

Modelos DDA para o Estudo do Mecanismo de Estabilização com Ancoragens do Teto de Aberturas Subterrâneas

Paulo Gustavo Cavalcante Lins
Professor, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, plins@ufba.br

Larissa Regina Costa Silveira
Professora, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, larissarcs@ufba.br

Erisvaldo Bitencourt de Jesus
Professor, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, ebjesus@ufba.br

RESUMO: A análise de deformação descontínua (DDA) refere-se a uma classe de modelos numéricos que pode permitir a representação de maciços rochosos como sistemas compostos por blocos elásticos separados por descontinuidades que obedecem a um critério de ruptura. No presente trabalho o teto de uma escavação em um maciço rochoso fraturado é estudado. Sem o reforço de ancoragens existe a formação de uma zona solta no teto da escavação. Simulações foram realizadas também para o mesmo maciço com a inclusão de ancoragens no teto. Os modelos com ancoragens consideram a existência de uma rigidez entre dois blocos ligados pela ancoragem. Desta forma a carga na ancoragem não é imposta, mas calculada em cada simulação. Dois padrões de ancoragens foram adotados. No primeiro padrão as ancoragens são verticais. No segundo padrão as ancoragens na região central do teto são verticais e inclinadas na região próximas das laterais. Os resultados indicam que a carga das ancoragens individuais é diferente, com maior carregamento das ancoragens próximas das laterais do teto. As simulações permitem uma melhor compreensão do processo de estabilização de aberturas subterrâneas por meio de ancoragens.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Deformação Descontínua (DDA), Aberturas Subterrâneas, Instabilidade de Teto, Ancoragens.

ABSTRACT: Discontinuous deformation analysis (DDA) refers to a class of numerical models that can allow the representation of rock masses as systems composed of elastic blocks separated by discontinuities that attends a failure criterion. In the present work the roof of an excavation in a fractured rock mass is studied. Without reinforcement of bolts, a loosening area will be formed on the roof of the excavation. Simulations were also carried out for the same mass with the inclusion of bolts in the roof. In this way, the load on the bolts is not imposed, but calculated in each simulation. Models with anchor consider the existence of stiffness between two blocks connected by the bolt. Two bolt patterns were adopted. In the first pattern, the bolts are vertical. In the second pattern, the bolts in the central region of the roof are vertical and inclined in the region close to the sides. The results indicate that the load of the individual bolts is different, with greater loading of the bolts close to the sides of the roof. The simulations allow a better understanding of the process of stabilizing underground openings using bolts.

KEYWORDS: Discontinuous Deformation Analysis (DDA), Underground Openings, Roof Instability, Bolts.

1 INTRODUÇÃO

Aberturas subterrâneas com teto com estratificação horizontal podem formar uma zona solta acima do teto que se torna instável. Por consequência uma parte do teto pode desabar. Por um processo de arqueamento o carregamento acima da abertura no teto pode ser transferido para as laterais da abertura. Em aberturas subterrâneas de Engenharia é possível controlar a instabilização com a instalação de ancoragens. O dimensionamento destas ancoragens é usualmente realizado por métodos empíricos ou baseado em soluções analíticas.

O conceito de unidade de reforço de rocha admite que o perímetro em torno de uma ancoragem individual está em equilíbrio limite e assim é possível definir uma carga para a ancoragem, conforme desenvolvem Lang e Bischoff (1981). Soluções analíticas são apresentadas por Bischoff e Smart (1975) e Krauland (1983) que assumem a hipótese que se desenvolve um arco plano de tensões no teto da abertura, onde uma zona de compressão é criada por sobreposição da ação dos bulbos de tensão das ancoragens.

No presente trabalho a análise de deformação descontínua (DDA) é aplicada para representar o processo de instabilização do teto fraturado acima de uma abertura subterrânea. Inicialmente um modelo sem reforço é utilizado para estudar a instabilização do teto e o processo de reequilíbrio do sistema com o arqueamento das tensões e formação de vigas aduela (“voussoir”) acima da zona solta. Dois modelos com diferentes padrões de ancoragens foram construídos. Estes modelos ilustram o processo de estabilização e permitem determinar as cargas nas ancoragens.

Os valores das cargas nas ancoragens são comparados com a referência do conceito de unidade de reforço de rocha, conforme Lang e Bischoff (1981).

A aplicação de modelos DDA para estudo da estabilização do teto de escavações em maciços fraturados já foi realizada por Yeung (1993) e Nie (2019). Hatzor e Benary (1998) e Tsesarsky e Hatzor (2006) apresentam a utilização de modelos DDA para avaliação da estabilidade de vigas aduela (“voussoir”).

