

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA  
Coordenação

# A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 1 • GEOLOGIA DE ENGENHARIA



Coimbra • Imprensa da Universidade

## GEOLOGIA DE ENGENHARIA EM OBRAS SUBTERRÂNEAS

NADIR PLASENCIA <sup>1</sup>

**PALAVRAS CHAVE:** geoengenharia, geologia de engenharia, túneis urbanos, túneis não urbanos.

**KEY WORDS:** geoengineering, engineering geology, urban tunnels, non-urban tunnels.

### RESUMO

Uma obra subterrânea distingue-se pela importância que o maciço envolvente assume no seu comportamento e, conseqüentemente, no dimensionamento estrutural. Este aspecto integra esse tipo de obra na Geoengenharia onde é fulcral o papel do Geólogo de Engenharia. Este trabalho terá como principal objectivo ilustrar a contribuição da Geologia de Engenharia e avaliar a influência da cobertura e do meio onde a obra se insere, nas actividades a desenvolver a nível desta disciplina. Apresentam-se quadros-resumo, onde se confrontam as obras subterrâneas em meio urbano e não urbano, e a abordagem no âmbito da geologia de engenharia.

### ABSTRACT: *Engineering Geology and underground projects and structures*

The rock massif plays a fundamental role on the behaviour and on the design of underground projects, making this type of structure different from many others, thus emphasizing the importance of Geoengineering. The contribution of Engineering Geologists is of major importance. The present work aims to illustrate the Engineering Geology contribution and to evaluate the influence of overburden and location of

199

---

<sup>1</sup> EDP Produção – Engenharia e Manutenção, SA (Grupo EDP). Rua do Bolhão, 4000 Porto, Portugal. (nadir.plasencia@em.edpproducao.edp.pt).

underground structures on their activity. Summary-tables are presented, where urban and non-urban underground structures, as well as the respective engineering geology activities, are compared.

## 1. CONCEITO DE GEOENGENHARIA

A importância da obra subterrânea depende fundamentalmente das suas dimensões, das coberturas, da envolvente superficial da obra e das características geológico-geotécnicas dos terrenos em que esta está inserida. É na crosta terrestre, em conjunto ou não com um suporte, que se encontra o sistema que assegura a sua estabilidade. Entra aqui o conceito de Geoengenharia, área comum da geologia e da engenharia, onde as formações geológicas devem ser encaradas como um elemento constitutivo ou material de todo o projecto [1].

A Geologia, que se ocupa da constituição e propriedades da crosta terrestre, tem um papel preponderante no estudo das soluções subterrâneas. O grande desenvolvimento da sociedade, provocando a renovação de métodos construtivos com novas tecnologias, torna também fundamental um conhecimento cada vez mais aprofundado das características geológicas. O bom senso, a sensibilidade e as experiências adquiridas são fundamentais no dimensionamento de uma obra subterrânea. Estes projectos assumem características distintas das restantes áreas da engenharia, dado que apenas terminam após a conclusão da obra. Estas obras necessitam de uma conjugação plena entre projectista, fiscalização e construtor, resultando o projecto final de uma constante adaptação às condições geológico-geotécnicas encontradas ao longo das escavações. Estas condições e sua tectónica resultam da incerteza na caracterização dos terrenos, consequência de uma frequente heterogeneidade e, muitas vezes, dificuldades de acesso para prospecção (densidade urbana ou profundidade da obra), assim como da complexidade do comportamento da estrutura subterrânea.

No decurso das várias fases do Projecto, o geólogo de Engenharia assume distintos papéis. Durante os estudos preliminares e prévios, deverá acompanhar a análise dos esquemas alternativos e contribuir para a estimativa do custo da obra. Na fase de projecto, deverá preparar os elementos geológico-geotécnicos para lançamento do concurso para construção, tendo, com esse fim, realizado campanhas de prospecção e interpretação dos resultados. Durante a fase de construção, o geólogo deverá acompanhar a obra para classificação dos materiais encontrados, tendo em consideração as secções tipo de sustimento e os procedimentos construtivos especificados, bem como o necessário registo das características do maciço encontrado [2].

