

Simulações DDA para Avaliação do Risco dos Mecanismos de Subsidência em Lapão - Bahia

Paulo Gustavo Cavalcante Lins

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, plins@ufba.br

Roberto Bastos Guimarães

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, rbg@ufba.br

Arthur de Almeida Barreto Silva

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, aabs94@gmail.com

Alexandre Barbosa Leite

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, ableite@msn.com

RESUMO: O município de Lapão no interior da Bahia registra movimentos do terreno que são associados ao relevo cárstico. Este tipo de movimento é comum na região que está situada no Craton do São Francisco. O sistema Q de classificação geomecânica estabelece limites para as dimensões das cavidades estáveis em função da qualidade do maciço rochoso. A identificação dos maciços rochosos em campo por meio do sistema Q permitiu estimar as dimensões das cavidades estáveis, a faixa de variação desta estimativa é grande. Simulações numéricas com o DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*) foram realizadas para melhorar a compreensão do processo de formação de dolinas. Estas simulações numéricas permitiram formular hipóteses que mudam a percepção do risco em determinadas áreas de Lapão.

PALAVRAS-CHAVE: DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*), Dolina, Classificação Geomecânica, Lapão – Bahia.

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2008 ocorreram no município de Lapão movimentos do terreno com o aparecimento de rachaduras e trincas. Na ocasião foi realizado um mapeamento geológico de risco pelo IPT identificando duas principais regiões de risco (IPT, 2008; Azevedo, 2013). Após a realização de levantamento geofísicos Santos *et al.* (2012) apresentam um mapa de risco detalhando as áreas de possível instabilidade. Em 2012 foram registrados novos movimentos no terreno. Com a sistematização de informações de geologia e de geofísica, Oliveira Filho (2015) elaborou um mapeamento mais detalhado identificando três classes de risco para o município de Lapão.

Na região de Lapão movimentos do terreno associados ao terreno cárstico são comuns. A Figura 1 apresenta a foto de uma dolina registrada próxima aos limites dos municípios de Barro Alto e Ibipêba. Conforme relatos a dolina foi formada de forma brusca durante a noite. Os moradores das imediações ouviram um grande barulho e no dia seguinte a dolina já estava na sua forma final. Os relatos situam a formação desta dolina por volta de 2010. Esta dolina está em área rural.

O fato dos movimentos do terreno estarem ocorrendo na sede do município de Lapão faz com que a ameaça encontre a vulnerabilidade.

Aspectos mais gerais sobre a formação de dolinas e subsidências são discutidos em Sowers (1996) e Whittaker e Reddish (1989).

Os meios cársticos naturalmente possuem cavidades. Um processo de dissolução pode fazer com que a cavidade cresça até uma dimensão em que o teto da cavidade possa colapsar, e se este colapso se estender até a superfície forma-se uma dolina.

Diversos tipos de modelos discretos vêm sendo utilizados para modelar subsidência. Como exemplo podem ser citados os trabalhos de O'Connor e Dowding (1992), Wu *et al.* (2004) e Elmo *et al.* (2013).

No presente trabalho os resultados de levantamento de campo em termos de classificações geomecânicas são sistematizados. De forma complementar modelos numéricos DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*) foram elaborados buscando verificar a interação entre duas cavidades identificada nos levantamentos geofísicos descritos em Santos *et al.* (2012).

Estes estudos procuram estabelecer mecanismos de verificação do tipo de caverna existentes a partir de observações dos deslocamentos na superfície e seu mapeamento.



Figura 1. Dolina no limite dos municípios de Barro Alto e Ibipêba (Foto de Arthur de Almeida Barreto Silva).

2 ROCHAS CARBONÁTICAS

Rochas carbonáticas apresentam em sua composição os carbonatos. Os mais encontrados são os carbonatos de cálcio (CaCO_3), que forma o mineral calcita e compõe o calcário, e o carbonato de cálcio e magnésio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) presente na dolomita e integrante dos dolomitos. Outra característica importante dessas rochas diz respeito a sua origem

sedimentar, depósitos carbonáticos são formados em ambientes marinhos, lacustres ou continentais de restos de conchas de seres marinhos que morreram e foram se assentando ao fundo desses ambientes aquáticos.

As rochas carbonáticas, em geral, são constituídas grãos de mineralogia pouco diversificada onde estão presente a calcita e a dolomita, na maioria das vezes. Além destes grãos, essa rocha é também formada por um cimento carbonático responsável pela coesão dessas partículas. Existem alguns principais tipos de grãos que podem compor esse material e cada um apresenta diferentes estruturas e/ou composição.

