

# O DESENVOLVIMENTO DA MECÂNICA DAS ROCHAS E PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO DA INVESTIGAÇÃO E DOS DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO

## The development of rock mechanics and evolution trends in research and applications

Luís Lamas<sup>a</sup>, José Vieira de Lemos<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa, Portugal.

**RESUMO** – A mecânica das rochas emergiu como uma disciplina independente no final da década de 50 do século XX, tendo tido um desenvolvimento acentuado até ao presente, que deverá continuar no futuro. Neste artigo faz-se uma breve retrospectiva dos mais importantes desenvolvimentos da mecânica das rochas até à atualidade e apresentam-se os aspetos em que se deverão registar desenvolvimentos significativos, quer em termos das aplicações, quer da investigação.

**ABSTRACT** – Rock mechanics emerged as an independent discipline in the end of the fifties of the 20<sup>th</sup> century and had an enormous development until the present, which will continue in the future. This article presents a brief retrospective of the most relevant developments in rock mechanics until the present and introduces the aspects in which more significant developments are expected, concerning applications and research.

**Palavras Chave** – Mecânica das rochas, emergência e desenvolvimentos, futuros domínios de aplicação, evolução da investigação.

**Keywords** – Rock mechanics, emergence and development, future fields of application, evolution of research.

### 1 – INTRODUÇÃO

Em resposta a um desafio colocado pelos editores da revista Geotecnia apresenta-se neste artigo, integrado no número especial da revista comemorativo do seu 50º aniversário, um exercício especulativo, tentando perspetivar os desenvolvimentos futuros da mecânica das rochas no que se refere às suas áreas de aplicação e também em termos de investigação. Com o objetivo de enquadrar este exercício no historial de desenvolvimentos da mecânica das rochas, pareceu interessante fazer primeiramente uma breve retrospectiva do processo de emergência da mecânica das rochas, nos anos do pós-guerra, como uma disciplina identificável dentro da engenharia geotécnica, bem como dos aspetos principais do seu desenvolvimento desde então até ao presente.

São apresentados os domínios de aplicação da mecânica das rochas em que se prevê que venham a ocorrer desenvolvimentos significativos, não só integrados nos grandes tópicos tradicionais, como as engenharias civil, de minas e do petróleo, mas também em tópicos que foram adquirindo importância com o decorrer do tempo, como o ambiente, a energia e o património, e ainda domínios de aplicação novos.

---

E-mails: llamas@lnec.pt (L. Lamas), vlemos@lnec.pt (J.V. Lemos)

ORCID: orcid.org/0000-0001-9438-9288 (L. Lamas), orcid.org/0000-0003-1324-7662 (J.V. Lemos)

A investigação em mecânica das rochas enfrentará novos desafios colocados pela sociedade no sentido de se obterem soluções mais seguras, mais económicas e mais sustentáveis. A investigação terá também de enfrentar os desafios colocados por novas aplicações, bem como pelo desenvolvimento acelerado da comunicação, das tecnologias digitais e dos inúmeros aspetos da inteligência artificial.

## 2 – RETROSPETIVA DO DESENVOLVIMENTO DA MECÂNICA DAS ROCHAS

### 2.1 – A emergência da mecânica das rochas como uma disciplina independente

No final da década de 50 do século XX, a mecânica das rochas tinha já dado os passos necessários para ser identificada como uma disciplina da engenharia geotécnica, ganhando gradualmente o seu estatuto de independência dos pontos de vista científico e das suas aplicações (Brown, 2011). Embora os primeiros passos do que veio a designar-se por mecânica das rochas tenham sido dados e reportados, de uma forma sistemática, desde meados do século XIX, nomeadamente na exploração de grandes minas a céu aberto e subterrâneas ou na construção de túneis ferroviários, foi a partir do início dos anos 50 do século XX que se conjugaram diversos fatores que levaram à sua afirmação como uma disciplina independente. Os grandes investimentos em infraestruturas e na exploração de recursos realizados neste período do pós-guerra não são, certamente alheios a este facto.

Em 1951 Leopold Müller (Figura 1) organizou o 1º Colóquio Geomecânico em Salzburgo, na Áustria, que terá em 2021 a sua 70ª edição e é das maiores conferências internacionais dedicadas à mecânica das rochas realizada anualmente no mundo. Em 1956 realizou-se em Golden, Colorado, o 1º Simpósio de Mecânica das Rochas dos Estados Unidos, que vai atualmente na sua 55ª edição. Em 1958, Leopold Müller tornou-se editor da revista *Geologie und Bauwesen*, que havia sido fundada em 1929 e era a principal publicação de literatura especializada, tendo em 1963 alterado o seu nome para *Rock Mechanics and Engineering Geology* (Figura 2), e que é a atual revista *Rock Mechanics and Rock Engineering*. No mesmo ano de 1963 foi fundada a revista *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, que juntamente com a anterior constituem ainda hoje as duas revistas mais importantes neste domínio. Tolobre (1957) e Müller (1963) escreveram os primeiros livros em que se procurou codificar os conhecimentos existentes. Em 1958 foi fundado o *International Bureau of Strata Mechanics* em Leipzig, na antiga República Democrática Alemã, que reunia cientistas da Europa Oriental, primordialmente dedicada a problemas de mecânica das rochas em minas. Em 1962, o grupo de cientistas predominantemente austríaco, encabeçado por Leopold Müller, então conhecido como o “grupo de Salzburgo” (*Salzburger Kreis*), a que se juntaram alguns cientistas de outros países (Fairhurst, 2012), fundaram a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM).

Dois acontecimentos com um significado particularmente relevante no que se refere à emergência da mecânica das rochas como disciplina independente e à sua natureza precederam a fundação da ISRM (Lamas, 2012). Leopold Müller manteve um diálogo constante com Lauritz Bjerrum, então vice presidente da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMFE) e seu futuro presidente, que numa carta endereçada a Müller escreveu: “*I have had correspondence with Professor Terzaghi, Professor Casagrande and Professor Skempton on the question whether Rock Mechanics shall be adopted into our Society and an attempt be made to merge the existing Rock Mechanics organizations into our International Society. I was personally against a merging, and Professor Terzaghi agreed with me. Professor Casagrande has now taken the decision that no attempt should be made to have Rock Mechanics organizations merged into our Society, but he leaves the question open for a possible cooperation in a joint international society of the two groups of people.*”. Estava assim consagrada a independência da mecânica das rochas da Sociedade científica até aí representante de todo o domínio da Geotecnia, aprovada pelos seus grandes nomes.

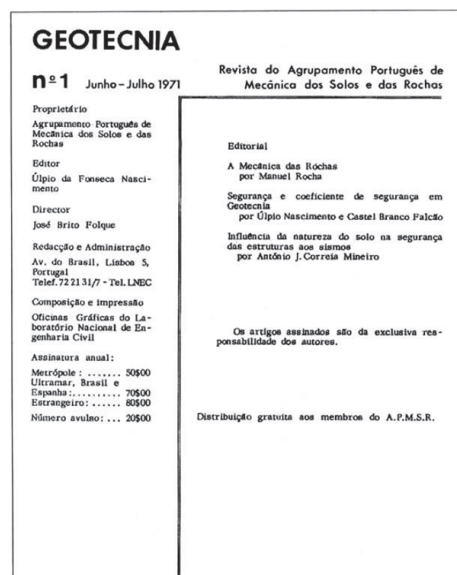
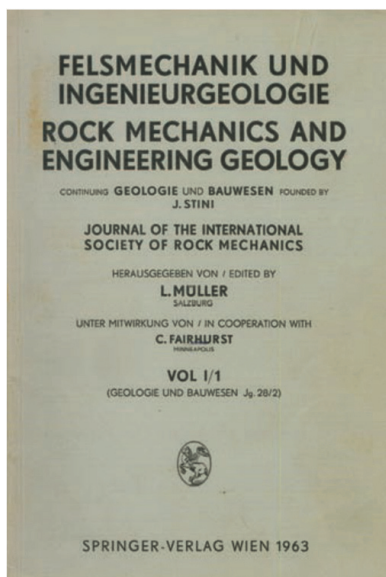
O segundo acontecimento marcante foi a entrevista dada por Müller e Pacher a uma estação de rádio de Salzburg na véspera da assembleia constituinte da ISRM. À questão “O que é a mecânica das rochas?”, Pacher respondeu: “A disciplina científica que estuda a resposta de rochas fraturadas quando sujeitas a forças, tensões e deformações impostas”. Perguntado sobre: “Conhecemos a resistência das rochas?”, Müller respondeu: “Para rocha ensaiada em laboratório, sim. Para o maciço rochoso, não. Isto é o que necessitamos de determinar. É por isso que necessitamos de uma Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas”. Ficou, assim, definida a questão central e o grande desafio da mecânica das rochas: “Qual o comportamento dos maciços rochosos, formados por rocha e superfícies de descontinuidade?”

Em Portugal, os principais desenvolvimentos na mecânica das rochas na década de 50 do século XX foram motivados pela necessidade de intervir nos projetos e na construção das novas barragens de betão, que se iniciaram após o final da segunda guerra mundial em resultado da decisão do Governo português de incentivar a eletrificação do país, e centraram-se fundamentalmente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) sob a direção de Manuel Rocha (Figura 1), um dos fundadores do LNEC e seu Diretor entre 1954 e 1974, que definiu as estratégias de investigação e soube reunir os recursos humanos e financeiros que lhe permitiram atingir esses objetivos (Lemos e Lamas, 2013). Em resultado dos resultados obtidos, Manuel Rocha veio a organizar no LNEC, em 1966, o 1º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas e a suceder a Leopold Müller na sua presidência, tendo desde essa data ficado o secretariado da ISRM sediado no LNEC. Este Congresso é unanimemente considerado como um marco fundamental, que instituiu a cooperação internacional sistemática dos engenheiros e cientistas da área da mecânica das rochas.



**Fig. 1** – Leopold Müller (1908-1988) e Manuel Rocha (1913-1981): precursores da disciplina de mecânica das rochas a nível internacional e nacional; primeiro e segundo presidentes da ISRM.

Foi também na década de 50 que teve início o que se viria a tornar na Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), com a criação da Comissão de Mecânica dos Solos da Ordem dos Engenheiros, liderada por Manuel Rocha. A Comissão tornou-se independente da Ordem e passou a assumir a designação de Agrupamento Português de Mecânica dos Solos, vindo a filiar-se na ISSMFE. Em 1966, coincidindo com a realização em Lisboa do primeiro Congresso Internacional de Mecânica das Rochas, o Agrupamento alarga o seu âmbito à Mecânica das Rochas e passa a designar-se Agrupamento Português de Mecânica dos Solos e das Rochas, integrando-se na ISRM (SPG, 2021). Com isto, também em Portugal a mecânica das rochas se consagrou como uma disciplina independente, no âmbito da engenharia geotécnica. É disso prova a publicação, em 1967, das folhas da cadeira de “Mecânica das Rochas” de Fernando de Mello Mendes (1967) e, em 1971, do livro “Mecânica das Rochas” e do artigo de abertura do primeiro número da Revista Geotecnia (Figura 2) “A Mecânica das Rochas”, ambos da autoria de Manuel Rocha (1971a e 1971b).



**Fig. 2** – Capas do primeiro número da revista *Rock Mechanics and Engineering Geology* e guarda da capa do primeiro número da Revista *Geotecnia*.

## 2.2 – Principais desenvolvimentos da mecânica das rochas

### 2.2.1 – Introdução

O desenvolvimento da mecânica das rochas após o início dos anos 60 do século XX foi rápido e suscitado pelas crescentes solicitações da sociedade para executar projetos mais complexos envolvendo maiores profundidades, maiores dimensões e novos requisitos. No entanto, a esse desenvolvimento não é alheia a necessidade de compreender a razão de graves insucessos, tais como a rotura da barragem de Malpasset em 1959, o deslizamento do talude da albufeira de Vajont em 1963 e graves acidentes em minas de carvão.

No campo das aplicações, que tradicionalmente se centravam nas engenharias civil, de minas e do petróleo, foram abertos novos domínios. São de destacar as aplicações relacionadas com a proteção do ambiente, nomeadamente os estudos de armazenamento em subterrâneo de gases, líquidos e resíduos radioativos, ou com a produção de energia, entre os quais a faturação de xistos ou a engenharia geotérmica.

Diversos autores têm apresentado o que consideram terem sido os principais desenvolvimentos e progressos da mecânica das rochas desde a sua emergência. O sumário que se apresenta é baseado nos trabalhos de referência de Hoek (2007), Fairhurst (2010), Brown (2011) e Habib e Panet (2012), bem como nas compilações de artigos com o estado da arte no início dos anos 90 do século XX coordenada por Hudson (1993) e, mais recentemente, por Feng (2017), e é constituído por uma lista de aspetos em que se registaram avanços importantes.

### 2.2.2 – Prospeção e caracterização dos maciços rochosos

- O estabelecimento de uma linguagem comum para descrição das rochas e dos maciços rochosos e sua normalização.
- Os desenvolvimentos nas tecnologias de furação e de registo de furos de sondagem, bem como de mapeamento das suas superfícies por métodos óticos, acústicos e elétricos.
- A utilização de métodos geofísicos, nomeadamente reflexão e refração sísmicas, permitindo a obtenção de tomografias.
- A generalização do mapeamento de superfícies de descontinuidade utilizando métodos fotogramétricos, de laser scan 3D e de tratamento de imagens digitais.

- O desenvolvimento de métodos de medição do estado de tensão *in situ*, associado a metodologias avançadas para a sua interpretação.
- A introdução de sistemas de classificação dos maciços rochosos com base em diversos parâmetros que os caracterizam (tais como RMR, Q e GSI), que trouxeram uma descrição codificada dos maciços rochosos e são hoje utilizados em projetos em todo o mundo.
- A representação 3D do terreno – incluindo a geologia, as descontinuidades, as unidades geotécnicas e as obras ou intervenções a realizar – associada a sistemas de informação geográfica contendo informação geotécnica e outra de interesse para os projetos, sejam eles civis, de minas ou outros.

