

ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS PARA O PROJECTO DE TÚNEIS*

Engineering geological investigations for the design of tunnels

por

RICARDO OLIVEIRA**

RESUMO – Este trabalho contém considerações várias relativas aos estudos geológicos e geotécnicos realizados na fase de projecto de túneis.

Após apresentação de uma metodologia para esses estudos, é feita uma análise em termos de custos/benefícios dos vários trabalhos de natureza geológica e geotécnica, com referência especial à comparação entre sondagens destrutivas acompanhadas de diagrfias e sondagens de rotação com recolha contínua de amostras.

Finalmente são apresentadas considerações relativas a sistemas de classificação de maciços rochosos e à sua utilização no projecto de túneis.

SYNOPSIS – This paper contains several considerations related to the engineering geological studies carried out during the design stage of tunnels.

First, a methodology for these studies is presented and, then, an analysis of the ratio cost/benefit is discussed for the different geological and geotechnical activities, with special reference to the relative value of: a) uncored drilling together with continuous recording of drilling parameters and borehole logging; and b) cored boreholes.

Finally considerations related to classification systems of rock masses and to their application in the design of tunnels are presented.

1 – INTRODUÇÃO

Embora a actividade de construção de túneis, sobretudo mineiros, seja muito antiga, só recentemente a sua construção é precedida de projectos baseados no conhecimento geológico e geotécnico dos terrenos envolvidos.

Do que se conhece, nem mesmo a construção de grande número de túneis ferroviários no final do século passado e no início deste século, e de túneis hidráulicos e centrais associados aos grandes aproveitamentos hidroeléctricos lançados entre os

* Conferência introdutória da sessão técnica n.º 1 do Simpósio Sobre Projecto de Túneis organizado pela E.T.S. de Ingenieros de Camiños, Canales y Puertos da Universidade de Valencia, Espanha, (11-14 Junho 85).

** Investigador Coordenador. Subdirector do LNEC. Professor da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

anos 20 e 50, foi em regra informada por estudos dos terrenos a escavar que permitissem a elaboração antecipada dos projectos respectivos, em condições hoje consideradas aceitáveis.

Só a partir do início da década de 60 começou a ficar claro o conceito de que a abertura de túneis deveria ser precedida de estudos geológicos e geotécnicos que permitissem prever com algum rigor as condições que iriam ser encontradas durante as escavações, evitando assim as frequentes surpresas que sempre se manifestavam em prejuízos materiais e muitas vezes humanos e em grandes atrasos na construção (Oliveira, R. 1974).

Para além disso, essas previsões permitiram igualmente, com o recurso a métodos de cálculo cada vez mais potentes, a elaboração antecipada dos projectos com a inclusão de estimativas de custo, de cadernos de encargos e de definição de responsabilidades e ainda a selecção de métodos de escavações mais apropriados.

Essa mudança de atitude, no que se refere ao projecto de túneis e outras cavidades subterrâneas, está bem documentada na numerosa bibliografia especializada publicada nos últimos 20 anos (Guidicini e Nieble, 1983) e muito tem contribuído para o continuado e profundo desenvolvimento das disciplinas científicas da Geotecnia, com destaque para a Mecânica das Rochas e a Geologia de Engenharia.

Apesar de uma procura constante de técnicas e de metodologias que permitam um melhor conhecimento geológico e geotécnico dos maciços nas fases de reconhecimento associadas ao projecto, e assim realizar projectos de melhor qualidade, é aceite sem reservas que, neste tipo de obras, em especial de túneis, o nível de conhecimento alcançado nesta fase é em regra inferior ao que normalmente se atinge para outros tipos de obras e que uma parte mais ou menos significativa do projecto terá que ser conduzida durante a própria fase de construção. Isso implica obviamente o acompanhamento permanente das obras, pelo menos na fase de escavação, por especialistas em Geotecnia.

Acresce que neste tipo de obras muito se tem investido nos últimos anos, em complemento dos estudos realizados na fase de projecto, na investigação ligada a métodos de reconhecimento aplicados nas frentes de ataque só utilizáveis também no decorrer dos trabalhos de escavação.