Oólitos são estruturas arredondadas e concêntricas que apresentam tamanho próximo a areias (0,25 a 2,00 mm) formados pela precipitação do carbonato de cálcio em volta de um núcleo de composição química variável.

Oncólitos são grãos originados quando a deposição carbonática se dá em envelopes irregulares, sem forma definida, diferente dos oólitos (Terra *et al.*, 2010 *apud* Figueiredo, 2011). Os carbonatos depositados provêm de origem biológica.

Pelóides são grãos de granulometria extremamente fina (micrítica) que formam estruturas subesféricas, sem núcleo e de origem desconhecida (Terra *et al.*, 2010 *apud* Figueiredo, 2011).

Esferulitos são partículas menores que 2 mm que apresentam forma esférica ou subesféricas e apresentam contornos lisos ou ondulados. Quando analisados em microscopia podem apresentar uma porção central de composição micrítica e ricas em vacúolos. Não apresentam núcleo (Terra *et al.*, 2010 *apud* Figueiredo, 2011).

Intraclastos são fragmentos de sedimentos carbonáticos que possuem idades próximas, pouco consolidadas e que foram erodidos e redepositados para formar novo sedimento (Folk, 1962 *apud* Fragozo *et al.*, 2008).

Bioclastos são os principais constituintes das rochas carbonáticas e englobam todos os fósseis de estruturas calcárias de organismos ou fragmento destas estruturas (Terra *et al.*, 2010 *apud* Figueiredo, 2011).

3 CARSTE

Terrenos cársticos são tidos como formas de relevo compostos principalmente por rochas carbonáticas e que apresentam feições características decorrente da dissolução dessas rochas. As dissoluções das rochas pode ser hipogênica, quando ocorre por meio de águas hidrotermais ácidas ou epigênica, quando a água da chuva com CO₂ dissolvido infiltra pelo solo (Santos, 2014 *apud* Oliveira Filho, 2015). A interação do dióxido de carbono com a água da chuva acaba por torná-la levemente ácida e, em contato com as rochas carbonáticas, proporcionará a dissolução lenta e gradual dessas estruturas.

A formação de aquíferos e rios subterrâneos é comum em terrenos cárstico. Grandes volumes de água podem escavar pouco a pouco a rocha e criar enormes condutos e caverna. As áreas de maior risco cárstico são as que possuem uma caverna ou um espaço vazio em subsuperfície preenchido por água. A abertura de poços artesianos e ciclos de regime muito chuvoso e seco podem provocar o abaixamento do nível do lençol freático e, possivelmente, instabilidade no teto dessa caverna. O colapso do teto pode ser inevitável e, em regiões urbanizadas, pode acarretar grave risco a população. Algumas feições são formadas a partir destes processos. Dentre estas feições pode-se destacar: lapiaz, dolinas, uvalas, poljes e sumidouros.

4 GEOLOGIA REGIONAL

A bacia de Irecê corta o Craton do São Francisco na direção N-S devido ao processo de *rift* abortado de idade estimada em 1,7 Ga. Diversos sedimentos e rochas sedimentares foram depositados nessa região até que ocorreu um soerguimento do terreno e uma exposição subaérea dos sedimentos, além da implantação de importantes redes de drenagens. Posteriormente, um evento de natureza térmico flexural resultou na subsidência do aulacógeno. Sequências de abaixamento e elevação do nível do mar possibilitaram que novos sedimentos fossem depositados. A cerca de 1,0 Ga ocorreu

um importante fenômeno de glaciação que foi responsável pela acumulação de arenitos e diamictitos de origem glacial. O processo de degelo resultou numa maior deposição de sedimentos de origem carbonática devido às inundações que ocorreram. Todos estes estágios de evolução foram propostos por Dominguez (1998) *apud* Fragoso *et al.* (2008).

Sustentando o cráton do São Francisco temos as rochas do Complexo Xique – Xique, embasamento da região datado do Proterozóico Inferior composto por itabiritos, rochas metamórficas com grandes teores de sílica e óxidos de ferro (CBPM, 2005 *apud* Fragoso *et al.*, 2008).

