

A MECÂNICA DAS ROCHAS**

Rock Mechanics

Por
MANUEL ROCHA *

RESUMO : Refere-se brevemente o aparecimento e a evolução da mecânica das rochas como disciplina independente, e mencionam-se as suas afinidades com outras disciplinas. São apresentadas as motivações do rápido desenvolvimento do novo ramo da mecânica, citando-se exemplos típicos das suas numerosas aplicações no campo da engenharia e das geociências. Termina-se com a definição do âmbito da mecânica das rochas.

SYNOPSIS : The advent and evolution of rock mechanics as an independent subject are briefly described as well as its affinities with other subjects. The reasons for the rapid growth of this new branch of mechanics are stated, and some typical instances of its numerous applications in the field of engineering and geosciences are given. The paper ends with the definition of the scope of rock mechanics.

1 - CRIAÇÃO E ESTADO ACTUAL DA MECÂNICA DAS ROCHAS

A mecânica das rochas desenvolveu-se sobretudo nos dois últimos decénios, e a própria designação desse novo ramo da mecânica apareceu somente por volta de 1955. As primeiras obras em que se procurou codificar os conhecimentos existentes foram a de Talobre intitulada "La mécanique des roches appliquée aux travaux publics", editada em 1957, e a do Professor Leopold Müller que veio a lume em 1963 sob o título "Der Felsbau", que se pode traduzir por "A construção em rocha".

A mecânica das rochas encontra-se presentemente em plena expansão, tal como a mecânica dos solos há cerca de 30 anos. O progresso dos conhecimentos.

*Director do LNEC, Professor Catedrático do IST.

**Este artigo constitui a matéria da lição da introdução da Cadeira de Mecânica das Rochas, recentemente criada no Instituto Superior Técnico.

está-se processando rapidamente, podendo mesmo ser bem identificada à escala de um ano ou dois, com ampla repercussão na concepção, projecto e execução de trabalhos em que é necessário ter em consideração o comportamento dos maciços rochosos, sejam fundações, túneis e outras aberturas, taludes, poços e furos, etc. Está-se ultrapassando a fase da solução empírica dos problemas para a do seu tratamento apoiado em previsão quantitativa. É bem ilustrativa do empirismo que reinava a afirmação que o célebre geólogo Lugeon faz na sua obra clássica "Barrages et Géologie", publicada em 1933, ao discutir o problema da definição da profundidade a atingir por uma fundação: "C'est une question de jugement, de bon sens qui ne peut être formulée". Hoje, um problema de fundação sobre um maciço rochoso pode ser tratado com inteira objectividade.

O célere progresso que se está verificando resulta essencialmente do esforço de investigação, empreendido sobretudo no último decénio, e não de a cumulação de experiência resultante de maior volume e responsabilidade das o bras executadas. Aliás, sem desejar minorar o valor da experiência colhida nas realizações, pode afirmar-se de um modo geral que a sua contribuição é bem modesta em face da que provém da investigação.

Segundo inquérito empreendido em 1966 pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, já então existiam 150 grupos de investigação, espalhados por 28 países e ocupando cerca de 2 000 pessoas. No Laboratório Nacional de Engenharia Civil dispomos presentemente de cerca de 50 pessoas, das quais 15 universitários, ocupadas em estudos no domínio da mecânica das rochas. É um dos grupos mais volumosos actualmente existentes e dispondo de meios mais completos.

É oportuno mencionar que a Sociedade Internacional tomou a iniciativa de empreender uma tarefa que consideramos de grande importância: a definição das linhas de investigação que se afiguram mais promissoras, do ponto de vista da projecção científica e económica que terão os resultados.

No tocante à juventude da mecânica das rochas é significativo referir que a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas foi constituída somente em 1962 e que teve o seu primeiro congresso em Lisboa, em 1966. Este congresso marcou um passo decisivo na consagração da nova disciplina e nele participaram cerca de 800 pessoas e foram apresentados cerca de 250 trabalhos, muitos de interesse excepcional.

No respeitante a revistas - elemento essencial da estruturação de um

domínio de conhecimentos - são actualmente publicadas duas: a da Sociedade Internacional, designada "Rock Mechanics",* e o "International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences", editada em Inglaterra. Além disso, numerosas outras revistas publicam com frequência trabalhos sobre a mecânica das rochas.

Dada a importância primordial do ensino na difusão dos conhecimentos, a Sociedade Internacional lançou em 1969 um pormenorizado inquérito destinado à averiguação da situação actual do ensino da mecânica das rochas nos diversos países. Presentemente são ainda pouco numerosos os países em que as escolas superiores oferecem cadeiras específicas de mecânica das rochas, sendo esta em regra ensinada dentro de outras cadeiras, em especial de mecânica dos solos. A finalidade que a Sociedade procura alcançar é o estabelecimento de recomendações em plano internacional sobre a natureza e desenvolvimento dos cursos de mecânica das rochas que devem ser ensinados nos vários ramos de engenharia e das geociências.

Pode afirmar-se que a mecânica das rochas está atingindo, como disciplina independente, plena maturidade.

2 - RELAÇÕES COM OUTRAS DISCIPLINAS

Tal como sempre acontece na formação de uma nova disciplina, também a mecânica das rochas começou por agregar e conferir unidade a conhecimentos respeitantes a maciços rochosos, ou com interesse para a previsão do seu comportamento, que se encontravam dispersos por outras disciplinas e aos conhecimentos cuja aparição determinou a própria criação desse novo ramo da mecânica. Entre essas disciplinas afins, destacam-se a petrografia, a geologia, em especial a geologia aplicada, e a mecânica dos solos, merecendo ainda ser referidas a teoria da elasticidade, a reologia e a hidráulica dos meios porosos e fracturados.

