

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TÚNEIS COM A TEORIA DOS BLOCOS

M.Sc. Ing. Rubén Medinaceli Tórrez
Ingeniero Civil e Ingeniero de Minas

Carrera de Ingeniería de Minas, Petróleos y Geotecnia - Universidad Técnica de Oruro – Oruro – Bolivia.
Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Geotecnia – Universidade de São Paulo - São Carlos – Brasil.
ruben.medinaceli@usp.com

RESUMO.

Os túneis rodoviários são, sem dúvida, uma das obras de engenharia mais importantes, e é por isso que a segurança nesse tipo de obra é um tema que sempre deve ser considerado no projeto.

A engenharia de túneis requer um grande número de decisões no local, pois coletar dados para o projeto é muito complicado, uma vez que as características do maciço rochoso só podem ser vistas após o início dos trabalhos.

A direção do túnel é determinada antes de começar, e a teoria dos blocos de Goodman e Shi (1985) pode ser utilizada para identificar e analisar a existência ou não de blocos-chave nessa direção.

As galerias de mineração, ao contrário dos túneis rodoviários, não requerem revestimento como parte de seu reforço. Nesse caso, a teoria dos blocos desempenha um papel muito importante durante todo o processo de extração mineral. No entanto, quando algum tipo de revestimento é colocado por razões de estabilidade,

Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma planilha do Excel com o objetivo de determinar quais desses blocos são blocos-chave que podem prejudicar a estabilidade do túnel ou da galeria de mineração.

RESUMEN.

Los túneles viales son sin duda una de las obras de ingeniería más importantes es por esto que la seguridad en este tipo de obras es un tema que siempre debe ser considerado en el diseño.

La ingeniería de túneles requiere un gran número de decisiones in situ, debido a que la toma de datos para el diseño es muy complicada, puesto de que se pueden ver las características del macizo rocoso recién una vez iniciados los trabajos.

La dirección del túnel es determinada antes de empezar el y la teoría de bloques de *Goodman* y *Shi* (1985) se puede utilizar para conocer y analizar la existencia o no de bloques clave en esta dirección.

Las galerías mineras a diferencia de los túneles viales no precisan de revestimiento como parte de su refuerzo. En este caso la teoría de bloques cumple un papel muy importante durante todo el proceso de extracción mineral; Sin embargo, cuando se coloca algún tipo de recubrimiento, por razones de estabilidad,

La presente investigación se desarrolla una planilla Excel con la finalidad de determinar cuáles de estos bloques son bloques clave que pueden perjudicar la estabilidad del túnel o galería minera.

1. ESTABILIDADE E CINEMÁTICA DE BLOCOS REMOVÍVEIS.

Alguns dos blocos criados pela interseção de descontinuidades e planos de escavação mostraram-se finitos e não intertravados. Esses blocos foram chamados de removíveis. Os blocos removíveis são divididos em 3 tipos de acordo com a teoria de blocos de *Goodman e Shi* (1985):

I. BLOCOS CHAVE; que se espera que se movimentem, quando a escavação estiver concluída, a menos que seja fornecido o suporte necessário.

II. BLOCOS CHAVE POTENCIAIS; que estejam em posição adequada para cair ou escorregar no momento da escavação; mas isso não acontecerá devido ao atrito disponível nas faces do bloco, que é suficiente para manter o bloco em estado de equilíbrio.

III. BLOCOS ESTÁVEIS; que não pode deslizar ou cair, mesmo quando o ângulo de atrito nas faces é zero, porque a orientação da força resultante promove a estabilidade.

Do exposto, conclui-se que apenas os blocos removíveis merecem uma análise de estabilidade.

Tendo identificado blocos removíveis como candidatos para análise detalhada, é conveniente classificar sua subdivisão em um dos dois tipos de análise possíveis disponíveis.

A primeira é uma análise de modo, que é realizada para distinguir blocos estáveis (Tipo II) de possíveis blocos chave ou verdadeiros blocos chave (Tipo II e I). A direção da força resultante deve ser especificada, mas não é necessário fornecer ou usar as propriedades das descontinuidades neste ponto da análise.