O Supergrupo espinhaço, de idade Mesoproterozóica, engloba o Grupo Paraguaçu, o Grupo Chapada Diamantina e a Formação Morro do Chapéu. O primeiro grupo apresenta arenitos, argilitos, siltitos e conglomerados, pelitos e psamitos, sendo estes últimos rochas sedimentares de origem detrítica clásticas (Guimarães, 1996 *apud* Fragoso *et al.*, 2008). O Grupo da Chapada Diamantina é composto por arenitos, pelitos, diamictitos, calcários e conglomerados originados de uma sequência deposicional eólica – fluvial e plataformar (Sampaio *et al.*, 2001 *apud* Fragoso *et al.*, 2008). Já a formação Morro do Chapéu engloba arenitos, argilitos e conglomerados em sua composição (Pedreira, 1994 *apud* Fragoso *et al.*, 2008).

O Supergrupo São Francisco é composto, na região estudada, pelo grupo Una que pode ser subdividido nas formações Salitre (topo) e Bebedouro (base).

Os sedimentos da formação Bebedouro são de natureza terrígena e foram depositados em ambiente glacial.

Os sedimentos da formação Bebedouro são compostos, basicamente, por diamictitos, pelitos e arenitos (Guimarães, 1996 *apud* Fragoso *et al.* 2008).

Já a formação Salitre apresenta uma sequência de rochas carbonáticas, com pequenas intercalações de rochas terrígenas (Guimarães, 1996 *apud* Fragoso *et al.*, 2008). Cobrindo toda a região da Bacia de Irecê têm-se sedimentos de origem Cenozóica.

5 DIMENSÃO DAS CAVIDADES ESTÁVEIS

Uma classificação geomecânica é usualmente elaborada a partir da observação de casos de campo, neste sentido elas são empíricas. De acordo com a classificação geomecânica proposta por Barton *et al.* (1974) a qualidade do maciço rochoso pode ser quantificada pelo índice Q.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Onde: RQD - *Rock Quality Designation*, J_n - Índice relativo ao número de famílias de descontinuidades, J_r - Índice relativo à influência da rugosidade das descontinuidades, J_a - Índice relativo à alteração das paredes das descontinuidades, J_w - Índice relativo à ação da água subterrânea, SRF - Índice relativo ao estado de tensões do maciço.

O máximo vão (L_{MAX}) que pode ser escavado em um maciço rochoso é definido em função do ESR e da qualidade do maciço rochoso.

O ESR é definido em função do grau de segurança exigido para uma obra. A Tabela 1 apresenta os valores de ESR de Barton *et al.* (1974).

$$L_{MAX} = 2 \cdot ESR \cdot Q^{0,4} \quad (2)$$

A Equação (2) define a linha que separa a região de maciços estáveis da região onde é necessário o uso de suporte conforme representado na Figura 2. Na Figura 2 ainda os dados de cavernas de calcário apresentados por Waltham e Fookes (2003) estão representados pela área hachurada. Deve ser dado destaque que muitas das cavernas naturais sob o critério do Sistema Q necessitariam de suporte ou seriam instáveis.

O limite entre aberturas auto-portantes e com necessidade de suporte da Figura 2 está construído para ESR=1.

Barton (1976) mostra que o limite varia com o ESR, destacando ainda que o limite pode ser não linear, particularmente para maciços de muito boa qualidade (Figura 3).

Tabela 1. Valores de ESR em função da natureza da escavação (Barton *et al.*, 1974).

Natureza da escavação	ESR
A. Galerias temporárias de minas, etc.	3-5 ?
B. Poços verticais: (i) Seção circular.	2,5
(ii) Seção retangular/quadrada.	2,0
C. Galerias permanentes de minas, túneis e galerias de adução (exceto condutos forçados sob altas pressões), túneis-piloto, câmaras e galerias para escavações de grande porte.	1,6
D. Escavações para estocagem, estações de tratamento d'água, túneis rodoviários e ferroviários (obras correntes), túneis de acesso.	1,3
E. Escavações para casas de força, túneis rodoviários e ferroviários (obras especiais), obras de defesa, emboques e interseções de túneis.	1,0
F. Escavações para centrais nucleares, túneis metroviários, instalações para desenvolvimento de atividade humana.	0,8