Poderá perguntar-se porque aparece tão tarde a mecânica das rochas. Consideramos que são duas as razões: a primeira, a extrema complexidade dos fenómenos em jogo e, a segunda, o facto de as formações rochosas exibirem em regra capacidade resistente satisfatória no respeitante às realizações correntes, quer do engenheiro de minas quer do engenheiro civil. Assim se

*Até 1969, inclusive, esta revista tinha a designação "Rock Mechanics and Engineering Geology".

compreende que a mecânica dos solos tenha sido constituída em primeiro lugar, pois os fenómenos são menos complexos e os solos levantam problemas muito mais delicados, por exibirem com frequência resistências muito baixas e elevadas deformabilidades. É oportuno referir que há formações geológicas cujo comportamento é intermediário entre o das rochas e dos solos e, além disso, são frequentes os problemas em que estão simultâneamente envolvidas formações rochosas e formações constituídas por solos.

A habitual interpenetração das fronteiras de disciplinas vizinhas é particularmente acentuada no caso das mecânicas das rochas e dos solos. Um problema ainda hoje em aberto é o da viabilidade e interesse de ser estabelecida uma síntese entre as duas disciplinas. O debate de tal problema implica a consideração da possibilidade de estabelecimento de uma disciplina unitária, e não de um mosaico de conhecimentos extraídos de uma e outra disciplina, e, além disso, é necessário ter em atenção a organização das actividades profissionais que se servem das mecânicas dos solos e das rochas. Assim, nos países da vanguarda do desenvolvimento tecnológico e de grande dimensão económica as condições são mais favoráveis à especialização e portanto, no caso em consideração, à constituição de grupo ou grupos profissionais que se ocupem somente de obras em maciços rochosos, o que estimula a constituição da disciplina mecânica das rochas. Um outro factor de natureza geral que influencia a organização do saber por disciplinas é a capacidade intelectual individual, pois está implícito ao organizar-se uma disciplina que os conhecimentos nela incluídos podem ser dominados por um indivíduo.

Os problemas respeitantes aos maciços rochosos têm sido tradicionalmente tratados pelos geólogos e ainda hoje se verifica com frequência, mesmo em países da vanguarda, os engenheiros deixarem completamente a esses especialistas a apreciação de propriedades e a previsão do comportamento dos maciços rochosos. Apesar de reconhecermos que é imprescindível a colaboração do geólogo, como teremos ocasião de concretizar mais adiante, consideramos que tal apreciação deve hoje ser conduzida pelo engenheiro especializado em mecânica das rochas. De outro modo, corre-se o risco de não serem adoptadas as soluções mais adequadas, em especial por não ser tirado mais amplo partido das propriedades dos maciços rochosos, como se compreende quando as decisões são tomadas com apoio somente no património de conhe

cimentos, de natureza essencialmente qualitativa, da geologia aplicada.

Dadas as afinidades existentes entre a mecânica das rochas e a dos solos e o facto de esta última estar mais difundida, observa-se muitas vezes a tendência para os problemas de mecânica das rochas serem tratados por especialistas de mecânica dos solos, com nítido prejuízo quer na formulação dos problemas quer na sua resolução. Compreende-se que esta situação seja muito frequente pois a maior parte dos interessados na mecânica das rochas são oriundos da mecânica dos solos, uma vez que só nos últimos anos foi instituído o ensino universitário da mecânica das rochas.

Quanto à formação de especialistas capazes de tratarem os problemas dos maciços rochosos, uma solução que também está sendo adoptada nos Estados Unidos, e nalguns outros países, consiste na formação de engenheiros geólogos ("geological engineer"), que seria preferível designar por engenheiros geotécnicos, cuja preparação é centrada nas geociências, nas quais se podem incluir a mecânica dos solos e das rochas. Observa-se que tal especialização é diferente da geologia aplicada ("engineering geology").

Como acontece cada vez mais com o desenvolvimento e diversificação dos conhecimentos humanos, são múltiplas as possibilidades que se oferecem de arrumação do saber com vista ao estabelecimento de áreas de especialização profissional adaptadas às diversas famílias de problemas a resolver. O que consideramos importante frisar é que, apesar da diversificação crescente de essas áreas de especialização, a resolução dos problemas tecnológicos - e tanto mais quanto maior for a sua envergadura e a responsabilidade envolvida - só pode aproveitar todos os conhecimentos existentes desde que nela se envolvam diversos especialistas. É assim que no domínio de que nos estamos ocupando é frequente ter de recorrer a grupos em que participam geólogos e engenheiros especializados em mecânica dos solos e em mecânica das rochas.

3 - MOTIVAÇÕES DO RÁPIDO DESENVOLVIMENTO

A rapidíssima expansão da mecânica das rochas é consequência não só dos prementes e muitos importantes problemas postos por diversos ramos da tecnologia - o que escorvou intensa actividade de investigação - mas também do progresso científico geral, o qual pôs à disposição desse novo ramo da mecânica preciosos conhecimentos e técnicas de medida que ele está assimilando e explorando.

Vejamos quais têm sido as motivações que, nos vários domínios de aplicação, têm contribuído para o florescimento da mecânica das rochas.

3.1 - No que se refere à engenharia civil a expansão da mecânica das rochas tem sido sobretudo estimulada pela crescente importância, dificuldade e responsabilidade das realizações. Assim tem acontecido em relação às barragens, cuja altura está atingindo os 300 m - como é o caso da barragem de Inguri, no Cáucaso - e que têm por vezes de ser fundadas sobre formações com propriedades precárias. É paradigmática das dificuldades de fundação que se podem apresentar o trecho em abóbada da barragem do Alto Rabagão (Fig.1). Graças a exaustivos estudos feitos sobre o comportamento do maciço rochoso de fundação e à simulação das suas propriedades em modelos, foi possível aceitar para a fundação na margem esquerda um maciço granítico cuja deformabilidade crescia com a cota (Fig.2) atingindo o módulo de elasticidade, E_f , na parte superior, onde o granito se encontrava decomposto, o valor muitíssimo baixo de cerca de $10\,000\text{ kgf/cm}^2$ (Rocha et al., 1969)*, isto é, $\frac{1}{20}$ do módulo de elasticidade do betão da barragem, E_c .