A segunda é uma análise de estabilidade, onde é necessário fornecer os ângulos de atrito para cada superfície de descontinuidade em contato, a fim de separar os blocos chave potenciais (II) e verdadeiros blocos chave (I). Os resultados da análise de modo orientam a análise de estabilidade.

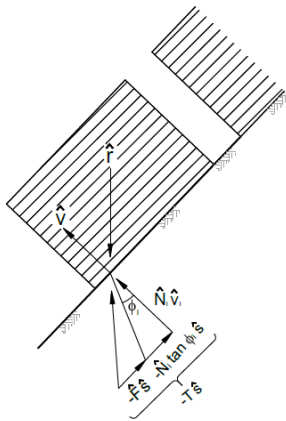
a. MODOS DE DESLIZAMENTO.

Nesta seção, serão estabelecidas as relações existentes da direção da resultante de uma força sobre um bloco em estado incipiente de deslizamento e a direção de deslizamento. Juntamente com outras constantes cinemáticas e uma direção específica para a força resultante, essas regras nos permitirão estabelecer, qual, se houver, modo de escorregamento é aplicável a cada

Joint Pyramid (pirâmide de juntas)? Goodman e Shi (1985)

Vamos denotar um bloco removível como B . Ignorando a rotação, cada parte de B experimenta um movimento descrito pelo mesmo vetor. O vetor unitário da direção de deslizamento será representado por \hat{s} . A discussão imaginará um estado de equilíbrio limite, em que o movimento ocorre sem aceleração.

Sob um determinado conjunto de forças, não se pode esperar que B esteja exatamente em uma condição de equilíbrio limite. Para ter B em um estado limite, adicionaremos uma força fictícia $-F\hat{s}$, como mostrado na Figura 1. Quando F é positivo, o bloco tenderá a deslizar a menos que seja adicionado suporte artificial. No caso oposto, um valor negativo de F implica que o bloco B está seguro contra o deslizamento. Portanto, F pode ser usado com um veículo para discutir condições limitantes. Goodman e Shi (1985)



B = bloco removível

\hat{s} = Vetor unitário da direção de deslizamento

F = Força fictícia

ϕ_l = Atrito

r = Resultante de todas as outras forças que atuam no bloco

Figura 1. Diagrama da força fictícia F e o valor da direção de deslizamento \hat{s}

Fonte: Block theory and its application to rock engineering - Goodman e Shi (1985)

i. FORÇAS ATUANDO EM B (Bloco removível)

Existem 3 contribuições para as forças que atuam no bloco B e são elas:

1. A resultante (N) dos componentes normais correspondentes às reações nos planos de deslizamento. Onde \hat{v} é o vetor unitário normal ao plano de descontinuidade l , direcionado ao bloco B ; então as reações normais são:

$$N = \sum_l N_l \hat{v}$$

Assume-se que não há forças de tração ao longo da descontinuidade, portanto,

$$N_l \geq 0$$

2. A resultante T das forças de atrito tangenciais é:

$$T_i = -N_l \tan \phi_l \hat{s}$$

e a resultante disso e a força fictícia é:

$$-T\hat{s} = - \sum_l N_l \tan \phi_l \hat{s} - F\hat{s}$$

$$\therefore T = \sum_l N_l \tan \phi_l + F$$

Para um bloco chave potencial ou verdadeiro, por projeto, o deslizamento ocorrerá se $\phi_l = 0$, porque um valor positivo de F implica em deslizamento, $T \geq 0$

3. A resultante r de todas as outras forças que atuam no bloco B , incluindo peso, forças de infiltração ou pressão hidráulica externa, forças de inércia e cargas ou forças de suporte. A força r será denominada como: Resultante Ativo.