No presente trabalho o teto de uma escavação em um maciço rochoso fraturado foi avaliado utilizando a análise de deformação descontínua (DDA). Três diferentes cenários/modelos foram avaliados. O primeiro de uma escavação sem sistema de reforço. O segundo e o terceiro, com sistemas de reforços com ancoragens em dois diferentes padrões.

2 FORMULAÇÃO DA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DESCONTÍNUA (DDA)

A formulação da análise de deformação descontínua (DDA) é detalhada, por exemplo, em Hatzor *et al.* (2018). O DDA permite realizar modelagem de sistemas compostos por blocos de rocha individuais separados por descontinuidades. A simulação pode representar grandes deslocamentos. Cada bloco possui seis variáveis: deslocamentos horizontais e verticais, rotação, deformação axial horizontal e vertical e distorção angular.

As variáveis são relacionadas com os esforços equivalentes por meio de uma matriz de forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & \cdots & \mathbf{K}_{1n} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & \cdots & \mathbf{K}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{K}_{n1} & \mathbf{K}_{n2} & \cdots & \mathbf{K}_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Onde as submatrizes na diagonal principal \mathbf{K}_{ii} representam a rigidez do bloco individual, e as submatrizes fora da diagonal principal \mathbf{K}_{ij} representam a rigidez do contato entre dois blocos.

Algoritmos de detecção de contato entre blocos são utilizados para definir criação de novos contatos, manutenção de contatos ou perda de contato. Os algoritmos envolvem contatos vértice-vértice, vértice-aresta e aresta-aresta.

Na formulação adotada as equações de movimento são resolvidas para cada passo de tempo por meio de um procedimento de solução incremental. A minimização da energia potencial permite determinar um sistema de equações que relaciona deslocamentos, velocidades e acelerações com forças aplicadas, que pode ser representado como:

$$\mathbf{K}\mathbf{d} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}} = \mathbf{F} \quad (2)$$

Onde \mathbf{K} é a matriz de rigidez, \mathbf{C} é a matriz de viscosidade, \mathbf{M} é a matriz de massa, \mathbf{F} é o vetor de forças externas, \mathbf{d} , $\dot{\mathbf{d}}$ e $\ddot{\mathbf{d}}$ são os vetores deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente.

A Figura 1 representa uma ancoragem de comprimento l conectando um ponto (x_1, y_1) em um bloco i com um ponto (x_2, y_2) em um bloco j , sendo a rigidez da ancoragem s , a força atuante na ancoragem é definida como:

$$f = -s \cdot \frac{dl}{l} \quad (3)$$

Note-se que nesta formulação, para representar as ancoragens no modelo, o reforço é representado por incremento de rigidez no sistema.

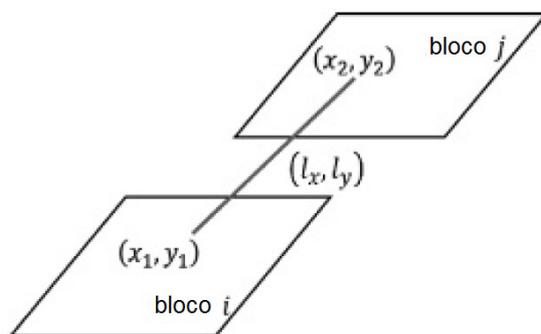


Figura 1. Conexão de ancoragens no DDA (Hatzor *et al.*, 2018).

3 MODELO SEM SUPORTE

A configuração inicial do modelo sem suporte é mostrada na Figura 2. Os blocos nas laterais e na base são blocos fixos. A abertura possui oito metros de largura e quatro metros de altura. Os blocos nas laterais da abertura permitem verificar o carregamento das paredes. Na região do teto os blocos possuem lados iguais de um metro. O padrão de fraturamento no teto envolve uma família subhorizontal persistente e uma família subvertical não persistente, o que configura uma aparência de imbricamento.

A análise foi realizada com a configuração mostrada na Figura 2, com carregamento tipo ligar a gravidade. As análises foram estáticas. O programa DDA 2D de Shi (2019) foi utilizado nas análises.