O confronto entre os deslocamentos da estrutura previstas pelos modelos e os obtidos na observação da obra conduziu a um acordo excelente, como se verá adiante (Rocha et al., 1970).

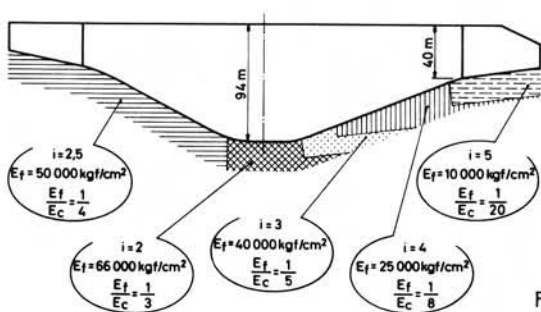
A construção de obras subterrâneas com dimensões cada vez mais importantes e a maiores profundidades está também desafiando a expansão da mecânica das rochas.

Referimos o caso do túnel rodoviário do Monte Branco, entrado em serviço em 1965, que é o túnel mais profundo construído até hoje, pois o recobrimento atinge 2 500 m (Fig.3). A tal profundidade desenvolvem-se tensões elevadíssimas na vizinhança do túnel as quais determinavam o esmagamento da rocha, apesar da sua elevada resistência, próxima de 1000 kgf/cm^2 , o que levantou sérias dificuldades no decorrer da abertura (Fig. 4). No tocante a túneis é digno de destaque o incremento que se está verificando em todo o Mundo do volume global das realizações. Assim, num relatório apresentado em reunião internacional convocada em 1970 pela Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) conclui-se que no próximo decénio se abrirão

* Ver referências bibliográficas no final do texto.



Fig.1



Figs 2



Fig. 3

mais de 600 000 km de túneis envolvendo um volume de escavação superior a $6\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ e um investimento de cerca de $1\,500 \times 10^6$ contos. Tal importância das obras de túneis está estimulando a intensificação da investigação, em especial com vista ao desenvolvimento de métodos expeditos para a sua abertura por meio de máquinas rotativas, mesmo para rochas de elevada resistência (Fig.5).

A construção de centrais eléctricas subterrâneas de potência cada vez mais elevada e exigindo portanto a execução de cavernas de maiores dimensões está também impondo o aperfeiçoamento da mecânica das rochas. Mencionarei a central de Cabora-Bassa, em construção, que exige, além da grande caverna para os grupos, numerosas outras grandes aberturas, como se pode ver na fig.6.

Um outro tipo de obras subterrâneas cada vez mais comum consiste em aberturas destinadas a armazenamento de líquidos e outros produtos, como por exemplo detritos radioactivos. Tem especial interesse o armazenamento de líquidos a baixas temperaturas uma vez que a água contida nas fracturas do maciço rochoso congela, obtendo-se assim automaticamente a estanquidade do reservatório. Enquanto neste caso é necessário ter em consideração a influência das baixas temperaturas no comportamento da rocha, no caso do armazenamento de detritos radioactivos a libertação de calor pode instalar temperaturas elevadas no maciço influenciando as suas propriedades, em especial acentuando a fluência.

Outro domínio em expansão que também cada vez mais exigirá da mecânica das rochas é o urbanismo subterrâneo, isto é, a exploração, cuja necessidade e interesse cada vez mais se reconhece, do espaço urbano se desenvolver em profundidade.

Como realização que está pondo à prova a capacidade da mecânica das rochas no respeitante à precisão das suas previsões, citamos o novo ciclotrão europeu, cuja localização está presentemente em estudo, sendo a região de Focant, na Bélgica, um dos locais em consideração, fig. 7. Implica a construção de um túnel circular, a 30 m de profundidade, com um diâmetro de 6 m e um perímetro de 7,5 km, exigindo-se que, ao longo de um ano, o assentamento diferencial entre dois pontos do túnel afastados de 100 m não ultrapasse 0,1 mm.

Compreende-se a extrema precisão exigida nos estudos do maciço rochoso para poder assegurar a verificação de tal condição.

No campo da engenharia civil um factor que tem chamado muito a atenção para a necessidade de um melhor conhecimento do comportamento dos maciços ro-



