

MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS EM GRANDES OBRAS SUBTERRÂNEAS



J. VIEIRA DE LEMOS
Investigador-Coordenador
LNEC
Lisboa - Portugal

SUMÁRIO

Abordam-se, neste trabalho, os aspectos gerais da modelação numérica do comportamento de maciços rochosos, com particular incidência na sua aplicação ao estudo de grandes obras subterrâneas. Apresentam-se sucintamente os principais métodos e a sua evolução, com referência a alguns trabalhos realizados no país. Discutem-se as potencialidades actuais dos modelos numéricos, e algumas das questões que se colocam na sua aplicação prática, recorrendo a diversos exemplos recentes no domínio das obras subterrâneas.

1. INTRODUÇÃO

O projecto e construção de aproveitamentos hidroeléctricos constituíram, em Portugal tal como noutros países, uma das motivações importantes para o desenvolvimento da disciplina de Mecânica das Rochas. Por um lado, as grandes barragens de betão, e as abóbadas em particular, requerem um estudo criterioso das suas fundações rochosas, como foi evidenciado pelo acidente de Malpasset. Por outro lado, a construção de centrais subterrâneas, envolvendo cavernas com vãos significativos e circuitos hidráulicos extensos, também colocam problemas complexos à disciplina.

Os modelos conceptuais do comportamento das estruturas, englobando nesta designação o maciço rochoso de fundação ou envolvente, sempre foram essenciais nos estudos de projecto, permitindo o enquadramento das necessárias verificações dos critérios de segurança e a previsão do desempenho das obras. Os modelos experimentais e analíticos deram lugar aos modelos numéricos, mais poderosos e versáteis, que actualmente permitem abordar a

complexidade dos materiais geotécnicos. Naturalmente que entre a proposta de um novo método numérico e a sua aplicação corrente decorre sempre um período mais ou menos longo de verificação e validação, durante o qual os modelos são confrontados quer com os resultados de ensaios laboratoriais e de campo, quer com o comportamento observado das obras.

Nesta comunicação, apresentam-se sucintamente as principais abordagens disponíveis para a modelação numérica de grandes obras subterrâneas, com particular referência à evolução da sua utilização em Portugal. Referem-se as características e potencialidades actuais dos modelos, sendo apresentados alguns exemplos de obras recentes no país, e ainda de estudos de investigação que permitem antever a evolução futura destas ferramentas da engenharia.

2. A EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE OBRAS SUBTERRÂNEAS EM MACIÇOS ROCHOSOS

2.1 Métodos analíticos e experimentais

A escavação de uma obra subterrânea introduz uma alteração significativa do estado de tensão na sua vizinhança. É a libertação das tensões pré-existentes ao longo da periferia do túnel ou caverna que constitui a principal acção a considerar na análise de estabilidade e no dimensionamento dos sistemas de sustimento. A análise do estado de tensão resultante da escavação foi inicialmente abordada por métodos analíticos, recorrendo às soluções da mecânica dos meios contínuos, para as hipóteses de elasticidade ou elasto-plasticidade dos materiais [1, 2]. Para além destas teorias configuraram uma simplificação drástica do comportamento mecânico do maciço rochoso, também só existem soluções para geometrias muito simplificadas. Os modelos físicos, designadamente o modelo de gesso da central de Cahora-Bassa ensaiado no LNEC [3], viabilizaram o estudo de formas mais complexas, embora o modelo conceptual da elasticidade linear se mantivesse. Algumas experiências foram feitas, por exemplo, por Barton, no NGI [4], com modelos físicos de blocos para representar o diaclasamento do maciço. Contudo, só o desenvolvimento dos modelos numéricos facultou aos engenheiros as ferramentas necessárias para a análise e previsão do comportamento de obras de maior complexidade.

2.2 Método dos elementos finitos

O desenvolvimento do método dos elementos finitos (MEF) transformou radicalmente a análise estrutural ao criar um instrumento capaz de abordar com facilidade geometrias genéricas e materiais de comportamento não linear. No caso dos maciços rochosos, são as superfícies de descontinuidade, das diaclases às grandes falhas, que têm uma influência decisiva no comportamento e cujo tratamento requer técnicas numéricas específicas. Para a representação numérica de um maciço rochoso existem duas alternativas fundamentais:

(i) modelos de meio contínuo equivalente: adoptam equações constitutivas para o comportamento do material que simulam os efeitos das descontinuidades, nomeadamente a sua limitada resistência a tensões de corte, e, em regra, a não resistência à tracção;

(ii) modelos de meio descontínuo: as discontinuidades mais relevantes são representadas explicitamente; no MEF, recorre-se a elementos de junta, inicialmente aplicados em mecânica das rochas por Goodman.