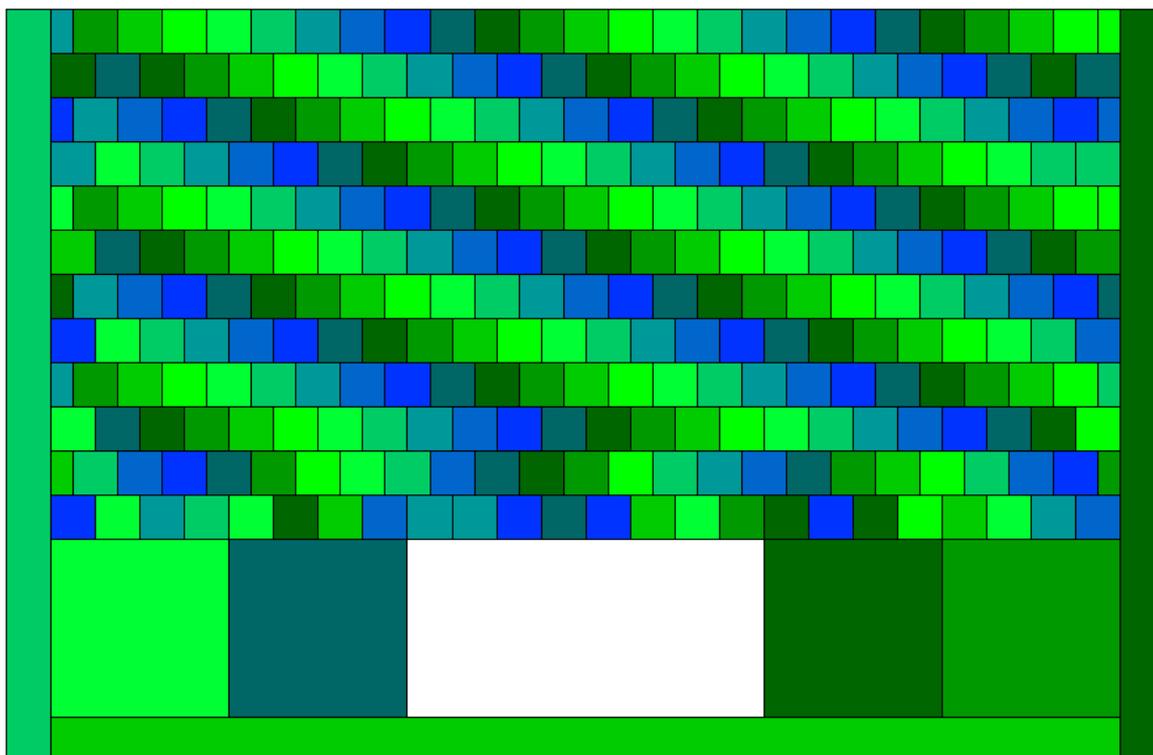


Figura 2. Modelo sem suporte, configuração inicial.

Os blocos foram assumidos com um módulo de elasticidade $E = 5 \text{ GPa}$ e um coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$, o peso específico foi de $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$. A resistência das descontinuidades foi tomada com um ângulo de atrito $\phi = 15^\circ$ e coesão nula.

A Figura 3 mostra a configuração final do modelo, após a estabilização do movimento dos blocos. Uma zona solta se formou acima da abertura. Nota-se que três linhas de blocos se precipitaram para o interior da escavação. Outras três linhas de blocos mantiveram-se estáveis após um movimento, indicando que as tensões laterais equilibram estes blocos, formando vigas aduela (“voussoir”).

Na Figura 3 as linhas vermelhas nos centróides dos blocos indicam a magnitude e orientação das tensões principais. O padrão geral mostra um alívio de tensões acima da abertura, com as tensões arqueando para as laterais. O arqueamento das tensões se mostra visível.