A condição de equilíbrio para bloco chave potencial ou verdadeiro B é:

$$r + \sum_l N_l \hat{v} - T\hat{s} = 0$$

Com:

$$T > 0 \text{ e } N_l \geq 0$$

Pelo Teorema da Remobilidade Goodman e Shi (1985), a direção de deslizamento \hat{s} do bloco removível B pertence ao JP (Pirâmide de junta) do bloco B ; quer dizer:

$$\hat{s} \subset JP$$

Os termos usados na teoria de blocos de Goodman e Shi (1985) foram mantidos em inglês

ii. ELEVAÇÃO (Lifting)

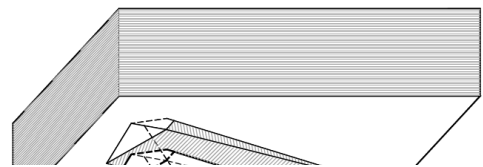
A Figura 2 mostra um bloco chave movendo-se livremente de seu local original. Chamaremos esse fenômeno de elevação, porque nenhum plano de descontinuidade permanece em contato, \hat{s} não pode estar contido em nenhum plano de descontinuidade. Porque nenhuma descontinuidade está em contato, $N_l = 0$ e $r + \sum_l N_l \hat{v} - T\hat{s} = 0$ torna-se:

$$r = T\hat{s}$$

Para um bloco chave verdadeiro ou potencial, $T \geq 0$, portanto:

$$\hat{s} = \hat{r}$$

Os JP foram definidos como conjuntos fechados, isto significa que o JP inclui não apenas o espaço dentro da pirâmide, mas também as faces laterais e as arestas. A condição para elevação é que ele \hat{s} deve estar contido dentro do JP, mas não em seus limites.



ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TÚNEIS COM A TEORIA DOS BLOCOS

Figura 2. Elevação ou despreendimento de um bloco (lifting)

Fonte: Block theory and its application to rock engineering - Goodman e Shi (1985)

PROPOSIÇÃO DE ELEVAÇÃO. Sim \hat{s} não é paralelo a nenhum plano do JP , a condição necessária suficiente de B , para satisfazer a equação de equilíbrio é que:

$$\hat{s} = \hat{r}$$

iii. DESLIZAMENTO EM UMA FACE.

A Figura 3 mostra o exemplo de um bloco deslizando ao longo de uma de suas faces, neste caso, \hat{s} é paralelo a apenas um plano de B (plano i) e a direção de deslizamento \hat{s} é a projeção ortográfica de r sobre o plano i .

$$\hat{s} = \hat{s}_i$$

Onde

$$\hat{s}_i = \frac{(\hat{n}_i \times r) \times \hat{n}_i}{|\hat{n}_i \times r|}$$

Onde:

\hat{n}_i é o vetor normal direcionado para cima ao plano i , determinado por:

$$\hat{n}_i = (A, B, C) = (\sin \alpha \sin \beta, \sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha)$$

Neste caso, todos os planos de discontinuidades, exceto o plano i , abrirão e $\hat{s} \in JP \cap P_i$, onde P_i representa o plano i . *Goodman e Shi (1985)*

PROPOSIÇÃO DE DESLIZAMENTO EM UMA FACE. Se a direção de deslizamento \hat{s} encontra-se em um único plano, P_i , a condição suficiente e necessária que o bloco removível B deve satisfazer a equação de equilíbrio

$r + \sum_l N_l \hat{v}_l - T \hat{s} = 0$, è $\hat{s} = \hat{s}_i$ e $\hat{v}_i \cdot r \leq 0$ onde \hat{s}_i é a projeção ortográfica de r no plano P_i

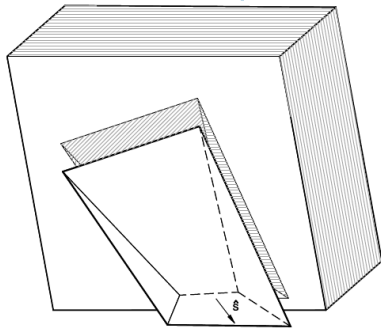


Figura 3. Deslizar em uma face ou superfície deslizante

Fonte: Block theory and its application to rock engineering - *Goodman e Shi (1985)*

iv. DESLIZAMENTO EM DUAS FACES.