A construção de um túnel em meio urbano permite minimizar interferências com achados arqueológicos ou problemas relacionados com infra-estruturas ou

redes. Frequentemente as escavações em meio urbano são realizadas a pequena profundidade, condicionando a sua execução a maciços de menor resistência e mais heterogêneos, o que aumenta a probabilidade de induzir assentamentos à superfície. A pequena cobertura facilita o acesso de mais meios de prospecção às cotas de escavação e a aplicação de equipamento de instrumentação. Entretanto, o aumento das coberturas para algumas centenas de metros poderá minimizar problemas de propagação de vibrações e/ou ruídos para a superfície, assim como de subsidências. Os túneis longos e profundos, escavados em zonas montanhosas, necessitam muitas vezes de diversas frentes de ataque, sendo por vezes também condicionados pelos traçados e emboquilhamentos desses mesmos ataques. Por outro lado, a escavação de túneis profundos poderá ser dificultada pelo comportamento não elástico do maciço, onde a viscosidade e a plasticidade não são tão favoráveis à abertura de escavações. Poderão ainda dificultar a abertura de túneis profundos fenómenos de “rockburst” (explosões de rocha), queda de blocos, destaque de lascas ou “squeezing” (fecho da secção por efeito da pressão), o aumento da pressão de água ou o aumento da temperatura. Entretanto, os métodos de prospecção a grande profundidade são onerosos, demorados e complexos, e nem sempre facilitam a definição dos modelos geológico-geotécnicos e a caracterização dos maciços às cotas interessadas pelas obras em questão.

## 2. OBSERVAÇÃO DA SUPERFÍCIE E CARTOGRAFIA GEOLÓGICA

No projecto de um túnel, a primeira contribuição técnica é dada pela intervenção do geólogo, que, observando a superfície do local da futura obra subterrânea, poderá ajudar na redução das incertezas com que se parte para um projecto desta tipologia. Nas primeiras fases do projecto o engenheiro é, provavelmente, menos importante que o geólogo [3]. As observações da superfície permitem descrever as formações e estruturas geológicas ao longo do alinhamento do traçado em estudo. A fotografia aérea do relevo é um ponto de partida para a análise da complexidade morfológica das formações, sendo também as cartas geológicas elementos indispensáveis. Obviamente, quanto mais profunda a obra, mais difícil a correlação do que se observa à superfície com o que se prevê em profundidade e mais necessária se torna uma intuição psicologicamente colorida [1].

Nos projectos de túneis, são as cartas geológicas que informam sobre os diversos tipos de formações e estruturas geológicas aflorantes, assim como permitem a previsão da disposição, em profundidade, das formações e estruturas geológicas. Os levantamentos geológicos e estruturais de superfície, realizados com precisão adequada à fase de projecto, são sempre necessários. É na cartografia geológica que se pode obter o estilo tectónico regional; no entanto, não fornece toda a informação necessária a uma compreensão de pormenor do que se irá detectar em

profundidade e que permita a definição do modelo geológico-geotécnico e a caracterização do maciço local. Além da carta geológica, poderá também ser necessária a preparação de uma carta geotécnica que traduza a estabilidade, alteração e/ou resistência das formações geológicas cartografadas, principalmente para as bocas dos túneis. Tendo em vista uma nova obra subterrânea, deverá ainda ser elaborada uma carta hidrogeológica ou, no mínimo, deverão ser registadas na carta geológica as características particulares que possam conduzir a problemas causados pela influência de água nas escavações.