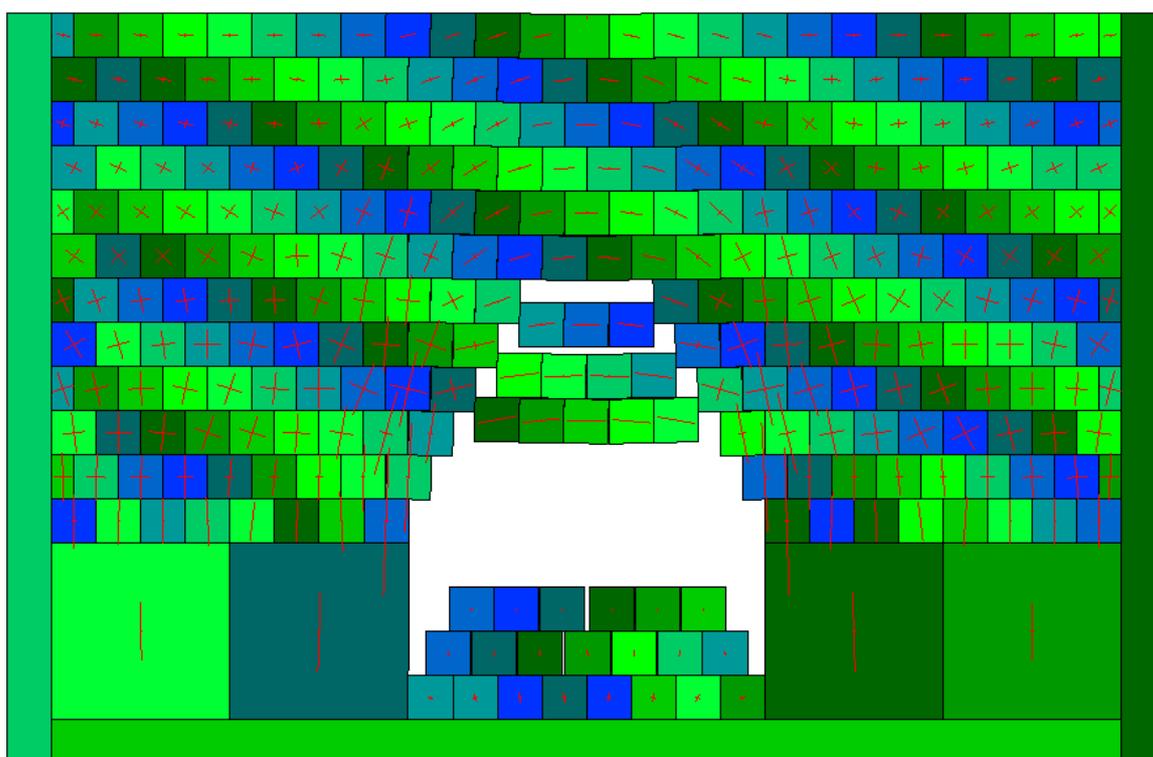


Figura 3. Modelo sem suporte, configuração final.

4 MODELOS COM SUPORTE

Os blocos nos modelos com suporte são idênticos aos do modelo sem suporte. A diferença dos modelos está no padrão das ancoragens. A configuração inicial do modelo com o primeiro padrão de ancoragens está mostrada na Figura 4. Neste padrão são representadas oito ancoragens verticais. A rigidez das ancoragens foi tomada como a de barras de aço, com 2,5 cm de diâmetro.

A configuração final do modelo com suporte com o primeiro padrão de ancoragem é mostrado na Figura 5. Nota-se que a posição dos blocos é praticamente idêntica da configuração inicial, ou seja, as ancoragens foram efetivas no sentido de manter os blocos estáticos.

Na Figura 5 a orientação das tensões principais (linhas vermelhas) mostra um padrão de arqueamento acima do que seria a região da zona solta do modelo sem suporte. Embora as ancoragens sejam verticais, existe um carregamento horizontal dos blocos na região ancorada, formando uma nova região de vigas aduela (“voussoir”). Pode-se interpretar também que a hipótese do desenvolvimento de um arco plano de tensões no teto da abertura é confirmada, conforme indica os modelos de Bischoff e Smart (1975) e Krauland (1983).

