

ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DESCONTÍNUA PARA SIMULAÇÃO DO MODO DE RUPTURA DO TETO DE ESCAVAÇÕES EM MEIOS FRATURADOS

DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS FOR SIMULATION OF FAILURE MODE OF EXCAVATION ROOF IN FRACTURED MEDIA

Paulo Gustavo Cavalcante Lins^a e Roberto Bastos Guimarães^a

^a*Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides Novis 2, Salvador/BA, 40210-630, Brasil, plins@ufba.br, rbg@ufba.br, <http://www.eng.ufba.br/>*

Palavras-chave: Análise de deformação descontínua, DDA, escavações, meios fraturados.

Resumo. Análise de deformação descontínua (DDA) é um modelo numérico desenvolvido para simular o comportamento de sistemas formados por blocos de rocha separados por descontinuidades. A formulação permite simular a cinemática dos blocos envolvendo grandes deslocamentos e rotações. Dois modelos físicos, representando o maciço rochoso fraturado do teto de escavações subterrâneas, são consideradas. No primeiro modelo existem duas famílias de descontinuidades persistentes, formando um padrão de blocos sem imbricamento. Com a redução da tensão lateral do modelo os blocos do teto vão se desprendendo até a propagação da instabilidade chegar na superfície. No segundo modelo uma família de descontinuidades é persistente e outra é não persistente, o padrão de blocos possui imbricamento. A redução da tensão lateral do modelo permite o desprendimento de blocos no teto da escavação, formando um domo. Neste segundo modelo com imbricamento a instabilidade não chega na superfície. As simulações de análise de deformação descontínua conseguiram reproduzir com sucesso os dois modelos físicos.

Keywords: Discontinuous Deformation Analysis, DDA, excavations, fractured media.

Abstract. Discontinuous Deformation Analysis (DDA) is a numerical model designed to simulate the behavior of systems formed by rock blocks separated by discontinuities. The formulation allows simulating block kinematics involving large displacements and rotations. Two physical models, representing the fractured rock mass of the underground excavation roof, are considered. In the first model there are two sets of persistent discontinuities, forming a pattern of blocks without imbricated. As the lateral stresses of the model are reduced, the blocks in the roof loosen until the propagation of instability reaches the surface. In the second model, a set of discontinuities is persistent and the another is not persistent, the block pattern have imbricated. The reduction in the lateral stress of the model allows the loosening of blocks from the roof of the excavation, forming a dome. In this second model with imbrication the instability does not reach the surface. The discontinuous deformation analysis simulations were able to successfully reproduce the two physical models.

1 INTRODUÇÃO

Um maciço rochoso pode ser modelado como um meio contínuo, um meio contínuo equivalente ou como um meio fraturado. Na abordagem de modelagem de meio fraturado o maciço pode ser representado por blocos de rocha separados por descontinuidades. A análise de deformação descontínua (DDA, *Discontinuous Deformation Analysis*) é um tipo de modelo numérico que permite realizar a abordagem de modelagem do maciço rochoso como meio fraturado.

Na formulação mais convencional do DDA os blocos de rocha possuem um formato poligonal. Nesta formulação clássica em duas dimensões para cada bloco são consideradas seis variáveis básicas: deslocamento horizontal, deslocamento vertical, rotação, deformação axial horizontal, deformação axial vertical e distorção angular. Os blocos possuem um comportamento elástico linear e as descontinuidades obedecem ao critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Uma aproximação de primeira ordem para os deslocamentos permite definir uma matriz que relaciona as variáveis básicas com seus respectivos esforços. Algoritmos para detectar os contatos entre os diferentes blocos permitem a montagem de uma matriz global do sistema. As variáveis são solucionadas ao longo do tempo. A formulação permite simular a cinemática dos blocos envolvendo grandes deslocamentos e rotações.