As barragens de betão foram, no país, uma das aplicações mais significativas do MEF, e rapidamente se estendeu a utilização do método ao maciço rochoso de fundação e a obras subterrâneas. No LNEC, foram desenvolvidos, já nos anos 70, modelos considerando o comportamento não linear do maciço [5], quer na hipótese de meio contínuo elasto-plástico, quer modelos de meio descontínuo, utilizando elementos de junta. O estudo numérico de túneis, geralmente analisados por modelos 2D, permitiu superar as limitações das técnicas analíticas clássicas [6]. Contudo, a análise de centrais subterrâneas obriga a modelos 3D, cujos custos computacionais só o progresso mais recente das tecnologias informáticas tornou acessíveis. Deste modo, as representações iniciais em 3D eram de natureza mais simplificada, quer em termos das malhas de cálculo, quer das hipóteses de comportamento do maciço. De salientar, o modelo desenvolvido em 1983 para as obras subterrâneas de Cahora-Bassa [7] e o estudo realizado para o aproveitamento hidroeléctrico de Vilarinho das Furnas [8].

2.3 Método dos elementos de fronteira

O método dos elementos de fronteira constitui uma alternativa ao MEF, com algum relevo na análise de tensões em obras subterrâneas [9]. No entanto, o facto das suas potencialidades serem mais limitadas que o MEF, pois se adequa principalmente a meios contínuos homogéneos e elásticos, tem limitado o seu domínio de aplicação.

2.4 Métodos simplificados de equilíbrio limite para análise da estabilidade de blocos

No projecto de obras subterrâneas em maciços rochosos, entre os potenciais modos de ruptura a considerar, há os que são definidos pelas estruturas geológicas, como seja o destacamento de volumes formados por discontinuidades no tecto e hasteais dos túneis e cavernas (Fig. 1). Métodos analíticos que resolvem o equilíbrio estático do bloco, tomado como independente, são de utilização corrente [1], e permitem avaliar as necessidades de suporte.

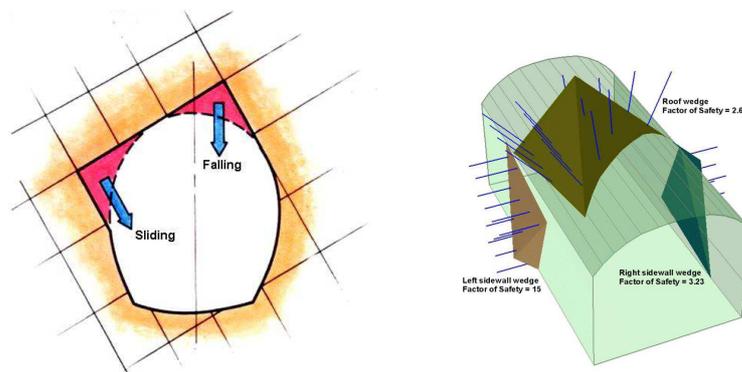


Figura 1: Métodos simplificados de análise de equilíbrio de blocos [10].

2.5 Método dos elementos discretos

No método dos elementos discretos (ou blocos discretos), o maciço rochoso é representado como um meio descontínuo, formado por um sistema de blocos ou partículas [11]. A interação mecânica entre os blocos obedece a um dado modelo constitutivo que caracteriza o comportamento de descontinuidade. Em comparação com os modelos de elementos finitos com elementos de junta, os elementos discretos oferecem maior versatilidade na geração dos modelos e na simulação de mecanismos de colapso, facilitando a consideração da alteração da geometria e conectividade do sistema durante a análise. Existem modelos mais simples, em que se admitem os blocos como rígidos, assim como modelos mais elaborados em que a deformabilidade dos blocos é incluída por meio da sua discretização interna. Os modelos de blocos são principalmente vocacionados para problemas com comportamento não linear significativo, enquanto que os modelos de elementos finitos representam mais eficientemente sistemas que pouco se afastam da resposta elástica.

No caso mais simples, um modelo numérico de blocos permite resolver os problemas de ruptura local em torno da escavação, abordados pelos métodos de equilíbrio limite da secção anterior. Trata-se, no entanto, de uma ferramenta muito mais poderosa, capaz de avaliar a estabilidade de sistemas de blocos múltiplos, e representar adequadamente o desenvolvimento das zonas em ruptura ao longo do processo de escavação. Barton et al. [12] realizaram uma aplicação de muito interesse de um modelo de elementos discretos à caverna de Gjovik, muito pouco profunda e com um vão de 62m, construída para os Jogos Olímpicos de 1994, na Noruega. O sistema de blocos foi gerado aleatoriamente, tentando reproduzir as características locais da compartimentação do maciço (Fig. 2).