### **2.2.3 – *Propriedades das rochas e dos maciços rochosos***

- A distinção clara entre duas escalas: a escala das amostras de rocha, que podem ser ensaiadas no laboratório, e a escala do maciço rochoso, que é a escala de interesse para a maioria das realizações da engenharia e que tem de ter em consideração a presença de descontinuidades.
- A aprovação de Normas de vários ensaios comuns de mecânica das rochas e o papel pioneiro dos sucessivos Métodos Sugeridos da ISRM.
- O desenvolvimento de ensaios *in situ* para caracterização das propriedades mecânicas e hidráulicas dos maciços rochosos.
- A utilização de prensas rígidas, servo-controladas, em ensaios laboratoriais para estudo da rotura progressiva das rochas, sob estados de compressão triaxiais, com recurso a sistemas de controlo e aquisição de dados computadorizados, e a sua monitorização com sensores específicos.
- Os avanços na modelação numérica da rotura das rochas e dos maciços rochosos utilizando modelos descontínuos.
- O desenvolvimento de metodologias de base empírica para estimar a resistência e a deformabilidade dos maciços rochosos, utilizando sistemas de classificação dos maciços rochosos e resultados de ensaios laboratoriais.
- O desenvolvimento de métodos de ensaio de deslizamento de descontinuidades sob tensão normal ou rigidez normal contantes.
- Os avanços na compreensão da influência da rugosidade e dos materiais de preenchimento das descontinuidades na sua resistência ao corte e rigidez.
- A melhoria da compreensão do escoamento de fluidos em descontinuidades e em maciços rochosos descontínuos.
- A introdução dos princípios da mecânica da fratura na mecânica das rochas e o desenvolvimento dos métodos de ensaio.
- Os avanços na descrição estatística dos sistemas de descontinuidades e o desenvolvimento de metodologias para sua representação e simulação.

### **2.2.4 – *Análise para o projeto e a investigação***

- A compreensão da interação entre o terreno e os elementos de suporte e reforço do maciço rochoso durante o processo de escavação.
- O desenvolvimento dos modelos numéricos em geral, como resultado do desenvolvimento extraordinário do poder de computação até aos nossos dias e dos desenvolvimentos teóricos que tiveram lugar, que possibilitaram a sua aplicação em análises de crescente complexidade, quer em estudos de investigação de diversos fenómenos, quer no cálculo para apoio ao projeto.
- O desenvolvimento e a aplicação de métodos utilizando diferentes tipos de discretização dos maciços rochosos, possibilitando análises de meio contínuo e descontínuo, bi- e tridimensionais, nomeadamente métodos dos elementos finitos, das diferenças finitas, dos elementos de fronteira, sem malha, dos elementos discretos, ou suas variantes e combinações.

- A “democratização” da utilização de modelos numéricos por engenheiros e técnicos não especialistas no seu desenvolvimento, proporcionado pela crescente disponibilização de programas comerciais que permitem a consideração de problemas complexos em termos de geometria, modelos constitutivos, análises não lineares e o estudo acoplado de diversos fenómenos, nomeadamente mecânicos, hidráulicos, térmicos e químicos.
- A introdução de abordagens probabilísticas para consideração das ações e das propriedades dos materiais, mas que na mecânica das rochas adquirem especial importância no que se refere à definição geométrica das superfícies de descontinuidades, nomeadamente pela utilização de sistemas discretos de fraturas (*Discrete Fracture Networks* - DFN).
- A implementação de métodos de verificação da segurança de base semi-probabilística ou probabilística, utilizando os princípios da teoria da fiabilidade, nomeadamente pela aplicação do sistema de Eurocódigos estruturais à geotecnia e pelo início da sua aplicação em projetos de mecânica das rochas.

### **2.2.5 – Construção**

- Os desenvolvimentos na escavação mecanizada de maciços rochosos, a céu aberto ou em subterrâneo, utilizando equipamentos de diversos tipos com dimensões cada vez maiores, com maior potência e produtividade, para aplicações de engenharia civil e de minas, com menores impactos no ambiente.
- Os desenvolvimentos, em especial, das tuneladoras de secção completa atingindo secções de grande dimensão, com aptidão para escavar terrenos heterogéneos, desde solos a maciços rochosos rijos, com condições difíceis em termos da presença e da pressão da água ou de estados de tensão elevados.
- Os avanços na compreensão do comportamento conjunto dos maciços e dos elementos de reforço e de suporte durante o processo de escavação, e o desenvolvimento de metodologias integradas de construção de obras subterrâneas, quer com recurso a tuneladoras, quer a explosivos, nomeadamente o novo método austríaco (NATM) e suas variantes.
- O desenvolvimento de novos materiais e elementos para reforço e suporte dos maciços, nomeadamente betão projetado reforçado ou não com fibras, novos tipos de pregagens utilizando novos materiais, ou a prefabricação de elementos de suporte.
- A melhoria das técnicas de furação e de corte de rocha, resultante da melhor compreensão dos processos de fragmentação por meios mecânicos ou usando explosivos.
- A utilização de novos tipos de explosivos para diferentes aplicações.
- Os grandes avanços em todos os domínios da automação e robotização dos processos de furação, de escavação mecanizada e com recurso a explosivos, ou da colocação de elementos de reforço e de suporte dos maciços.

### **2.2.6 – Observação**

- O desenvolvimento de equipamentos e metodologias para a medição de coordenadas e deslocamentos por taqueometria e nivelamento de alta precisão, GNSS, fotogrametria terrestre e aérea digital, varrimento laser (LiDAR), ou interferometria por radar de abertura sintética (InSAR).
- A utilização de técnicas de microssísmica na monitorização de micro-roturas no âmbito do controlo de golpes de rocha (*rockbursts*) durante a escavação a grande profundidade.
- O desenvolvimento de sistemas integrados de observação, com acesso e controlo remotos, para aquisição de dados, seu armazenamento, processamento, interpretação, emissão de relatórios e alertas, que fornecem informação em tempo real e permitem a tomada de decisões atempadas, nomeadamente através de sistemas de gestão do risco.

- A consideração da observação como aspeto fundamental para controlo da segurança durante a construção, nomeadamente pela comparação de valores previstos com valores observados.
- A consideração da observação como parte de um processo integrado de projeto, construção e observação no âmbito do que é designado por método observacional.
- A utilização da retroanálise dos resultados da observação, quer relativos ao comportamento quer à rotura das obras geotécnicas, para identificação de valores das propriedades dos materiais e para melhoria da compreensão dos modos de rotura.

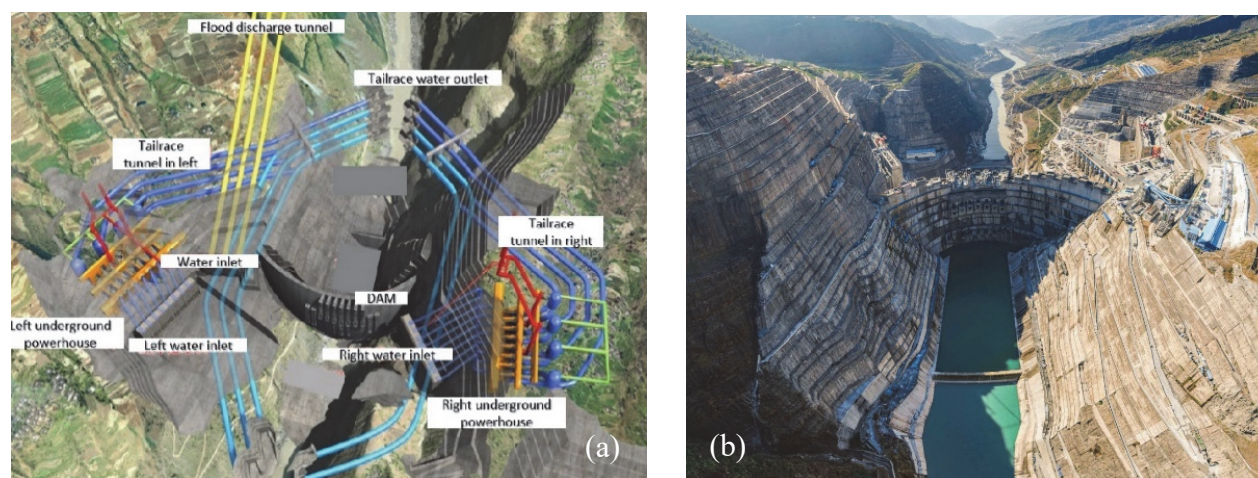
### 3 – PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO DA MECÂNICA DAS ROCHAS

#### 3.1 – Aplicações

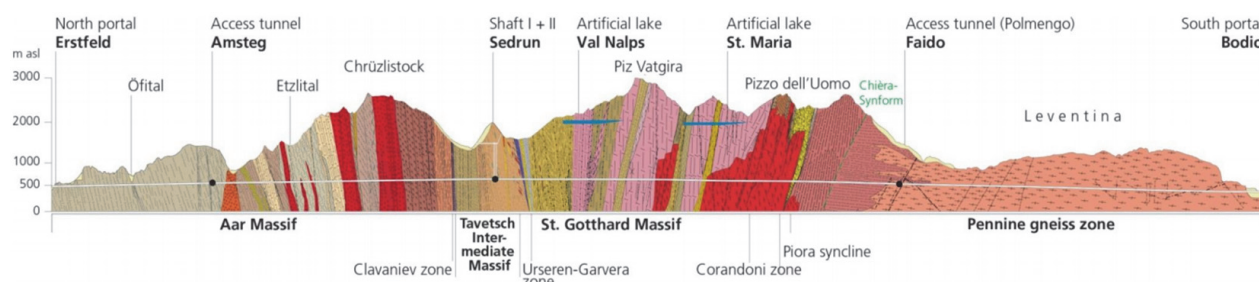
A mecânica das rochas emergiu, como se viu, ligada a aplicações em engenharia civil e de minas. Foi o caso dos túneis ferroviários e, muito posteriormente, rodoviários, das fundações de barragens, dos taludes rochosos para vias de comunicação e minas a céu aberto, ou das minas subterrâneas, nomeadamente de carvão. Com a diminuição da atividade nas obras de construção civil e na atividade mineira nos países industrializados, e o advento de outras atividades relacionadas com o espaço subterrâneo, a profundidades crescentes e com intervenções em terrenos de maior complexidade, outras aplicações vieram a ter lugar, de forma que a situação atual é substancialmente diferente da existente há 60 anos, e esta tendência irá acentuar-se no futuro.

Os desafios no âmbito da engenharia civil resultarão do aumento da complexidade das obras a executar. A crescente ocupação do terreno, à superfície e em subterrâneo, fará com que as novas construções se localizem em maciços rochosos mais complexos, quer pelas suas piores propriedades mecânicas e hidráulicas, quer pelas condições de estado de tensão e hidrogeológicas, quer ainda pelo menor conhecimento devido às dificuldades na prospeção. Por outro lado, fará com que se construa em locais com maior risco de acidentes, tais como taludes naturais com declives acentuados ou zonas de elevada sismicidade. Uma complexidade adicional residirá na crescente dimensão das obras. A mitigação das consequências de acidentes irá resultar no desenvolvimento de sistemas de alerta com crescente eficiência.

São de referir as obras subterrâneas urbanas (túneis rodoviários, ferroviários e para drenagem, estacionamento), fundações de mega-barragens de betão (altura > 250 m) com uma problemática distinta da das barragens usuais (Figura 3), cavernas para mega-centrais hidroelétricas e para armazenamento de sólidos e de fluidos, túneis viários a grandes profundidades (> 1000 m) (Figura 4) e submarinos, a prevenção de deslizamentos de terrenos em zonas montanhosas e urbanas.



**Fig. 3** – Mega-barragem de Baihetan: (a) Modelo 3D das obras subterrâneas (Meng et al., 2020); (b) Vale e barragem em construção.



**Fig. 4** – Túnel base de Gotthard: perfil geológico longitudinal (Alptransit, 2021).

A área da mineração passará por desafios não muito diferentes dos da engenharia civil. Os desafios do futuro, ditados pela procura de minerais a nível mundial, serão a exploração de minérios a maiores profundidades, quer em subterrâneo quer a céu aberto, com riscos crescentes. Em países produtores de carvão, os aspetos relacionados com avanços nos métodos de exploração necessitarão de intervenção da mecânica das rochas (Dhar, 2016). Requisitos mais severos no que se refere ao controlo dos estalos de rocha (*rockbursts*) à ventilação, ao controlo da temperatura, à segurança e às questões ambientais serão mais condicionantes.

O encerramento de minas não elimina completamente os riscos de efeitos negativos à superfície no período após a operação (Didier et al, 2008). Problemas de subsidência e de roturas em chaminé em minas subterrâneas (Figura 5), ou de instabilidade de taludes em minas a céu aberto, continuarão a requerer a atenção dos especialistas de mecânica das rochas.

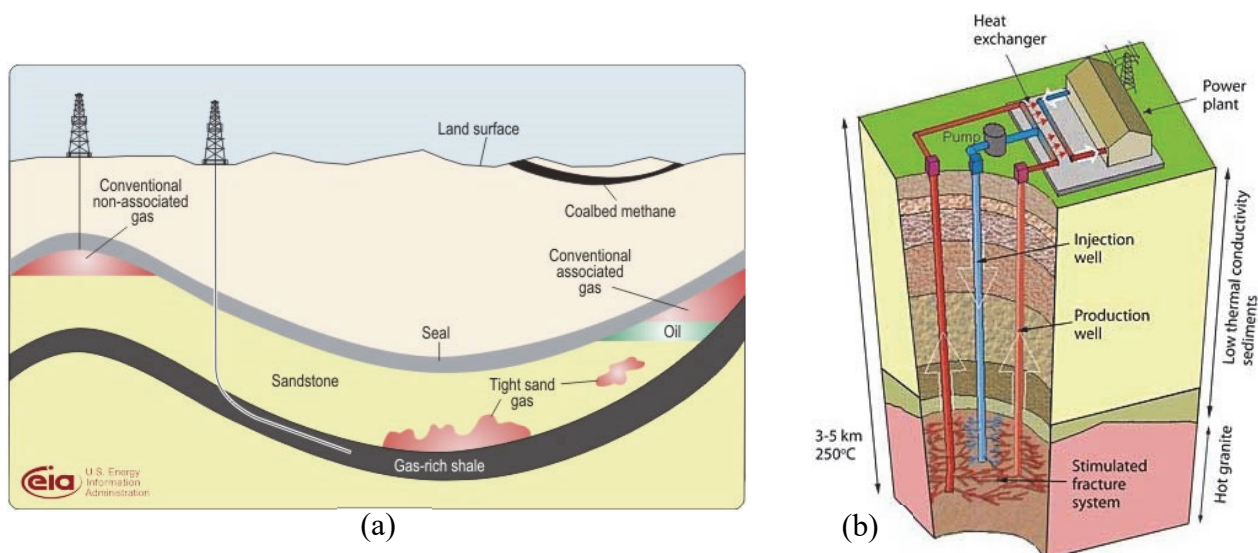


**Fig. 5** – Roturas após o encerramento de minas: (a) subsidência controlada por descontinuidades; (b) rotura em chaminé numa mina de gesso (Didier et al., 2008).