O DDA foi formalizado na tese de Shi (1988), sendo utilizado com sucesso em diversas aplicações em escavações subterrâneas em rochas. Hatzor e Benary (1998) indicam que o DDA é mais apropriado e menos conservador que a teoria de viga Voussoir para análise de estabilidade de uma caverna histórica utilizada como um reservatório subterrâneo de água. Tsesarsky e Hatzor (2006) ao realizarem um estudo paramétrico com DDA para a deflexão do teto de túneis em maciços fraturados concluíram que a zona solta acima da escavação é controlada pela razão entre o espaçamento das descontinuidades e o vão da escavação. Chen e Deng (2008) aplicaram DDA determinar os deslocamentos e o dano na análise de estabilidade da casa de força da hidroelétrica de Jinping. Bakun-Mazor et al. (2009), ao estudarem uma caverna de grande vão, conseguiram com modelos DDA identificar o desenvolvimento de mecanismo de arqueamento no teto da abertura. He e Zhang (2015) utilizaram DDA para investigar o mecanismo de arqueamento em escavações subterrâneas em maciços fraturados, o estudo permitiu observar um processo de arqueamento global e grupos de arqueamento localizados. Uma visão detalhada do desenvolvimento, formulação e aplicações do DDA pode ser encontrada em Hatzor et al. (2018).

No presente trabalho são considerados como referência dois modelos físicos apresentados por Cecil (1970). Os modelos físicos representam o maciço fraturado do teto de escavações subterrâneas, são consideradas. No primeiro modelo existem duas famílias de descontinuidades persistentes, formando um padrão de blocos sem imbricamento. No segundo modelo uma família de descontinuidades é persistente e outra é não persistente, o padrão de blocos possui imbricamento. Os dois modelos foram simulados com um programa de DDA. O resultado das simulações DDA foi coerente com o padrão geral de movimento observado nos modelos físicos.

2 ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DESCONTÍNUA

2.1 Formulação básica

Conforme de Shi (1988) e Hatzor et al. (2018), na formulação clássica do DDA um bloco possui formato poligonal. Considerando (x_0, y_0) as coordenadas de um ponto do bloco (normalmente o centroide do bloco), seus deslocamentos de translação de corpo rígido ao longo de x e y são respectivamente (u_0, v_0) , r_0 é o ângulo de rotação, em radianos, em torno do ponto. As deformações axiais e deformação cisalhante do bloco são representadas por ε_x , ε_y e γ_{xy} ,

respectivamente. Desta forma, para um bloco i o vetor de incógnitas \mathbf{d}_i é formado por $(u_o, v_o, r_o, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})$, conforme ilustrado na Figura 1.

Assumindo uma função de deslocamentos de primeira ordem, a relação entre os deslocamentos de um ponto e o vetor de incógnitas \mathbf{d}_i é dada por uma matriz \mathbf{T}_i , na forma:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y - y_o) & (x - x_o) & 0 & (y - y_o)/2 \\ 0 & 1 & (x - x_o) & 0 & (y - y_o) & (x - x_o)/2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_o \\ v_o \\ r_o \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \mathbf{T}_i \mathbf{d}_i. \quad (1)$$

O DDA utiliza um procedimento de solução incremental, onde as equações de movimento são resolvidas para cada passo de tempo. A variação de energia incremental é determinada para cada passo de tempo como um sistema que busca alcançar o equilíbrio. Baseado na minimização da energia potencial, o sistema de equações pode ser representado como:

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

Onde \mathbf{K} é a matriz de rigidez, \mathbf{M} é a matriz de massa, \mathbf{C} é a matriz de viscosidade, \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 equação (2) é usualmente resolvida por um esquema β de Newmark.

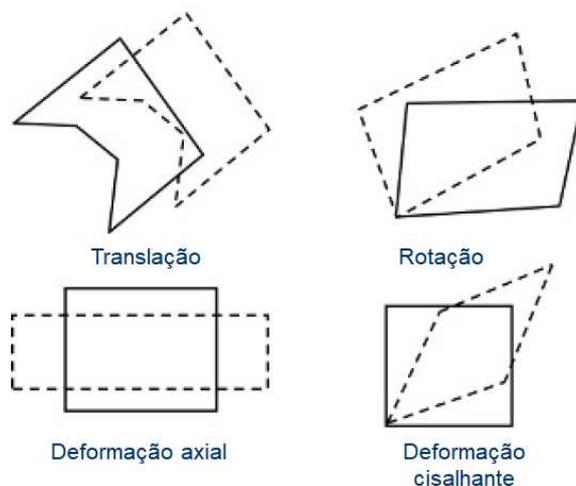


Figura 1: Variáveis de deslocamento do DDA (HATZOR et al. 2018).