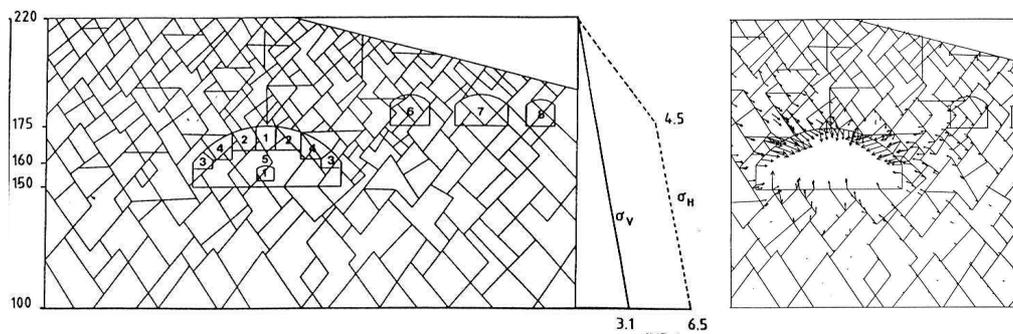


Figura 2: Modelos de blocos discretos da caverna de Gjovik [12].

Para além dos modelos de blocos poliédricos, existem os modelos de partículas circulares ou esféricas, muito utilizados actualmente em estudos de investigação [11]. São modelos de pormenor, que permitem abordar os mecanismos fundamentais do comportamento dos materiais, por exemplo, os fenómenos de propagação da fractura. Com as potencialidades actuais de cálculo, só é viável analisar efectivamente sistemas à escala do ensaio de laboratório, ou zonas localizadas de obras, mas é previsível um grande incremento da sua utilização num futuro próximo.

Na Fig. 3a mostra-se esquematicamente um sistema de partículas circulares e as forças de contacto, de distribuição muito variável em virtude da estrutura aleatória do sistema. Esta capacidade de representar a irregularidade e variabilidade dos sistemas físicos é uma vantagem importante deste método, que tem mostrado um bom desempenho face a resultados experimentais. A Fig. 3b apresenta um modelo de pormenor de uma zona junto à parede de um túnel circular, representando-se apenas os contactos que já sofreram ruptura, o que permite inferir a localização de um mecanismo de destacamento de uma cunha [13].

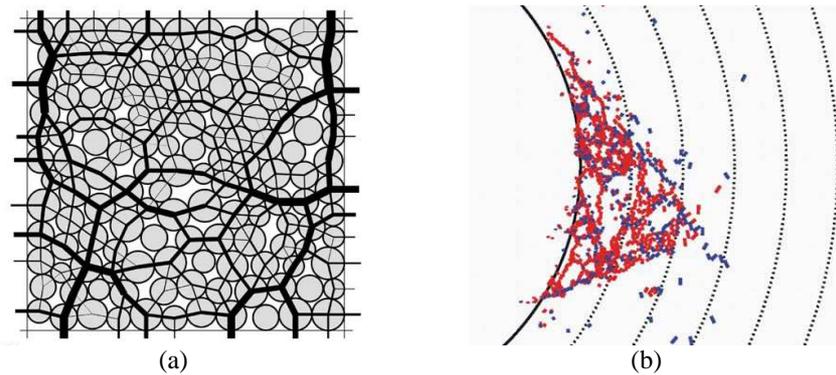


Figura 3: Modelos de partículas circulares. (a) Distribuição de forças de contacto entre partículas; (b) Desenvolvimento de modo de ruptura localizada em túnel [13].

3. AS POTENCIALIDADES ACTUAIS DOS MODELOS NUMÉRICOS PARA O ESTUDO DE GRANDES OBRAS SUBTERRÂNEAS

3.1 Modelos de meio contínuo equivalente

Em obras subterrâneas executadas em profundidade em maciços de boa qualidade, não é expectável um afastamento significativo do regime elástico do maciço, pelo que os modelos de contínuo equivalente são adequados para a análise global. Em complemento, as questões de estabilidade local podem ser abordadas pelos métodos simplificados anteriormente descritos. Num modelo contínuo, pode naturalmente considerar-se a anisotropia elástica, e também verificar a possível ocorrência de comportamento não linear, e quantificar a segurança, com base em diversos modelos constitutivos, por exemplo, elasto-plásticos, multilaminados, ou modelos de dano.

São os modelos contínuos que têm tido aplicação mais frequente em grandes obras subterrâneas. No nosso país, podem referir-se, entre outros, os estudos em modelo numérico das centrais do Alto Lindoso [14], Miranda [15], Venda Nova II [16, 17, 18], Cahora-Bassa [19], e de novos empreendimentos [20], tais como Picote II [21]. Para além dos aproveitamentos hidroeléctricos, outras obras têm justificado a elaboração de modelos numéricos de alguma complexidade, por exemplo, a estação elevatória e túnel de Socorridos, na ilha da Madeira [22].

Os programas de cálculo actuais permitem uma representação detalhada de todo o processo construtivo. A Fig. 4 apresenta a sequência das fases de escavação consideradas na análise da central de Picote II [21], realizada pela EDP com o programa FLAC-3D. Para facilitar a visualização, o desenho mostra apenas os volumes de rocha escavada e o revestimento de betão.