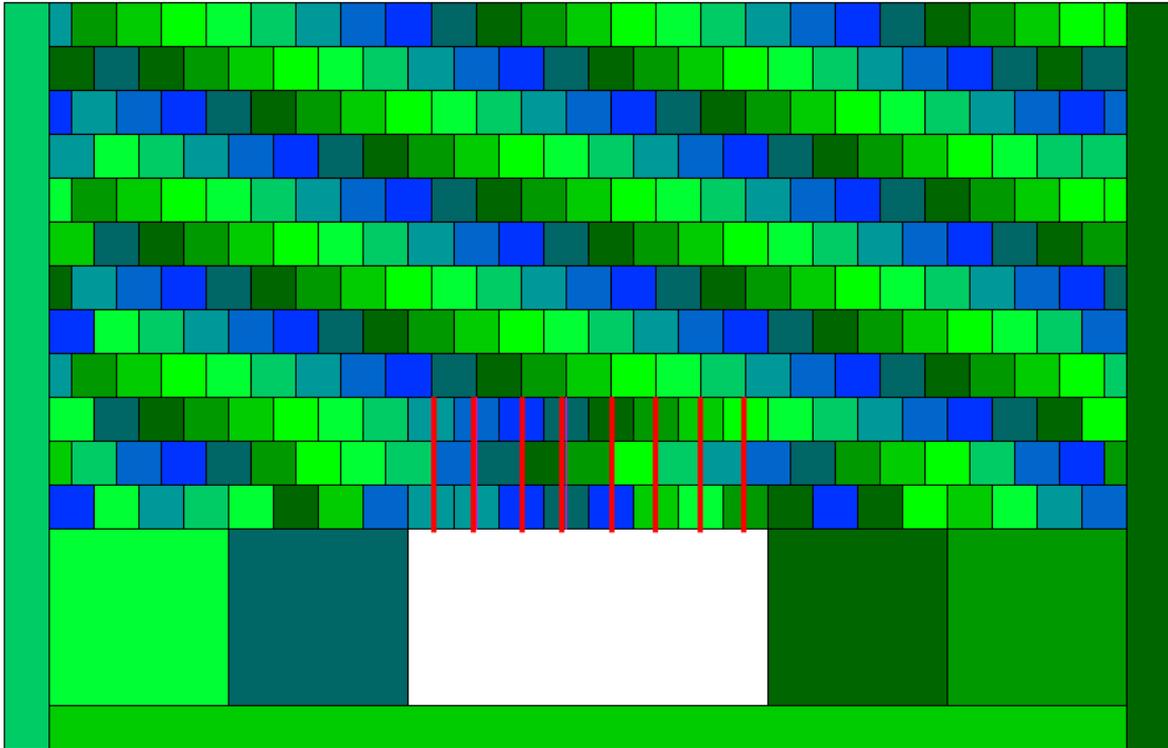


Figura 4. Modelo com suporte, primeiro padrão de ancoragens, configuração inicial.

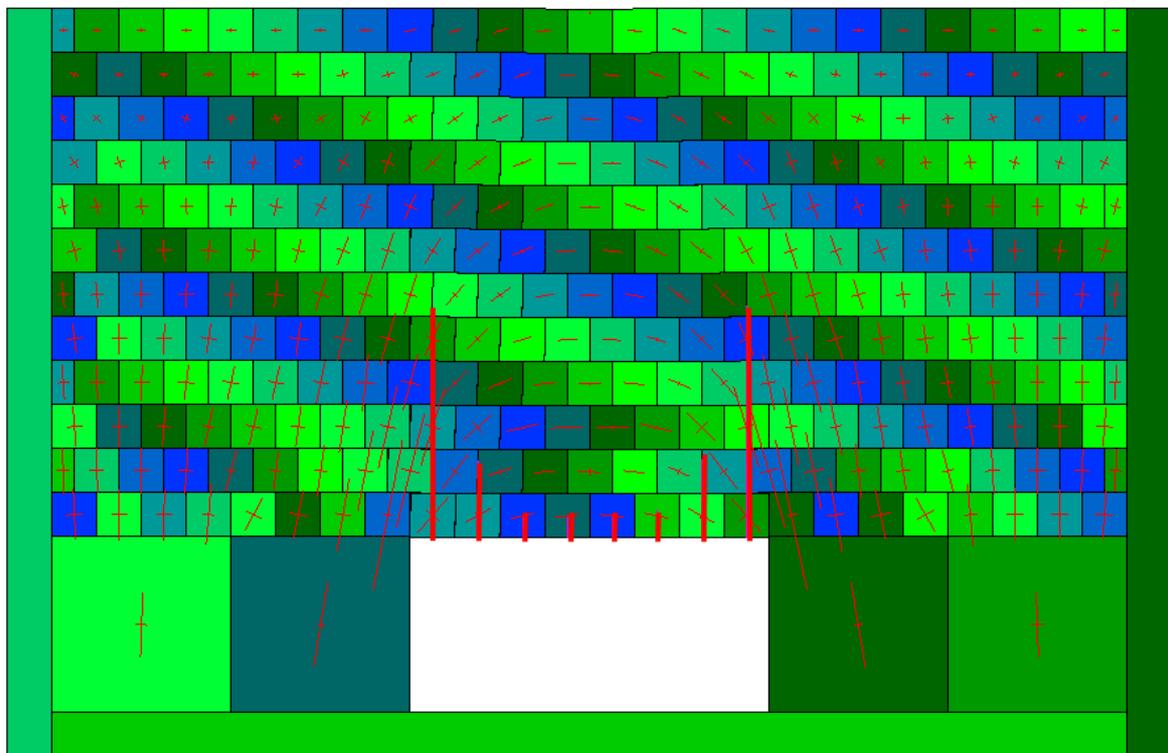


Figura 5. Modelo com suporte, primeiro padrão de ancoragens, configuração final.