As matrizes que representam cada bloco e as submatrizes que representam os contatos entre blocos são colocadas em uma matriz global que representa todo o sistema. A posição de cada matriz é tomada de acordo com o grau de liberdade que representa. Para um problema com n blocos, o sistema de equações global de equilíbrio pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & \cdots & \mathbf{K}_{1n} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & \cdots & \mathbf{K}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{K}_{n1} & \mathbf{K}_{n2} & \cdots & \mathbf{K}_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_n \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Onde as submatrizes na diagonal principal \mathbf{K}_i dependem das propriedades do bloco i ; as submatrizes fora da diagonal principal \mathbf{K}_{ij} são definidas pelos contatos entre o bloco i e j . O

vetor de deslocamentos do bloco i d_i possui dimensão 6×1 . O vetor de carregamento F_i associado com as seis incógnitas do bloco i também possui dimensão 6×1 .

2.2 Detecção de contatos

Cada bloco individual interage com os outros nos seus contornos. Para blocos bidimensionais três tipos de contatos existem: vértice-vértice, vértice-aresta (ver Figura 2), e aresta-aresta (ver Figura 3). Dentre estes contatos, o contato vértice-aresta e o contato vértice-vértice são os dois tipos básicos. O contato aresta-aresta pode ser convertido em uma combinação dos dois tipos básicos, existindo em quatro formas básicas, conforme ilustrado na Figura 3. Detalhes sobre a detecção de contatos podem ser encontrados em Shi (1988) e Hatzor et al. (2018).

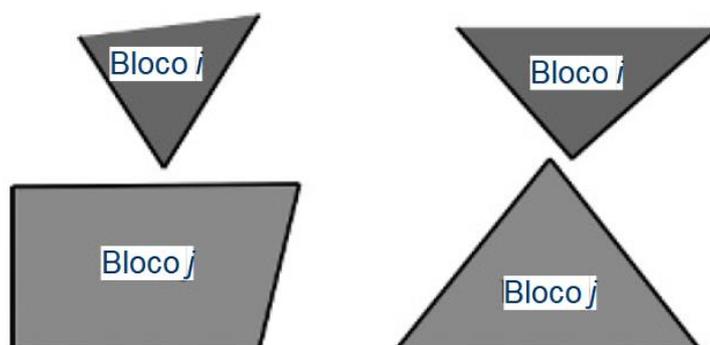


Figura 2: Contato vértice-aresta e contato vértice-vértice entre dois blocos (HATZOR et al. 2018).

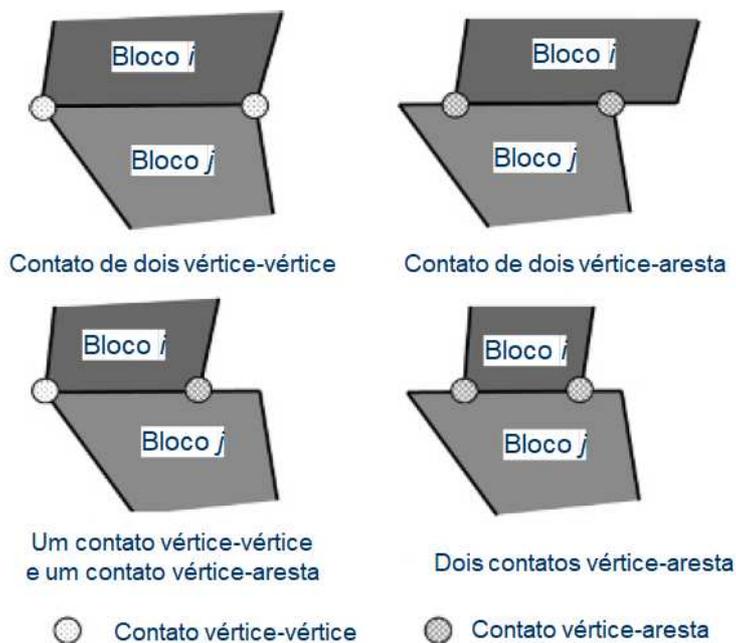


Figura 3: Contatos aresta-aresta (HATZOR et al. 2018).