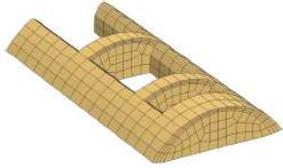
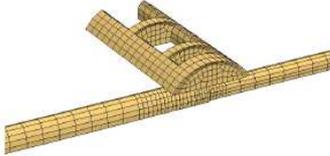
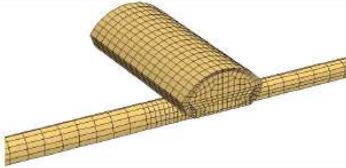
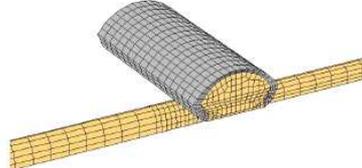
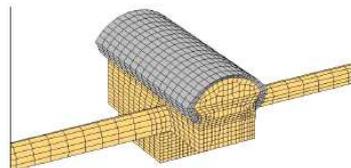
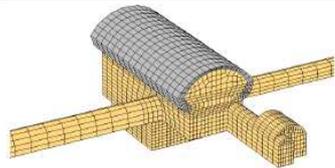
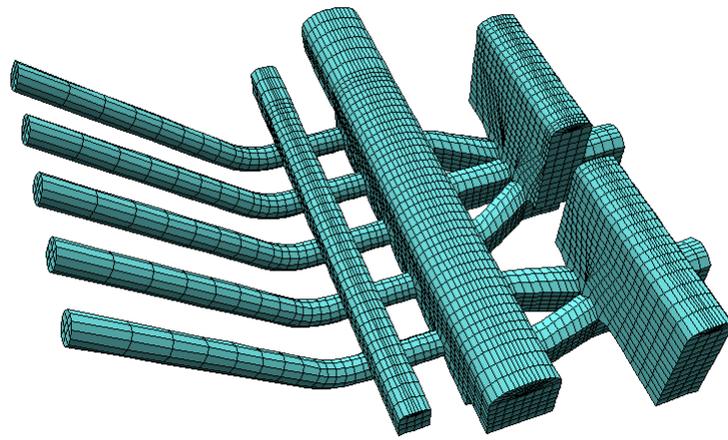
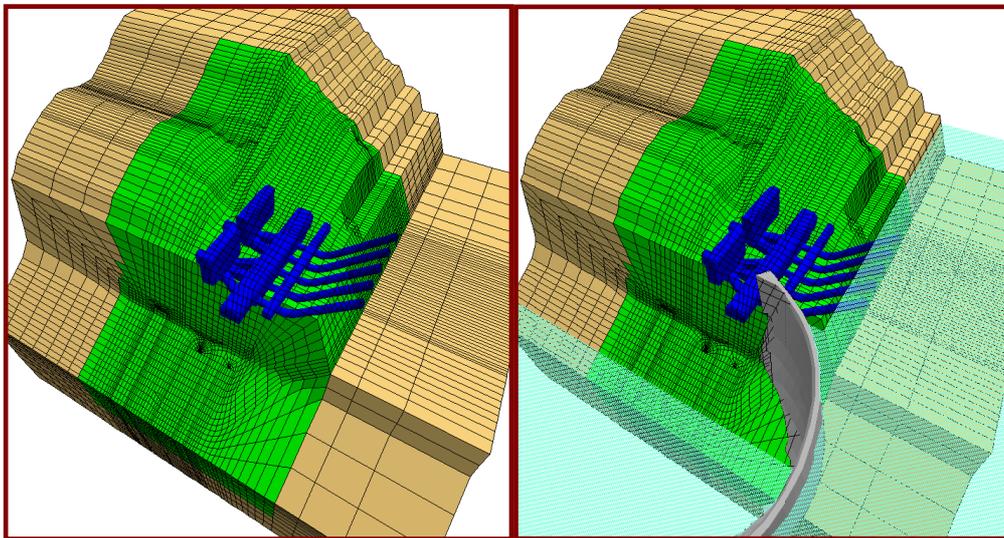
Phase	Zones excavated/constructed	Description
1		<ul style="list-style-type: none"> - Excavation of two side drifts at the arch level of the powerhouse extending through all the cavern length and three transversal connections between them; - Installation of six triple rod-extensometers in the vault, in two transversal sections, to measure rock mass displacements.
2		<ul style="list-style-type: none"> - Benching of powerhouse main access tunnel.
3		<ul style="list-style-type: none"> - Finishing of arch excavation; - Benching of the powerhouse down to a level that allows concreting the arch.
4a		<ul style="list-style-type: none"> - Concrete arch structure construction by cast-in-place.
4b		<ul style="list-style-type: none"> - Benching of cavern lower part; - Installation of horizontal triple rod-extensometers in both instrumented sections of the cavern.
5		<ul style="list-style-type: none"> - Benching of transformers chamber.

Figura 4: Modelo da central de Picote II. Representação das fases de escavação [21].

Os modelos 3D de maciços rochosos exigem sempre um grande esforço computacional. Apresenta-se na Fig. 5, um modelo da central de Cahora-Bassa, elaborado recentemente no LNEC também com o FLAC-3D [19]. A representação das cavernas e chaminés de equilíbrio obriga a uma malha relativamente fina para se obterem boas estimativas das tensões. O modelo completo, que neste caso teve de ser prolongado até à encosta e à superfície do terreno, torna-se assim bastante complexo.