As Figuras 4 e 5 mostram exemplos de blocos deslizando ao longo de dois planos, P_i e P_j (ou ao longo de sua linha de interseção), porque é a única direção comum de ambos os planos. A direção de deslizamento \hat{s} é a direção ao longo da linha de interseção que faz um ângulo agudo com a direção da resultante ativa (resultante de todas as forças envolvidas).

$$\hat{s} = \hat{s}_{ij} = \frac{(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \text{signo} \left((\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot r \right)$$

Além disso, a direção de deslizamento é uma aresta do JP formada pela interseção dos planos i e j : *Goodman e Shi (1985)*

$$\hat{s} \in JP \cap P_i \cap P_j$$

PROPOSIÇÃO DE DESLIZAMENTO EM DUAS FACES. Se a direção de deslizamento é simultânea em dois planos, P_i e P_j ; as condições suficientes e mínimas para que o bloco B satisfaça a equação de equilíbrio $r + \sum_l N_l \hat{v}_l - T \hat{s} = 0$, são:

$$\hat{v}_i \cdot \hat{s}_j \leq 0 \quad \hat{v}_j \cdot \hat{s}_i \leq 0$$

e

$$\hat{s} = \frac{(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \text{signo} \left((\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot r \right)$$

Onde \hat{s}_i e \hat{s}_j são as projeções ortográficas de r sobre os planos P_i e P_j , respectivamente, conforme indicado em a equação $r + \sum_l N_l \hat{v}_l - T \hat{s} = 0$

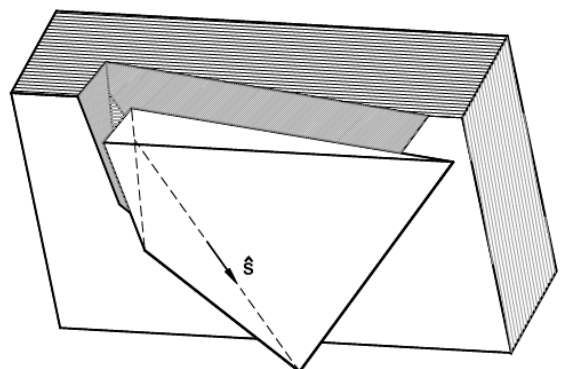


Figura 4. Deslizando em dois planos
Fonte: Block theory and its application to rock engineering - *Goodman e Shi (1985)*

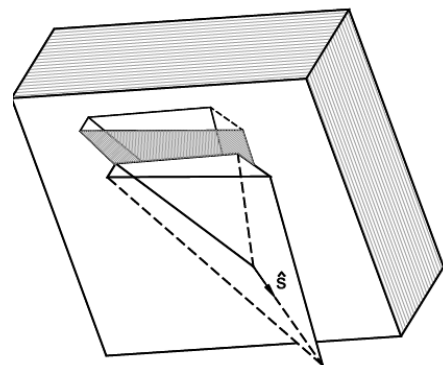


Figura 5. Deslizando em dois planos
Fonte: Block theory and its application to rock engineering - *Goodman e Shi (1985)*

b. A FORÇA DE DESLIZAMENTO

As equações de equilíbrio para translação livre, deslizamento em uma ou duas faces, têm dado na seção anterior. Usando essas equações, podemos calcular as equações correspondentes para a força de escorregamento $F \hat{s}$.

ELEVAÇÃO (Lifting)

Neste caso, $N_l = 0$, para todos os planos de discontinuidades e a equação $T = \sum_l N_l \tan \phi_l + F$, torna-se:

$$F = T$$

e a equação de equilíbrio é:

$$T\hat{s} = r$$

e a combinação com $F = T$, resulta em:

$$F = |r|$$

Quando a gravidade é o único contribuinte para a resultante ativa, F é simplesmente o peso do bloco. *Goodman e Shi (1985)*

DESLIZAMENTO EM UMA FACE.