Fig. 4

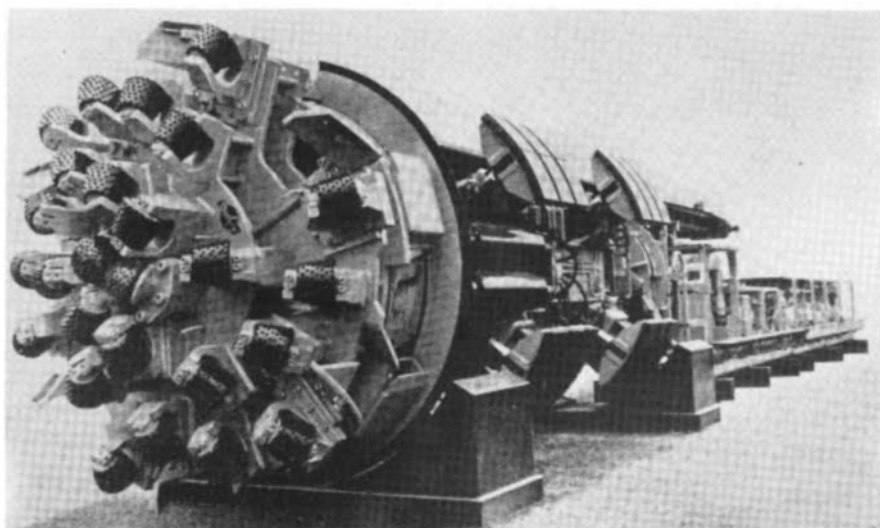


Fig.5

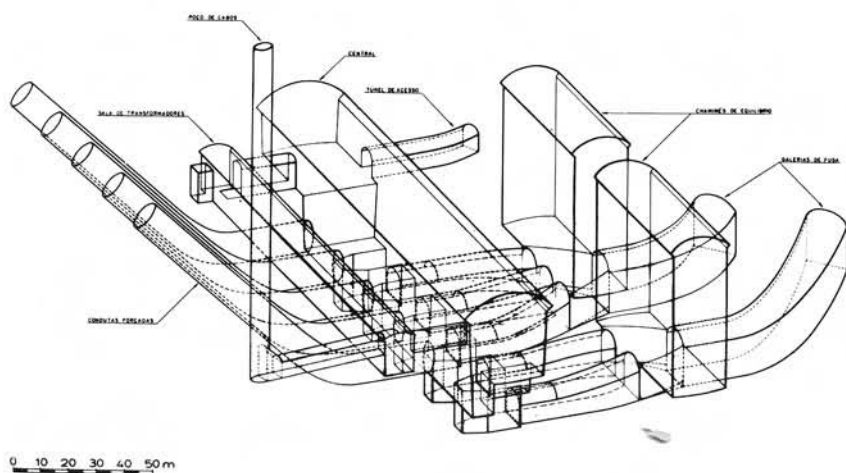


Fig.6

chosos tem sido a ocorrência de alguns acidentes muito graves em obras hidráulicas. Refiro o acidente muito conhecido da barragem arco de Malpasset, em França, que provocou 350 mortes (Fig. 8). O acidente foi provocado por comportamento deficiente da fundação, tendo-se destacado uma cunha na margem esquerda, ocorrência que analisaremos mais tarde. Outro acidente ainda mais grave, não só do ponto de vista de vidas, pois provocou 2000 mortes, mas também da perda de valores, foi o de Vajont, em Itália (Fig. 9). O acidente foi provocado pelo escorregamento de uma vertente que expulsou grande massa de água do reservatório, a qual passou sobre a barragem e foi canalizada pela estreitíssima garganta de jusante indo destruir quase completamente a povoação de Longarone. A barragem, com 260 m de altura - quando do acidente a mais alta do Mundo -, comportou-se de maneira satisfatória, apesar das solicitações devidas ao galgamento e à pressão das terras que preenchem o reservatório qu se até ao coroamento.

3.2 - No que respeita a engenharia de minas, o desenvolvimento da mecânica das rochas tem sido sobretudo estimulado pelas preocupações gerais de melhoria da economia e das condições de segurança das explorações mineiras, e ain da pelos problemas postos pela crescente profundidade atingida pelas minas, tendo já sido ultrapassados os 3000 m. Nota-se que a abertura de minas foi a primeira actividade em que o homem teve de encarar os problemas do comportamento dos maciços rochosos. Apesar disso, grande parte das explorações minei ras ainda hoje são guiadas por conhecimentos exclusivamente empíricos.

Nas explorações mineiras a céu aberto um problema que por vezes assume a maior acuidade e está determinando aprofundadas investigações é o da estabilidade de taludes, em especial quando se trata de taludes de natureza permanente aos quais se deseja dar a máxima inclinação, por razões de economia.

Nas explorações mineiras subterrâneas com aberturas de carácter permanente nas quais são deixados pilares ou paredes do próprio minério para suportar o terreno sobrejacente, a economia da exploração impõe a averiguação exaustiva da secção mínima que pode ser dada a esses elementos resistentes, a fim de minorar a perda de minério (Fig. 10).

Na engenharia de minas a capacidade resistente dos maciços rochosos é em regra explorada muito mais exaustivamente do que nas obras de engenharia civil. É frequente trabalhar-se na vizinhança da rotura, o que impõe mais profundo conhecimento dos fenómenos envolvidos na resistência dos maciços



Fig. 7

Fig. 8



Fig. 9

Comprimento total do escorregamento = 1850 m



Barragem

rochosos. Por vezes nas minas trabalha-se mesmo com os maciços já em franca rotura, como acontece na exploração de uma camada de minério em que as formações sobrejacentes são suportadas por prumos metálicos (Fig.11). Na engenharia de minas interessa mesmo conhecer o que se passa para além da rotura, como por exemplo as dimensões dos blocos determinadas pela rotura e as suas acções sobre suportes.

É oportuno referir que os problemas postos pela engenharia civil e pela engenharia de minas à mecânica das rochas se apresentam em regra com feição diferente. Na verdade, enquanto em cada exploração mineira é possível ir colhendo progressivamente um conhecimento empírico sobre o comportamento do conhecimento de um novo local, em regra com limitações no respeito ao grau de desenvolvimento dos estudos a empreender. Daqui resulta interessar muito à engenharia civil o conhecimento de leis de âmbito geral e de métodos para a determinação das propriedades das formações envolvidas em cada obra. Por outro lado, a engenharia de minas exige, para cada caso, um conhecimento mais aprofundado do comportamento das formações, pois trabalha com coeficientes de segurança muito mais baixos do que os exigidos pelas obras de engenharia civil, dado o carácter permanente destas obras e a eleva da segurança a garantir aos seus utentes. Em resumo, num domínio exige-se previsão com maior precisão numa situação melhor conhecida enquanto no outro basta, em regra, precisão modesta mas em contrapartida as situações são menos conhecidas.