(a)



(b)

(c)

Figura 5: Modelo da central de Cahora-Bassa [19]. (a) Representação dos volumes escavados; (b) Vista global do modelo; (c) Visualização da localização da barragem e albufeira.

Na Fig. 6, apresenta-se o modelo da central em poço projectada para o reforço de potência do aproveitamento da Bemposta. A modelação numérica, com uma representação detalhada da geometria da escavação, permitiu uma avaliação da estabilidade global, e uma previsão dos deslocamentos. A análise da estabilidade local foi realizada por métodos analíticos. A utilização articulada de vários modelos na análise de uma dada obra, cada um deles com um objectivo específico, ou a escalas diversas, constitui geralmente uma boa opção. Um modelo numérico único destinado a cumprir múltiplas funções pode tornar-se demasiado pesado em termos computacionais, e os seus resultados difíceis de interpretar.

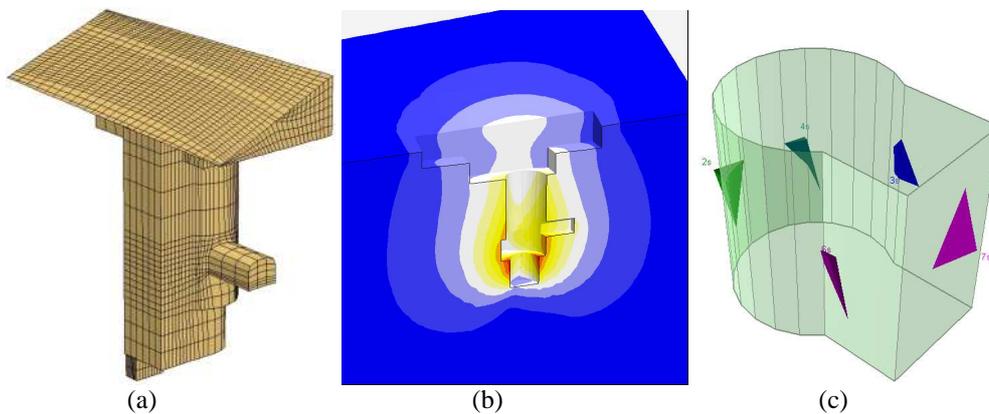


Figura 6: Modelo da central de Bemposta II [20]. (a) Representação dos volumes escavados; (b) Previsão do campo de deslocamentos obtida com o modelo numérico; (c) Análise da estabilidade local por métodos analíticos.

3.2 Comportamento hidromecânico

A aplicação de modelos numéricos à análise de escoamentos em obras subterrâneas tem assumido um carácter especialmente importante em projectos de armazenagem de hidrocarbonetos ou de resíduos, onde a percolação pode colocar questões críticas de segurança e ambientais. A modelação do escoamento é um problema difícil, não do ponto de vista dos métodos numéricos, mas devido à dificuldade de caracterizar adequadamente a rede de fissuras por onde se verifica a percolação. Em consequência, os modelos de meio contínuo equivalente são geralmente preferidos. No âmbito de aproveitamentos hidroeléctricos nacionais, é de referir a análise dos túneis em pressão do Alto Lindoso [23]. Mais recentemente, foi realizado um estudo da central de Venda Nova II, com o objectivo de interpretar os caudais elevados medidos nos sistemas de drenagem dos túneis de acesso à central [24]. Foi utilizado um modelo contínuo multilaminado, com um tensor de permeabilidade anisotrópico de modo a representar a orientação das famílias de diaclases dominantes. A Fig. 7 mostra uma parte da malha de cálculo, permitindo visualizar a caverna e os túneis representados.

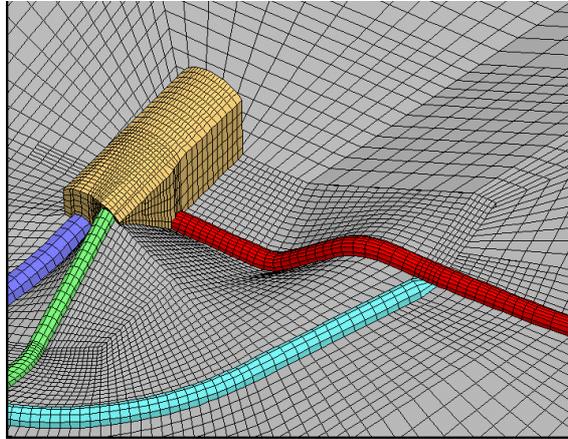


Figura 7: Modelo hidromecânico da central e túneis de Venda Nova II [24].