A Figura 6 mostra o modelo com suporte, com o segundo padrão de ancoragens. A diferença do primeiro padrão de ancoragens é que agora as duas primeiras e as duas últimas linhas de ancoragens estão inclinadas.

A Figura 7 mostra também pequenos movimentos dos blocos, o que também confirma a eficiência deste padrão de suporte. Na Figura 7 observa-se também uma orientação das tensões principais (linhas vermelhas) indicando um arqueamento das tensões acima da zona solta do modelo sem suporte. Na região onde seria a zona solta existe um carregamento horizontal dos blocos o que os estabiliza.

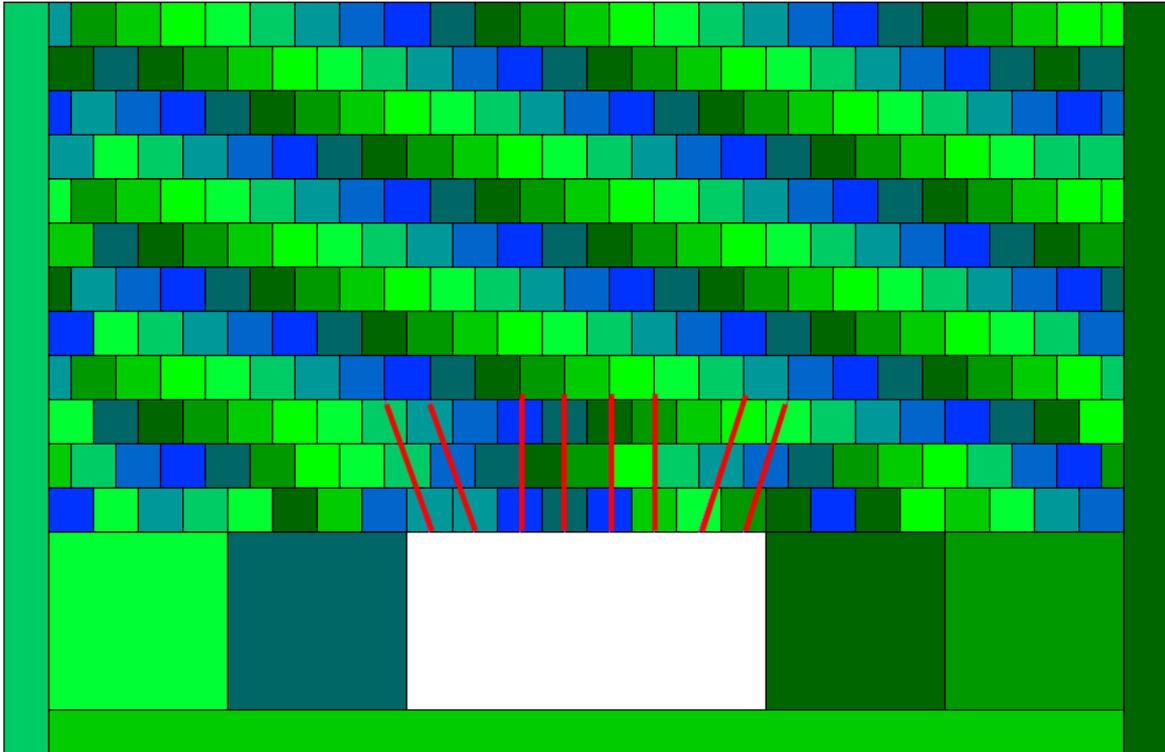


Figura 6. Modelo com suporte, segundo padrão de ancoragens, configuração inicial.