2.3 Aplicação de restrições de contato

Quando um contato entre blocos é identificado uma estratégia deve ser adotada para lidar com a restrição de contato. A estratégia mais clássica é utilizar um método de penalidade. Uma discussão detalhada pode ser encontrada em Hatzor et al. (2018).

3 MODELOS FÍSICOS DE ESCAVAÇÕES EM MEIOS FRATURADOS

A descrição séria de ensaios em modelos físicos, representado o processo de instabilidade no teto de uma escavação em meios fraturados, é detalhada em Cecil (1970). Dois destes ensaios são simulados numericamente no presente trabalho.

Cecil (1970) utilizou blocos de um material artificial com propriedades similares a um granito intacto. O material artificial era composto, em percentagem de peso, por areia 76%, “Hydrocal B-11 plaster” 10% e água 14%.

As propriedades mecânicas do material artificial utilizado são detalhadas em Cecil (1970). Mas para as simulações realizadas no presente trabalho foram adotados os seguintes parâmetros: peso específico $\gamma = 18,85 \text{ kN/m}^3$, ângulo de atrito entre as paredes dos blocos $\phi = 29^\circ$, coesão entre as paredes dos blocos nula, módulo de elasticidade $E = 10,3 \text{ GPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,15$.

Os blocos utilizados possuíam 6,35 cm por 6,35 cm por 15,24 cm. No arranjo geral do ensaio 19 colunas e 14 linhas de blocos eram utilizados, conforme pode ser visualizado na representação da Figura 4.

O aparato utilizado para realização dos ensaios está representado na Figura 4. O aparato permitia a aplicação de uma pressão horizontal nas duas laterais e uma pressão vertical no topo. Nos ensaios reportados a pressão vertical não foi aplicada. O aparato possuía alçapões na parte inferior que permitiam simular a escavação de material.

Um ensaio consistia tipicamente em aplicar uma tensão horizontal, recolher os alçapões para simular a escavação e diminuir a tensão horizontal para acompanhar a movimentação dos blocos. Desta forma os padrões de movimento no teto da escavação eram acompanhados.

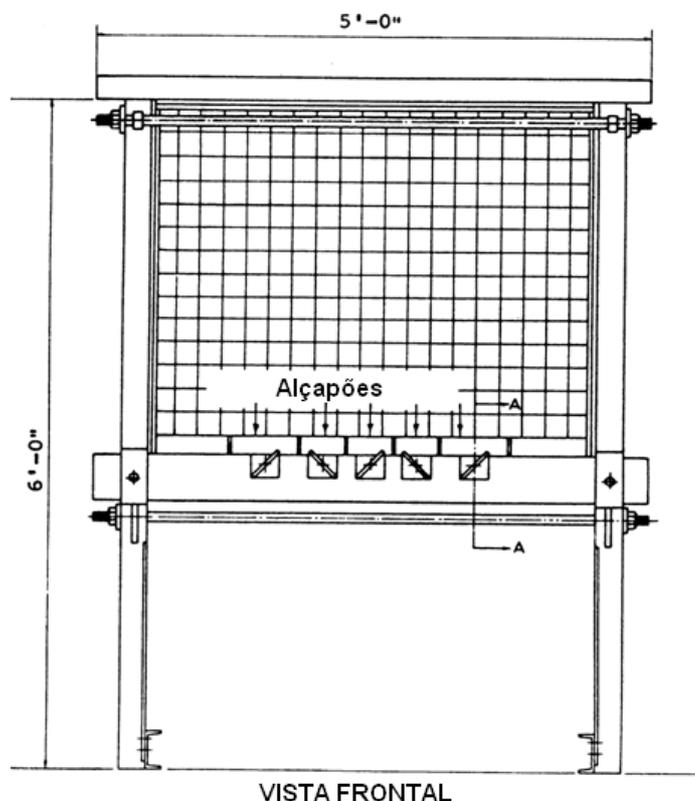


Figura 4: Aparato dos modelos físicos de Cecil (1970).

4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para a realização das simulações numéricas foi utilizado o programa DDA 2D (Shi, 2019).

A primeira simulação refere-se a um padrão de distribuição dos blocos onde não existe imbricamento (Figura 5). As discontinuidades verticais e horizontais são persistentes, conforme pode ser observado na Figura 5(a) e Figura 5(d), respectivamente para o modelo físico e a simulação DDA.