No entanto, o tema de sessão n. 1 diz respeito apenas aos **reconhecimentos prévios** para o projecto e é essencialmente sobre esse tópico que versará este trabalho. Por certo que no decorrer desta e de outras sessões do Simpósio haverá oportunidade para discutir as actividades de natureza geológica e geotécnica nas restantes fases do empreendimento, nomeadamente durante a construção e, cada vez mais, na interpretação dos elementos de observação não só na fase de construção, mas igualmente na de exploração das obras.

Face ao tempo disponível para a exposição, por um lado, e atendendo, por outro, a que a numerosa bibliografia já referida descreve, com mais ou menos pormenor, os

métodos de reconhecimento geológico, de prospecção geofísica, de prospecção mecânica, de ensaios “in situ” e em laboratório mais frequentemente utilizados em estudos de obras subterrâneas, pensou-se que seria mais útil abordar nesta conferência apenas alguns tópicos mais modernos ou mais controversos para estimular a discussão entre os participantes.

Nesse sentido, far-se-ão algumas considerações sobre a metodologia que se afigura mais adequada para a generalidade de estudos desta natureza, com referência a análises de tipo custo/benefício para os vários tipos de trabalho de prospecção geotécnica; tratar-se-á, ainda que sumariamente, da questão dos sistemas de classificação de maciços rochosos e da sua utilização com o método empírico do projecto de túneis; e finalmente procurar-se-á abordar, na perspectiva da metodologia proposta, a questão da utilização de sondagens destrutivas acompanhadas de diagrfias em alternativa às sondagens tradicionais com colheita de amostras.

2 – METODOLOGIA DE ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

Tal como para outras obras de engenharia, o projecto de túneis desenvolve-se em geral em fases que vão desde os estudos de viabilidade até ao anteprojecto e finalmente ao projecto para concurso dos empreendimentos. Como se disse, grande parte das vezes só durante a construção é possível executar parcelas importantes do projecto ou introduzir modificações que podem alterar significativamente as soluções iniciais.

Para cada uma dessas fases, deve utilizar-se os métodos mais adequados, isto é, aqueles que, em cada caso, com menor custo e menor duração, levem a obter informação satisfatória, que permite avançar no projecto com segurança.

É óbvio que os métodos de estudo utilizados serão significativamente diferentes, em cada fase, para diversas situações possíveis e, dando só o exemplo de túneis, facilmente se aceita que as diferenças poderão ser grandes em situações tão diversas tais como túneis em maciços rochosos, em maciços terrosos, subaquáticos e ainda em túneis em idênticas condições geológicas mas com espessuras de recobrimento muito variáveis.

O que parece então importante, em qualquer caso, é conduzir os reconhecimentos prévios em todas as fases, com vista a dispôr-se da caracterização mais ou menos rigorosa dos terrenos que irão ser interessados pelas escavações em termos das características relevantes para a obra (reologia – deformabilidade e resistência –, estado de tensão e permeabilidade, em especial no caso de túneis hidráulicos).

Embora possa parecer fazer sentido, em geral, no caso de túneis, tratar separadamente as zonas dos emboquilhamentos onde há que otimizar a extensão dos trechos a construir a céu aberto e onde, conseqüentemente é pequena no início do túnel a

espessura de recobrimento de terrenos, frequentemente meteorizados, na metodologia que aqui se propõe, essa separação não é nítida, residindo a principal diferença no facto de nessas zonas de emboquilhamento existir em regra maior quantidade de resultados dos estudos, em consequência da maior acessibilidade às cotas, de atravessamento dos túneis. Em certos casos de túneis rodoviários ou ferroviários, com pequenos recobrimentos, a solução alternativa pode ser a escavação em céu aberto de todo o traçado, se forem difíceis as condições geológicas a encontrar.