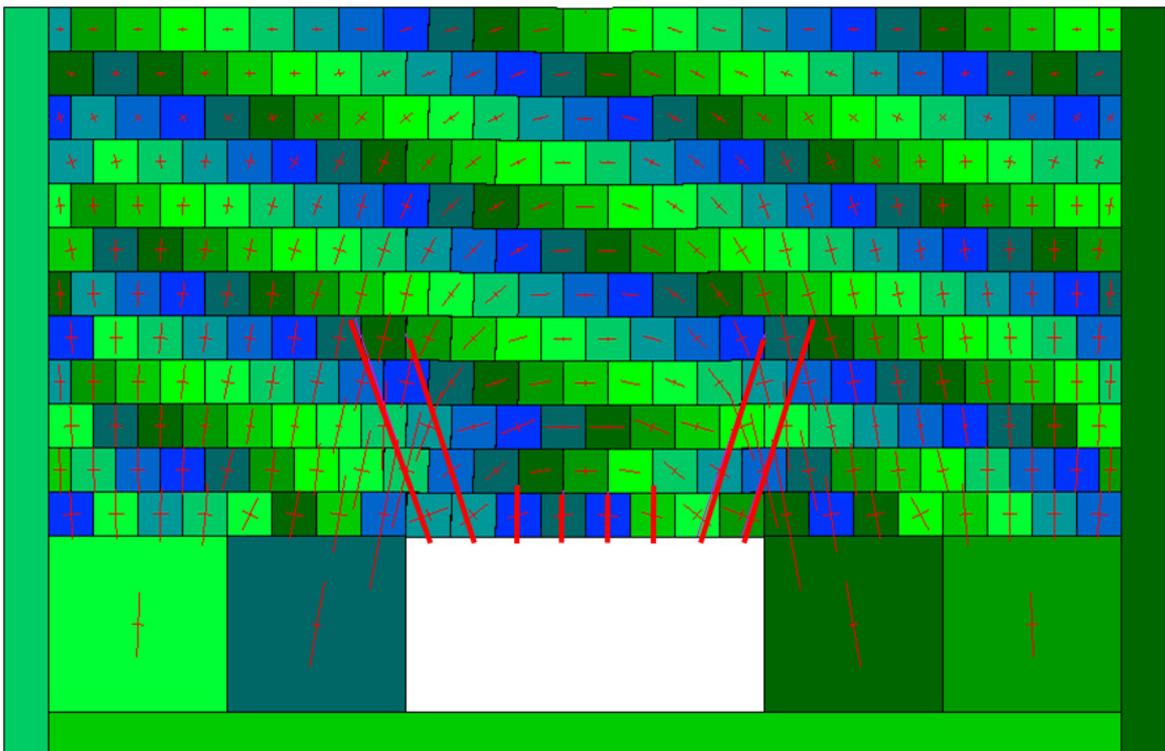


Figura 7. Modelo com suporte, segundo padrão de ancoragens, configuração final.

As cargas nas ancoragens obtidas nas duas análises são mostradas na Tabela 1. Note-se que as cargas são maiores nas ancoragens das laterais e menores nas ancoragens do centro. A pequena não simetria das cargas pode ser atribuída ao processo iterativo de cálculo do modelo DDA.

Tabela 1. Cargas, em kN, nas oito ancoragens dos dois modelos.

Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8
Primeiro padrão	289,7	97,0	27,7	24,9	28,4	34,6	99,2	292,3
Segundo padrão	168,0	155,7	38,3	34,3	33,0	36,9	155,6	167,0

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio do conceito de unidade de reforço de rocha cada ancoragem possui uma área de influência definida por um espaçamento s , as ancoragens possuem comprimento l e atuam em um maciço que possui altura da rocha não carregada acima da superfície da abertura D , conforme ilustrado na Figura 8 (Lang e Bischoff, 1981).

Sendo α um parâmetro igual a 1 para ancoragens passivas e igual a 0,5 para ancoragens ativas; γ é o peso específico da rocha; $\mu = \tan \phi$, onde ϕ é o ângulo de atrito do maciço; c é a coesão do maciço, e h é o carregamento acima a unidade de reforço de rocha, k é o coeficiente de empuxo horizontal; a carga na ancoragem (T) pode ser calculada por:

$$T = \alpha \cdot \frac{\gamma \cdot A \cdot R}{\mu \cdot k} \cdot \left(1 - \frac{c}{\gamma \cdot R} - \frac{\mu \cdot h}{\gamma \cdot R}\right) \cdot \left[\frac{1 - e^{-\mu \cdot k \cdot D/R}}{1 - e^{-\mu \cdot k \cdot l/R}}\right] \quad (4)$$

Adotando-se $\alpha = 1$; $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$; $\phi = 15^\circ$; $c = 0$; $h = 0$; $l = 3$ metros; $k = v/(1-v) = 0,25/(1-0,25) = 0,33$; $D = 12$ metros; chega-se a uma carga na ancoragem $T = 98,6 \text{ kN}$. Os valores obtidos nas simulações DDA, indicados na Tabela 1, são menores que este valor de referência para as ancoragens do centro e maiores para as ancoragens das laterais.

Os valores de carga nas ancoragens das análises DDA são consistentes em ordem de grandeza com o obtido na análise pelo conceito de unidade de reforço de rocha.