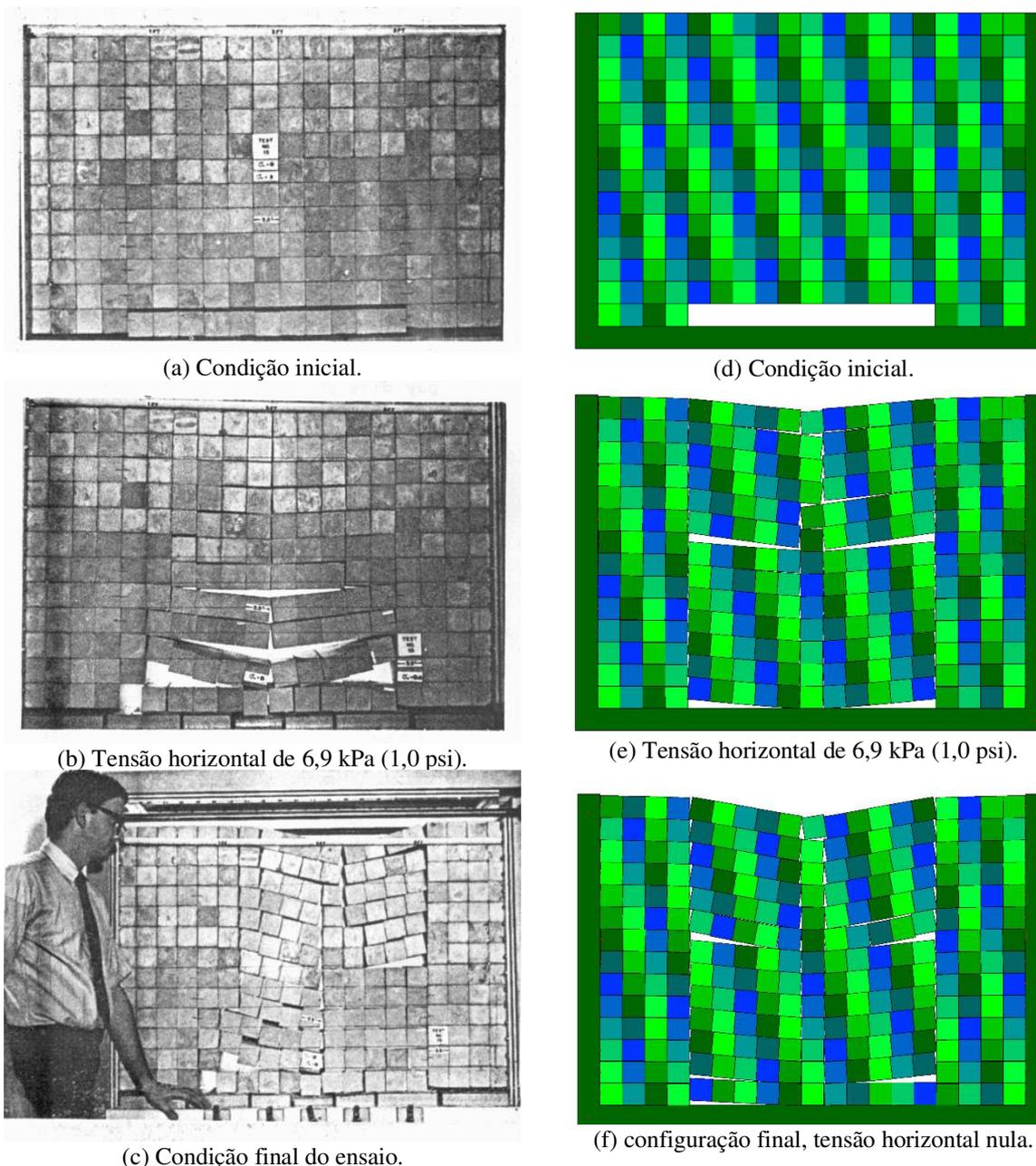


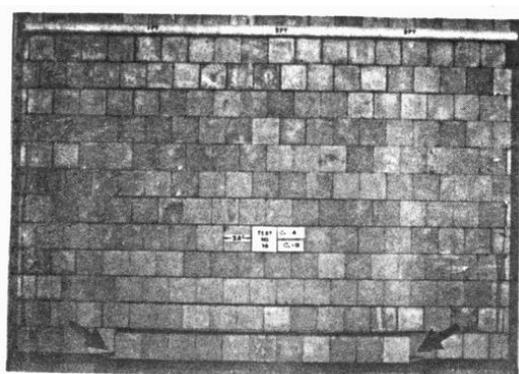
Figura 5: Modelo sem imbricamento; (a), (b) e (d) modelos de Cecil (1970); (d), (e) e (f) simulações DDA.

Para os primeiros 100 ciclos de tempo da simulação uma tensão lateral de 6,9 kPa (1,0 psi) foi aplicada nas duas laterais do modelo, na forma de foças concentradas nos blocos da primeira e última coluna. Na Figura 5(b), ilustrando o modelo físico, pode ser observado que as sete primeiras linhas de blocos são sustentadas pela mobilização do atrito pela ação da tensão lateral, as linhas abaixo já sofreram flexão e movimentação vertical, formando um domo. Na Figura

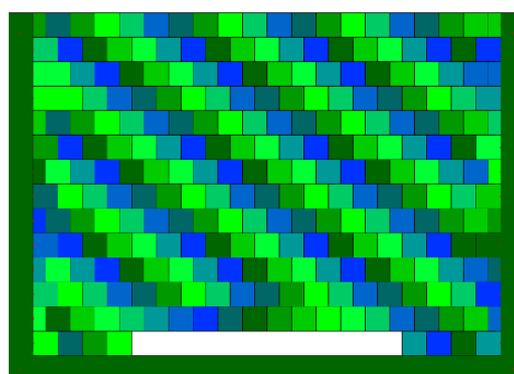
5(e), ilustrando o modelo numérico, as seis primeiras linhas são sustentadas pela mobilização do atrito pela ação da tensão lateral, as linhas abaixo já sofreram flexão e movimentação vertical.