Como há apenas um plano de contato, a equação $T = \sum_l N_l \tan \phi_l + F$ se torna:

$$T = N_i \tan \phi_i + F$$

$$T\hat{s} = (\hat{v}_i \times r) + \hat{v}_i$$

Pelo que:

$$T = |\hat{v}_i \times r|$$

E

$$N_i = -r \cdot \hat{v}_i$$

Substituindo esses dois últimos em $T = N_i \tan \phi_i + F$, temos:

$$F = |\hat{v}_i \times r| + |\hat{v}_i \cdot r| \tan \phi_i$$

Onde

$$\hat{v}_i = -\hat{n}_i \operatorname{signo}(\hat{n}_i \cdot r)$$

Pela declaração de deslizamento unilateral:

$$(\hat{v}_i \cdot r) \leq 0$$

Substituindo $\hat{v}_i = -\hat{n}_i \operatorname{signo}(\hat{n}_i \cdot r)$ em $F = |\hat{v}_i \times r| + |\hat{v}_i \cdot r| \tan \phi_i$, temos:

$$F = |\hat{n}_i \times r| + |\hat{n}_i \cdot r| \tan \phi_i$$

Esta fórmula é usada para obter a força de deslizamento em uma única face ao longo do plano P_i .

Quando a resultante ativa r é dada apenas pela gravidade.

$$r = (0, 0, -W)$$

Onde: $W > 0$

Suponha que a direção de mergulho e mergulho do plano P_i sejam α_i e β_i , respectivamente.

$$\hat{n}_i = (\sin \alpha \sin \beta, \sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha)$$

$$|\hat{n}_i \times r| = |-W \sin \alpha_i \sin \beta_i, W \sin \alpha_i \cos \beta_i, 0|$$

$$|\hat{n}_i \cdot r| = (W^2 \sin^2 \alpha_i \cos^2 \beta_i + W^2 \sin^2 \beta_i, W \sin^2 \alpha_i \sin^2 \beta_i)^{\frac{1}{2}}$$

$$|\hat{n}_i \times r| = W \sin \alpha_i$$

$$|\hat{n}_i \cdot r| = |-W \cos \alpha_i|$$

$$|\hat{n}_i \cdot r| = W \cos \alpha_i$$

Da equação $F = |\hat{n}_i \times r| + |\hat{n}_i \cdot r| \tan \phi_i$ temos:

$$F = W \sin \alpha_i - W \cos \alpha_i \tan \phi_i$$

Esta equação expressa a Força de Deslizamento quando a resultante ativa r é devida unicamente à ação da gravidade. *Goodman e Shi (1985)*

DESLIZAMENTO EM DUAS FACES

Neste caso, o bloco removível B , desliza ao longo dos planos do conjunto de descontinuidades i e j , os demais planos de descontinuidade são abertos. A força de reação normal $N_l = 0$ para todo $l \neq i$ ou j , e $T = \sum_l N_l \tan \phi_l + F$, torna-se:

$$T = N_i \tan \phi_i + N_j \tan \phi_j + F \quad T \geq 0, N_i \geq 0, N_j \geq 0$$

Pelo que:

$$F = T - N_i \tan \phi_i + N_j \tan \phi_j$$

Sim:

$$N_i(\hat{v}_i \times \hat{v}_j) \cdot (\hat{v}_i \times \hat{v}_j) = -(r \times \hat{v}_j) \cdot (\hat{v}_i \times \hat{v}_j)$$

Se obtem:

$$N_i = \frac{-(r \times \hat{v}_j) \cdot (\hat{v}_i \times \hat{v}_j)}{(\hat{v}_i \times \hat{v}_j) \cdot (\hat{v}_i \times \hat{v}_j)}$$

Porque $N_i \geq 0$, pode ser escrito como:

$$N_i = \frac{|(r \times \hat{n}_j) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)|}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2}$$

Similarmente

$$N_j = \frac{|(r \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)|}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2}$$

Da equação a seguir temos: $r \cdot \hat{s} - T(\hat{s} \cdot \hat{s}) = 0$

$$T = r \cdot \hat{s}$$

Para um bloco chave ou bloco chave potencial, $T > 0$, então:

$$T = \frac{|r \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)|}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|}$$

Substituindo:

$$F = \frac{1}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2} [|r \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| |\hat{n}_i \times \hat{n}_j| - |(r \times \hat{n}_j) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \tan \phi_i - |(r \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \tan \phi_j]$$

Esta equação fornece a força de deslizamento para um bloco chave ou bloco chave potencial, deslizando nos planos P_i e P_j . *Goodman e Shi (1985)*

CONDIÇÕES CINEMÁTICAS PARA ELEVAÇÃO E DESLIZAMENTO.