Além da análise de cartas geológicas existentes ou elaboração de carta geológica adequada, apoiada na fotografia aérea, aero-fotogrametria, cartografia por meio de satélite e topografia, serão entretanto necessários trabalhos de campo com vista à caracterização geológico-geotécnica do maciço, tendo por base os afloramentos existentes que, na maior parte dos casos se apresentam descontínuos e cobertos por depósitos ou pelo tecido urbano. Esta actividade pode e deve ser realizada em simultaneidade com os trabalhos de campo necessários para a elaboração da carta geológica e/ou geotécnica. Nesta fase, é possível a colheita de dados fundamentais para uma primeira abordagem a qualquer trabalho de geologia de engenharia. É importante a identificação, recolha e interpretação da informação geológica útil para o projecto pois, apesar da prospecção, a realizar numa fase posterior, ser, sem dúvida, uma informação fundamental na definição do modelo geológico, os primeiros dados procedentes dos afloramentos não deixam de ser a peça fulcral [4]. Os métodos para colheita dessa informação não mudaram muito nas duas últimas décadas, não se tendo ainda encontrado substituto para os trabalhos de campo, fundamentais para a elaboração de uma adequada caracterização geológico-geotécnica [5].

Nos projectos a desenvolver em meio urbano, a grande dificuldade na investigação de superfície prende-se, por vezes, na raridade de afloramentos resultante da proliferação da malha urbana [6]. Idêntica escassez pode, por vezes, também ocorrer em zonas não urbanas com grande cobertura de solos provenientes ou não da alteração das rochas locais e de vegetação densa. Taludes de estradas e pedreiras antigas ou actuais são as zonas ideais para a recolha de informação sobre os maciços que se pesquisam.

Uma contribuição importante da geologia de engenharia no estudo de traçado de túneis prende-se com o desenvolvimento do seu eixo e a variabilidade de formações e estruturas geológicas que poderá atravessar, assim como as suas relativas posições e orientações. Os possíveis traçados e características geológico-geotécnicas deverão ser ponderados de forma a permitir a escolha de uma ou mais soluções possíveis, a aprofundar, apoiada nos modelos geológicos, elaborados tendo em consideração a cartografia geológica e observação de superfície.

Em túneis pouco profundos em meios urbanos, é importante, quando possível, conhecer os alinhamentos estruturais e as famílias de descontinuidades existentes.

No entanto, os aspectos relacionados com a meteorização do maciço, que pode ser intensa no caso de coberturas reduzidas, ultrapassam por vezes a importância da geologia estrutural. Em túneis profundos, pelo contrário, é fundamental uma análise da compartimentação do maciço e a identificação das estruturas geológicas mais relevantes.

A identificação das zonas meteorizadas é importante nos emboquilhamentos e traçados próximos da superfície, onde as coberturas são menores, agravando as condicionantes geotécnicas associadas às zonas mais superficiais. No entanto, nem em todos os maciços se encontra a sequência típica de um perfil de meteorização e, portanto, há também bocas de túneis enquadradas em maciço rochoso são.

Os problemas de rebaixamentos dos níveis freáticos e subsidências estão fundamentalmente associados a túneis de coberturas mais reduzidas. Não é, no entanto, totalmente seguro que não originem impactes ambientais em traçados profundos.

Em túneis para circuitos hidráulicos com revestimentos flexíveis (geralmente túneis profundos) pressões internas excessivas de água e perdas de água do túnel poderão também causar deslizamentos à superfície. Para evitar estas situações, a localização dos circuitos hidráulicos terá que ser criteriosamente analisada em função das coberturas e estruturas geológicas relevantes.

Nestes circuitos hidráulicos, tendo em vista evitar fugas de água, deverá ser analisada a existência de estruturas geológicas que, de alguma forma, facilitem a percolação para a superfície, túneis de acesso ou restituição, principalmente nas zonas das bocas e de passagem por linhas de água coincidentes com menores coberturas [7]. Falhas e zonas de fraqueza requerem especial atenção nas escavações subterrâneas, dado que a sua estrutura, composição e propriedades podem ser muito diferentes do maciço envolvente, introduzindo alterações na rede de percolação teórica [8]. Tendo em vista esta preocupação, é relevante a definição do modelo hidrogeológico e de fracturação no projecto de circuitos hidráulicos, principalmente se não revestidos.