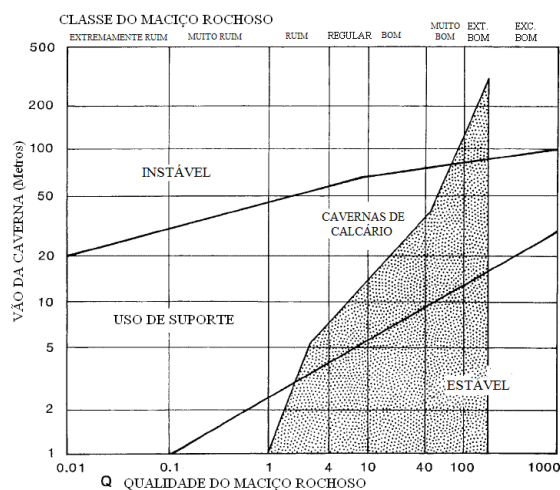


Figura 2. Estabilidade das cavernas relacionadas ao índice Q de Barton et al. (1974), segundo Waltham e Fookes (2003). A faixa de Q em Lapão varia de 1,7 a 213.

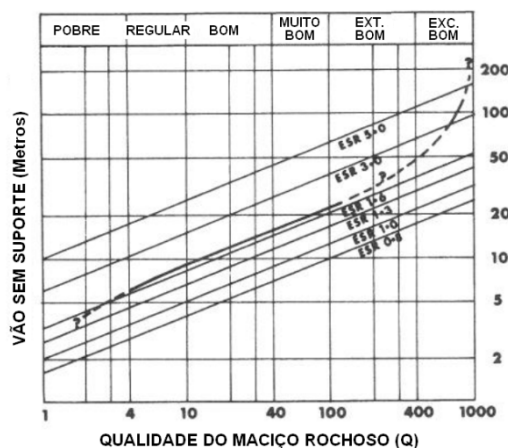


Figura 3. Limites de projeto sem suporte sugeridos para vários tipos de escavações (Barton, 1976).

6 FORMAÇÃO DE DOLINAS

O estudo da formação de dolinas encontra um paralelo com o estudo de subsidências geradas por escavações subterrâneas, particularmente as escavações de mineração.

Whittaker e Reddish (1989) discutem diversos conceitos e teorias de subsidência de minas. Uma atenção pode ser dada ao conceito de subsidência de mina apresentado por Fayol, em 1885, que foi estabelecido a partir de modelos experimentais.

O modelo do domo de Fayol estabelece relações entre a dimensão da abertura e sua cobertura com a forma da subsidência.

Segundo Whittaker e Reddish (1989) Fayol identificou aspectos importantes do mecanismo de subsidência de minas, destacando-se:

- (1) o movimento é transmitido para a superfície a partir de todas as profundidades de trabalho;
- (2) os efeitos na superfície tornam-se mínimos, abaixo de certa profundidade;
- (3) os movimentos tornam-se cada vez mais fracos quando eles progridem para cima do nível de trabalho;
- (4) a subsidência sempre ocorre verticalmente acima dos trabalhos de mineração;
- (5) a subsidência ocorre dentro de linhas limites desenhadas da aresta dos trabalhos de mineração;
- (6) o preenchimento de áreas mineradas reduz o efeito da subsidência e gera proteção da superfície.

Segundo Sowers (1996) o processo de dissolução de material em meios cárticos faz com que a cavidade na rocha cresça, as tensões cisalhantes e de tração no teto da cavidade e as tensões de compressão nas paredes da cavidade aumentam, sendo que as máximas tensões cisalhantes estão no intervalo, conforme visto na Figura 4(a). Como a caverna continua a aumentar, fissuras de tração podem se desenvolver no teto da caverna, por vezes acompanhadas de fissuras de cisalhamento diagonais próximo do meio entre o teto da caverna e as paredes laterais. A tensão de fraturamento permite que blocos de rocha caiam do teto, dependendo do padrão de fraturamento do teto, conforme Figura 4(b).

Waltham e Fookes (2003) apresentam um exemplo de uma abertura subterrânea cujo o teto desaba e vai se acumulando no piso, existindo um processo de migração do espaço vazio no sentido ascendente. Este caso está ilustrado na Figura 5.