Nesta seção será comprovado que existe um JP correspondente a uma determinada direção de deslizamento e então serão estabelecidos procedimentos para identificá-lo. Uma análise de modo determina uma lista completa de JP 's correspondentes a todas as direções de deslizamento. Isso será verificado nas seções subsequentes.

Lista completa de direções de deslizamento, dada uma força resultante r .

- Para elevação:

$$\hat{s} = \hat{r}$$

- Para deslizamento em uma face (i), as direções de deslizamento \hat{s}_i são determinadas por:

$$\hat{s} = \hat{s}_i \quad \hat{s}_i = \frac{(\hat{n}_i \times r) \times \hat{n}_i}{|\hat{n}_i \times r|}$$

- Para deslizamento em duas faces (i) e (j), as direções de deslizamento \hat{s}_{ij}

$$\hat{s} = \hat{s}_{ij} \quad \hat{s}_{ij} \\ = \frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \text{signo} \left((\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot r \right)$$

De acordo com a definição de “removibilidade”, cada bloco removível tem uma direção de deslizamento ao longo da qual pode ser movido sem colidir com o maciço rochoso adjacente. Então segue que: *Goodman e Shi (1985)*

$$\hat{s} \in JP$$

Levantamento

Quando um bloco é levantado, \hat{s} não é paralelo a nenhum plano P_i . Assim, como \hat{v}_i é a normal direcionada ao bloco, para cada plano l do bloco.

$$\hat{s} \cdot \hat{v}_l > 0$$

Deslizamento em uma face

Para o caso de um deslizamento no plano P_i , \hat{s} é paralelo a P_i . Portanto, com $\hat{s} \in JP$ e a proposição de deslizamento em uma face, obtemos:

$$\hat{s} \cdot \hat{v}_l > 0$$

$$r \cdot \hat{v}_l < 0$$

Deslizamento em duas faces.

Para deslizamento nos planos i e j . \hat{s} é paralelo aos planos i e j . Usando $\hat{s} \in JP$ e a proposição de deslizamento em duas faces, obtemos:

$$\hat{s} \cdot \hat{v}_l > 0 \quad \text{para toda } l, l \neq i$$

$$\hat{s}_i \cdot \hat{v}_j \leq 0$$

$$\hat{s}_j \cdot \hat{v}_i \leq 0$$

Conhecendo \hat{s} e r , essas equações fornecem informações suficientes para identificar todas as correspondentes \hat{v}_i e, portanto, identificar o JP .

c. ENCONTRAR A DIREÇÃO DO DESLIZAMENTO PARA UM DETERMINADO JOINT PYRAMID (JP).

Apenas alguns JP 's têm uma direção de deslizamento. Aqueles JP 's que são removíveis, mas não possuem direção de deslizamento, são chamados de blocos estáveis, tipo III. Na próxima seção, será estabelecido um critério para que um bloco removível seja estável.

O vetor mais próximo de um JP em relação a r

Dada a força resultante r e um JP (Pirâmide de junta), para qualquer vetor $\hat{g} \in JP$, denotaremos como (\hat{r}, \hat{g}) o ângulo entre \hat{r} e \hat{g} . Se houver um vetor $\hat{g} \in JP$ tal que (\hat{r}, \hat{g}) seja menor ou igual ao ângulo entre \hat{r} e qualquer vetor JP , então a \hat{g} será chamado de "o vetor mais próximo de um JP a \hat{r} ". O ângulo (\hat{r}, \hat{g}) será então chamado, "o menor ângulo entre JP e \hat{r} ". *Goodman e Shi (1985)*

As três proposições a seguir determinam os vetores mais próximos dos JP 's para todos os casos

• Proposição 1:

Se existe um vetor $\hat{h} \in JP$, tal que $(\hat{r}, \hat{h}) < 90^\circ$, então existe um e somente um vetor mais próximo de JP em relação a r .