3.3 - A engenharia do petróleo tem contribuído para a dinamização da mecânica das rochas através da sua necessidade de executar economicamente furos de grande profundidade, que já ultrapassam os 8 000 m. Com vista a investigações sobre a crosta terrestre, está hoje sendo debatida a abertura de furos para atingirem profundidades da ordem dos 15 000 m.

As furações profundas põem dois problemas: o das elevadíssimas tensões que ocorrem na sua vizinhança poderem provocar o colapso da rocha e o da economia da operação de furação. Este exige a investigação do fenómeno da desagregação da rocha sob a acção das ferramentas de sondagem usadas. Tal fenómeno faz parte de um capítulo recente e em rápida expansão da mecânica das rochas designado por cominuição, o qual se ocupa de todas as formas de extração e fragmentação das rochas, desde o desmonte por explosivos, à britagem, à desagregação e à moagem.

Fig.10

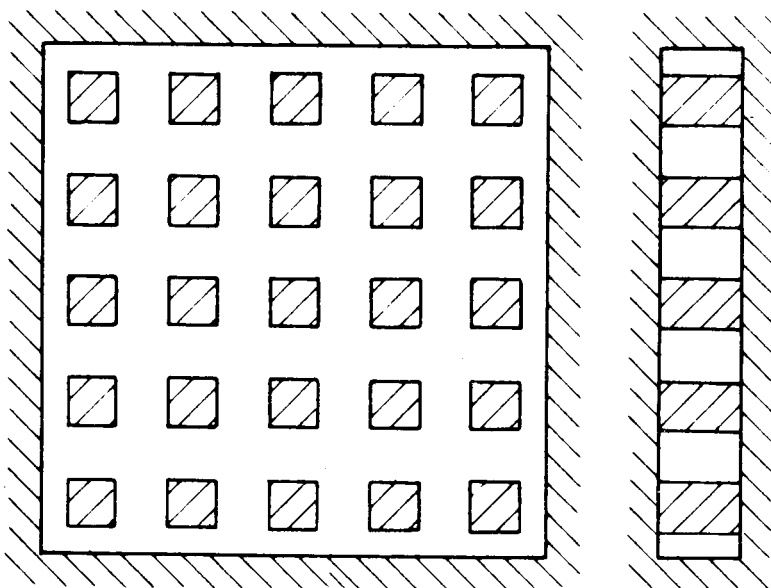


Fig.11

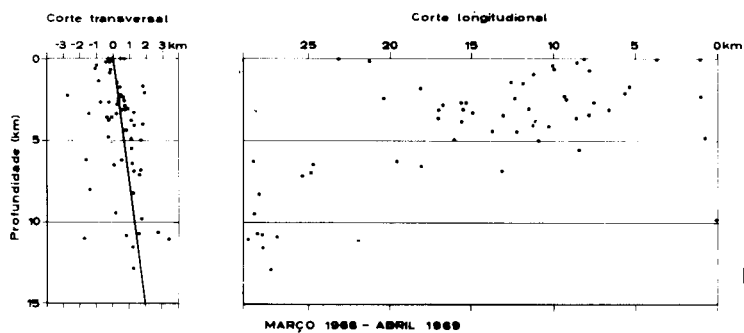
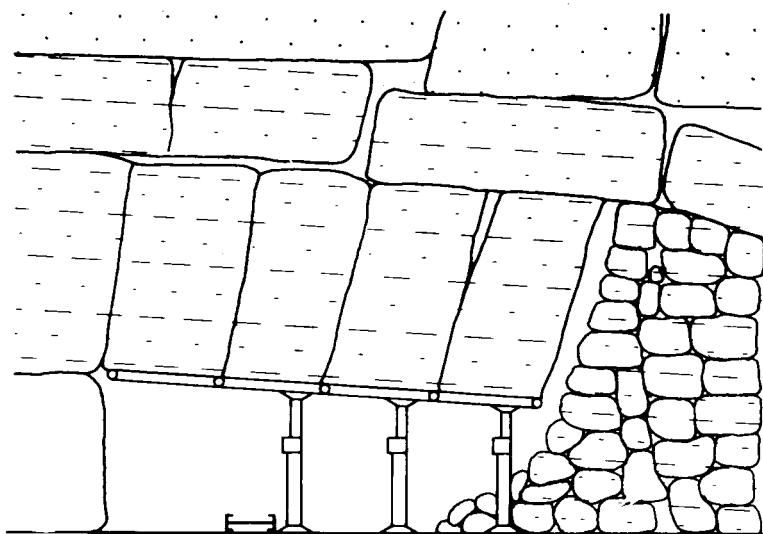


Fig. 12

3.4 - Finalmente, no respeitante às geociências, a geologia põe à mecânica das rochas o problema, tão importante, da interpretação em termos mecânicos dos fenómenos de deformação e de rotura da crosta terrestre, tais como dobramentos, falhas e diaclases. E é oportuno referir que apesar de as formações rochosas exibirem, pode dizer-se sempre, diaclases, não existe ainda hoje explicação universalmente aceite sobre a sua génese.

A interpretação mecânica dos fenómenos da geologia tem feito grandes progressos. A principal dificuldade com que se luta é a caracterização do comportamento das rochas submetidas a estados de tensão actuando durante tempos à escala geológica, o que obriga extrapolações controversas dos resultados obtidos em laboratório. Outra dificuldade encontrada nessa caracterização resulta da necessidade de considerar temperaturas e estados de tensão muito elevados, tal como ocorre em profundidade na crosta terrestre. Tal tem estimulado um apreciável volume de investigação experimental do comportamento, sob tais condições, de rochas e também dos cristais que as constituem.