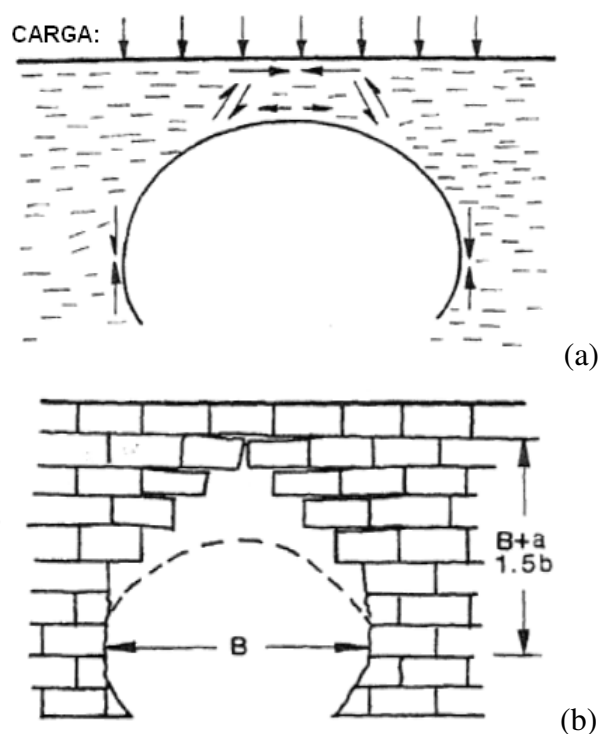


Figura 4. Tensões e deslocamentos no entorno de uma cavidade em rocha. (a) Maciço rochoso competente contínuo com uma pequena cobertura no teto da caverna. (b) Deslocamentos em um maciço rochoso estratificado horizontalmente e verticalmente acima da caverna (Sowers, 1996).

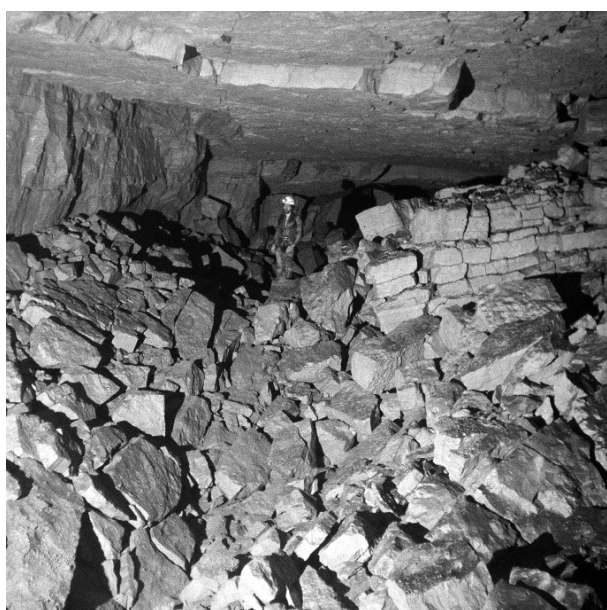


Figura 5. Ruptura progressiva do teto de uma abertura subterrânea (Waltham e Fookes, 2003).

7 CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO

Para caracterizar o maciço rochoso de Lapão foram feitas visitas a quatro afloramentos de rocha no município e no subúrbio. Nos afloramentos “Lagoa do Adalto” (AD) e “Fazenda do Gildasão” (FG) optou-se por caracterizar o maciço em termos de valores máximos (AD+ e FG+) e valores mínimos (AD- e FG-) do índice Q. Nos afloramentos da “Fonte do Lapão” (FL) e “Lagoa Augusto Leão” (LAL) foi possível representar o maciço por um valor médio. A Tabela 2 apresenta o resumo das classificações.

Tabela 2. Classificação pelo sistema Q dos afloramentos.

Local	RQD	J _n	J _r	J _a	J _w	SRF	Q
AD +	100	1	4	0,75	1	2,5	213
AD -	40	3	3	2	1	2,5	8
FG +	80	3	3	0,75	1	2,5	43
FG -	40	3	3	3	1	2,5	5,3
FL	100	9	1,5	2	0,5	2,5	1,7
LAL	100	1	4	1	1	2,5	160

Para estimar as possíveis dimensões das cavernas em campo os resultados da classificação pelo sistema Q foram utilizados na equação (2) para calcular o máximo vão que pode ser escavado em um maciço rochoso. Caso seja considerado o maior ESR para obras civis permanentes (ESR=1,6) as aberturas estáveis poderiam ter entre 3,96 e 27,32 metros. Utilizando o maior valor de ESR para obras provisórias de mineração (ESR=5) as dimensões das aberturas estáveis estariam entre 12,36 e 85,38 metros.

8 SIMULAÇÕES DDA

O DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*) é um método numérico que permite a simulação da interação de blocos de rocha deformáveis que são separados por descontinuidades que obedecem a um critério de ruptura. Trabalhos como os de Shi e Goodman (1985) e Shi (1992) apresentam a formulação básica do método. O programa de MacLaughlin e Sitar (1995) foi utilizado no presente trabalho.