• Proposição 2:

Se \hat{s} é a direção de escorregamento de JP sob a resultante ativa r , então \hat{s} é o vetor mais próximo de JP em relação a \hat{r} y $\hat{r} \cdot \hat{s} > 0$.

• Proposição 3:

Si \hat{g} é o vetor mais próximo de JP em relação a r , e $\hat{g} \cdot \hat{s} > 0$, portanto, \hat{g} é a direção de deslizamento ($\hat{g} = \hat{s}$).

Critérios para blocos estáveis.

Essas proposições geram critérios para julgar se um JP corresponde ou não a um bloco estável.

Critério 1: Um JP corresponde a um bloco estável se para qualquer $\hat{h} \in JP$

$$\hat{h} \cdot r < 0$$

Critério 2: Um JP corresponde a um bloco estável se r , \hat{s}_i e \hat{s}_{ij} todos não estiverem contidos no JP .

$$\hat{r} \notin JP$$

$$\hat{s}_i \notin JP \quad \text{para toda } i$$

$$\hat{s}_{ij} \notin JP \quad \text{para toda } ij$$

d. TEOREMA DO EIXO DO TÚNEL.

Um teorema sobre as relações entre o eixo do cilindro do túnel e as pirâmides de juntas (JP 's) dos blocos removíveis provará ser muito útil, dito teorema diz:

Uma pirâmide de junta JP es un bloque removível de um túnel sim e solo sim $\pm \hat{a} \notin JP$.

Se o eixo do túnel \hat{a} é um elemento do JP , o teorema dita que o JP não pertence a nenhum bloco removível do túnel. Isso porque o eixo do túnel pertence a cada um dos semiespaços cuja união determina a pirâmide de escavação EP (Excavation Pyramid) e, portanto, $EP \cap JP$ deve conter \hat{a} e de acordo com isso, não está vazio. Cada JP que não contém o eixo do túnel possui um bloco removível correspondente no túnel. *Goodman e Shi (1985)*

2. PROGRAMA EXCEL.

Toda essa metodologia foi inserida em uma planilha do Excel para poder fazer uma análise de estabilidade muito mais rápida, e não ter que realizar cálculos longos.

a. SOBRE A PLANILHA

- A planilha está em espanhol.
- É necessário o conhecimento da teoria de blocos de *Goodman e Shi (1985)*
- A planilha exige que sejam registrados os dados de mergulho e direção de mergulho de 3 famílias de descontinuidades; se houver 4 ou mais, devem ser feitas combinações de três.
- É necessário anotar a direção do eixo do túnel, por enquanto o mergulho do Túnel permanece em 0° , mas em uma versão futura do programa isso pode mudar.

- Uma vez inseridos esses dados, o programa calcula automaticamente e exibe como resultado e um gráfico dos grandes círculos das famílias de descontinuidades e da superfície de escavação para análise posterior.
- O programa calcula a direção, modo y força de deslizamento de todas as pirâmides de juntas,

mas com o método estereográfico é possível analisar a posição de cada bloco em relação ao teto, superfície e piso do túnel.

Na Figura 6 você pode ver o programa com o exemplo visto no estudo de caso.

Famílias de discontinuidades			
Conjunto de discontinuidades	Buzamiento	Dirección de buzamiento	Ángulo de fricción
1	69	65	37
2	56	100	21
3	40	350	26

Eje de túnel	
Círculo de referencia	Dirección de buzamiento
0	85

Análisis bajo peso propio			
r			
0	0	0	-1

Modos de deslizamiento			
.P	Dirección	F	Tipo de bloque
.P 000	s23	0.0389	Cuña Clave
.P 001	s2	0.6144	Cuña Clave
.P 010	s13	0.2489	Cuña Clave
.P 011	s1	0.6635	Cuña Clave
.P 100	Estable	Estable	Estable
.P 101	s12	0.2082	Cuña Clave
.P 110	s3	0.2692	Cuña Clave
.P 111	r	1.0000	Cuña Clave