Assim, feita a caracterização geológica a uma escala regional, procurando evidenciar a estrutura geológica e o estilo tectónico dos maciços, sobretudo na perspectiva de evitar, na medida do possível, o atravessamento de formações litologicamente inconvenientes ou de acidentes tectónicos com expressão geotécnica ou hidrogeológica desfavorável, e escolhido um traçado mais ou menos definitivo para o túnel, o estudo deverá iniciar-se por um reconhecimento geológico de superfície, tirando partido essencialmente de afloramentos ou de escavações existentes na faixa do alinhamento. Em muitos locais o recobrimento intenso com vegetação ou com depósitos de cobertura quase invalida tal operação, sem o recurso a, pelo menos, alguns trabalhos de limpeza ou abertura de algumas trincheiras. Raramente se ultrapassa este nível de reconhecimento na fase de estudo de viabilidade ou de escolha de soluções do empreendimento. O recurso a alguns trabalhos de prospecção geofísica eléctrica e sísmica pode desde logo dar boas informações sobretudo nas zonas de emboquilhamento ou de menores espessuras e ajudar à caracterização mais precisa das formações.

Nos casos de túneis subaquáticos o recurso ao método sísmico de reflexão pode também nesta fase dar informações importantes quanto à estrutura geológica do maciço (Garcia Yague, 1983)..

Da análise desta informação de campo e expedita deverá resultar a elaboração do programa de prospecção geotécnica que irá ser o suporte das opções do projecto, nomeadamente no que se refere à geometria mais adequada para as secções, aos tipos de solução de suporte provisório, aos métodos de escavação e até, desde logo, a eventuais soluções definitivas de revestimento e de consolidação do terreno.

Como em regra, não se dispõe de acesso directo ao interior do maciço a atravessar com o túnel, a informação deverá ser obtida a partir da superfície do terreno, devendo por isso os métodos ser bem escolhidos em função da natureza e estrutura das formações e, como já se disse, da espessura do recobrimento.

No caso de túneis profundos, por exemplo, métodos há que ficam praticamente excluídos pela sua pequena capacidade de penetração em profundidade.

Está-se pois na fase onde mais se exige dos reconhecimentos prévios mas também onde, muitas vezes, há que justificar caso a caso o programa elaborado e, sobretudo, justificar pormenorizadamente o custo das diversas operações.

O importante nesta fase do projecto é proceder-se ao **zonamento geotécnico** do maciço com vista à escolha de soluções-tipo para as diversas zonas geotécnicas que vierem a ser atravessadas. Em regra a consideração de três ou no máximo quatro zonas é mais do que suficiente para o fim pretendido.

Sendo o **zonamento geotécnico** (ou seja a consideração de volumes dos maciços geológicos com idênticas respostas geotécnicas a curto e a longo prazo) tanto mais ou menos pormenorizado consoante a quantidade de informação disponível e até consoante a sua distribuição espacial, é indispensável lançar para o efeito mão de métodos de prospecção e de ensaio que, com relativamente baixo custo, permitam um grande número de elementos referentes aos parâmetros relevantes. Por outras palavras, devem privilegiar-se os métodos que possibilitem informação possível de um tratamento estatístico, que conduza ao zonamento.

A questão, neste ponto, centra-se sobretudo na possibilidade de realizar sondagens mecânicas, por vezes profundas, e na execução no seu interior de ensaios que caracterizem a deformabilidade, a permeabilidade e o estado de tensão (Barr, 1977), (Oliveira, R. e J. Charrua Graça, 1985). Nestes casos, e nesta fase, a caracterização da resistência fica dependente essencialmente da realização de ensaios de corte ou de deslizamento sobre tarolos representativos retirados das sondagens.

Trata-se pois de elaborar um programa de estudos em que as sondagens sejam projectadas com diâmetros que permitam fins múltiplos e inclinações adequadas.

O princípio que aqui se advoga, no caso de maciço litologicamente homogéneo ou nos casos em que essa quasi-homogeneidade se verifique a partir de certa profundidade, é que se elabore um programa de prospecção mecânica com recurso a sondagens não destrutivas, praticamente desde a superfície, que contenha um número de sondagens distribuídas se possível por toda a extensão do traçado, com um comprimento total que pareça significativo em relação à extensão do túnel em causa. Sem se pretender estabelecer regras em problemas desta natureza, dir-se-á que se poderá considerar satisfatório na maior parte dos casos de maciços litologicamente homogéneos, atingir com as sondagens um comprimento total da ordem de grandeza do comprimento do túnel e mesmo bastante inferior no caso de túneis muito extensos. Se as sondagens forem bem orientadas em relação às descontinuidades mais importantes, a probabilidade de ocorrerem no maciço, ao nível do túnel, situações não amostradas com a sua realização é extraordinariamente reduzida.