O levantamento geofísico descrito por Santos *et al.* (2012) relata a possível existência de um grupo de cavernas na região do centro da cidade

e outro grupo na região do subúrbio. Modelos contínuos de elementos finitos apresentados por Lins *et al.* (2015) indicam que as dimensões das cavernas estimadas em Santos *et al.* (2012) apresentariam uma cobertura muito pequena, e já teriam colapsado.

Seis simulações DDA foram elaboradas representando uma caverna menor (região do centro) e uma caverna maior (região do subúrbio).

Nas simulações o maciço foi representado por blocos grandes, de 100 metros de comprimento por 50 metros de altura. No padrão estrutural dos blocos foi representado um imbricamento dos blocos.

As descontinuidades foram consideradas como obedecendo ao critério de Mohr-Coulomb, com coesão nula e ângulo de atrito de 30°. Uma falha subvertical com ângulo de atrito de 2° foi colocada próximo a cavidade menor.

Como condições iniciais uma tensão horizontal de 1250 kPa foi aplicada no modelo, representado de forma simplificada as tensões *in situ*.

Para representar as condições de contorno do modelo um bloco único que limita as laterais e a base do modelo foi fixado, com os deslocamentos impedidos nas duas direções (ver Figuras 6 a 11).

Nas simulações os blocos estão sob a ação do peso próprio.

Nas simulações a espessura da cobertura das cavernas foi variada de 50 metros até 300 metros, conforme pode ser observado nas Figuras 6 a 11. Nas simulações com cobertura de 50 e 100 metros o teto da caverna desaba formando uma dolina (Figuras 6 e 7).

Nas demais simulações existem instabilidades dos tetos das cavernas, mas esta instabilidade não evolui até a superfície, o maciço por arqueamento encontra nova configuração de equilíbrio (Figuras 8 a 11).

A formação de dolinas indicada nas simulações com cobertura de 50 e 100 metros permite levantar a hipótese de esta instabilidade já ter ocorrido. Desta forma o processo de movimento do terreno observado na região do subúrbio pode ser caracterizado como uma dolina enterrada (Figura 12).

Se esta hipótese puder ser confirmada a

condição de risco na região do subúrbio é bem mais baixa. E assim sendo, as recomendações de uso para a área podem ser revisadas.

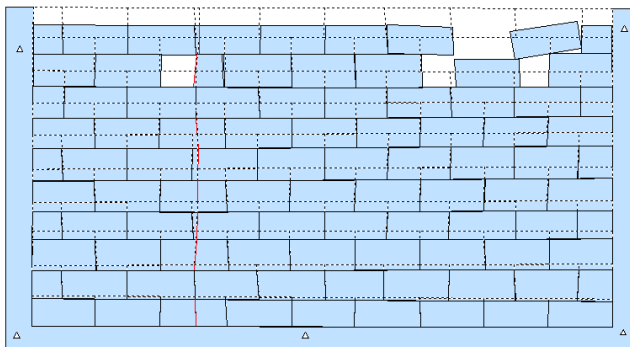


Figura 6. Simulação 1, cobertura de 50m.

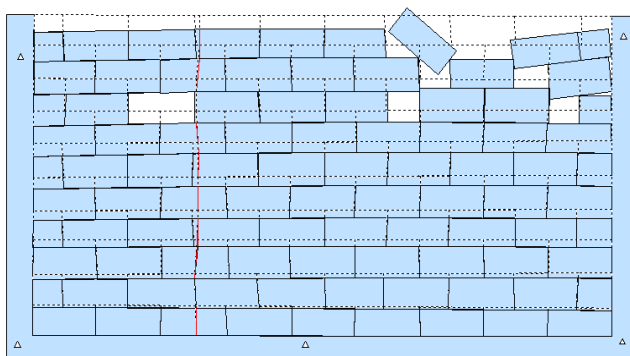


Figura 7. Simulação 2, cobertura de 100m.

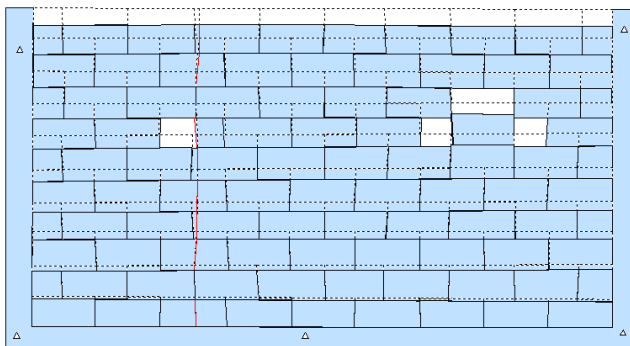


Figura 8. Simulação 3, cobertura de 150m.