A sismologia também está estimulando o desenvolvimento da mecânica das rochas ao procurar investigar os fenómenos envolvidos na ocorrência de sismos e, nos últimos anos, na busca de métodos para a sua previsão.

Citamos as observações que estão sendo feitas dos movimentos da muito conhecida falha de San Andreas, na Califórnia, que é a principal responsável pela elevada sismicidade desta região. A observação de deslocamentos, feita a partir das estações situadas a cerca de 10 km de distância da falha, mostram a existência de um movimento paralelo à falha de cerca de 4 cm por ano na zona em observação, que é próxima de São Francisco. Além disso, numerosas estações sísmicas situadas na vizinhança da falha permitem fazer uma determinação muito precisa da posição dos hipocentros, isto é, dos pontos de onde irradiam os sismos, registando-se cerca de uma centena de choques por mês. Como se vê na fig. 12 os hipocentros encontram-se a profundidades relativamente pequenas, de cerca de 2 a 15 km, concentrando-se em certas zonas do plano da falha, que é aproximadamente vertical. Está-se em face de movimento de duas placas de pequena espessura - cerca de 15 km - em relação ao comprimento da falha, que é superior a um milhar de quilómetros, e pensa-se que sismos importantes virão a ocorrer nas zonas onde não se dão os sismos frequentes, isto é, ocorrerão nas zonas onde está armazenada energia de deformação e não naquelas onde se está libertando sob a forma de choques sísmicos de fraca intensidade. Consideramos que constituirá contribuição fundamental

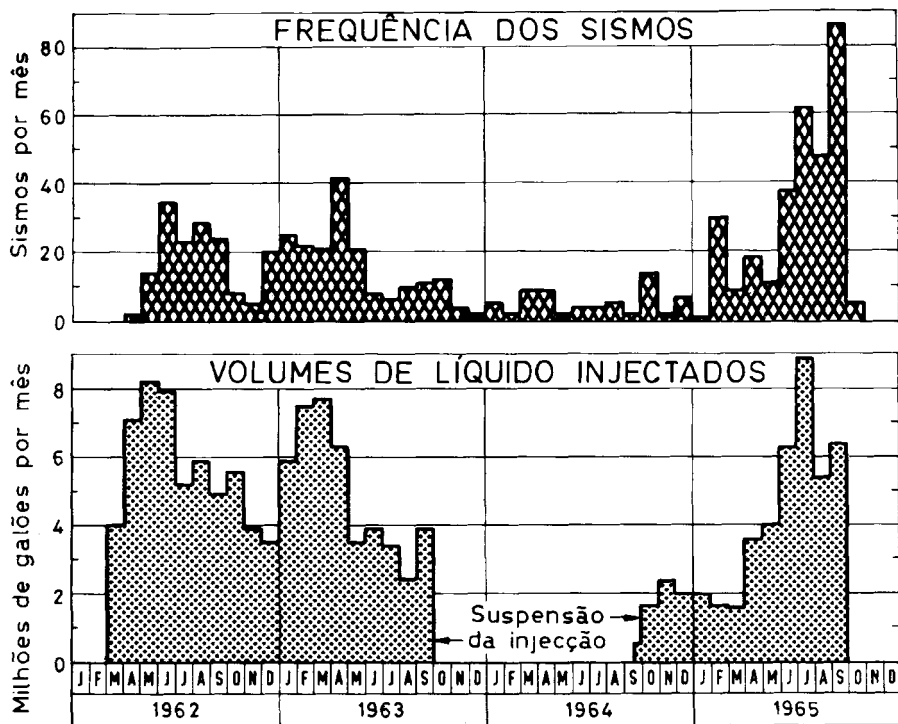


Fig. 13

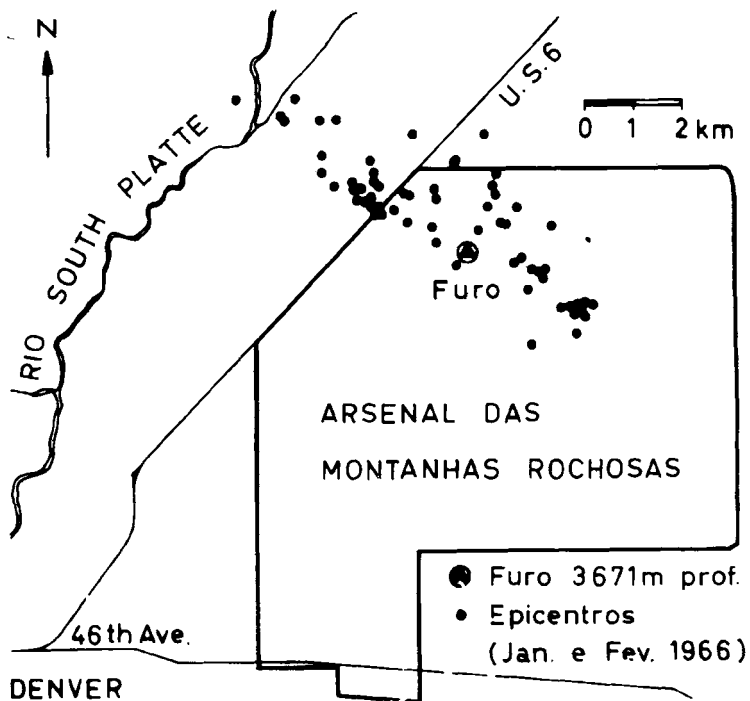


Fig. 14

para a previsão da ocorrência de sismos a determinação do estado de tensão da crosta na vizinhança das falhas activas, o que temos a intenção de fazer, com técnica que desenvolvemos recentemente e que será apresentada mais tarde. O conhecimento do campo de tensões associado ao conhecimento das condições de rotura dos materiais da caixa da falha permitirá, em princípio, a previsão de sismos.