Resumem-se no Quadro I as actividades a desenvolver na fase inicial do projecto de obras subterrâneas, bem como as principais dificuldades associadas ao meio (urbano ou não urbano) onde estas se inserem.

### 3. PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

*“Um bom modelo geológico permite aos geólogos e engenheiros envolvidos no Projecto compreender as interacções dos diversos componentes que constituem a crosta terrestre e tomar decisões técnicas racionais baseadas nessa compreensão. Em empreendimentos em que não exista um modelo geológico adequado, apenas podem ser tomadas decisões “ad hoc” e o risco de problemas na construção devidos a condições geológicas não previstas é muito elevado.” [3]*

Quadro I – Cartografia geológica e reconhecimento de superfície em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Observação da Superfície	Muito dificultada pela malha urbana. É fundamental a pesquisa de elementos cartográficos antigos. Alinhamentos estruturais de grande importância poderão ser detectados na observação de fotografia aérea que abranja região envolvente não urbana.	Dificultada pelas coberturas de solos e pelas coberturas vegetais, mas em geral é uma actividade com benefícios.
Cartografia Geológica	A existência de cartografia geológica antiga facilita o desenvolvimento destes trabalhos. É uma actividade de extrema complexidade a realizar neste meio. É útil a observação de qualquer talude ou de escavações em curso para implantação de novas estruturas.	Geralmente existem afloramentos que podem ser observados permitindo estudar a petrografia e a geologia estrutural. A fotografia aérea é muito útil. Em geral é uma actividade com proveito.
Reconhecimento de Superfície	Muito dificultada pela malha urbana. É útil a observação de qualquer talude ou de escavações em curso para implantação de novas estruturas.	Geralmente existem afloramentos que podem ser observados e estudados em pormenor permitindo apoiar a orientação final das escavações. Em geral é uma actividade com muito proveito.
Hidrogeologia	Dado que a generalidade das escavações se realizam em meios pouco profundos e alterados, é fundamental saber quais os graus de alteração e o tipo de formações mais superficiais.	Estas escavações terão um maciço envolvente quase impermeável. Torna-se, no entanto, imperativo o conhecimento pormenorizado das estruturas geológicas que poderão pôr em comunicação a superfície e as escavações.

Tendo em vista a definição dos traçados dos túneis, é recolhida informação fundamental nos trabalhos de cartografia geológica já referidos no capítulo anterior. No entanto, no decorrer e aprofundar dos conhecimentos e exigências do projecto, tornam-se necessários novos trabalhos que permitam obter indicações sobre o que se passa abaixo da superfície. Esses trabalhos, designados por prospecção, incluindo métodos geofísicos, sondagens, poços e galerias, devem ser encaminhados de forma a, por um lado, permitir completar o modelo geológico nos pontos onde existam dúvidas não esclarecidas pelo reconhecimento geológico de campo, e por outro lado, facilitar a realização de ensaios *in situ* e a obtenção de amostras para ensaios laboratoriais [4]. As campanhas de prospecção podem trazer grandes benefícios para a caracterização do maciço onde se pretende executar a obra, desde que não sejam impedidas por restrições ambientais, especificações ou complicadas condicionantes de execução. A cartografia geológica de superfície, com a inerente informação prévia do local e condições geológicas regionais, assim como os acessos e o objectivo do Projecto são condicionantes para o planeamento da campanha de prospecção [9].

Os objectivos principais dos trabalhos de prospecção, tendo em vista o projecto de uma obra subterrânea, são a obtenção de dados para apoio na definição e/ou pormenorização do modelo geológico, uma base para avaliação de potenciais problemas de instabilidade, obtenção dos parâmetros necessários para a análise

de estabilidade e dimensionamento dos suportes e revestimentos e uma base para avaliação do custo e preparação dos elementos para concurso.