O sector da energia está a ser alvo de pressões de dois tipos, de certa forma antagónicas: por um lado, o crescimento da procura de energia em consequência do aumento da população e das necessidades da indústria, e por outro lado as crescentes restrições ambientais. Está, assim, a sofrer um processo da transformação, no sentido de adaptar os modos de produção e também de armazenamento de resíduos aos novos paradigmas.

A produção de hidrocarbonetos baseada em métodos não convencionais em maciços sedimentares, tem tido importantes desenvolvimentos, com furações a maiores profundidades, sob temperaturas e estados de tensão elevados, em maciços rochosos não fraturados e com permeabilidades muito reduzidas, como é o caso do gás de xisto. Estas formações necessitam de ser sujeitas a fraturação hidráulica, em furos propositadamente desviados para as atingir, por forma a criar caminhos para a circulação dos fluidos para os furos de extração (Figura 6a). A mecânica das rochas será cada vez mais chamada a intervir nestes problemas, estudando a propagação de fraturas e os fenómenos térmicos, hidráulicos, mecânicos e químicos (THMC) de forma acoplada (Pellet, 2018).

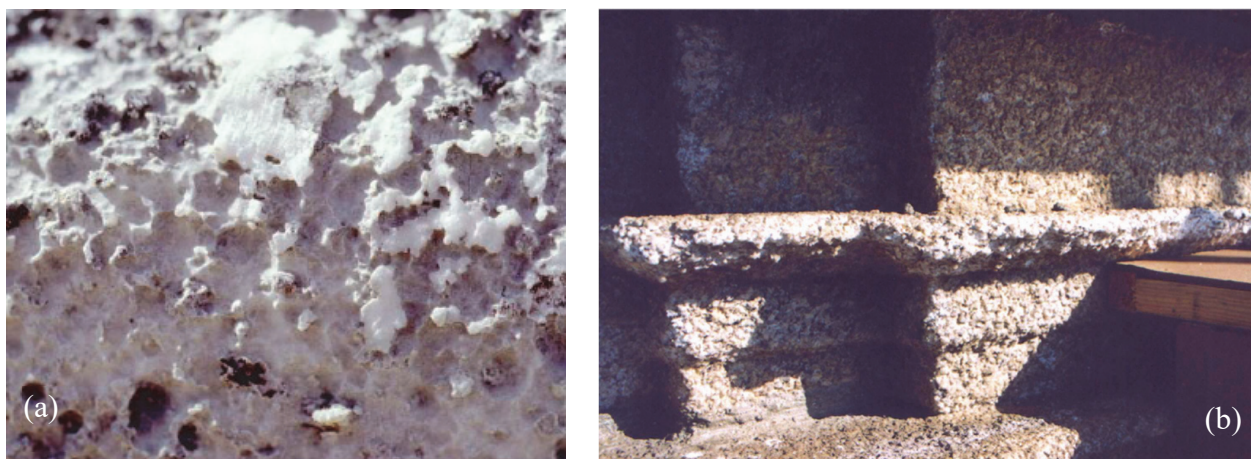
Os sistemas geotérmicos melhorados (*enhanced geothermal systems*) profundos localizam-se em formações rochosas plutônicas cristalinas, com sistemas de descontinuidades pré-existent, mas que necessitam de ser estimuladas por fraturação hidráulica, para aumentar as trocas de calor entre o maciço e a água circulante (Figura 6b). Requerem crescente contribuição da mecânica das rochas, nomeadamente no estudo das propriedades dos maciços, dos sistemas de fraturas e do estado de tensão de origem tectónica, na utilização de análises acopladas THMC, bem como na prevenção de acidentes devidos à reativação de falhas e à sismicidade induzida associada, relacionadas com os aspetos da resposta dinâmica dos sistemas e da propagação da fraturação (Pellet, 2017).



**Fig. 6** – (a) esquema geométrico de depósitos convencionais e não convencionais de gás (EIA, 2010); (b) esquema de um sistema geotécnico melhorado (GW, 2021).

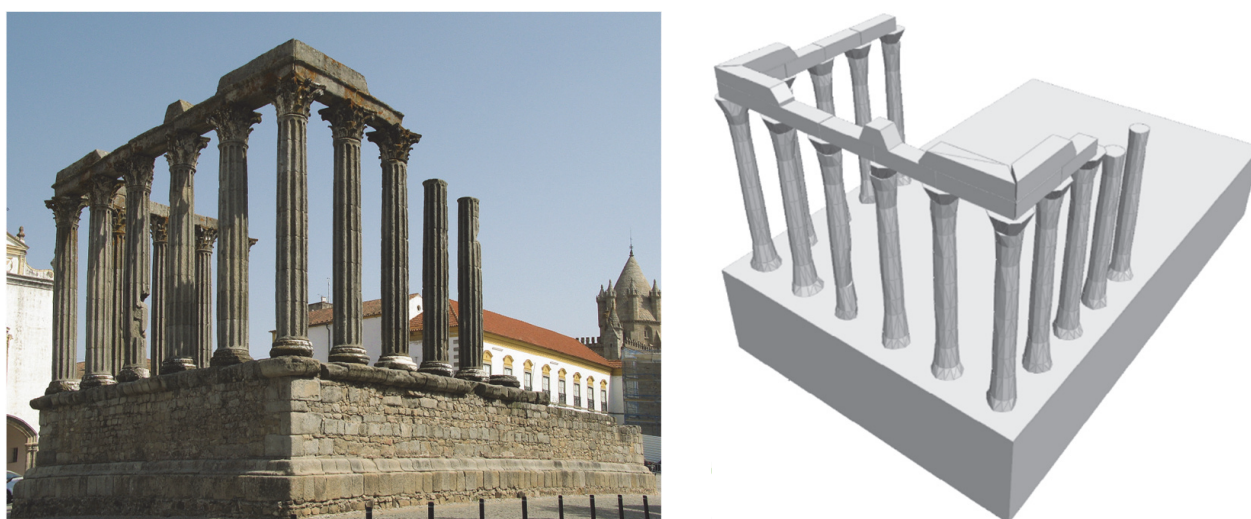
Ainda no campo ambiental, a mecânica das rochas desempenhará um papel de crescente importância em vários domínios, de que se destacam: o sequestro de dióxido de carbono em depósitos profundos para redução das emissões para a atmosfera, nos quais é necessário assegurar a não migração do gás para a atmosfera e evitar a contaminação dos aquíferos; o armazenamento subterrâneo de resíduos radioativos, com soluções já em funcionamento ou em desenvolvimento em diferentes ambientes geológicos, nos quais é necessário avaliar o dano em redor das cavernas para evitar a migração de elementos radioativos; a armazenagem subterrânea de gás em cavernas de sal (Bérest e Côme, 1993; Bérest, 2013). Após o acidente com a central nuclear de Fukushima, no Japão, voltou a suscitar interesse uma ideia, já considerada no passado, de construir centrais nucleares no espaço subterrâneo, garantindo desta forma uma redução do risco de dispersão aérea de materiais radioativos em caso de acidente, bem como uma diminuição do risco face à ocorrência de sismos. (Duffaut e Sakurai, 2018).

A preservação do património construído é uma área de atividade onde a mecânica das rochas tem desempenhado um papel relevante. Em primeiro lugar, a questão da conservação e restauro e monumentos e outras estruturas de alvenaria de pedra constitui um domínio onde existe uma vasta experiência, nomeadamente sobre os processos de degradação das rochas ao longo do tempo em face das condições ambientais (Figura 7), e sobre as metodologias de intervenção mais adequadas (Delgado Rodrigues, 2004).



**Fig. 7** – (a) Biocolonização em calcários do mosteiro dos Jerónimos; (b) desintegração de um bloco de granito (Delgado Rodrigues, 2007).

Do ponto de vista do comportamento estrutural, a mecânica das rochas tem obviamente intervenção nos problemas de fundação destas estruturas (Jackson e Marra, 2006). De salientar ainda a utilização comum de instrumentos de modelação numérica na análise de obras em maciços rochosos e de estruturas de alvenaria de pedra. Na realidade, os modelos de blocos ou elementos discretos, que surgiram inicialmente na mecânica das rochas, têm demonstrado um excelente desempenho no estudo de estruturas de alvenaria de blocos, onde as descontinuidades assumem igualmente um papel crítico do ponto de vista da estabilidade (Figura 8). Em particular, é de referir a sua aplicação na análise do comportamento de estruturas históricas sob ações sísmicas (Psycharis et al., 2003). Tal como nos outros domínios, é de prever o incremento do emprego deste tipo de representação, progressivamente com um maior refinamento, e apoiando-se em idealizações constitutivas mais elaboradas dos materiais e das descontinuidades. Para além destes problemas essencialmente relacionados com o comportamento mecânicos, o estudo das estruturas antigas exige a capacidade de analisar e prever a evolução de fenómenos de deterioração dos materiais ao longo do tempo e, portanto, de modelos avançados de interação entre os diversos fenómenos físicos e químicos em jogo.



**Fig. 8** – Templo romano de Évora e modelo de elementos discretos (Nayeri, 2012)

Saindo ainda mais dos domínios tradicionais das aplicações da mecânica das rochas, com a exploração do espaço o interesse pelo conhecimento dos terrenos em outros planetas e a corrida para

o estabelecimento de bases e a exploração de minérios na Lua ou em Marte (Rostami, 2021), a humanidade terá de lidar com maciços rochosos desconhecidos, sob condições diferentes das da Terra. A mecânica das rochas extraterrestre tem já algum desenvolvimento, nomeadamente para a abertura de furos de sondagem (Figura 9a) em robôs transportados em missões a Marte. Numa análise das fotografias de Marte, Aydan (2017) considera haver grandes semelhanças em termos das descontinuidades, da alteração das rochas, dos mecanismos de rotura por deslizamento e por rotação de blocos em taludes (Figura 9b), concluindo que os problemas de mecânica das rochas em Marte são muito semelhantes aos da Terra, se devidamente considerados os diferentes campos gravitacionais, temperaturas, condições atmosféricas e ausência de água.



**Fig. 9** – Mecânica das rochas extraterrestre: (a) sonda para furação do robô *Perseverance* em Marte (ABC, 2021); (b) rotura de um talude em Marte (Aydan, 2017)

### 3.2 – Prospeção e caracterização dos maciços rochosos

A caracterização dos maciços rochosos terá de enfrentar no futuro desafios de diferente natureza. Por um lado, a crescente utilização de modelos numéricos complexos, mas de utilização relativamente amigável do utilizador, associados a metodologias empíricas para obtenção de valores das propriedades dos maciços rochosos, tem levado ao falso julgamento de ser possível atingir níveis de fiabilidade elevados para as soluções de projeto, frequentemente com uma menor atenção à caracterização dos maciços e a não consideração da maior incerteza inevitavelmente associada a um pior conhecimento do terreno. Esta tendência para um refinamento das análises e da modelação, e uma menor consideração dos dados geotécnicos reais, deve ser evitada e para tal é fundamental o papel dos engenheiros experientes.

Outro desafio, de certa forma oposto ao anterior, decorrente da complexidade de alguns modelos numéricos de ponta, consiste na necessidade de dispor, como dados de partida, de parâmetros dos maciços rochosos que não são facilmente obtidos. É o caso de modelos de blocos discretos com consideração da geometria e da persistência das superfícies de descontinuidade, em que a atual capacidade de modelação de sistemas muito complexos, baseados em descrições estatísticas das superfícies de descontinuidade utilizando sistemas discretos de fraturas (*Discrete Fracture Networks*), associados a modelos de partículas ou blocos para simulação de maciços rochosos, exigem a utilização de novas metodologias de caracterização da geometria dos maciços.

Segundo Fairhurst (2010) “O próximo passo fundamental para o avanço da mecânica das rochas e da engenharia das rochas consiste na obtenção de dados confiáveis, à escala dos maciços, por forma a calibrar e melhorar as previsões numéricas. Deve ser dada, com urgência, atenção ao desenvolvimento de formas de obter esses dados com custos razoáveis”. O mesmo autor refere ainda que “à medida que a mecânica das rochas se foca na escala dos maciços, o seu avanço necessita de uma maior interação com a geologia de engenharia”.

É interessante referir a introdução do conceito de “modelo do terreno” (*ground model*) na nova geração do Eurocódigos, prevista para entrar em vigor em 2024 (CEN, 2021), definido como: “esquema específico do sítio, da disposição e das características do terreno e da água do terreno, com base nos resultados da prospeção e de outros dados disponíveis”. O conceito de modelo integrando todos os dados disponíveis vai no sentido referido por Fairhurst (2010) de considerar os maciços como um todo, em que o que é relevante é o seu comportamento à escala do maciço.

Por outro lado a disponibilidade de novas tecnologias, nomeadamente de imagens digitais obtidas por meios terrestres ou aéreos, com a crescente vulgarização dos veículos aéreos não tripulados (*drones*), bem como de varrimentos por laser (3D laser scan, LiDAR), associadas a ferramentas de inteligência artificial para o reconhecimento de padrões, levarão à sua utilização na caracterização dos maciços rochosos de forma mais intensa e com novas aplicações.

A representação espacial georreferenciada dos dados da prospeção do terreno recorrendo a métodos de BIM tem já uma expressão relevante e é, sem dúvida, uma metodologia que terá notáveis avanços no futuro próximo e uma utilização cada vez maior.