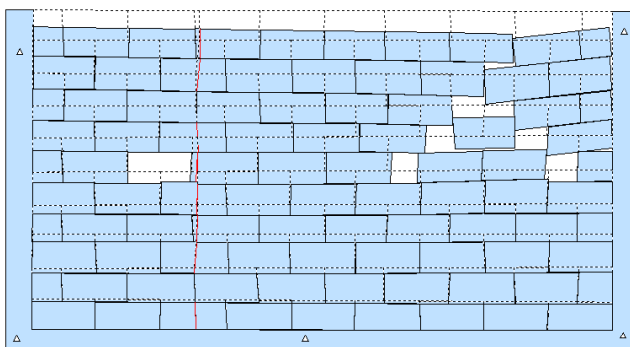


Figura 9. Simulação 4, cobertura de 200m.

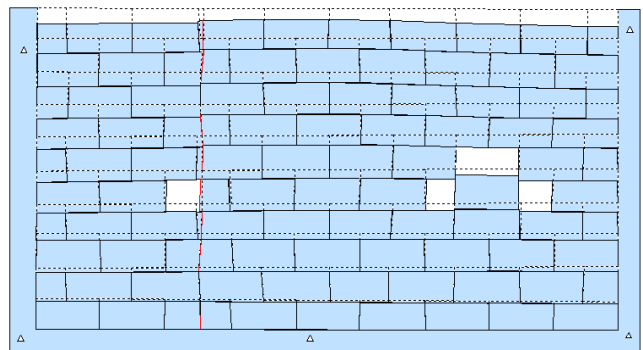


Figura 10. Simulação 5, cobertura de 250m.

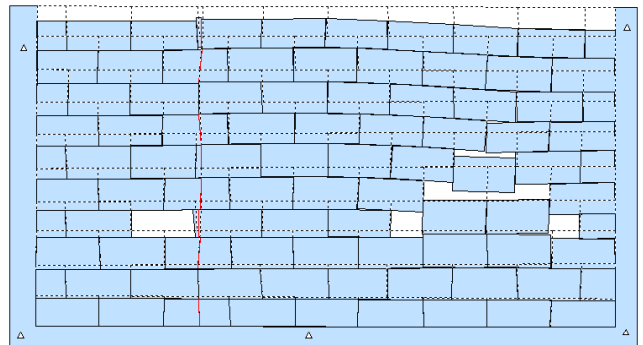


Figura 11. Simulação 6, cobertura de 300m.

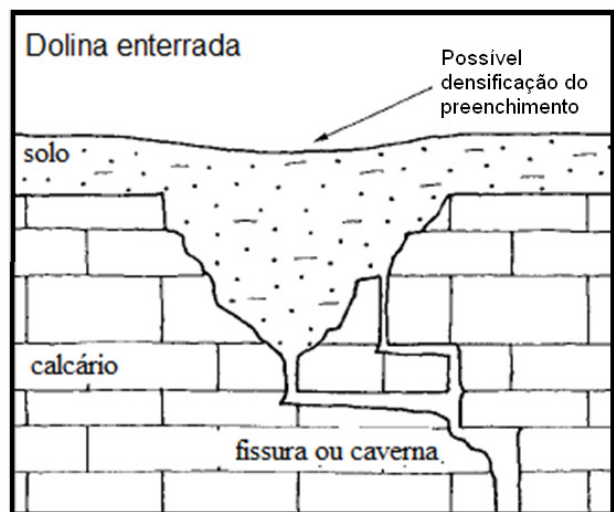


Figura 12. Dolina enterrada (Waltham e Fookes, 2003).

9 CONCLUSÕES

A compreensão dos processos de instabilidade do terreno na região de Lapão passa por uma detalhada caracterização geológica e geotécnica do terreno.

As classificações geomecânicas permitem estimar a dimensões das cavernas que seriam estáveis no maciço rochoso de Lapão. A variabilidade do terreno e das formas de fazer estas estimativas é grande. A dimensão das

cavernas estáveis pode variar de cerca de quatro metros até por volta de oitenta metros.