O facto de ter sido observado, no campo de ensaios do estado de Nevada, nos Estados Unidos, que explosões nucleares provocam escorregamentos em falhas - foram observados escorregamentos de dezenas de centímetros em falhas situadas até alguns quilómetros do ponto de explosão - fez nascer a ideia de provocar deliberadamente a libertação de energia em falhas activas por meio de explosões nucleares, isto é, provocar sismo num dado momento, o que permitirá às populações tomar precauções para a sua segurança.

Sismos que ocorreram nos últimos anos na região da cidade de Denver (Healy et al. 1968), Colorado, sugerem outra via para provocar a libertação de energia acumulada em falhas. Na verdade, esses sismos foram provocados pela injeção de líquido num profundo furo de sondagem, como é claramente posto em evidência pela forte correlação, apresentada na fig. 13, entre a frequência dos choques sísmicos e os volumes de líquido injectados no furo. Os epicentros determinados situam-se ao longo de uma falha que existia na vizinhança do furo que atingia a profundidade de cerca de 3700 m, (Fig. 14). A interpretação mais plausível da ocorrência dos sismos é a seguinte: o líquido injectado instalou pressões intersticiais na caixa da falha as quais reduziram o valor da tensão normal efectiva actuante no plano da falha, o que teria permitido que a tensão tangencial, suposta invariável, passasse a ser capaz de provocar roturas. Os sismos que por vezes se observam no primeiro enchimento de grandes reservatórios de barragens também poderão ter origem no mesmo fenómeno que acaba de ser considerado.

Como é óbvio, recorra-se à explosão nuclear, à injeção de líquido ou a outros meios, provocar um sismo constituirá decisão da maior responsabilidade, assim como qualquer aviso às populações de eminência de sismo evidenciada por método de previsão que venha a ser estabelecido. Poderá mesmo perguntar-se se não será preferível ignorar a eminência da ocorrência de um sismo e deixar aos deuses o seu desencadeamento. Porém, a confiança no progresso científico faz-nos crer que o Homem acaba sempre por beneficiar do conhecimento dos fenómenos naturais.

As breves referências que acabamos de fazer aos problemas que nos vários domínios estão aproveitando os conhecimentos da mecânica das rochas e escorvando o seu desenvolvimento põem bem em evidência a diversidade e importância, quer científica quer tecnológica, das aplicações na nova disciplina.

4 - ÂMBITO DA MECÂNICA DAS ROCHAS

Nos últimos anos tem sido feito um esforço, como se impunha, para precisar a definição de quais os fenómenos que devem constituir o âmbito da mecânica das rochas.

Em primeiro lugar é necessário procurar uma fronteira entre os solos e as rochas, materiais aos quais é dada na engenharia a designação genérica de terrenos*. Segundo o conceito habitual, os solos são os terrenos constituídos por partículas soltas ou agregadas de tal modo que se podem separar facilmente mediante agitação dentro de água. Isto é, nos solos que exibem coesão esta é conferida por filmes líquidos entre as partículas, a espessura dos quais aumenta quando na presença de água em excesso assim evanescendo a sua capacidade agregadora. Por oposição, definem-se as rochas como os terrenos cuja coesão não é comprometida pela presença de água em excesso. Perante tal critério qualitativo - pois não são definidas as condições em que é feita a agitação dentro de água - não é de estranhar que existam terrenos que não se sabe se hão-de ser classificados como solos ou rochas, os quais contudo não são frequentes. É de esperar a existência de banda de indeterminação, uma vez que há toda a continuidade quer no fenómeno geológico da petrificação das formações constituídas por solos quer no fenómeno de alteração das rochas conducente aos solos designados residuais.

O que interessa frisar é o facto de ao referido critério de classificação dos terrenos em solos e rochas corresponderem materiais que exibem em regra propriedades tecnológicas muito diversas, em especial deformabilidade e resistência, que são propriedades com interesse fundamental para o engenheiro.

A fim de evidenciar a diferença de comportamentos, apresentam-se nas tabelas 1 e 2 valores típicos do módulo de deformabilidade, E , e da coesão e ângulo de atrito, c e ϕ , para solos e rochas, respectivamente. Os valores do módulo de deformabilidade dos solos foram obtidos em ensaio edométrico,

*Conforme o "Vocabulário de Estradas e Aeródromos", LNEC, 1962.

e dizem respeito à tensão de 1 kgf/cm^2 , e os das rochas em compressão simples. Apesar disto, os módulos das rochas são muito superiores aos dos solos, verificando-se mesmo diferença marcada no respeitante às rochas decompostas. Quanto à coesão ela é também muito mais elevada nas rochas, a não ser para as rochas decompostas para as quais a coesão se aproxima da das argilas muito duras. No que se refere ao ângulo de atrito já as rochas se aproximam muitas vezes dos solos, chegando no entanto nas rochas a atingir valores muito mais elevados. Deseja frisar-se que nas tabelas se consideraram os intervalos de variação mais correntes das três grandezas, podendo pois ocorrer valores que se afastem bastante dos indicados, em especial no respeitante às rochas.

TABELA 1

Tipo de solo	Módulo de deformabilidade E (kgf/cm ²)	Resistência	
		Coesão c (kgf/cm ²)	Âng.de atrito ϕ (°)
Areias			
soltas	50-200	—	30
médias	150-400	—	35
duras	350-450	—	40
Argilas			
moles	10- 50	0-0,5	30-35(*)
duras	50-150	0,5-1,2	
muito duras	150-500	1,2-2,5	

(*) Tensões efectivas.