Completando esse programa com a medição no interior dos furos de níveis piezométricos, com a realização de ensaios de deformabilidade estáticos (dilatómetro) e dinâmicos (ensaios ao longo dos furos e entre furos) e de permeabilidade (quando for importante determinar esta característica) em número satisfatório (várias dezenas a algumas centenas — e sempre dependentes da extensão do túnel) e com o estudo da fracturação do maciço, e de algumas das características relevantes para a análise da sua resistência (sobretudo da natureza e rugosidade das superfícies de descontinuidade),

dispôr-se-á de um conjunto de grandes números relativos aos parâmetros que irão influenciar na escolha das soluções de projecto.

Os métodos actuais para a determinação do estado de tensão não permitem, por enquanto, idêntico tratamento pelo que este importante parâmetro não entra em regra no respectivo zonamento geotécnico.

Na Fig. 1 apresenta-se como exemplo os resultados da aplicação desta metodologia ao estudo do maciço do túnel do Castelo do Bode em Portugal, no qual foram consideradas 3 zonas geotécnicas, cujos limites e características médias foram confirmadas no decorrer da escavação do túnel, terminada em 1984 (Oliveira, R. e al., 1983).

Casos há, sobretudo em situações de túneis de grandes diâmetros, onde na fase de **reconhecimento prévio** o acesso ao maciço se faz através de galeria-piloto cuja justificação económica fica altamente valorizada, sobretudo se ela vier a ser utilizada na fase de escavação para o desmonte da restante secção de projecto. Na experiência do autor, trata-se de técnica hoje em dia raramente utilizada na fase de projecto, quer pelos elevados custos alcançados por esses trabalhos, quer pelo grande desenvolvimento nos últimos anos das técnicas de sondagem, de amostragem e de ensaio no interior de furos.

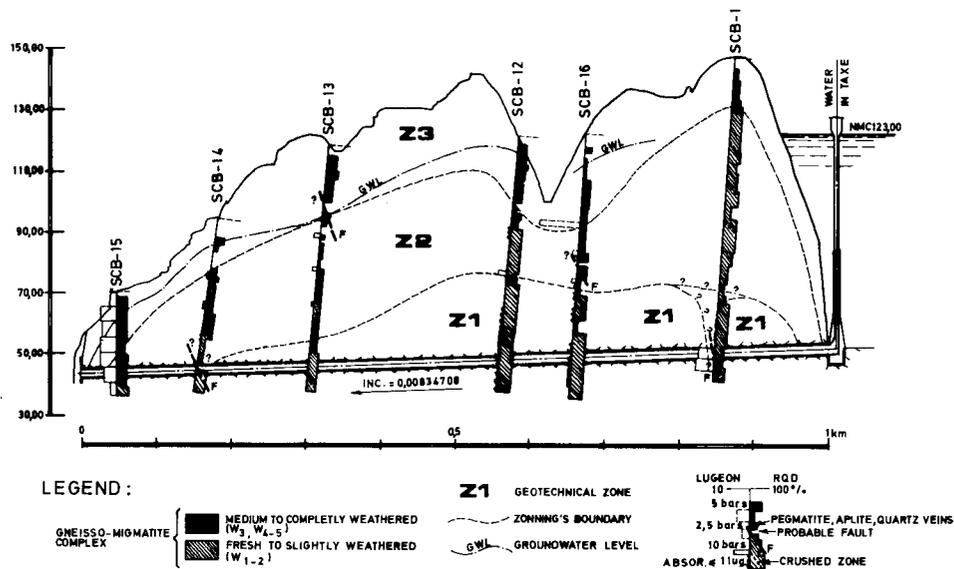


Fig. 1 – Engineering geological zoning.