Como referido por LOMBARDI (2001), a quantidade de trabalhos de investigação a desenvolver prende-se fundamentalmente por estabelecer uma aceitável relação benefício/custo. Este exercício pode-se tornar demasiado arriscado, não tanto por o custo dos trabalhos de prospecção estar subestimado, mas pelo facto de os benefícios da prospecção serem, por definição, indefinidos. Ou seja, com frequência só pode ser decidido se os benefícios dos trabalhos de prospecção foram ou não válidos após estar concluída a campanha de prospecção prevista. Existe contudo um limite razoável para os trabalhos a desenvolver na fase de projecto, que se prende com a necessidade da equipa projectista em obter conhecimento sobre as formações geológicas, de forma a não estar limitada na caracterização global das formações onde serão realizadas as escavações, bem como de forma a poder diminuir a quantidade de incertezas iniciais. A título de orientação a experiência parece indicar que, para um túnel de dificuldade média, se poderá aceitar, como valor orientador, que o comprimento total das sondagens seja superior a 50% da dimensão longitudinal do túnel [4]. Salienta-se, no entanto, que são mais frequentes os casos de obra em que após construção se considera que mais prospecção teria permitido uma diminuição dos custos e dos prazos do que o contrário, isto é, casos em que se considerou a prospecção excessiva [1].

Quadro II – Comparação entre os métodos mais utilizados na prospecção em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Geofísica por Métodos Sísmicos	Muito dificultada pela malha urbana e pelas infraestruturas. É mais proveitosa se realizada entre furos, com a possibilidade de obter parâmetros geomecânicos. Tem a grande condicionante do ruído urbano. O método de refração oferece melhores resultados que a reflexão.	Dificultada pelas coberturas vegetais mas, no geral, é uma actividade proveitosa. Pode ser realizada antes da prospecção mecânica, para apoio ao seu dimensionamento, e pode ainda ser utilizada entre furos, permitindo a caracterização do maciço nessa zona. Os métodos de reflexão possibilitam a prospecção a grande profundidade.
Sondagens e Poços	Os poços podem ser adequados principalmente nos emboquilhamentos. É facilmente exequível atingir com sondagens profundidades que ultrapassem a soleira dos túneis. A localização das sondas é dificultada pelo tecido urbano. Poderá ter interesse o uso da recente técnica de sondagens direccionadas.	Por vezes pode ser complicado o acesso das sondas a alguns locais. É dispendioso e moroso prospectar até às cotas de implantação das obras. As sondagens em avanço realizadas a partir das frentes de escavação permitem contornar esta dificuldade. O desenvolvimento das técnicas de sondagem direccionada poderá vir a ser útil para ultrapassar algumas dificuldades.
Galerias de reconhecimento	Não é frequente a realização de galerias de reconhecimento, a não ser, por vezes, em avanço, nos túneis.	As galerias de reconhecimento são principalmente realizadas para prospecção em locais de cavernas, no entanto, só é possível a sua realização após execução de túneis de acesso.

No âmbito das obras subterrâneas, o recurso a trabalhos de prospecção não se verifica apenas na fase de projecto. Muitas vezes é também necessário, já no decurso da escavação, o recurso a sondagens ou métodos sísmicos para aprofundar o conhecimento do maciço na frente de escavação e diminuir o grau de incertezas sobre o que se irá encontrar para lá dessa frente. O modelo geológico é uma ferramenta dinâmica que vai mudando à medida que aumenta a informação. Num empreendimento subterrâneo o maior volume de informação aparece no decurso da escavação. O modelo geológico é continuamente refinado à medida que se avança pelas diferentes fases do Projecto [3].

No Quadro II apresentam-se as dificuldades de aplicação dos principais métodos de prospecção em meio urbano e em meio não urbano.

#### 4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Em meio urbano, dada a reduzida profundidade dos traçados, é possível a realização de ensaios *in situ* e a obtenção de amostras para ensaios laboratoriais em fases precoces de projecto. Em obras subterrâneas profundas e quando não for viável obter amostras representativas com os métodos de prospecção, tais ensaios apenas são passíveis de realizar quando se atinjam as cotas de projecto, por meio de túneis de acesso. Na análise e interpretação dos resultados dos ensaios de laboratório e de campo é importante verificar se os resultados obtidos são representativos e se traduzem a realidade do maciço *in situ* (Quadro III).