Uma vez esclarecido o conceito de rocha, do ponto de vista da engenharia vejamos o que se entende por mecânica das rochas. A mecânica das rochas é a disciplina que trata do comportamento mecânico, isto é, das relações entre solicitações actuantes, quer aplicadas pela Natureza quer pelo

Homem, e as deformações dos maciços rochosos, tal como ocorrem na Natureza. Esta última concretização é fundamental pois existe em regra uma profunda diferença entre o comportamento mecânico de uma amostra de rocha que se estuda em laboratório e o comportamento de um maciço natural.

TABELA 2

Tipo de rocha	Módulo de deformabilidade E (10^3 kgf/cm ²)	Resistência	
		Coesão c (kgf/cm ²)	Ang.de atrito ϕ (°)
Argilitos e silíticos			
resistência baixa	40 - 100	10 - 40	30 - 35
média	100 - 200	40 - 80	30 - 40
elevada	200 - 300	80 - 160	40 - 55
Grés e conglomerados			
resistência baixa	50 - 100	5 - 30	30 - 40
média	100 - 400	30 - 80	40 - 60
elevada	400 - 900	40 - 140	45 - 65
Calcários			
argilosos	10 - 50	5 - 20	30 - 40
margosos	50 - 200	10 - 60	30 - 40
puros	400 - 1000	100 - 200	40 - 50
Quartzitos	200 - 1000	50 - 150	45 - 65
Granitos e gnaisses			
decompostos	5 - 100	4 - 20	35 - 50
alterados	100 - 400	20 - 80	40 - 60
sãos	400 - 1200	80 - 160	45 - 65
Xistos (*)			
decompostos	5 - 100	4 - 10	
alterados	100 - 400	10 - 100	45 - 65
sãos	400 - 1200	100 - 200	

(*) Características muito variáveis devido à anisotropia.

Esta diferença provém da ocorrência de fracturas no maciço, em especial de

diaclasses e falhas, que modificam profundamente quer a deformabilidade quer a resistência do maciço, incrementando a primeira e reduzindo a segunda. A mecânica das rochas é portanto a mecânica de um meio cortado por superfícies de discontinuidade. É este o aspecto específico da mecânica das rochas em face da mecânica dos outros meios, assim como na mecânica dos solos o aspecto específico que levou à sua individualização foi a consideração de duas fases e a consequente criação do conceito de pressão intersticial. Considerada a definição dada, teria sido preferível a designação de mecânica dos maciços rochosos à de mecânica das rochas, mas esta foi adoptada afinal por corresponder à designação em francês, "mécanique des roches", e em inglês, "rock mechanics". Foi o chamado grupo de Salzburgo que, inspirado em especial nos trabalhos do geólogo Stini, deu a devida ênfase ao papel desempenhado pelas fracturas no comportamento dos maciços rochosos.

Deve desde já notar-se que as fracturas dos maciços, assim como os interstícios da própria rocha, se encontram preenchidos com fluídos, em regra água ou ar e água, os quais aplicam solicitações ao maciço que podem desempenhar papel decisivo no seu equilíbrio. Além disso, nos problemas que o engenheiro tem a resolver dizendo respeito a maciços rochosos, o estudo da percolação de fluídos constitui muitas vezes problema relevante, em especial em obras hidráulicas.

Do ponto de vista tecnológico a importância da mecânica das rochas provém em grande parte do facto de ela ter em consideração as fracturas que cortam os maciços, pois são elas que levantam a maior parte das dificuldades nas realizações em que o engenheiro tem de lidar com os maciços rochosos. Por outras palavras, quando não ocorram fracturas, o que por vezes acontece, posto que raramente, a resistência das rochas é em regra suficientemente elevada e a sua deformabilidade suficientemente baixa para não se pôr qualquer problema ao engenheiro. No que respeita às obras de engenharia civil, como se trabalha a maior parte das vezes a pequenas profundidades o papel desempenhado pelas fracturas é decisivo, pois elas acentuam-se em regra com a proximidade à superfície do terreno.

Das considerações que acabam de ser feitas depreende-se que no estudo de qualquer problema se põem duas questões fundamentais: i) a identificação das fracturas que cortam o maciço e a determinação das suas propriedades; e ii) a determinação das propriedades da rocha, isto é, do material entre as fracturas.

A resolução dos problemas da mecânica das rochas, assim como acontece no estudo do comportamento estrutural dos diversos tipos de materiais, implica o conhecimento:

- da deformabilidade dos maciços rochosos, isto é, das relações entre forças e deformações;
- da resistência dos maciços, isto é, das condições que determinam a sua rotura;
- do estado de tensão inicial ou residual, como também é designado, a que se encontra submetido o maciço;
- e, finalmente, dos estados de tensão que se desenvolvem nos maciços em virtude das solicitações aplicadas, incluídas as devidas à percolação. É a partir deste conhecimento que se faz a apreciação da adequação dum projecto, em especial da sua segurança.

BIBLIOGRAFIA

- HEALY, J.H.; REBEY, W.W; GRIGGS, D.T.; RALEIGH, C.B. - The Denver Earthquakes - Science, 27 Sept., 1968, vol. 161, pag. 1301-1310
- ROCHA, Manuel; SILVEIRA, A.F. da; AZEVEDO, M.C.Cruz; LOPES, J.Baptista - Influência da muito alta deformabilidade da fundação na concepção e comportamento de uma barragem-abóbada. Revista "Técnica", nº. 320, 1969.
- ROCHA, Manuel; SILVEIRA, A.F. da; RODRIGUES, O.V.; AZEVEDO, M.C.Cruz; FLORENTINO, C.A. - Behaviour of a large dam built on a very deformable foundation. Comunicação apresentada ao X Congresso Internacional das Grandes Barragens, Montreal, 1970.