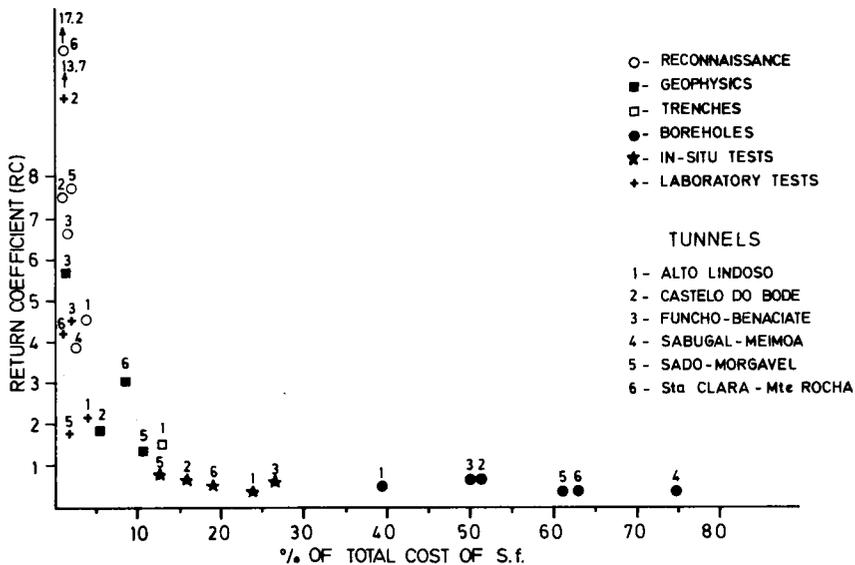
3 – CUSTOS E BENEFÍCIOS

Uma das razões do desenvolvimento crescente, nos últimos anos, das ciências que constituem a Geotecnia, deve-se à evidência clara dos elevados benefícios traduzidos em termos de segurança, de redução de prazos e até do custo das obras, quando comparados com os custos dos trabalhos de reconhecimento geológico e geotécnico que deram contribuição relevante para aqueles benefícios (1 a 2% do custo das obras).

Esta afirmação aplica-se sem qualquer margem para dúvida ao caso dos túneis, onde inclusive alguns autores têm procurado quantificar essa relação custo/benefício quer em termos absolutos (Bergman, M.S., 1978) quer em termos relativos (Rodrigues Carvalho, J.A. e R. Oliveira, 1982).

Na Fig. 2 apresenta-se um gráfico onde, com base em dados recolhidos de estudos realizados em túneis portugueses, se traçou uma curva que permite analisar, para cada tipo de trabalho de prospecção e de ensaio realizado, e em função dos seus custos, qual a contribuição percentual respectiva para o conhecimento global do maciço interessado.

Embora seja sempre difícil reduzir custos sem diminuir significativamente o grau de conhecimento atingido, parece possível ainda evoluir nesse sentido, sobretudo através do aperfeiçoamento da metodologia proposta e do desenvolvimento de meios



de acesso aos maciços e de novos métodos de ensaio expeditos. Obviamente que a experiência adquirida com a grande quantidade de estudos para obras subterrâneas e a constatação da sua validade na fase de construção muito têm contribuído e, por certo, continuarão a contribuir para esse fim.

Dentro desta linha de preocupações, assiste-se hoje ao retomar de uma prática, muito frequente alguns anos atrás, de substituir nos programas de prospecção as sondagens de furação com colheita contínua de amostras por sondagens destrutivas pelo menos em grande parte da sua extensão. Essa prática que se crê está a ser muito utilizada em alguns países da Europa, nomeadamente em França, pressupõe, contudo, o acompanhamento da realização dessas sondagens destrutivas com a realização de diagramas de vários tipos, nomeadamente com registo contínuo dos parâmetros mais relevantes da furação (velocidade de avanço, percussão reflectida, pressão e caudal do fluido de circulação, etc.) e procurando correlações entre esses parâmetros e as características geológicas e geotécnicas dos maciços.

Na opinião do autor as economias encontradas com essas soluções não justificam a sua generalização, nem mesmo tendo em conta que dessa forma os estudos sofrerão possivelmente redução sensível de prazo (Gomes Coelho, A. e J.L. Tocha Santos, 1985).

