPIRICAL APPROACH TO CALCULATE LOADS IN COAL MINE ROADWAYS**. IN: PROCEEDINGS, 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND CONTROL IN MINING WEST VIRGINIA UNIVERSITY, MORGANTOWN, EUA, 24 P, 1986.