O conhecimento sobre atividade sísmica e os riscos que coloca nas regiões em que se manifesta tem avançado significativamente, para o que tem contribuído o maior número e qualidade dos registos obtidos nas redes sísmicas, assim como as tecnologias InSAR que permitem quantificar de forma mais rigorosa os movimentos da superfície associados a estes fenómenos (Lanari et al., 2010). A investigação nesta área tem claramente afinidades com a mecânica das rochas e a compreensão dos fenómenos geológicos é essencial para a engenharia de obras em maciços rochosos.

### 3.3 – Propriedades das rochas e dos maciços rochosos

Com base no conhecimento dos maciços obtido nos trabalhos de prospeção e caracterização, bem como nos resultados de ensaios *in situ* ou laboratoriais, é possível quantificar as propriedades dos maciços com interesse para a análise e o projeto das realizações. Ulusay e Gersek (2017) apresentam uma extensa reflexão sobre as futuras necessidades de desenvolvimento de métodos de ensaio, dando especial relevo aos referidos seguidamente.

- ensaios de rochas a temperaturas elevadas, particularmente para problemas de armazenamento de resíduos radioativos;
- ensaios dinâmicos das rochas, nomeadamente de resistência ao corte de descontinuidades sujeitas a carregamentos dinâmicos;
- ensaios de medição do estado de tensão em maciços rochosos, quer no campo quer em laboratório usando técnicas de emissão acústica;
- técnicas de amostragem e ensaios de rochas brandas;
- ensaios de rochas designadas por *bimrocks* (*built in matrix rocks*), compostas por blocos de rocha inseridos numa matriz de textura mais fina;
- ensaios triaxiais verdadeiros para estudo da influência da tensão principal média na resistência e na deformabilidade;
- ensaios para determinação de parâmetros de escavabilidade de rochas;
- ensaios para determinação de limites de dano para prevenção de lasqueamento (*spalling*) em redor de escavações;
- ensaios para avaliação da alterabilidade e de taxas de degradação das rochas.

Os ensaios triaxiais verdadeiros revelam-se de uma importância crescente para investigação da influência da tensão principal média na resistência, na deformabilidade e na permeabilidade das rochas e também na propagação de ondas.

No que diz respeito a laboratórios de investigação subterrâneos (*underground research laboratories* – URL), é expectável que venha a aumentar o seu número e o tipo de ensaios e investigações que neles se poderão realizar. Os URL podem desempenhar um papel relevante na validação de desenvolvimentos teóricos. São utilizados fundamentalmente em investigações

experimentais relacionadas com o estudo acoplado de processos termo-hidro-mecânico-químicos em maciços rochosos, que é relevante para problemas de armazenagem de resíduos radioativos e projetos de produção de energia geotérmica (Wang et al., 2017).

No que se refere às propriedades dos maciços rochosos, é hoje em dia prática comum a utilização do critério de rotura de Hoek-Brown e de uma série de outras equações empíricas que lhe estão associadas, para obter parâmetros de resistência e de deformabilidade dos maciços rochosos com base em ensaios triaxiais em laboratório e em observações qualitativas do maciço rochoso, nomeadamente das descontinuidades, utilizando o GSI (*geological strength index*) (Hoek e Brown, 2019). Muitas vezes essas equações são utilizadas sem contestação e são consideradas de aplicação universal. No entanto, é interessante recordar as palavras de Evert Hoek numa carta dirigida ao editor do News Journal da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas em 1994 (Hoek, 1994):

*“In writing Underground Excavations in Rock almost 15 years ago, Professor E.T. Brown and I developed the Hoek-Brown failure criterion to fill a vacuum which we saw in the process of designing underground excavations. Our approach was entirely empirical, and we worked from very limited data of rather poor quality. Our empirical criterion and our estimates of the input parameters were offered as a temporary solution to an urgent problem.*

*In retrospect, it is clear that we were naïve in believing that our emergency criterion would soon be replaced by a set of well-researched predictive tools which were well substantiated by field studies and back analyses of real rock engineering case histories. In fact, the reverse has happened, and I am alarmed to see the Hoek-Brown criterion being applied to problems which we did not even dream about when we made those desperate estimates 15 years ago”.*

Quer isto dizer que será importante continuar a desenvolver estudos para procurar um critério de rotura robusto para maciços rochosos, baseado em dados e em princípios sólidos, não para substituir desde já o de Hoek-Brown na prática da engenharia das rochas, com o qual existe uma grande experiência na sua aplicação, mas pelo menos para investigação e para tipos específicos de aplicação. Tal critério teria vantagem em considerar a tensão principal intermédia (Chang e Haimson, 2012), evitar pontos angulosos no plano octaédrico de tensões e ter uma lei de cedência definida (Pan e Hudson, 1988), bem como complementado por uma definição do comportamento pós-pico e transição para o estado residual (Crowder e Bawden, 2004).

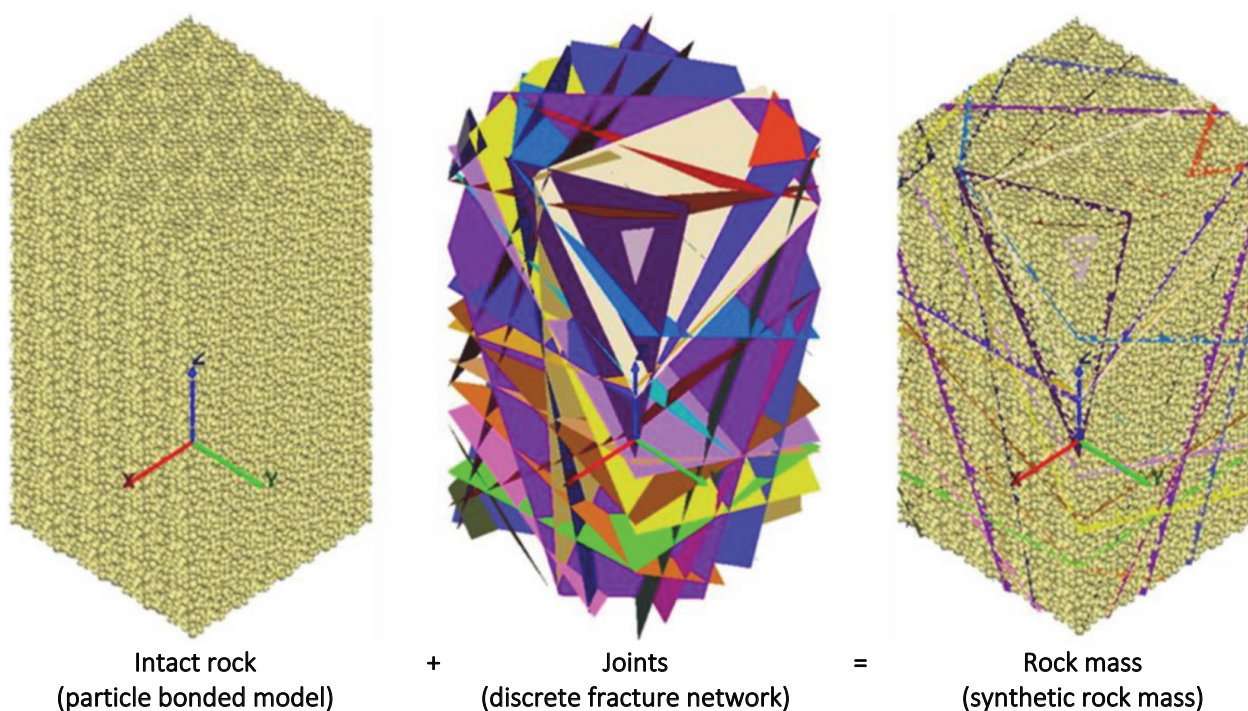
Outro aspeto relevante tem a ver com a variabilidade intrínseca dos valores das propriedades dos maciços rochosos e das incertezas que lhe estão associadas. Os valores considerados nos cálculos para verificação da segurança devem ter em conta esta incerteza, por forma a que possam ser atingidos os níveis de fiabilidade desejados. No âmbito dos Eurocódigo 7 (CEN, 2021), esta incerteza é considerada mediante a utilização de valores característicos das propriedades do maciço rochoso, nomeadamente das propriedades resistentes, tais como a resistência ao corte. Os valores característicos são, em princípio, definidos em termos probabilísticos, embora o número de dados frequentemente não o permita. É, por isso, importante realizar estudos estatísticos das propriedades das rochas e dos maciços rochosos, que permitam apoiar a obtenção de valores característicos das propriedades mais relevantes para o cálculo e a verificação da segurança.

### **3.4 – Análise para o projeto e a investigação**

Os métodos de análise de problemas de mecânica das rochas têm evoluído no sentido de um recurso cada vez mais importante às ferramentas de modelação numérica, uma tendência que se deverá manter no futuro. Na realidade, o desenvolvimento de modelos numéricos mais complexos, potencialmente capazes de capturarem com maior fidelidade o comportamento observado dos maciços rochosos, em paralelo com o aumento da capacidade dos meios computacionais, tem permitindo a sua utilização mais intensiva nas diversas fases da atividade de projeto. Starfield e Cundall (1988), num artigo pioneiro sobre a metodologia de modelação em mecânica das rochas,

salientavam o seu papel primordial como instrumento a que o engenheiro pode recorrer para a compreensão dos fatores dominantes num dado problema, nomeadamente permitindo testar as diversas hipóteses compatíveis com os dados experimentais disponíveis. Nesta perspetiva, tem-se intensificado a utilização diversificada dos modelos em múltiplas situações. Um exemplo que tem assumido importância crescente é a simulação detalhada das condições de execução de ensaios laboratoriais ou de campo, permitindo uma visão crítica da informação experimental. Em simultâneo, a utilização sistemática de modelos na análise do comportamento observado, para além de contribuir para a questão fundamental da sua validação, permite uma análise em pormenor o desempenho das obras. O desenvolvimento dos meios computacionais aponta para a possibilidade de modelação do comportamento em tempo real, com atualização permanente dos modelos através de técnicas avançadas de calibração (Sjoberg, 2020).

Constituindo as discontinuidades um facto determinante na resposta dos maciços rochosos, a sua representação nos modelos numéricos constituiu, ao longo das últimas décadas, um dos desafios mais importantes para os investigadores neste domínio. Os objetivos para o desenvolvimento dos métodos de análise definidos nos tempos iniciais da mecânica das rochas (Rocha, 1964) foram globalmente alcançados com os atuais modelos de elementos finitos e elementos discretos que permitem a representação pormenorizada do meio descontínuo nas mais diversas situações (Fairhurst, 2019). A simulação de solos e rochas por meio de sistemas de partículas ou blocos foi já, há duas décadas, apontada como o paradigma futuro da modelação em Geotecnia (Cundall, 2001). É de prever o uso mais intensivo de modelos das obras a uma escala mais fina, tais como o conceito de “*Synthetic Rock Mass*” SRM, proposto por Ivars et al. (2011) (Figura 10). Estes modelos, no entanto, são obviamente mais exigentes na informação que exigem, e, portanto, dependentes das possibilidades efetivas de prospeção e caracterização, no campo e no laboratório.

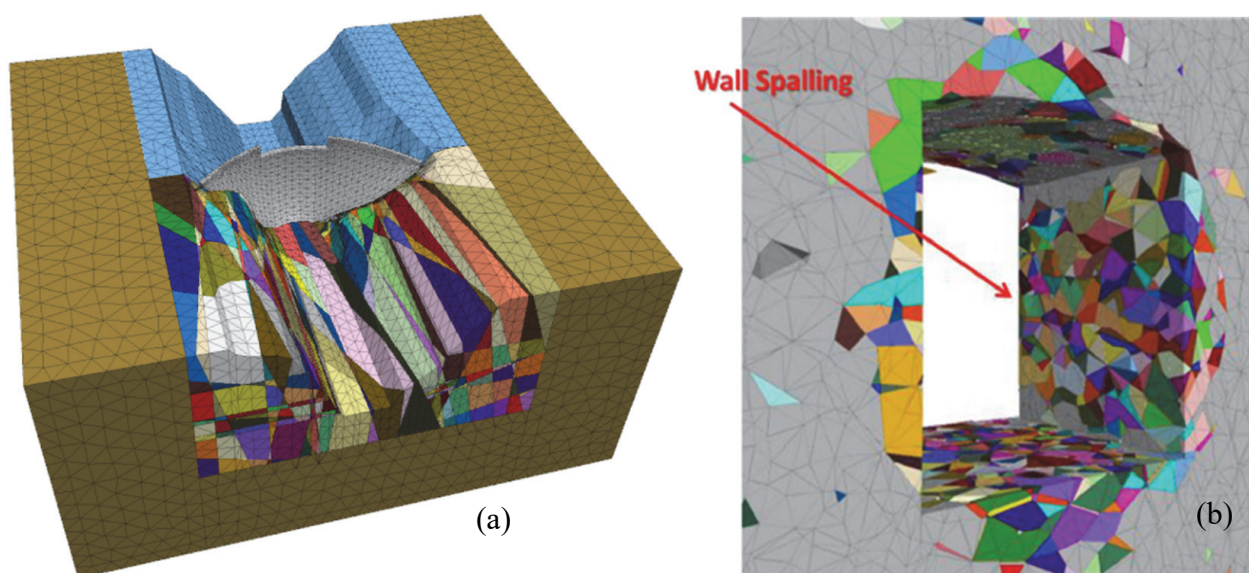


**Fig. 10** – Conceito de “*Synthetic Rock Mass*” SRM (Lorig e Varona, 2013)

Uma vez que os parâmetros essenciais que regem a resposta mecânica das rochas e dos maciços apenas podem ser obtidos em termos estatísticos, torna-se necessário incorporar nas representações a variabilidade natural dos meios geológicos e a incerteza do nosso conhecimento (Elmo e Stead, 2020). Deste modo, a utilização de modelos estocásticos, baseados numa realização das distribuições estatísticas suscetíveis de ser ajustadas às principais grandezas em jogo, será naturalmente cada vez

mais importante. Os meios computacionais disponíveis ainda limitam muito a utilização das séries de simulações que uma análise de Monte Carlo exige, para a maioria dos problemas de interesse prático. Contudo, a tendência para conceitos probabilísticos de segurança é um facto adquirido, e que irá condicionar toda a prática da modelação.