Números retirados da bibliografia (Gomes Coelho, T. Santos) para exemplos franceses referem custos da ordem de 2/3 dos custos da furação com amostragem contínua, e no único caso que se conhece em Portugal, em que essas técnicas estão a ser utilizadas, a título experimental, num túnel projectado num maciço xistoso do sul do país com espessuras de recobrimento da ordem das dezenas mas inferior à centena de metros, o custo desses trabalhos atinge cerca de 75% do valor da furação tradicional com amostragem contínua.

Ainda que não deixe de ser uma opinião subjectiva, afirma-se que a relação custo/benefício nestas situações de maciços constituídos por terrenos com reduzidas variações geológicas e geotécnicas desde próximo da superfície até às cotas de atravessamento pelo túnel fica significativamente agravada com o recurso sistemático a estas técnicas. Isto porque se considera que, mesmo com certa deficiência de execução das sondagens tradicionais, que se reflete numa amostragem por vezes menos boa dos maciços atravessados, a informação que se pode recolher da análise dessa amostragem em termos da caracterização da sua fracturação e do seu estado de alteração e dos ensaios de resistência, de deformabilidade e de deslizamento de descontinuidades que se podem fazer sobre as amostras recolhidas é altamente mais valiosa que a modesta redução do custo dos trabalhos.

Com esta posição contudo, não se pretende invalidar o eventual interesse dessas técnicas em certas situações geológicas ou até a vantagem, em alguns casos, da utilização conjunta num mesmo estudo de furação destrutiva com diagrfias contínuas e de furação com amostragem.

Em qualquer caso, e repetindo os princípios da metodologia proposta pelo autor, o que se deve privilegiar na fase de reconhecimentos prévios é o recurso a técnicas que, em virtude de do seu baixo custo e rápida execução, permitam a obtenção directa de grande número de parâmetros que caracterizem satisfatoriamente os maciços e deixem prever com certo rigor o seu comportamento na fase de obra. Tal é igualmente válido para outros tipos de obras, principalmente para o estudo de fundações de barragens (Oliveira, R., 1979 e 1983).

4 – SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Tirando partido da obtenção de informações relativas à natureza geológica dos terrenos a atravessar com túneis, vários autores têm procurado desde há muitos anos relações directas entre certas características, sobretudo geológicas, e o comportamento dos maciços em termos de projecto das obras (ou seja escolha de métodos de escavação, necessidade e tipo de sustimento provisório e revestimento definitivo, custos e prazos de execução) e da previsão do seu comportamento.

A tentativa mais antiga, mais frequentemente citada na bibliografia, foi feita por Terzaghi (Terzaghi, K., 1946) em que o autor procurou estimar as pressões exercidas pelos terrenos na sequência da abertura de túneis, em função de 7 classes de maciços rochosos em cuja classificação qualitativa fez intervir a resistência da rocha, o grau de fracturação do maciço e, nas classes mais desfavoráveis, aspectos ligados à expansibilidade e alterabilidade das rochas.

Alguns anos depois (1969) Don Deere, introduz o conceito de RQD e propõe uma relação entre o valor desse parâmetro e a qualidade de maciços rochosos de natureza essencialmente granítica.

Apesar do relativo sucesso dessas e de outras tentativas de classificações de maciços rochosos para fins de projecto de túneis ou de apreciação da estabilidade de túneis já construídos, foi só com o interesse crescente pelos problemas dos túneis, que se acentuou, como se disse, a partir do início da década de 70, e com o estudo mais pormenorizado das suas características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas, que surgiram sistemas de classificação, por um lado, mais ambiciosos (visto pretenderem ter validade para as diversas situações geológicas, funcionais e topográficas) e, por outro, baseados em experiências mais numerosas. Para além do sistema de classificação de Whickam, Tiedmann and Skinner (1974), designado por RSR (rock structure rating) que tem em conta na classificação ponderada dos maciços rochosos apenas parâmetros de natureza geológica e hidrológica, há que destacar os sistemas de classificação desenvolvidos por Bieniawski (1973) e por Barton, Lien and Lund (1974) pela grande aplicação que tiveram nos últimos 10 anos em todo o mundo.

Sendo desenvolvidos por autores diferentes, em países diferentes, a filosofia dos dois sistemas de classificação é muito semelhante.