Quadro III – Ensaios de caracterização em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Ensaios laboratoriais	Facilidade de recolha de amostras representativas do maciço onde se insere a obra.	Por vezes é complicada a obtenção de amostras do maciço à cota da obra, sendo necessário extrapolar parâmetros, a partir da caracterização de amostras mais superficiais.
Ensaios <i>in situ</i>	É exequível a realização de ensaios <i>in situ</i> em fases precoces dos estudos de caracterização.	São possíveis apenas após construção de túneis de acesso.

#### 5. RELATÓRIOS E MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

O conjunto de actividades acima descritas, desenvolvidas no âmbito da Geologia de Engenharia, e seus resultados, deverão ser englobados num relatório.

De acordo com o EC7, o designado Relatório de Caracterização Geotécnica, que serve de base ao Relatório do Projecto Geotécnico, deverá incluir toda a informação de âmbito geológico relevante para a obra. Numa obra subterrânea, inserida nas categorias geotécnicas 2 ou 3, dada a grande componente geológica que constitui esse documento, considera-se que o relatório que serve de base ao Relatório de Projecto Geotécnico deveria ser designado por Relatório de Caracterização Geológica e Geotécnica.

Para que o dimensionamento geotécnico seja adequado, é importante dispor-se de um bom modelo geológico-geotécnico. Os modelos geológicos devem ser fáceis de assimilar e de interpretar por todos os que intervêm no dimensionamento e na obra. Nesse sentido as empresas de projecto deveriam investir em produtos que permitissem a construção rápida de blocos diagramas, processos já utilizados para a indústria petrolífera. Se a visão tridimensional é importante para entender o modelo geológico-geotécnico do maciço numa caverna, também, apesar do seu cariz linear, não deixa de ser relevante para túneis, onde os efeitos laterais são condicionantes para a estabilidade.

Quadro IV – Classificações de maciços em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Classificação de Maciços	A profundidade e a meteorização do maciço condicionam a utilização das classificações. Poderão ou não ser usadas as classificações a título indicativo e no sentido de permitir o zonamento. O sistema Q entra em consideração com a cobertura. Estando perante um maciço intensamente meteorizado, cujo comportamento seja o de um solo, a classificação do NATM será a mais indicada.	São aplicáveis, de modo geral, todas as classificações abordadas: NATM, RMR, Q e GSI.
Condições Geológicas Singulares	Associadas à heterogeneidade do maciço; geralmente blocos resistentes em solos ou rochas alteradas. No caso de maciços ricos em argilas expansivas, poderão surgir fenómenos de expansibilidade. Não está excluída a presença de falhas.	Zonas de falha mais ou menos tectonizadas, por vezes associadas a dobras e carreamentos. Fenómenos de expansibilidade devido a afluições de água e fenómenos de fluência devido à acção de tensões.

## 6. CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS NO APOIO AO PROJECTO E CONSTRUÇÃO

As classificações de maciços, apesar da subjectividade associada, são muito úteis na fase de estudo prévio, tendo em vista o zonamento do maciço e orçamentação da obra. Em maciços cujas características se saiba não conduzirem a situações críticas de instabilidade, poderão inclusive ser usadas, em conjunto com a experiência adquirida, para a escolha de soluções de sustimento. Visto que em

meio urbano, e às profundidades a que se inserem as obras subterrâneas, o maciço apresenta, muitas vezes, comportamento de solo, nem sempre são aplicáveis as classificações que visam o zonamento do maciço.