No quadro dos modelos de meio descontínuo, a questão da propagação da fratura através da matriz rochosa, nomeadamente da extensão das descontinuidades pré-existentes, continua a ser um tema em que são de esperar desenvolvimentos nos próximos anos, o que permitirá evitar o carácter excessivamente conservativo de muitos modelos descontínuos. Efetivamente, nos modelos à escala da obra, por exemplo em estudos de avaliação da segurança de fundações de barragens (Espada et al., 2018), apesar de já ser possível representar a compartimentação do maciço com algum pormenor, os blocos da matriz rochosa são ainda habitualmente considerados como rígidos ou elásticos. Nesta linha de desenvolvimento, os denominados “*bonded-block models*” (Garza-Cruz e Pierce, 2014) constituem uma proposta interessante na simulação de processos de fratura e fragmentação, e, portanto, da transição contínuo-descontínuo, essencial a uma quantificação mais rigorosa da segurança de obras em maciços rochosos (Figura 11).

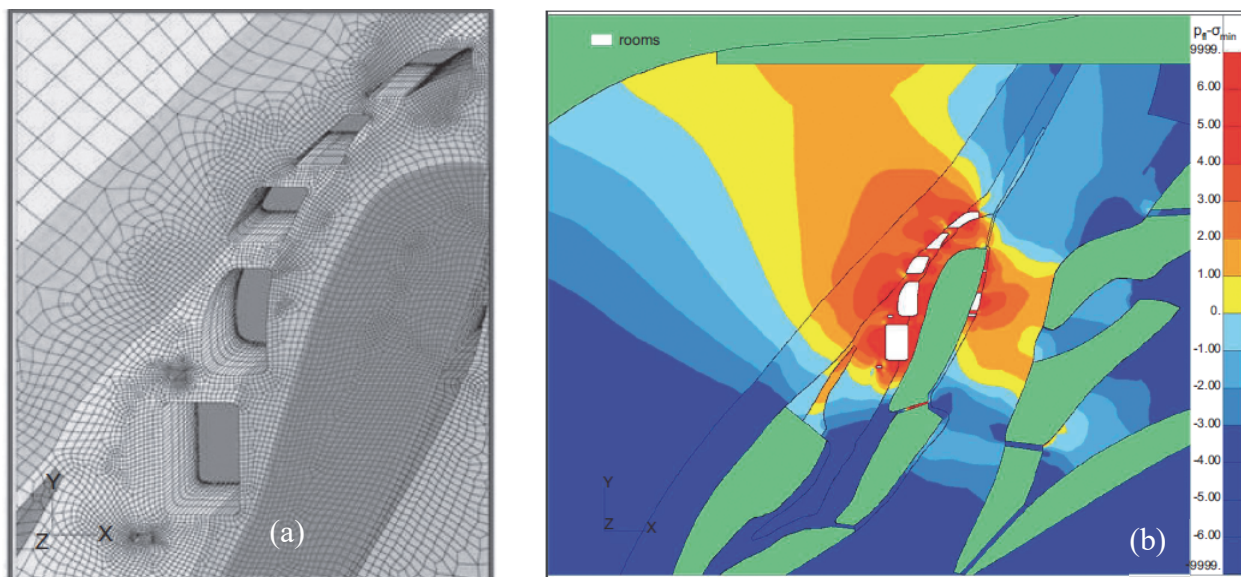


**Fig. 11** – (a) Modelo de elementos discretos da fundação da barragem de Foz Tua (Espada et al. 2018); (b) *bonded-block model* para estudo do comportamento deformacional de *block caving* (Fairhurst, 2019)

Um modelo é sempre uma representação da realidade física, e em todas as fases de análise se coloca a questão do nível de pormenor necessário, em face dos objetivos concretos de cada projeto. Um detalhe excessivo penaliza os tempos de cálculo, assim como a avaliação dos resultados, por vezes sem grandes vantagens. Para modelos de grande extensão, dada a impossibilidade de refinamento generalizado, a utilização de modelos multi-escala deverá assumir maior relevo (Liu et al., 2018). Esta abordagem tem por base uma interação entre uma malha mais larga que cobre o domínio em análise e um simulador do comportamento constitutivo de cada elemento, o qual pode consistir num modelo numérico de pormenor do elemento de volume representativo, ou mesmo recorrer a ferramentas de inteligência artificial, tais como redes neuronais (Masi et al., 2021).

Uma tendência que irá certamente acentuar-se prende-se com o uso de modelos acoplados que consideram a interação de fenómenos físicos de natureza diversa. A interação hidromecânica resultante de escoamento de fluidos em maciços rochosos, em especial através das descontinuidades, é corrente atualmente, nomeadamente no estudo de fundações de barragens. Em engenharia de petróleo, acresce a importância dos fenómenos de fracturação hidráulica. Nos problemas ambientais, a questão do transporte assume grande acuidade. A inclusão das variáveis térmicas, e a sua interação

com os processos mecânicos e hidráulicos, ou ainda químicos (THMC), é de grande importância em problemas ambientais, como o armazenamento de resíduos (Hudson et al., 2017), ou em projetos de engenharia geotérmica (Jing et al., 2000). A previsão do comportamento a longo prazo é um requisito importante nestes projetos, por exemplo, no estudo da utilização de antigas minas de sal para repositório de resíduos, em que a avaliação dos efeitos térmicos e de fluência na integridade das cavernas exige análises complexas (Heuserman et al., 2017) (Figura 12) A caracterização rigorosa dos parâmetros que regem a interação entre as diversas grandezas físicas é o desafio mais importante para o sucesso destes modelos acoplados.



**Fig. 12** – Modelação de um repositório de resíduos em estruturas salíferas: (a) malha de elementos finitos 3D; (b) áreas suscetíveis de fratura a longo prazo (Heusermann et al., 2017)

A consideração da variável temporal é sempre um elemento de complexidade nas tarefas de modelação. Neste campo, contam-se, em primeiro lugar os processos de evolução lenta, relacionados com o comportamento a longo prazo, como sejam a fluência, alteração, ou degradação material. No outro extremo da escala de tempos, incluem-se os fenómenos dinâmicos. A modelação numérica de problemas dinâmicos, nomeadamente no caso habitual de sistemas não-lineares que exigem uma solução passo-a-passo no tempo, tem sempre custos computacionais elevados. É de prever a sua utilização mais alargada, embora provavelmente ainda recorrendo a representações menos complexas dos maciços rochosos, de modo a permitir cálculos menos onerosos. A previsão da resposta dinâmica e a avaliação da segurança das obras sob ação sísmica são questões para as quais serão exigidas respostas mais rigorosas. O comportamento de rochas e maciços rochosos sob a ação de explosivos constitui também um tema de investigação importante, igualmente dependente da existência de meios de cálculo poderosos (Furtney et al. 2016).

Em anos recentes, os desenvolvimentos mais influentes nas metodologias de modelação numérica têm decorrido talvez mais dos avanços na área do software, do que das formulações teóricas que lhe estão subjacentes. Em primeiro lugar, é de referir os métodos de geração de modelos que permitem criar sistemas maiores e mais complexos com um esforço menor da parte do engenheiro. A ligação das tecnologias de CAD aos programas de análise irá certamente intensificar-se, de modo que as características concretas de um dado maciço possam ser reproduzidas com realismo num modelo numérico, facilitando a sua atualização progressiva à medida que mais informação se torna disponível.

Outro aspeto onde se podem prever desenvolvimentos de grande impacto é a possibilidade de ligação entre modelos de cálculo diversos, baseados em métodos distintos ou abordando fenómenos

físicos de natureza diversa, com migração fácil de informação e dos resultados obtidos nas sucessivas fases de análise. Esta questão será certamente facilitada pela adoção de software com maior flexibilidade de utilização, nomeadamente permitindo ao engenheiro a programação e automatização de tarefas, com base em linguagens de programação interna. De grande importância, em especial no campo da investigação e de aplicações mais avançadas, é a possibilidade de introduzir modelos constitutivos do comportamento dos materiais ou das descontinuidades.

A velocidade de cálculo é essencial para viabilizar modelos mais refinados e complexos. Neste domínio, o recurso à paralelização de tarefas é a principal via que tem sido avançada. A utilização eficiente de processadores múltiplos é já efetuada por muitos programas disponíveis em máquinas correntes. A paralelização massiva em redes com memória distribuída é, contudo, fundamental para permitir um incremento significativo da velocidade de cálculo. De referir ainda a generalização do acesso a meios computacionais disponíveis em redes globais (*cloud computing*), que irá colocar meios cada vez mais poderosos à disposição do engenheiro.

Outro aspeto relevante no âmbito da análise de problemas de mecânica das rochas é o da verificação da segurança para o projeto das estruturas geotécnicas. O método mais habitual tem sido a utilização de coeficientes de segurança globais, com valores específicos para diferentes tipos de obras e de verificações da segurança. São valores fixados de forma empírica e determinística, que traduzem a experiência existente. Embora tendo desvantagens na consideração das incertezas de diversas natureza e origem, têm aspetos importantes a seu favor, que consistem em estarem calibrados pela experiência da sua utilização generalizada e em serem de fácil utilização.

Mais recentemente, têm entrado em vigor regulamentos para o projeto de estruturas geotécnicas que consideram a natureza aleatória das incertezas associadas aos parâmetros intervenientes na verificação da segurança. São disso exemplo as metodologias de verificação da segurança em relação a estados limites por métodos semi-probabilísticos preconizadas no Eurocódigo 7 (CEN, 2004) na Europa, utilizando valores característicos e coeficientes parciais aplicados às ações e seus efeitos, às resistências e às propriedades dos materiais, ou no *load and resistance factor design* – LRFD (AASHTO, 2020) nos E.U.A., utilizando coeficientes que afetam os valores nominais das ações e das resistências. Os métodos semi-probabilísticos são aproximações das soluções obtidas com métodos probabilísticos, em que a utilização de valores característicos e de coeficientes parciais pretende considerar a incerteza e obter a fiabilidade desejados. Têm a grande vantagem de, uma vez estabelecidos os valores dos parâmetros a utilizar e dos coeficientes parciais, a verificação da segurança ser feita de uma forma semelhante à via determinística e poderem, assim, ser aplicados com relativa facilidade na generalidade dos projetos.

No entanto, os métodos semi-probabilísticos têm também desvantagens, tais como: a hipótese da independência dos diferentes parâmetros considerados como variáveis aleatórias; o efeito simultaneamente estabilizador e desestabilizador de alguns parâmetros; a inexistência de valores de coeficientes parciais para alguns parâmetros, nomeadamente propriedades dos materiais; a não aplicabilidade de metodologias baseadas em coeficientes parciais e valores característicos para consideração das incertezas associadas a parâmetros geométricos. Na engenharia das rochas são especialmente relevantes as duas últimas: i) os coeficientes parciais apresentados no Eurocódigo 7 para as propriedades dos materiais consideram apenas parâmetros do critério de Mohr-Coulomb, obrigando à aplicação de metodologias aproximadas de linearização quando são utilizados os critérios de rotura não lineares usados em maciços rochosos, tais como os de Hoek-Brown e de Barton-Bandis; a consideração das propriedades geométricas das superfícies de descontinuidade de forma probabilística, nomeadamente a sua orientação, não é possível com o método semi-probabilístico adotado no Eurocódigo 7, embora a influência da sua geometria na verificação da segurança seja tão importante como a das suas propriedades resistentes.

Estas dificuldades são ultrapassadas recorrendo à teoria da fiabilidade estrutural e à utilização de métodos probabilísticos, os quais serão já permitidos na nova geração dos Eurocódigos, prevista para entrar em vigor em 2024, sempre que as incertezas na representação das ações, dos efeitos das ações e das resistências sejam tais que a utilização de métodos com base na teoria da fiabilidade

resulte numa representação significativamente melhor do que a utilização de coeficientes parciais (CEN, 2021). Os maciços rochosos são considerados como materiais que podem estar incluídos nestes casos, pois o seu comportamento é fortemente afetado pela presença de descontinuidades.

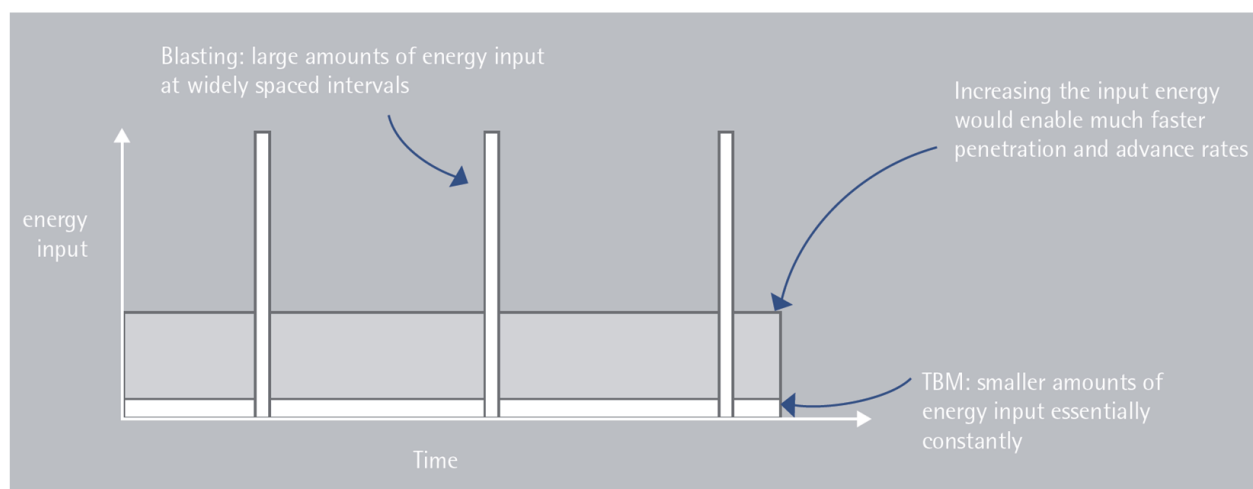
Os métodos probabilísticos, já utilizados em engenharia das rochas em situações restritas e relativamente simples, deverão ter um desenvolvimento acentuado no futuro (Low, 2019) (Harrison, 2019). Os métodos probabilísticos exatos, incluindo o método de Monte Carlo e suas variantes, assim com os métodos probabilísticos aproximados, como os FORM (*First Order Reliability Methods*) e muitos outros, deverão vir a ter desenvolvimentos teóricos e ver o seu âmbito de aplicação alargado a estruturas geotécnicas de crescente complexidade. A tal não será alheio o previsível crescimento acelerado das capacidades computacionais requeridas por estes métodos.