3.3 Modelos descontínuos

Os modelos de meio descontínuo podem ser baseados no método dos elementos finitos, recorrendo a elementos de junta ou interface, ou no método dos elementos discretos. A primeira opção é frequentemente utilizada quando se pretende representar apenas algumas descontinuidades de maior importância. Quando o modelo inclui um número elevado de descontinuidades, formando sistemas de blocos, então os elementos discretos são mais indicados. Deve-se entender um modelo descontínuo como uma idealização da realidade física, em que pormenores excessivos são de evitar. Em primeiro lugar, há que incluir aquelas falhas e descontinuidades singulares cuja localização é conhecida. Em seguida, as diaclases são modeladas de modo simplificado, através de um conjunto representativo de cada família, com a sua orientação média, mas em regra com um espaçamento superior ao real, de modo a evitar um esforço computacional incomportável. O que é essencial é dotar o modelo da capacidade de simular os vários mecanismos de ruptura possíveis, no sentido de fornecer uma avaliação correcta da segurança.

Os modelos de blocos discretos têm sido aplicados entre nós principalmente no estudo de fundações de barragens, em que os modos de ruptura de volumes de rocha definidos pela intersecção de várias descontinuidades assumem um papel decisivo [25].

No âmbito das obras subterrâneas, pode referir-se um estudo original em modelo numérico do projecto da caverna de Tindaya, nas ilhas Canárias, uma concepção artística do escultor Eduardo Chillida. Trata-se de uma escavação com dimensões de 45x50x65m, com um tecto plano, a uma profundidade de 50m. Foi realizado um modelo de blocos discretos com o programa 3DEC, com vista a apoiar o projecto do suporte [26]. A Fig. 8 mostra a concepção da caverna com as principais estruturas geológicas detectadas, em que se destaca um conjunto de diques basálticos, que foram incluídas no modelo numérico. A análise numérica permitiu identificar os mecanismos de colapso definidos pelas descontinuidades, e dimensionar o vasto sistema de pregagens necessário para estabilizar o tecto da caverna.

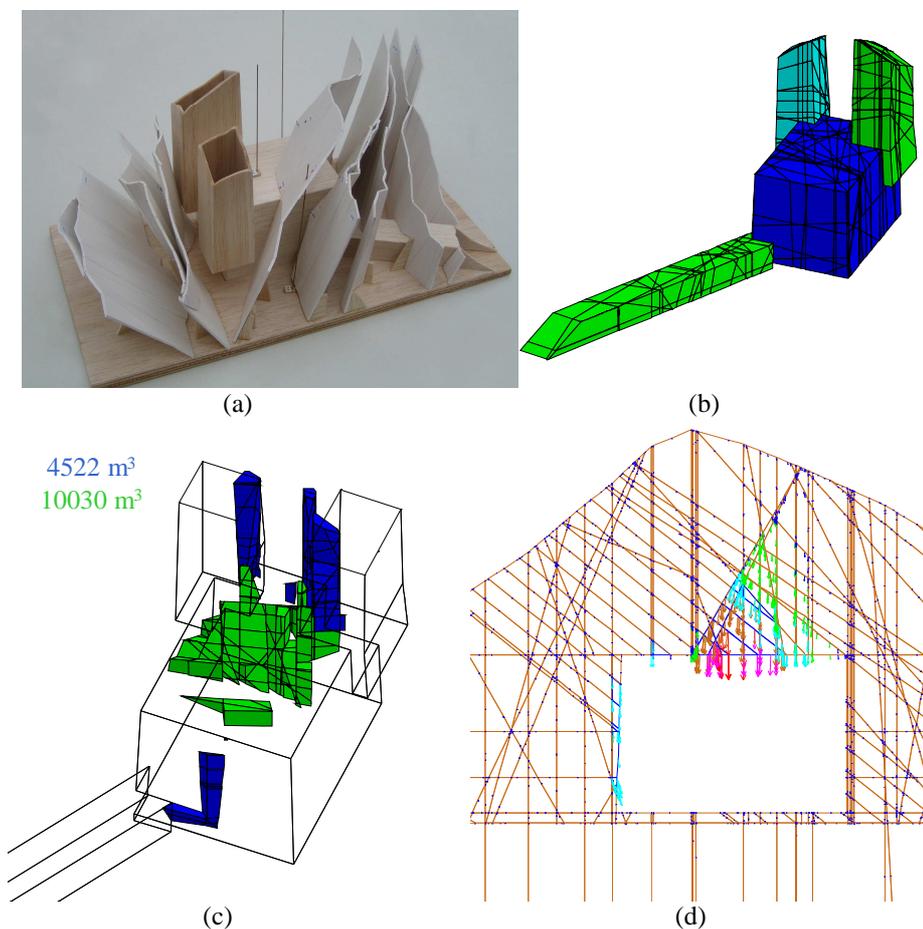


Figura 8: Modelo da caverna de Tindaya [26]. (a) Concepção da caverna e diques basálticos; (b) Modelo de blocos discretos; (c) Volume de blocos instáveis; (d) Mecanismo de colapso.