Na simulação DDA após 100 ciclos a tensão horizontal é zerada e o cálculo continua até 450 ciclos. A configuração estabilizada do ensaio pode ser observada na Figura 5(c) para o modelo físico e Figura 5(f) para o modelo DDA. Pode ser observado, tanto no modelo físico como no numérico, que a estabilização dos blocos mostra uma flexão, consequência da trajetória do processo de descarregamento.

Na segunda simulação o padrão de distribuição dos blocos forma imbricamento (Figura 6). As descontinuidades horizontais são persistentes e as descontinuidades verticais são não persistentes. A configuração inicial do ensaio pode ser observada na Figura 6(a) e Figura 6(d), respectivamente para o modelo físico e a simulação DDA.



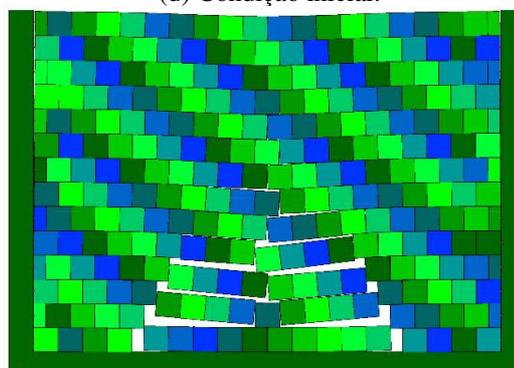
(a) Condição inicial.



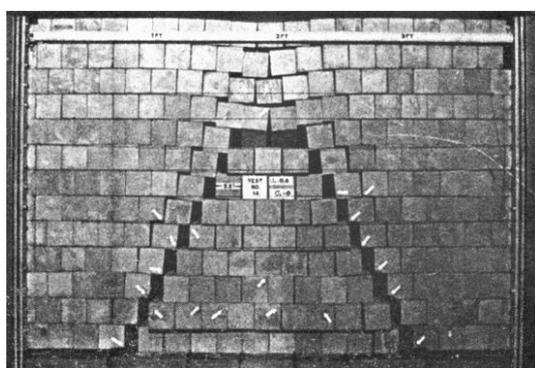
(d) Condição inicial.