### 3.5 – Construção

Há certamente inúmeros aspetos relacionados com as realizações em maciços rochosos que sofrerão grandes evoluções no futuro próximo, nomeadamente os relacionados com a utilização do espaço subterrâneo. A necessidade de criar escavações cada vez com maiores secções, maior comprimento e a maior profundidade, a preços competitivos com outras soluções à superfície e em prazos cada vez mais reduzidos, resultará na necessidade de integração de uma melhor caracterização dos terrenos com análises cada vez mais realistas do comportamento das escavações, bem como com métodos de construção utilizando novos conceitos e novas tecnologias.

Optou-se por destacar, neste trabalho, a enorme evolução registada nas tecnologias associadas à construção de túneis, tando no que respeita à eficiência dos métodos de escavação como ao reforço do maciço e aos suportes. Galler (2017) apresenta uma interessante análise dos aspetos principais dos métodos de escavação com recurso a explosivos e utilizando tuneladoras, bem como dos desenvolvimentos esperados, incluindo como aspeto fundamental a produção de matérias primas de alta qualidade a partir dos materiais de escavação, o que é do maior interesse dos pontos de vista ambiental e económico.

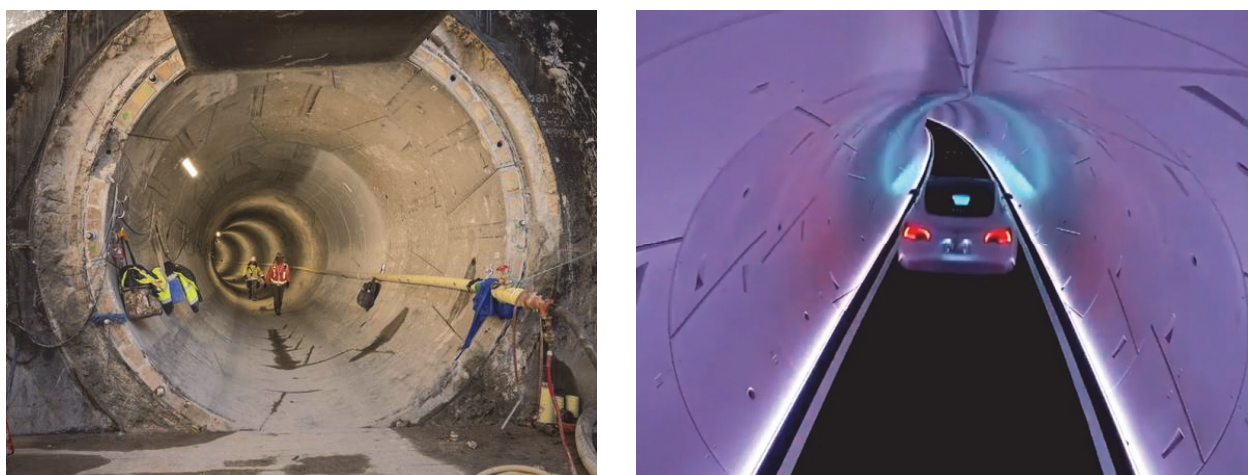
Existe, uma diferença radical entre os métodos de escavação por explosivos e por meios mecânicos do ponto de vista do padrão do *input* de energia (Hudson, 2012), sobre a qual importa refletir. Na escavação por explosivos, grandes quantidades de energia são introduzidas em intervalos de tempo de segundos, espaçados no tempo por períodos de muitas horas ou mesmo dias. Ao contrário, na escavação por meios mecânicos quantidades de energia muito menores são introduzidas de forma contínua. Esta tão grande diferença entre os dois métodos de escavação levará, certamente, a que seja possível desenvolver métodos de construção com maior *input* de energia de uma forma contínua, como se ilustra na Figura 13.



**Fig. 13** – Energia associada a escavação de maciços rochosos por explosivos e por tuneladoras (Hudson, 2012)

O aumento do *input* de energia na escavação por meios mecânicos traduzir-se-á, obviamente, num aumento do ritmo da penetração, quer mediante o aumento do impulso sobre o terreno, com motores mais potentes, quer pela diminuição da resistência do maciço rochoso à penetração. Neste campo, é de referir a utilização de micro-ondas para o aquecimento rápido de alguns minerais constituintes da rocha e da água, por forma a induzir microfissuras e fraturas na rocha. Com a instalação desta tecnologia em equipamentos de escavação mecânica, como tuneladoras, a fraturação e fragmentação dos maciços rochosos não resultará apenas da capacidade de corte da cabeça da tuneladora, mas também do efeito térmico provocado pelas micro-ondas. As investigações em curso neste domínio (Zhao et al., 2018) permitirão aumentar a eficiência dos meios mecânicos de escavação, com um aumento do *input* contínuo de energia, conduzindo a soluções financeiramente atraentes e em prazos mais curtos.

Ainda no âmbito da utilização de túneis em meio urbano e da eficiência da sua escavação, é incontornável referir o conceito introduzido por Elon Musk com o objetivo de desenvolver redes tridimensionais de túneis urbanos, a diferentes profundidades, com custos e prazos reduzidos (Reynolds, 2017) (<https://www.boringcompany.com/>). O conceito baseia-se na escavação de túneis rodoviários de pequeno diâmetro (cerca de 3,7m), apenas com uma via, para carros elétricos, utilizando tuneladoras com maior potência, com a possibilidade de escavarem e colocarem o suporte em simultâneo, sem paragens (Figura 14). A visão do promotor deste conceito é vir a escavar túneis por um décimo do custo, num décimo do prazo. As realizações incluem o *Las Vegas Convention Center Loop* com 3 km, inaugurado em 2021, e um túnel piloto de 1,6 km em Los Angeles para investigação relativamente ao desenvolvimento de uma rede nessa cidade, estando em fase avançada de planeamento uma rede idêntica em Las Vegas.



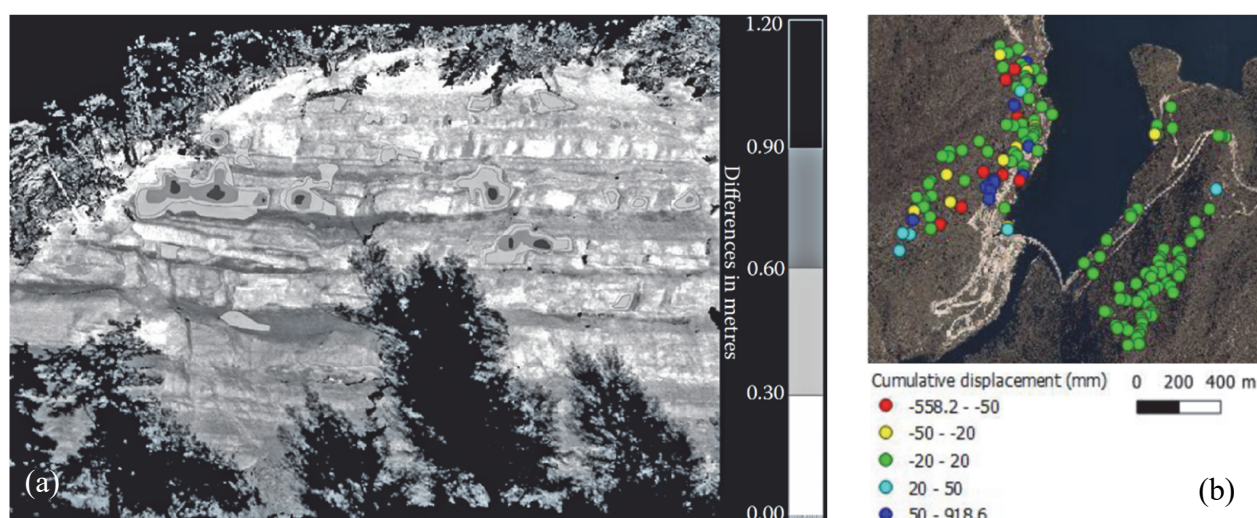
**Fig. 14** – Túneis do *Las Vegas Convention Center Loop*

### 3.6 – Observação

A observação a longo prazo, utilizada na fase de serviço das obras e de outras realizações, é importante quando a sua falha representa um risco para a segurança das populações e também económico, como é o caso das barragens ou das pontes. Em engenharia geotécnica, em que o conhecimento dos materiais é frequentemente muito limitado, a observação adquire grande relevância durante os processos de escavação, acompanhando uma estrutura geotécnica em constante mutação. Na engenharia mineira é uma atividade constante durante a exploração das minas. Na engenharia civil, a escavação decorre num intervalo de tempo limitado e é frequentemente seguida de uma fase de aplicação das solicitações de serviço. É nestas fases que a observação adquire a sua maior relevância, no sentido de monitorizar o comportamento das obras e fornecer informação em tempo real de forma a permitir a tomada das decisões necessárias para assegurar a sua segurança.

Os desenvolvimentos expectáveis na observação do comportamento das realizações em engenharia das rochas desenvolver-se-ão em dois campos fundamentais. Por um lado, pela utilização das novas tecnologias e equipamentos que vão estando disponíveis e, por outro lado, pela integração dos resultados da observação, em tempo real, com os da análise do comportamento dos maciços.

Do lado das novas tecnologias, a utilização de métodos geodésicos não tradicionais verá aumentado o seu papel na observação de obras. A monitorização de deslocamentos em pontos notáveis com recurso a GNSS (Shimuzu e Nakashima, 2017) atinge já precisões milimétricas e a previsível diminuição dos custos dos equipamentos de alta precisão irá aumentar a sua utilização. A fotogrametria digital terrestre e aérea beneficia agora da democratização trazida pela utilização de *drones* na captação das imagens e permite obter coordenadas das superfícies fotografadas e gerar modelos tridimensionais dos objetos. O varrimento por laser (LiDAR), tal como a fotogrametria, são já técnicas muito utilizadas na monitorização de taludes (Figura 15a), nomeadamente em grandes minas a céu aberto e em grandes taludes naturais (Jaboyedoff et al., 2018) (Kim et al., 2018). Mais recentemente a tecnologia de InSAR (Roque, 2020) tem sido utilizada para detetar movimentos de terrenos, incluindo a monitorização de taludes (Figura 15b). Os desenvolvimentos no processamento numérico associado a estes métodos, bem como nas capacidades computacionais, torná-los-ão incontornáveis na monitorização da superfície do terreno.



**Fig. 15** – (a) Modelo comparativo mostrando movimentos (de blocos) ao longo do tempo num talude rochoso (Jaboyedoff et al., 2018); (b) deslocamento acumulado num período de dois anos segundo a direção da inclinação dos taludes a montante de uma barragem (Roque, 2020)

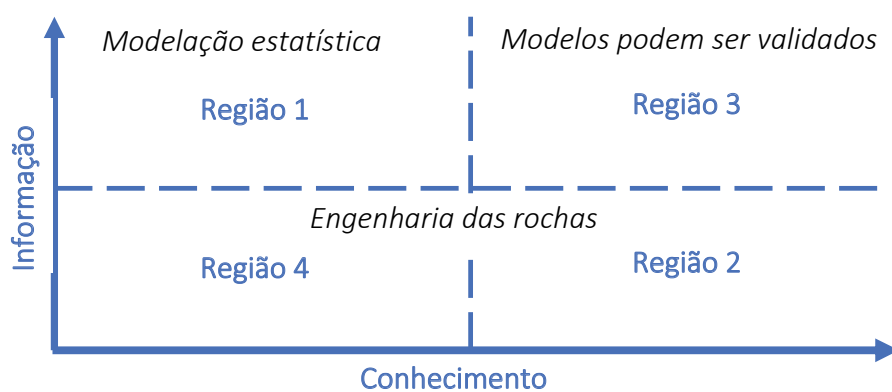
As técnicas de microsísmica têm vindo a ser utilizadas na monitorização de micro-roturas das rochas sob estados de tensão elevados. Estas técnicas são mais comuns nas minas profundas (Durrheim, 2017) e em aplicações relacionadas com a indústria petrolífera, e mais recentemente têm sido utilizadas durante a escavação de túneis profundos para circuitos hidráulicos de empreendimentos hidroelétricos ou fins viários, tendo como objetivo o controlo e a mitigação dos efeitos de golpes de rocha (*rockbursts*) durante a escavação (Feng et al., 2017). Com o aumento da atividade a profundidades cada vez maiores esta tecnologia tem vindo a ser alvo de contínua investigação e verá certamente ampliada a sua utilização.

A utilização de sensores inteligentes (*smart sensors*) deu já os primeiros passos na engenharia das rochas (Yang et al. 2007). Definem-se como “dispositivos que recebem o *input* do ambiente físico e usam capacidades computacionais integradas para desempenhar funções pré-definidas quando detetam *inputs* específicos, processando-os e transmitindo-os” (Posey, 2021). Estes sensores são utilizados no âmbito dos princípios da “Internet das Coisas” (*Internert of Things* – IoT), que consistem em conectar todos os tipos de objetos à internet, permitindo a sua sincronização e a sua

utilização remota. É uma conexão entre o mundo digital e o mundo físico. Parece óbvio que a aplicação de sensores inteligentes de acordo com os princípios da IoT, em associação com software dedicado de visualização, tem na monitorização geotécnica um campo de aplicação privilegiado (Carri et al., 2021). Um campo em que existe já investigação avançada é o da monitorização de pregagens em rocha usando sensores inteligentes. Milhões de pregagens são instaladas anualmente à escala mundial para o reforço de taludes e escavações em rocha, e o seu adequado comportamento é essencial para a estabilidade dos maciços. No entanto, a verificação do seu desempenho é habitualmente feita por ensaios de arranque, destrutivos, após a sua instalação. A utilização de sensores inteligentes, nomeadamente piezoelétricos e de fibras óticas, em grandes quantidades, ambiciona obter informação sobre as forças instaladas e a corrosão, bem como as condições da calda de selagem (Song et al., 2021). Este exemplo é apenas um de entre os muitos que estão em desenvolvimento e terão aplicação generalizada em obras geotécnicas.