3.3 Algumas questões sobre a aplicação dos modelos

Em todas as análises de obras geotécnicas existe uma variabilidade do comportamento dos materiais muito maior do que na engenharia estrutural. No caso das obras subterrâneas há incertezas acrescidas, que os trabalhos da prospecção nunca permitem eliminar completamente. O trabalho clássico de Starfield e Cundall [27] sobre a metodologia de modelação em mecânica das rochas, pensada em função das limitações da informação disponível, é particularmente relevante neste tipo de obras. A importância de dirigir a actividade de modelação para a resposta a questões específicas, eliminando tanto quanto possível pormenores não relevantes, também é salientada por estes autores.

Os estudos paramétricos são uma componente essencial da análise, permitindo explorar o modelo e avaliar a influência de parâmetros menos bem conhecidos. As técnicas de retro-análise, ou identificação de parâmetros, assumem um papel significativo neste contexto, ao possibilitar a calibração dos modelos numéricos com resultados da observação [14]. Em primeiro lugar, fornecem elementos para o teste e validação dos modelos numéricos, assim como uma valiosa experiência na sua aplicação. Tornam também possível o aperfeiçoamento progressivo de um modelo numérico com informação obtida ao longo do processo construtivo. A deformabilidade global do maciço rochoso e o estado de tensão inicial são parâmetros que tem sido possível estimar de forma mais consistente com base em técnicas de retro-análise, por exemplo, para as centrais do Alto Lindoso [14] e de Venda Nova II [18]. Neste último caso, a identificação de parâmetros recorreu a métodos elaborados de optimização com base em técnicas de inteligência artificial, que possibilitaram uma maior eficiência no tratamento de um modelo numérico 3D. De referir ainda, no âmbito dos sistemas de análise do conhecimento, o interesse dos sistemas periciais no apoio ao controlo de segurança de obras subterrâneas [28].

Os modelos numéricos podem também dar uma contribuição importante na análise da actividade experimental, nomeadamente dos ensaios de campo. O estado de tensão in situ é um parâmetro fundamental no comportamento de obras subterrâneas, e também um daqueles cuja determinação é mais difícil. Neste contexto, é de salientar um estudo em que foi analisado o estado de tensão no local da central de Picote II, na sequência de ensaios de sobrecarotagem e de almofadas planas [29]. A modelação numérica do local dos ensaios permitiu compreender o efeito do vale no estado de tensão global existente, conduzindo a uma interpretação consistente dos valores obtidos nos vários ensaios realizados.

Finalmente, uma referência à selecção do programa de cálculo, um factor importante para se conseguir a máxima eficiência na modelação. A questão mais crítica não é já o tempo de cálculo, mas o tempo do engenheiro na preparação dos dados, na indispensável verificação da correcção do modelo, e na interpretação dos resultados obtidos. Na análise de obras subterrâneas, como de outros problemas geomecânicos, há que representar domínios extensos. Importa utilizar ferramentas que automatizem tanto quanto possível a elaboração da malha de cálculo, embora o controlo crítico de todo o processo pelo engenheiro seja essencial. A representação das sucessivas fases de escavação é indispensável, tal como a capacidade de simular de modo realista os vários sistemas de suporte, das pregagens ao betão projectado e revestimentos definitivos. As capacidades de visualização gráfica são também fundamentais, de modo a agilizar as tarefas de verificação dos dados e interpretação dos resultados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O espectro de modelos numéricos actualmente disponíveis para o estudo de grandes obras subterrâneas é vasto, como se pode depreender desta breve exposição. Para cada caso, há que seleccionar o modelo mais apropriado, em função das características da obra, mas também dos objectivos do estudo. Um factor decisivo na escolha da abordagem numérica é a informação disponível sobre o maciço rochoso, pois os modelos mais complexos exigem sempre mais dados, e de melhor qualidade. Na sua ausência é sempre preferível optar por uma representação mais simplificada, mas bem fundamentada, do que ser obrigado a inferir parâmetros sem suporte experimental sólido. No caso de obras subterrâneas, só durante a construção é possível obter alguns dados e confirmar outros. As técnicas de identificação de parâmetros, que

permitem actualizar o modelo à medida que mais informação fica disponível, podem dar um bom contributo para o aperfeiçoamento progressivo dos modelos e a melhoria das suas capacidades de previsão.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Hidroeléctrica de Cahora-Bassa a autorização para a apresentação do modelo numérico da central.