As simulações com o DDA permitem inferir que cavernas com menores coberturas são menos estáveis. Na dimensão de blocos considerada nos modelos DDA não foi possível verificar a influência de uma caverna em outra vizinha, isto deve ser estudado com modelos com blocos menores.

A observação dos resultados das simulações com o DDA levaram a levantar a hipótese da dolina de maior dimensão em Lapão ser uma dolina enterrada. Em consequências o loteamento Ida Cardoso, que fica nas bordas da dolina de subúrbio que sofrendo recalque, com abertura de fendas em algumas edificações, pode estar em uma situação de risco menor do que se pensava anteriormente. Ou seja, talvez possa ser descartada a possibilidade das residências serem engolidas pela dolina. Afortunadamente uma campanha de sondagens mecânicas pode ser a possibilidade para eliminar essa dúvida.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, A.A. (2013) Análise de Risco em Áreas Urbanas Edificadas Sobre Maciços Carbonáticos Carstificados o Caso do Município de Lapão, Ba, 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Rio de Janeiro.
- Barton, N. (1976) Recent Experiences with the Q-system of Tunnel Support Design, *Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg. p. 107-117.
- Barton, N., Lien, R. e Lunde, J. (1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, *Rock Mechanics*, Vol. 6, p. 189-239.
- Elmo, D.; Stead, D.; Eberhardt, E. e Vyazmensky, A. (2013) Applications of Finite/Discrete Element Modeling to Rock Engineering Problems, *International Journal of Geomechanics*, Vol. 13, p. 565-580.
- Figueiredo, A.L.C. (2011) *Fácies Carbonáticas e Potencial Reservatório da Formação Salitre Neoproterozóica, na Bacia de Irecê-Bahia, Brasil*, Monografia de Graduação em Geologia. Universidade Federal da Bahia. 126 p.
- Fragoso, D.G.C.; Reis, H.L.S. e do Amaral, M.H.K. (2008) *Mapeamento Geológico da Região de Irecê-Lapão – Registros de uma Rampa Carbonática Neoproterozóica*, Monografia de Graduação em Geologia. Universidade Federal de Minas Gerais. 158 p.
- IPT (2008) *Análise das Causas das Trincas e Rachaduras na Superfície do Terreno e em Edificações na Área Urbana do Município de Lapão, BA*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Relatório técnico IPT no. 107 507-205.
- Lins, P.G.C.; Guimarães, R.B.; Silva, A.A.B. e Silva, L.S.C. (2015) Contribuição para a Construção de um Modelo Geomecânico para Análise de Risco do Relevo Carste do Município de Lapão - Bahia, 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves.
- MacLaughlin, M.M. e Sitar, N. (1995) *DDA for Windows: Discontinuous Deformation Analysis for the Windows PC Environment*, University of California, Berkeley. Geotechnical Engineering Report No. UCB/GT/95-04. 23p.
- O'Connor, K.M. e Dowding, Ch.H. (1992) Distinct Element Modeling and Analysis of Mining-induced Subsidence, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 25, p. 1-24.
- Oliveira Filho, I.B. (2015) *Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização em Ambiente Cárstico - Lapão - BA*, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 118 p.
- Santos, E.S.M.; Silva, R.W.S. & Sampaio, E.E.S. (2012) Analysis of the Risk of Karst Collapse in Lapão, Bahia, Brazil, *Exploration Geophysics*, Vol. 43, p. 198-212.
- Shi, G.-H. (1992) Discontinuous Deformation Analysis: A New Numerical Model for the Statics and Dynamics of Deformable Block Structures, *Engineering Computations*, Vol. 9, p. 157-168.
- Shi, G.-H. e Goodman, R.E. (1985) Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis, *International Journal for Numerical Methods in Geomechanics*, Vol. 9, p. 541-556.
- Sowers, G.F. (1996) *Building on Sinkholes: Design and Construction of Foundations in Karst Terrain*, American Society of Civil Engineers, New York. 202 p.
- Waltham, A.C. e Fookes, P.G. (2003) Engineering Classification of Karst Ground Conditions, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 36, p. 101-118.
- Whittaker, B.N. e Reddish, D.J. (1989) *Subsidence: Occurrence, Prediction, and Control*, Elsevier, Amsterdam. 528 p.
- Wu, J.-H.; Ohnishi, Y. e Nishiyama, S. (2004) Simulation of the mechanical behavior of inclined jointed rock masses during tunnel construction using Discontinuous Deformation Analysis (DDA), *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 41, p. 731-743.