### 3.7 – Inteligência artificial

Muitos dos problemas da engenharia das rochas, quer superficiais quer em subterrâneo, são caracterizados por uma quantidade reduzida de informação sobre o terreno ou sobre as interações entre o terreno e as estruturas a construir e, por vezes, reduzido conhecimento dos fenómenos que condicionam o comportamento dos maciços e das estruturas. Usando a classificação conceptual de Holling (Figura 16) dos problemas de modelação (Starfield e Cundall, 1988), os problemas que caem na região 1 têm boa informação, embora com limitado conhecimento, o que torna apropriada a utilização de modelos estatísticos. Os problemas que se situam na região 3 têm boa informação e bom conhecimento, pelo que é possível construir modelos confiáveis que podem ser validados. A modelação de problemas nas regiões 2 e 4 é caracterizada pela escassez de informação, por não existir ou não estar disponível. É nestas regiões que se situa a maioria dos problemas de engenharia das rochas, embora frequentemente sejam utilizadas metodologia típicas da região 3, o que pode não ser apropriado (Feng e Yang, 2017). Em face das limitações das previsões dos modelos analíticos ou numéricos nestas condições, tornou-se interessante a utilização de métodos de inteligência artificial, que não são dependentes de conhecimento a priori dos fenómenos e do estabelecimento de hipóteses (Lawal e Kwon, 2021).



**Fig. 16** – Classificação conceptual de Holling (1978) dos problemas de modelação

Os métodos que se enquadram globalmente na área da inteligência artificial têm assumido um papel cada vez mais relevante em vários domínios da mecânica das rochas. Uma componente importante destas técnicas decorre da sua capacidade de, a partir da análise de bases de dados, permitirem inferir padrões de comportamento e realizar previsões de uma forma automatizada, sem intervenção direta do engenheiro. Esta abordagem tem demonstrado um bom desempenho num conjunto muito diverso de atividades ligadas à engenharia de obras em maciços rochosos (Feng e Yang, 2017).

Em primeiro lugar, no âmbito da caracterização dos maciços, vários autores têm aplicado estes métodos para estimar propriedade mecânicas dos maciços, tais como deformabilidade, resistência à compressão, etc. a partir de bases de dados contendo parâmetros diversos obtidos nos trabalhos de prospecção (Elmo e Stead, 2020). Uma bibliografia extensa de aplicações desta natureza no âmbito da engenharia de minas é apresentada por Lawal e Kwon (2021).

No quadro da modelação numérica, o desenvolvimento de modelos constitutivos baseados em redes neuronais tem sido proposto por vários investigadores, como alternativa às formulações de base mecânica. É previsível que esta abordagem venha a adquirir mais ampla utilização no futuro, em particular para materiais de comportamento complexo ou acções menos bem documentadas, para os quais as relações constitutivas clássicas não permitem simulações adequadas (Feng e Yang, 2017; Masi et al., 2021).

Um campo de aplicação mais exigente inclui o emprego das técnicas de inteligência artificial para a previsão direta do comportamento das obras sem recorrer à intermediação dos modelos mecânicos clássicos (Morgenroth et al., 2019). Esta via tem particular interesse em problemas em que estes modelos são de uso mais difícil, quer pela complexidade dos fenómenos físicos subjacentes, quer pela dificuldade de calibração dos modelos com parâmetros materiais representativos. Resende et al. (2008) recorreram a redes neuronais na previsão de vibrações resultantes de explosões, tendo obtido resultados com uma precisão semelhante à análise estatística tradicional. Sousa et al. (2018) discutem a aplicação de várias técnicas de inteligência artificial no âmbito do projeto e construção de obras subterrâneas profundas em maciços rochosos, desde o seu papel na avaliação das propriedades mecânicas, até à previsão da ocorrência de fenómenos de instabilidade dinâmica (*rockbursts*). A previsão de *rockbursts* constitui na realidade uma área onde se verifica uma grande atividade de investigação envolvendo os recursos da inteligência artificial, nomeadamente da aprendizagem automática, no sentido de superar as dificuldades demonstradas pelos modelos mecânicos. Os citados trabalhos de Morgenroth et al. (2019) e Lawal e Kwon (2021) discutem um conjunto de desenvolvimentos recentes nesta área.

#### 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mecânica das rochas e a engenharia das rochas, tal como a engenharia geotécnica em geral e outros ramos da engenharia, estão a passar por um processo de evolução, que em certa medida pode ser considerado paralelo do da evolução da indústria 3.0 para a indústria 4.0. As bases fundamentais da disciplina da mecânica das rochas foram estabelecidas a partir dos anos 50 do século XX e até ao início do século XXI registaram-se progressos notáveis na sua aplicação a uma larga gama de realizações e na investigação aplicada. Desenvolveram-se métodos de ensaio e modelos de cálculo com sofisticação crescente, foram introduzidos conceitos que melhoraram o conhecimento dos maciços rochosos, do seu comportamento e das questões associadas à segurança, desenvolveram-se técnicas de construção robotizadas, mais eficientes e amigas do ambiente, e introduziram-se novas técnicas de observação do comportamento das realizações. Nos últimos anos, em simultâneo com o advento da indústria 4.0, tem-se assistido a uma rápida transição tecnológica resultante da introdução dos métodos de inspeção, de observação e de controlo remotos recorrendo a técnicas de realidade aumentada; da vulgarização dos sistemas de referência, da medição de deslocamentos e da utilização das imagens proporcionadas por satélites; da utilização da inteligência artificial para resolução de problemas com vantagens relativamente aos métodos tradicionais; da criação do conceito de gémeos digitais em engenharia das rochas e de maciços rochosos virtuais; da utilização da internet para comunicação entre os sistemas físicos e os humanos.

Os engenheiros terão de corresponder aos desafios postos por esta transição. Mas, para tal, precisam de ter uma formação de base sólida. É internacionalmente reconhecido que a principal causa de deficiências ou mesmo de insucessos na área da engenharia das rochas tem como base a insuficiente formação dos técnicos. Tratando-se de uma disciplina de charneira entre outras disciplinas, os currículos dos cursos de engenharia civil e de minas, ou não incluem engenharia das

rochas, ou têm lacunas graves nos conhecimentos de geologia. O mesmo se passa nos cursos de geologia, em que os imprescindíveis conhecimentos de engenharia não abundam nos currículos. Em Portugal a situação é semelhante e pode considerar-se que terá havido mesmo um retrocesso: a formação em engenharia das rochas nos cursos de engenharia civil é reduzida e a que existia nos cursos de mestrado pré-Bolonha, frequentados por grande parte dos engenheiros geotécnicos, praticamente desapareceu. Não será estranho a este menor interesse por esta disciplina em Portugal a diminuição das realizações em que ela é fundamental, como as fundações de grandes barragens, as grandes obras subterrâneas, ou as minas subterrâneas e a céu aberto. Como resultado, os problemas de engenharia das rochas acabam, frequentemente, por ser tratados por técnicos sem formação específica nesta área. É fundamental que esta situação seja revista num futuro próximo.

O intercâmbio internacional, nesta como em outras áreas tecnológicas, é importante para possibilitar a troca de conhecimentos e experiências, bem como o envolvimento dos técnicos em atividades que extravasam o próprio país. No contexto nacional, é relevante o aumento da participação em iniciativas europeias, quer a nível da regulamentação técnica e da normalização no âmbito do CEN ou da ISO, quer de parcerias para a investigação, o desenvolvimento e a inovação, assim como em grupos de trabalho ou comissões técnicas de sociedades internacionais, como a ISRM, a ICOLD ou a ITA.

É interessante refletir sobre o papel que poderão ter no futuro os principais meios de interação entre técnicos, tanto a nível nacional como internacional, nomeadamente as reuniões de trabalho e os congressos. As transformações no modo de trabalho, grandemente aceleradas durante a pandemia do coronavírus, levarão a que a maior parte dos eventos sejam levados a cabo, se não totalmente, pelo menos parcialmente de forma virtual, através da internet. As vantagens em termos de custos e de tempo serão enormes, mas o contacto pessoal essencial reduzir-se-á, sendo ainda uma incógnita o balanço dos prós e dos contras.

As sociedades técnicas e científicas, nacionais e internacionais, como a SPG e a ISRM, terão de se adaptar e conviver com o facto de o acesso à informação ser cada vez mais livre e facilmente pesquisável por qualquer pessoa através da internet, utilizando mecanismos de busca seletivos, e de a formação de grupos espontâneos para troca de informação poder, ainda que parcialmente, substituir o papel tradicional dessas sociedades. No entanto, elas poderão tornar-se ainda mais necessárias, sediando comissões técnicas que processem a informação – que está disponível em quantidades crescentes – por forma a desenvolverem guias, manuais, recomendações e outras publicações de utilidade para os seus associados; promovendo eventos em formato tradicional de conferências e exposições técnicas presenciais em colaboração com a indústria, em paralelo com múltiplos tipos de iniciativas de divulgação de conhecimentos e de discussão entre os associados organizadas através da internet; aumentando as medidas para reconhecimento do mérito dos seus associados individuais e coletivos; aumentando a sua visibilidade e influência junto dos meios técnico e científico, bem como dos decisores. Com a necessária transformação do seu leque de atividades e do seu modo de funcionamento, as sociedades técnicas e científicas poderão vencer os desafios que se lhes colocam e continuar a atrair os membros da comunidade técnica e científica, nomeadamente os mais jovens, por forma a ser inequívoca a vantagem em tornarem-se associados e a mobilizá-los para as suas atividades.

## 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2020). *AASHTO LFRD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABC (2021). *NASA's Perseverance rover is different to any mission that's landed on Mars. Here's why*. Acedido em 20 de maio de 2021, em: <https://www.abc.net.au/news/science/2021-02-16/mars-nasa-perseverance-rover-different-to-other-missions/13108892>.

- Alptransit (2021). *The Gotthard Base Tunnel. The world's longest railway tunnel*. Acedido em 20 de maio de 2021, em: [https://aqtr.com/system/files/file\\_manager/12h\\_ambros\\_zgraggen.pdf](https://aqtr.com/system/files/file_manager/12h_ambros_zgraggen.pdf).
- Aydan, Ö (2017). *Some Thoughts About Rock Mechanics Aspects of Mars*. 3rd Off Earth Mining Forum, Sydney, Austrália. Acedido em 20 de maio de 2021, em: <https://www.acser.unsw.edu.au/sites/acser/files/uploads/oemf2017/slides/Aydan.pdf>.
- Bérest P. (2013). *The mechanical behavior of salt and salt caverns*. Keynote lecture. Proc. ISRM International Symposium Eurock 2013. CRC Press.
- Bérest, P.; Côme, B. (1993). *The contributions of rock mechanics to environmental protection*. Keynote lecture. Proc. ISRM International Symposium Eurock 1993. CRC Press.
- Brown, E.T. (2011). *Fifty years of the ISRM and associated progress in rock mechanics*. In Q. Qian & Y.X. Zhou (eds), *Harmonising Rock Engineering and the Environment*, Proceedings 12<sup>th</sup> Congress ISRM, Beijing. Taylor & Francis, London.
- Carri, A.; Valletta, A.; Cavalca, E.; Savi, R.; Segalini, A. (2021). Advantages of IoT-Based Geotechnical Monitoring Systems Integrating Automatic Procedures for Data Acquisition and Elaboration. *Sensors* 21. doi.org/10.3390/s21062249.
- CEN (2004). *EN 1997 Eurocode 7 – Geotechnical design*. European Committee for Standardization.
- CEN (2020). Draft prEN 1990. Eurocode – Basis of structural and geotechnical design. European Committee for Standardization.
- CEN (2021). Draft prEN 1997. Eurocode 7 – Geotechnical design. European Committee for Standardization.
- Chang, C.; Haimson, B (2012). *A Failure Criterion for Rocks Based on True Triaxial Testing*. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45, pp 1007-1010. doi: 10.1007/s00603-012-0280-8.
- Crowder, J.J.; Bawden, W.F. (2004) *Review of Post-Peak Parameters and Behaviour of Rock Masses: Current Trends and Research*. Acedido em 20 de maio de 2021, em: [https://www.roscience.com/documents/pdfs/rocnews/fall2004/Crowder\\_Bawden.pdf](https://www.roscience.com/documents/pdfs/rocnews/fall2004/Crowder_Bawden.pdf).
- Cundall, P.A. (2001). *A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics?* Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 149(1), pp. 41-47.
- Dahr, B.B. (2016). *Advances in rock mechanics and future trends*. Proceedings of the conference on Recent Advances in Rock Engineering (RARE 2016), Bangalore, India. Atlantis Press.
- Delgado Rodrigues, J. (2004). Dos materiais rochosos à conservação da pedra. Entre a investigação e a prática. *Geotecnia*, 100, março 2004, pp. 81-88.
- Delgado Rodrigues, J. (2007). *Conservation of stone monuments. From diagnostic to practice*. MINBAR AL JAMIAA n°7, Actes de la RIPAM 2005, Meknès, Maroc, pp. 287-295.
- Didier, C.; Merwe, N.; Betournay, M.; Mainz, M.; Kotyrba, A.; Aydan, O.; Josien, J.P.; Song, W.K. (2008). *Mine closure and post-mining management. International state-of-the-art*. Commission on Mine Closure, International Society for Rock Mechanics.
- Duffaut, P.; Sakurai, S. (2018). *Back to Underground Reactors*. Em: Proc. of the 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10), Singapore, Z. Zhao, Y. Zhou, J. Shang (eds).
- Durrheim R.J. (2017). *Microseismic monitoring technologies for deep mining*. *Rock Mechanics and Engineering* (Ed. Feng), Volume 4, Capítulo 14, pp. 341-363, CRC Press.