Com efeito, ambos utilizaram idênticos parâmetros (alguns deles exactamente iguais, como o RQD, o espaçamento entre fracturas, o estado de alteração e rugosidade das discontinuidades e as condições hidrogeológicas do maciço rochoso), ambos usam o conceito de atribuição de pesos aos vários parâmetros em função da respectiva importância no comportamento dos maciços, chegando a um sistema de classificação da qualidade do maciço, com base no somatório dos pesos parciais correspondentes à classificação dos vários parâmetros.

Com base nessa classificação da qualidade do maciço, retiram conclusões sobre a sua estabilidade em função dos diâmetros das escavações, estimam valores de parâmetros de resistência para os terrenos e, finalmente, concluem pela eventualidade de suporte para garantir a curto ou a longo prazo a respectiva estabilidade.

Inclusivé, mais tarde, Bieniawski (Bieniawski e Orr, 1976) propôs, em função dos resultados da aplicação conjunta dos dois sistemas a numerosas situações, incluindo barragens, uma relação entre o seu sistema de classificação (RMR – rock mass rating) e o de Barton (Q – rock mass quality) do tipo

$$\text{RMR} = 9 \log_e Q + 44$$

Dearman (1983), no relato geral do tema correspondente do Simpósio Internacional da IAEG, em Lisboa, para além de fazer uma apresentação actualizada destes sistemas de classificação, faz uma comparação entre ambos e comentários com muito interesse a seu respeito e a respeito da sua aplicação.

Feitas estas considerações introdutórias sobre os sistemas de classificação de maciços rochosos mais usados (não se apresenta aqui o que foi desenvolvido por Manuel Rocha (Rocha, M., 1976) nos últimos anos da sua actividade, por não ter tido a divulgação desejada, em virtude do seu desaparecimento prematuro), importa fazer alguns comentários que explicitem a ligação deste tópico com o dos **reconhecimentos prévios**, que constitui o tema n.º 1 do Simpósio.

Os aspectos mais relevantes destes comentários prendem-se com os seguintes aspectos:

- a) Os sistemas de classificação de maciços constituem métodos empíricos de projecto e são, em numerosas situações, os únicos elementos de projecto das obras subterrâneas.
- b) Embora tenham tido a sua origem na observação de casos de obra existentes (obras já realizadas com sucessos e acidentes), a sua aplicação actual, na fase de projecto das obras, implica que os correspondentes programas de reconhecimento geológico e geotécnico permitam a obtenção ou a estimativa aceitável dos parâmetros que entram no respectivo sistema de classificação; isto passa, como atrás se referiu, entre outras coisas, pela realização de sondagens bem orientadas com medições no seu interior e pela colheita de amostras que

permitam a sua observação visual e a realização de ensaios; contudo no que se refere a alguns parâmetros utilizados é muito difícil a sua estimativa na fase de projecto.

- c) Não faz sentido aplicar qualquer sistema de classificação a um maciço rochoso onde irá ser escavado um túnel, sem antes proceder ao seu **zonamento geotécnico**; feito esse zonamento, o sistema ou sistemas de classificação incidem sobre cada uma das zonas e, em relação a cada uma delas, será então feita uma classificação de qualidade e, face a essa classificação, deduzidos os parâmetros que serão utilizados no projecto.
- d) Será sempre desejável que, na fase de obra, se possa confrontar a previsão dos parâmetros utilizados nas classificações das várias zonas geotécnicas durante o projecto e a previsão do próprio comportamento pois só assim se poderão ir introduzindo melhoramentos nos procedimentos a adoptar e ir optimizando o planeamento dos trabalhos de **reconhecimento** prévio a realizar.
- e) Em problemas importantes de obras subterrâneas, os parâmetros geológicos e geotécnicos obtidos na fase de projecto, para além de poderem ser utilizados para a classificação dos maciços utilizada com método empírico de projecto, deverão ser suficientemente precisos e adequados para poderem ser utilizados nos modelos numéricos desenvolvidos por vários autores (Pinto da Cunha, 1980), permitindo assim a realização de projectos com maior grau de rigor e pormenorização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARR, M. V. (1977) — *Downhole instrumentations — a review for tunneling ground investigation*. Tech. note. Círia, London.
- BARTON, N., R. LIEN and J. LUNDE (1974) — *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, vol. 6, n.º 4.
- BARTON, N. (1983) — *Application of Q — System and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses*. Panel Report, theme II. Proceedings Int. Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, vol. 2. Lisboa.
- BERGAM, M. S. (1978) — *Geo-Planning — A necessary tool for controlled underground construction*. Proceedings III Int. Congress. Int. Association of Engineering Geology, vol. 2, Section III. Madrid.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1973) — *Engineering classification of jointed rock masses*. Trans. Inst. Civ. Engr., vol. 15, South Africa.
- BIENIAWSKI, Z. T. and C. M. ORR (1976) — *Rapid site appraisal for dam foundations by the Geomechanics Classification*. Proc. 12 th Int. Congress on Large Dams, ICOLD. México.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1983) — *The Geomechanics Classification (RMR system) in design applications to underground excavations*. Panel Report, Theme II. Proceedings Int. Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, vol. 2. Lisboa.