REFERÊNCIAS

- [1] Rocha, M. – Estruturas Subterrâneas, LNEC. Lisboa, 1976.
- [2] Fairhurst, C. – “Analysis and design in rock mechanics - The general context”. In Comprehensive Rock Engineering (Eds. J.A. Hudson, E.T. Brown, C. Fairhurst, E. Hoek), Pergamon, Oxford, vol. 2, pp. 1-29, 1993.
- [3] Silveira, A.F., M. Cruz Azevedo, C. Pereira da Costa – “Contribuição para o estudo da central subterrânea de Cabora Bassa”. Memória nº 430, LNEC, 1974.
- [4] Barton, N. – “Previsão do comportamento de aberturas subterrâneas em maciços rochosos”. Geotecnica, nº 53, pp. 7-48, 1988.
- [5] Ribeiro e Sousa, L. – “A utilização do método dos elementos finitos no dimensionamento de maciços rochosos”. Tese de Especialista, LNEC, 1974.
- [6] Cunha, A.P. – “Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos”. Tese de Especialista, LNEC, 1979.
- [7] Ribeiro e Sousa, L. – “Concepção e cálculo de grandes estruturas subterrâneas”. Programa de investigação, LNEC, 1983.
- [8] Martins, C.R.S. – “Contribuição para o estudo de estruturas subterrâneas associadas a empreendimentos hidroeléctricos”. Tese de Especialista, LNEC, 1985.
- [9] Lamas, L.N., E.M. Frasilio, L.R. Sousa, C.S. Martins – “Aplicação do método dos elementos de fronteira na análise de estruturas subterrâneas”. Geotecnica nº46, pp. 91-115, 1986.
- [10] Derek Martin, C. – “The Design of Underground Excavations for Civil Projects”. ISRM South American Seminar, 2010.
- [11] Lemos, J.V. – “Os modelos de elementos discretos em geomecânica. Evolução e perspectivas futuras”. Geotecnica, nº 100, pp. 333-344, 2004.
- [12] Barton, N. et al. – “Predicted and measured performance of the 62 m span Norwegian olympic ice hockey cavern at Gjøvik”. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 31(6), pp. 617-641, 1994.
- [13] Potyondy, D.O., P.A. Cundall – “A bonded-particle model for rock”. Int. J. Rock Mech. Min. Sciences, 41, pp. 1329-1364, 2004.
- [14] Castro, A.L.H.T. – “Métodos de retroanálise na interpretação do comportamento de barragens de betão”. Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, 1998.
- [15] Ribeiro e Sousa, L., N.S. Leitão, G. Monteiro – “Observed behaviour of the structures for the power increase of the Miranda hydroelectric project”. 9th ISRM Congress, Paris, pp. 1603-1612, 1999.
- [16] LNEC – “Estudo em modelo matemático da central de Venda Nova II”. Relatório elaborado para a Hidrorumo Projecto e Gestão SA, LNEC, 1997.

- [17] Lima, C, M. Resende, N. Plasencia, C. Esteves – “Venda Nova II hydroelectric scheme powerhouse geotechnics and design”. *ISRM News*, vol. 7, n.º 2, pp. 37-41, 2002.
- [18] Miranda, T. – “Geomechanical parameters evaluation in underground structures. Artificial intelligence, Bayesian probabilities and inverse methods”. Tese de Doutoramento. Univ. Minho, Guimarães, 291p, 2007.
- [19] LNEC – “Análise do comportamento das obras subterrâneas de Cahora-Bassa”. Relatório realizado para a Hidroelétrica de Cahora-Bassa, LNEC, 2009.
- [20] Lima, C. – “Reforços de potência da EDP. Aspectos geotécnicos das obras subterrâneas”. Seminário sobre aspectos geotécnicos do projecto, construção, exploração e análises de risco em obras subterrâneas, LNEC, Dezembro 2009.
- [21] Esteves, C., N. Plasencia, C. Lima – “The application of FLAC3D on Picote II Underground Powerhouse”. In *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geo-Engineering - 2008* (Eds. Hart, Detournay, Cundall), Paper 09-04, 2008.
- [22] Ambrósio, A., J. Mateus Brito, S. Rosa, J. Santos, J. Almeida Sousa, A. Pedro – “Estação elevatória e túnel de restituição dos Socorridos”. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, 2006.
- [23] Lamas, L.N. – “Contribution to understanding the hydromechanical behaviour of pressure tunnels”. PhD Thesis, University of London, 1993.
- [24] Leitão, N.S., L.N. Lamas – “Modeling of the high pressure circuit of the Venda Nova II hydroelectric scheme”. 4th FLAC Symposium (Eds., R. Hart and P. Varona), Madrid, Paper No. 03-03, 2006.
- [25] Lemos, J.V. – “Block modelling of rock masses. Concepts and application to dam foundations”. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 12, No. 7-8, pp. 915-949, 2008.
- [26] Senís, M., P. Varona – “3DEC numerical modeling of the Tindaya Mountain Project”. *First Int. FLAC /DEM Symposium on Numerical Modeling*, Minneapolis, 2008.
- [27] Starfield, A.M., P.A. Cundall – “Towards a methodology for rock mechanics modelling”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 25, no. 3, pp. 93-106, 1988.
- [28] Silva Domingues, C., L. Ribeiro e Sousa, E. Portela, F. Carrilho – “Análise do comportamento do túnel de São Bento. Aplicação de um sistema baseado em conhecimento”. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, pp. 1143-156, 2002.
- [29] Muralha, J., L. Lamas, C. Esteves – “State of stress assessment for the Picote II underground powerhouse design”. *Sinorock 2009* (Eds. Hudson, Tham, Feng, Kwong), Hong-Kong, 2009.