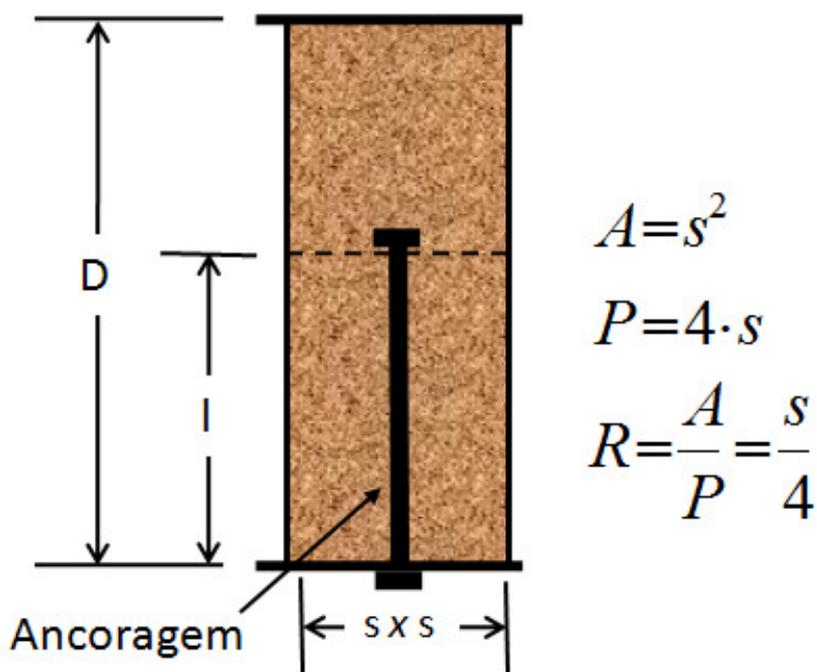


Figura 8. Conceito de unidade de reforço de rocha (modificado de Lang e Bischoff, 1981).

6 CONCLUSÕES

No modelo sem reforço se observa a formação de uma zona solta acima da abertura subterrânea. As primeiras linhas de blocos se desprendem completamente. As linhas de blocos imediatamente superiores se movimentam verticalmente formando vigas aduela (“voussoir”), onde os esforços horizontais mobilizam a resistência ao cisalhamento entre os blocos criando uma situação de equilíbrio do conjunto. A orientação das tensões principais mostra um processo de arqueamento dos esforços para a lateral da abertura.

Nos modelos com reforço de ancoragem se observa um confinamento da região que formaria a zona solta, resultando em estabilidade do sistema. As ancoragens geram esforços horizontais que mobilizam a resistência ao cisalhamento dos blocos, em um mecanismo similar ao preconizado pela solução analítica do modelo de arco plano de tensões no teto.

O padrão de ancoragem com inclinação apresenta esforços menores nos elementos de reforço. As ancoragens próximas as laterais da abertura apresentam cargas maiores. Os valores das cargas das ancoragens dos modelos DDA possuem cargas similares, em ordem de grandeza, das cargas previstas pelo modelo do conceito de unidade de reforço de rocha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bischoff, J.A., Smart, J.D. (1975) A method of computing a rock reinforcement system which is structurally equivalent to an internal support. In: 16th US Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis. *Proceedings...* p.179-184.
- Hatzor, Y.H., Benary, R. (1998) The stability of a laminated voussoir beam: Back analysis of a historic roof collapse using DDA. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(2), p.165-181.
- Hatzor, Y.H., Ma, G., Shi, G.-H. (2018) *Discontinuous deformation analysis in rock mechanics practice*. CRC Press, Boca Raton. 388p.
- Krauland, N. (1983) Rock bolting and economy. In: International Symposium on Rock Bolting, Abisko. *Proceedings...* p.499-507.
- Lang, T.A., Bischoff, J.A. (1981) *Research study of coal mine rock reinforcement*. US Bureau of Mines Open File Report OFR 72-82. 224pp.
- Nie, W. (2019) *Reinforcement mechanism of rockbolt system for underground excavation*. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10356/83549>>. Acesso em 20 fev. 2024.
- Shi, G.-H. (2019) *DDA 2D. The original version of 2D DDA for Windows platform*. Disponível em: <https://www.ddamm.org/wiki/Softwares#DDA_2D>. Acesso em 21 jun. 2022.
- Tsesarsky, M., Hatzor, Y.H. (2006) Tunnel roof deflection in blocky rock masses as a function of joint spacing and friction – A parametric study using discontinuous deformation analysis (DDA). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(1), p. 29-45.
- Yeung, M.R. (1993) Analysis of a mine roof using the DDA method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(7), p.1411-1417.