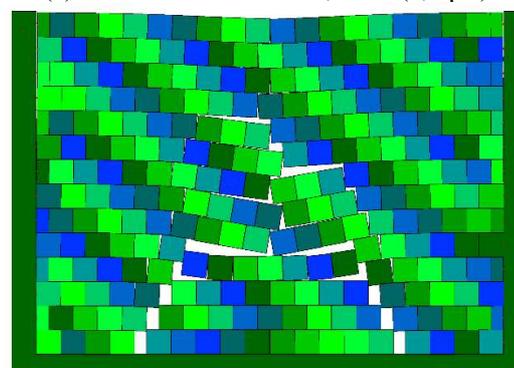
(b) Tensão horizontal de 6,2 kPa (0,9 psi).



(e) Tensão horizontal de 6,2 kPa (0,9 psi).



(c) Tensão horizontal de 2,8 kPa (0,4 psi).



(f) Tensão horizontal de 2,8 kPa (0,4 psi).

Figura 6: Modelo com imbricamento; (a), (b) e (d) modelos de Cecil (1970); (d), (e) e (f) simulações DDA.

Para os primeiros 50 ciclos de tempo da segunda simulação uma tensão lateral de 6,2 kPa (0,9 psi) foi aplicada nas duas laterais do modelo, na forma de foças concentradas nos blocos da primeira e última coluna. Na [Figura 6\(b\)](#), ilustrando o modelo físico, pode ser observado que as três linhas de blocos acima do teto da escavação (base do modelo) se desprenderam e as linhas superiores apresentam são sustentadas pela mobilização do atrito pela ação da tensão lateral, com pouco movimento. Na [Figura 6\(e\)](#), ilustrando o modelo numérico, também pode ser observado que as três linhas de blocos acima do teto da escavação (base do modelo) se desprenderam e as linhas superiores apresentam são sustentadas pela mobilização do atrito pela ação da tensão lateral, com pouco movimento. Tanto no modelo físico como no numérico a quarta e quinta linhas acima do teto da escavação apresentam pequena flexão.

Na simulação DDA após 50 ciclos a tensão horizontal é reduzida para 2,8 kPa (0,4 psi) e o cálculo continua até 450 ciclos. A configuração estabilizada do ensaio pode ser observada na [Figura 6\(c\)](#) para o modelo físico e [Figura 6\(f\)](#) para o modelo DDA. Pode ser observado, tanto no modelo físico como no numérico, que se forma uma zona solta no teto da escavação até a altura da oitava linha acima do teto da escavação. Em ambos os modelos as quatro linhas da parte superior da escavação sofrem pouco deslocamento vertical ou flexão.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O padrão geral de movimento dos blocos nos ensaios físicos foi reproduzido nas simulações DDA. Entretanto, algumas diferenças no comportamento podem ser observadas. [Cecil \(1970\)](#) relata que algumas quinas de blocos foram esmagadas durante os ensaios. Isto se deve a concentrações de tensão nestes pontos. Este fenômeno de esmagamento não é reproduzido nas presentes simulações DDA. Podem ser notadas nas simulações que alguns blocos se estabilizam por apoio nas suas quinas.

O tempo não foi levado em conta explicitamente nas simulações aqui realizadas. Apenas ciclos de simulação foram considerados até uma estabilização dos sistemas.

Dependendo do ajuste dos parâmetros de rigidez no contato entre blocos e critério de passo de tempo a simulação pode se tornar instável. No presente trabalho os blocos são pequenos (ordem de grandeza de centímetros). O critério padrão do programa DDA 2D não se mostrou suficiente. Uma análise de sensibilidade foi necessária para concretizar as análises.

A trajetória de tensões influencia os resultados. No caso do modelo sem imbricamento, uma simulação, não apresentada aqui, sem aplicação de uma carga lateral na fase inicial leva a um padrão de movimentos onde os blocos descem verticalmente, sem apresentar a aparência de flexão obtida nas simulações aqui apresentadas.

No caso do modelo com imbricamento foi possível simular a formação de uma zona solta no teto da escavação e um processo de arqueamento das tensões para as laterais. Para o caso de descontinuidades sem coesão, este processo somente é obtido com o padrão de imbricamento.