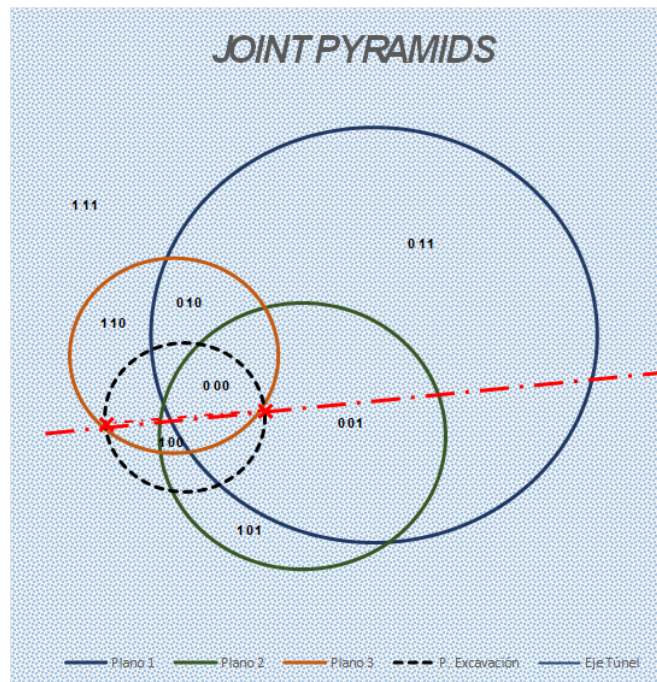


Figura 6. Estudo de caso - 2 - Programa Excel

3. ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso tem os seguintes dados:

Planos	Mergulho	Direção de mergulho	Ângulo de atrito
1	069	065	37
2	056	100	21
3	040	350	26
Túnel	000	085	

a. ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Blocos estáveis: Na figura 6 você pode ver que a pirâmide de junta (JP) 100 é um bloco estável, é um bloco de piso, então ele não pode deslizar sob seu próprio peso, na a tabela reflete essa situação.

Eixo de túnel: Devido ao teorema do eixo do túnel, as pirâmides de juntas (JP) 110 e (JP) 001 são blocos estáveis.

Bloco chave: Os outros blocos são:

- A pirâmide de junta (JP) 110 é um bloco na parede direita.
- As pirâmides de juntas (JP) 011 e (JP) 111 são blocos no teto do túnel.
- A pirâmide de junta (JP) 101 é um bloco na parede esquerda.

Como pode ser visto, este programa nos ajuda a realizar análises de estabilidade com teoria de blocos proposta por Goodman e Shi, muito rapidamente, os blocos chave e sua localização podem ser identificados.

4. CONCLUSÕES

- A teoria dos blocos proposta por *Goodman e Shi* ajuda a identificar os blocos instáveis no túnel, também ajuda a identificar onde esses blocos se encontram na seção do túnel.
- A partir de uma planilha do Excel, os testes de variação de mergulho e direção de mergulho podem ser realizados e ver se novos blocos chave são criados.
- A implementação desta planilha é uma ferramenta muito útil para o engenheiro responsável pelo projeto do túnel identificar rapidamente os principais blocos chave.

Este modelo também pode ser usado em escavações de mineração.

Bibliografia

- Goodman R & Shi G (1985). Block theory and its application to rock engineering. Prentice Hall.
- Ayes JC (2011). La teoría de bloques aplicada a la mecánica de rocas. Instituto Politécnico Nacional.
- Huang T, Chen J, Chang C (2003). Stability analysis of rock slopes using block theory. Journal of the Chinese institute of engineers.
- Zheng J, Kulatilake P, Shu B, Sherizadeh T, Deng J (2014). Probabilistic block theory analysis for a rock slope at an open pit mine. Computers and geotechnics.
- T. Liu, J. Deng, J. Zheng, L. Zheng, Z. Zhang, H. Zheng (2016). A new semi-deterministic block theory method with digital photogrammetry for stability analysis of a high rock slope in China. Engineering geology
- Javier, A. (s.f.). Problemas de mecánica de rocas. Madrid: Bubok Publishing S.L.
- Roberto Tomás Jover (1), I. F. (2002). APLICACIONES DE LA PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica.

Artículo recibido: 29.04.2023

Artículo aceptado: 28.05.2023