- EIA (2010). *Energy in Brief*. U.S. Energy Information Administration. Acedido em 20 de abril de 2021, em: <https://geology.com/energy/shale-gas/>.
- Elmo, D.; Stead, D. (2020). Disrupting rock engineering concepts: is there such a thing as a rock mass digital twin and are machines capable of learning rock mechanics? *Slope Stability 2020*, P.M. Dight (ed.), Australian Centre for Geomechanics, Perth. doi:10.36487/ACG\_repo/2025\_34.
- Espada, M.; Muralha, J.; Lemos, J.V.; Plasencia, N.; Figueiredo, J.N.; Silva Matos, D.; Marques, J.C. (2018). *Discrete element modelling of the failure mechanisms of Foz Tua arch dam foundation*. Em: Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX – Cardoso et al. (Eds), Taylor & Francis, London, vol. 2, Capítulo 46.
- Fairhurst, C. (2010). *First Vienna-Leopold-Müller Lecture: What is the strength of a rock mass? Progress in answering Müller's (implicit) question*. In *Proceedings 5<sup>th</sup> Colloquium, Rock Mechanics–Theory & Practice*, Vienna, 26–27 November 2009, *Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik*, Band 9: 87–110.
- Fairhurst, C. (2012). *The formation of the ISRM*. In J.A. Hudson & L. Lamas (eds), *ISRM 50<sup>th</sup> Anniversary Commemorative Book 1962-2012*, chapter I, ISRM, Lisboa.
- Fairhurst, C. (2019). *Rock Engineering: Where is the Laboratory?* *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, pp. 4865–4888. doi: 10.1007/s00603-019-02019-9.
- Feng, X.T. (Ed.) (2017). *Rock Mechanics and Engineering*. Volume 1: Principles, Volume 2: Laboratory and field testing; Volume 3: Analysis, modelling & design; Volume 4: Excavation, support and monitoring; Volume 5: Surface and underground projects. CRC Press.
- Feng, X.T.; Liu, J.; Chen, B.; Xiao, Y.; Feng, G.; Zhang, F. (2017) *Monitoring, Warning, and Control of Rockburst in Deep Metal Mines*. *Engineering*, No. 3, pp. 538-545.
- Feng, X.T.; Yang, C.X. (2017). *20 years of intelligent rock mechanics*. *Rock Mechanics and Engineering* (Ed. Feng), Volume 3, Capítulo 14, pp. 425-450, CRC Press.
- Furtney, J.K.; P. Andrieux; A.K. Hall (2016). *Applications for Numerical Modeling of Blast Induced Rock Fracture*. 50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Houston, Texas, June 2016, Paper Number: ARMA-2016-621.
- Galler, R. (2017). *Excavation*. *Rock Mechanics and Engineering* (Ed. Feng), Volume 4, Capítulo 1, pp. 2-50, CRC Press.
- Garza-Cruz, T.V.; Pierce, M. (2014). *A 3DEC Model for Heavily Veined Massive Rock Masses*. Proc. 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, Alexandria, 2014, Paper 14-7660.
- GW (2021). *Geothermal Basics*. Geothermal Worldwide. Acedido em 20 de maio de 2021, em: <http://www.geothermalworldwide.com/geothermal-basic.html>.
- Habib, P.; Panet, M. (2012). *Rock Mechanics and Engineering Practice*. In J.A. Hudson & L. Lamas (eds), *ISRM 50<sup>th</sup> Anniversary Commemorative Book 1962-2012*, chapter X, ISRM, Lisboa.
- Harrison, J.P. (2019). *Challenges in Determining Rock Mass Properties for Reliability-Based Design*. *Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, Taipei. Ching, J.; Li, D.Q e Zhang, J. (Eds), Research Publishing, Singapura.
- Heusermann, S.; Fahland, S.; Eickemeier, R. (2017). *Geomechanical stability and integrity of nuclear waste disposal mines in salt structures*. Em: *Rock Mechanics and Engineering*, Volume 2: Analysis, Modeling and Design, X.T. Feng (ed.), CRC Press.

- Hoek, E. (1994). *The challenge of input data for rock engineering*. Letter to the editor, ISRM News Journal Vol. 2, N. 2. International Society for Rock Mechanics.
- Hoek, E. (2007). *The development of rock engineering*. In Practical rock engineering, chapter 1. RocScience, em: <http://www.rocsience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>.
- Hoek, E.; Brown, E.T. (2019). *The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, pp. 445-463.
- Holing, C.S. (1978). *Adaptive environmental assessment and management*. John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- Hudson, J.A. (2012) *The future for rock mechanics and the ISRM*. In J.A. Hudson & L. Lamas (eds), ISRM 50<sup>th</sup> Anniversary Commemorative Book 1962-2012, chapter XII, ISRM, Lisboa.
- Hudson, J.A. (Ed.) (1993). *Comprehensive rock engineering: principles, practice & projects*. Volume 1 Fundamentals; Volume 2 Analysis and design methods; Volume 3 Rock testing and site characterization; Volume 4 Excavation, support and monitoring; Volume 5 Surface and underground project case histories. Pergamon Press.
- Hudson, J.A.; Tsang, C.F.; Jing, L. (2017). Coupled THMC modeling for safety assessment of geological disposal of radioactive wastes: The DECOVALEX project (1992–2015). Rock Mechanics and Engineering (Ed. Feng), vol. 3, chapter 1, CRC Press.
- Ivars, D.M.; Pierce, M.E.; Darcel, C.; Reyes-Montes J.; Potyondy, D.O.; Young R.P.; Cundall, P.A. (2011). *The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling*. Int J Rock Mech Min Sci, 48, pp. 219–244.
- Jaboyedoff, M.; Abellán, A.; Carrea, D.; Derron, M.H.; Matasci, B.; Michoud, C. (2018). *Mapping and Monitoring of Landslides Using LIDAR*. Em: Natural Hazards: Earthquakes, Volcanoes, and Landslides. CRC Press.
- Jackson, M.; Marra, F. (2006). *Roman Stone Masonry: Volcanic Foundations of the Ancient City*. American Journal of Archaeology, 110, n° 3, pp. 403-436. doi: 10.3764/aja.110.3.403
- Jing, Z.; Willis-Richards, J.; Watanabe, K.; Hashida, T. (2000). *A three-dimensional stochastic rock mechanics model of engineered geothermal systems in fractured crystalline rock*. Journal of Geophysical Research Atmospheres 105, B10, pp. 23663-23680. doi: 10.1029/2000JB900202.
- Kim, D.H.; Balasubramaniam, A.S.; Gratchev, I. (2018). *Application of Photogrammetry and Image Analysis for Rock Slope Investigation*. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 49 No. 2.
- Lamas, L. (2012). *The ISRM founding documents*. In J.A. Hudson & L. Lamas (eds), ISRM 50<sup>th</sup> Anniversary Commemorative Book 1962-2012, chapter II, ISRM, Lisboa.
- Lanari, R.; Berardino, P.; Bonano, M.; Casu, F.; Manconi, A.; Manunta, M.; Manzo, M.; Pepe, A.; Pepe, S.; Sansosti, E.; Solaro, G.; Tizzani, P.; Zeni, G. (2010). *Surface displacements associated with the L'Aquila 2009 Mw 6.3 earthquake (central Italy): New evidence from SBAS-DInSAR time series analysis*, Geophysical Research Letters, 37, L20309. doi: 10.1029/2010GL044780.
- Lawal, A.I.; Kwon, S. (2021). *Application of artificial intelligence to rock mechanics: An overview*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13, pp. 248-266. doi: 10.1016/j.jrmge.2020.05.010.
- Lemos, J.V.; Lamas, L. (2013). *Contribuição de Manuel Rocha para a mecânica das rochas e as fundações de barragens*. LNEC, Lisboa.

- Liu, X.; Han, G.; Wang, E.; Wang, S.; Nawnit, K. (2018). *Multiscale hierarchical analysis of rock mass and prediction of its mechanical and hydraulic properties*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10, pp. 694-702. doi: 10.1016/j.jrmge.2018.04.003.
- Lorig, L.J.; Varona, P.M. (2013). *Guidelines for numerical modelling of rock support for mines*. Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Y. Potvin e B. Brady (eds). doi: 10.36487/ACG\_rep/1304\_04\_Lorig.
- Low, B.K. (2019). *Rock Engineering Insights from Reliability Analysis to Improve Eurocode 7 Design Approach*. Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR), Taipei. Ching, J.; Li, D.Q e Zhang, J. (Eds), Research Publishing, Singapura.
- Masi, F.; Stefanou, I.; Vannucci, P.; Maffi-Berthier, V. (2021). *Thermodynamics-based Artificial Neural Networks for constitutive modelling*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 147, 104277. doi: 10.1016/j.jmps.2020.104277.
- Mello Mendes, F. (1967). *Mecânica das Rochas*. Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico, 541 p., Lisboa.
- Meng, G.T.; Xi, J.R.; Shi, A.C.; Detournay, C. (2020). *Griddle generation of FLAC3D models for the Baihetan Dam project*. Em: Applied Numerical Modeling in Geomechanics – 2020 – Billiaux, Hazzard, Nelson & Schöpfer (eds.). 2020 Itasca International, Inc.
- Morgenroth, J.; Khan, U.T.; Perras, M.A. (2019). *An Overview of Opportunities for Machine Learning Methods in Underground Rock Engineering Design*. Geosciences, 9, 504. doi:10.3390/geosciences9120504
- Müller, L. (1963). *Der Felsbau*. Ferdinand Enker Verlag, Stuttgart.
- Nayeri, S.A. (2012) *Seismic Assessment of the Roman Temple in Évora, Portugal*. Mestrado Europeu em Análise Estrutural de Monumentos e Construções Históricas, Universidade do Minho, Guimarães.
- Pan, X.D.; Hudson, J.A. (1988). *A Simplified Three-Dimensional Hoek-Brown Yield Criterion*. In: Romana M. (ed) Rock mechanics and power plants, A.A. Balkema, Rotterdam, pp 95–103.
- Pellet, F.L. (2017). *Rock mechanics is meeting the challenge of geo-energies*, Procedia Engineering, Symposium of the International Society for Rock mechanics, Eurock 2017. Elsevier.
- Pellet, F.L. (2018). *Rock Mechanics and Environmental Engineering for Energy and Geo-resources*. Symposium of the International Society for Rock mechanics, Eurock 2018. CRC Press.
- Posey, B. (2021). *Smart sensor definition*. TechTarget IoT Agenda. Acedido em 20 de maio de 2021, em: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/smart-sensor>.
- Psycharis, I.N.; J.V. Lemos; D.Y. Papastamatiou; C. Zambas; C. Papantonopoulos (2003). *Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, pp. 2063-2084. doi: 10.1002/eqe.315.
- Resende, R.; Mata, J.; Gomes, J.; Neves, J.P. (2008). *Vibration control of underwater blasting works using artificial neural networks*. 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
- Reynolds, P. (2017). *Musk talks tunnelling concepts*. TunnelTalk, May 2017. Acedido em 20 de maio de 2021, em: <https://www.tunneltalk.com/Discussion-Forum-May2017-Elon-Musk-talks-tunnelling.php>.

- Rocha, M. (1964). *Mechanical Behaviour of Rock Foundations in Concrete Dams*. Proc. 8th International Congress on Large Dams, vol. I, Edinburgh, pp. 785-831. LNEC, Memória nº 244.
- Rocha, M. (1971a). *A Mecânica das Rochas*. Revista Geotecnia nº 1, pp. 7-27. SPG, Lisboa.
- Rocha, M. (1971b). *Mecânica das Rochas*. Coleção Cursos e Seminários CS 5, 1ª edição, 4 volumes, 448 p., LNEC, Lisboa.
- Roque, D. (2020). Displacement Measurement through InSAR Geodesy for Structural Health Monitoring. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.
- Rostami, J. (2021). Space, Extraterrestrial, Asteroid and Lunar Mining. Colorado School of Mines.
- Shimuzu, N.; Nakashima, S. (2017). *Review of GPS displacement monitoring in rock engineering*. Rock Mechanics and Engineering (Ed. Feng), Volume 4, Capítulo 19, pp. 593-626, CRC Press.
- Sjöberg, J. (2020). *Solving rock mechanics issues through modelling: then, now, and in the future?*. In J Wesseloo (ed.), Proceedings of the Second International Conference on Underground Mining Technology, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 27-46. doi: 10.36487/ACG\_repo/2035\_0.02.
- Song, G.; Li, W.; Wang, B.; Ho, S.C.M. (2017). *A Review of Rock Bolt Monitoring Using Smart Sensors*. Sensors, 17, 776. doi: 10.3390/s17040776.
- Sousa, L.R.; Miranda, T.; Sousa, R.L.; Tinoco, J. (2018). *Deep Underground Engineering and The Use of Artificial Intelligence Techniques*. International Journal of Earth & Environmental Sciences Volume 3, 158. doi: 10.15344/2456-351X/2018/158.
- SPG (2021). *Sobre a Sociedade Portuguesa de Geotecnia*. Acedido em 15 de abril de 2021, em: <https://www.spgeotecnia.pt/pages/1>.
- Starfield, A.M.; Cundall, P.A. (1988). *Towards a methodology for rock mechanics modelling*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 25, pp. 99-106. doi: 10.1016/0148-9062(88)92292-9.
- Talobre, J. (1957). *La mécanique des roches appliquée aux travaux publics*. Dunod, Paris.
- Ulusay, R.; Gercek, H. (2017). *Introductory longer review for rock mechanics testing methods*. Em: Rock Mechanics and Engineering, Volume 2: Laboratory and Field Testing, X.T. Feng (ed.), CRC Press.
- Wang, J., Feng, X.T., Hudson, J. (2017). *Underground research laboratories*. Em: Rock Mechanics and Engineering, Volume 2: Laboratory and Field Testing, X.T. Feng (ed.), CRC Press.
- Yang, Y.W.; Bhalla, S.; Wang, C.; Soh C.K., Zhao, J. (2007). *Monitoring of rocks using smart sensors*. Tunnelling and Underground Space Technology 22, pp. 206–221.
- Zhao, J.; Zheng, Y; Zhang, Q.; Zhao, X. (2018). *Rock Fracturing by Low Power Microwave Treatment – Observations, Mechanisms and Applications*. Em: Proc. of the 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10), Singapore, Z. Zhao, Y. Zhou, J. Shang (eds).