As tensões laterais possuem um papel importante na mobilização da resistência ao cisalhamento das paredes dos blocos. Com esta mobilização, o meio fraturado passa a funcionar de forma similar a um meio contínuo, permitindo que linhas de blocos fraturados tenham comportamento análogo a vigas contínuas.

6 CONCLUSÕES

A análise de deformação descontínua é um método numérico flexível que permite modelar a dinâmica de sistemas formados por blocos de rocha separados por descontinuidades. No presente trabalho a análise de deformação descontínua foi utilizada para reproduzir dois modelos físicos representando o processo de perda de estabilidade do teto de uma escavação em um meio fraturado.

O primeiro modelo estudado se refere ao teto de uma escavação em um maciço com duas famílias de descontinuidades persistentes. O padrão dos blocos no teto não forma imbricamento. Neste caso a tensão lateral atuante possui papel fundamental na estabilidade do teto. As linhas de blocos se comportam como viga contínua apenas enquanto a tensão lateral mobiliza a resistência ao cisalhamento entre os blocos. A perda da tensão lateral gera a instabilidade. Este padrão geral de comportamento foi observado tanto no modelo físico quanto na simulação numérica.

O segundo modelo estudado se refere ao teto de uma escavação em um maciço onde uma família de descontinuidades horizontal é persistente enquanto uma outra família de descontinuidades vertical é não persistente. O padrão dos blocos no teto forma imbricamento. A tensão horizontal possui papel na estabilidade do teto, por conta de mobilizar a resistência ao cisalhamento entre os blocos. Com o alívio da tensão horizontal ocorre o debilitamento dos blocos na região do teto, ou seja, os blocos se soltam formando uma zona solta acima da escavação. O padrão com imbricamento dos blocos faz com que o processo de arqueamento das tensões para as laterais se torne presente. Em um maciço com padrão de imbricamento o teto pode tomar nova configuração de estabilidade com a formação de um domo no teto, após a redução das tensões laterais. Este padrão geral de comportamento também foi observado tanto no modelo físico quando na simulação numérica.

Algumas dificuldades foram encontradas e superadas na realização das simulações. As dificuldades estão associadas a definição de ajuste dos parâmetros de rigidez no contato entre blocos e critério de passo de tempo.

Simulações de análise de deformação descontínua auxiliam na compreensão dos processos de instabilidade do teto de escavação subterrâneas. A comparação das simulações numéricas com os modelos físicos aumenta a confiança no uso dos modelos computacionais em tela. A aplicação deste instrumental numérico para projeto de estruturas em campo pode se tornar mais comum.

REFERÊNCIAS

- Bakun-Mazor, D., Hatzor, Y.H., e Dershowitz, W.S., Modeling mechanical layering effects on stability of underground openings in jointed sedimentary rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46:262–271, 2009.
- Cecil III, O.S., *Correlation of rock bolt-shotcrete support and rock quality parameters in Scandinavian tunnels*. PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, 1970. (Republicado como: Swedish Geotechnical Institute, Proceedings No. 27. Disponível em: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/sgi-proceedings/sgi-pr27.pdf>).
- Chen, W., e Deng, J., Application of key block theory and DDA to the stability analysis of underground powerhouse of Jinping hydropower station I. In: *The Eighth International Symposium on Analysis of Discontinuous Deformation*, Beijing, 243–247, 2008.
- Hatzor, Y.H., e Benary, R., The stability of a laminated Voussoir beam: Back analysis of a historic roof collapse using DDA. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35:165–181, 1998.
- Hatzor, Y.H., Ma, G., e Shi, G.-H., *Discontinuous deformation analysis in rock mechanics practice*. CRC Press, 2018.
- He, L., e Zhang, Q.B., Numerical investigation of arching mechanism to underground excavation in jointed rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50:54–67, 2015.
- Shi, G.-H., *DDA 2D. The original version of 2D DDA for Windows platform*, 2019. Disponível em: https://www.ddamm.org/wiki/Softwares#DDA_2D.
- Shi, G.-H., *Discontinuous deformation analysis: A new numerical model for the statics and*

- dynamics of block systems*. PhD Thesis, University of California, Berkeley, 1988.
- Tsesarsky, M., e Hatzor, Y.H., 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*, 21:29–45, 2006.