- DEARMAN, W. R. (1983) — *Classification systems. Design of underground structures based on classification systems*. General Report, Theme II. Proceedings Int. Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, vol. 2. Lisboa.
- DEERE, D. (1969) — *Geologic considerations*. Chapter I in "Rock Mechanics in Engineering Practice" edited by Stag & Zienkiewicz, John Wiley and Sons. London.
- GARCIA YAGUE, A. (1983) — *Geophysical methods for tunnels*. Panel Report, Theme I. Proceedings Int. Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, vol. 2. Lisboa.
- GOMES COELHO, A. and J. L. TOCHA SANTOS (1985) — *Novas técnicas de prospecção geotécnica. Diagrfias instantâneas em sondagens destrutivas*. Revista Geotecnia, n.º 43. SPG. Lisboa.
- GUIDICINI, G. and C. NIEBLE — *Engineering Geology in underground construction*. General Report, Theme I. Proceedings Int. Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, vol. 2. Lisboa.
- OLIVEIRA, R. (1974) — *Engineering geological investigations and in situ testing*. Panel Report, Theme VII. 2.nd International Congress of the International Association of Engineering Geology, vol. 2. S. Paulo.
- OLIVEIRA, R. (1979) — *Engineering geological problems related to the study of dam foundations*. Panel Report, Theme I. Intern. Symposium on Engineering Geological Problems related to Hydrotechnical Construction Tbilisi (URSS).
- OLIVEIRA, R. and J. MOURA ESTEVES (1980) — *Geophysical exploration at the Ruhr — Neger tunnel*. LNEC internal report. Lisboa.
- OLIVEIRA, R. (1982) — *Obras subterrâneas*. Notas de aulas. Curso de Mestrado de Geologia de Engenharia. Universidade Nova de Lisboa.
- OLIVEIRA, R., C. COSTA and J. DAVID (1983) — *Engineering Geological studies and design of Castelo do Bode tunnel*. Theme I. Proceedings Int. Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, vol. 2. Lisboa.
- OLIVEIRA, R. and J.G. CHARRUA GRAÇA (1985) — *In situ tests in rock masses*. Chapter 26, Ground Engineer's Reference Book. Edited by F. Bell, under publication by Butterworth, England.
- PINTO DA CUNHA, A. (1980) — *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos*. Tese para especialista. LNEC. Lisboa.
- ROCHA, M. (1976) — *Estruturas Subterrâneas*. Lições dos Cursos de Mestrado em Geologia de Engenharia e Mecânica dos Solos. Universidade Nova de Lisboa.
- RODRIGUES CARVALHO, J. and RICARDO OLIVEIRA (1982) — *Cost and benefit of site investigation for tunneling in Portugal*. Proceedings IV Congress Int. Association of Engineering Geology, vol. IV, Theme 2. New Delhi.
- TERZAGHI, K (1946) — *Rock defects and loads on tunnel supports*. Introduction to Tunnel Geology.
- WICKAM, G.E., H.R. TIEDMAN and E.H. SKINNER (1974) — *Ground support prediction model — RSR Concept*. Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference, vol. 1. S. Francisco.