A classificação utilizada no NATM (New Austrian Tunnelling Method), sendo descritiva do comportamento do maciço quando sujeito a uma escavação subterrânea, adequa-se a todos os meios; no entanto, na base do zonamento associado à classificação do NATM, para apoio à interpretação e conjugação da informação, é, muitas vezes, necessário o recurso a outras classificações (Quadro IV), como GSI, RMR ou Q (que se baseiam na análise dos elementos recolhidos nas fases antecedentes dos trabalhos), sendo, posteriormente, cada zona geomecânica enquadrada numa classe de comportamento. Esta classificação qualitativa pode também ser útil para a percepção do comportamento do maciço, mesmo quando usadas classificações quantitativas.

A utilização sistemática das classificações RMR (rock mass rating) e do sistema Q (index Q), e pontual do GSI (Geological Strength Index), nas frentes de escavação de Venda Nova II, mas também a experiência acumulada de outras obras subterrâneas — casos do Alto Lindoso, Caldeirão, Sabugueiro, Foz Côa e Cefra — levam a tecer as considerações que seguidamente se apresentam.

A utilização da classificação de Bieniawski (RMR) em zonas de falha ou zonas muito meteorizadas não se revela adequada; frequentemente há necessidade de optar por um tipo de suporte, considerado eficiente, que corresponderia a um valor de RMR mais baixo do que o somatório dos parâmetros do método. Para zonas de falha sem água, o valor mínimo de RMR é 23, recomendando Bieniawski que o suporte seja aplicado até 10m da frente de escavação; intuitivamente observa-se, com frequência, que esse afastamento não se afigura adequado para o comportamento que o maciço apresenta na escavação (ressalva-se, no entanto, que esta situação depende muito da secção de escavação). Quando o maciço evidencia fracas características geomecânicas, a classificação GSI, mais imediata e intuitiva, parece ajustar-se melhor ao comportamento real do maciço que a classificação RMR. Ainda em relação à classificação de Bieniawski, considera-se que as descontinuidades com direcção perpendicular ao eixo do túnel e pendor entre 20° e 45° a favor da escavação deveriam ter o mesmo peso para ajuste na classificação do RMR que as descontinuidades com o mesmo pendor, mas contra a escavação, ou seja, deveriam também ser consideradas desfavoráveis. Com efeito, a presença de tais descontinuidades num maciço de boas características geomecânicas implica a utilização de pregagem sistemática na abóbada, quer o pendor das diaclases seja a favor ou contra a escavação.

A classificação de Barton, apesar de numa primeira análise poder parecer complexa para aplicação na frente de escavação, revela-se relativamente expedita. É uma classificação que se enquadra num método muito versátil de construção de túneis, que para a escolha do suporte tem em consideração, além das características

do maciço, a secção de escavação, as tensões *in situ* e/ou presença de falhas e a função da obra.

Dada a subjectividade associada às classificações de maciços, é aconselhável utilizar e confrontar mais do que uma classificação. Devido à relação entre a dimensão da escavação e a geoestrutura, a rotura é frequentemente condicionada por esta última. A atribuição de um determinado tipo de sustimento/revestimento deverá ter em consideração não apenas a classificação da frente de escavação, mas também as características da envolvente, por exemplo, eventual proximidade de contactos litológicos, não visíveis nas superfícies escavadas.

## 7. OBSERVAÇÃO DE OBRAS SUBTERRÂNEAS

A monitorização tem um papel imprescindível, principalmente no acompanhamento de obras subterrâneas em meio urbano e/ou próximo da superfície, no caso de grandes secções de escavação, e/ou em condições geológicas singulares. A interpretação conjunta dos resultados da monitorização e das características geológicas locais permite adequar metodologias e sustimentos a aplicar. Em escavações realizadas em maciços de boas características geomecânicas, geralmente profundos, o método de escavação mais utilizado (explosivos) dificulta a utilização de instrumentação próximo da frente de escavação, onde se verificam as maiores deformações.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Geologia, como base de conhecimento da crosta terrestre, deverá sempre constituir o ponto de partida para um adequado dimensionamento de qualquer obra subterrânea. A observação de superfície é insubstituível e o reconhecimento de superfície imprescindível, apesar das dificuldades muitas vezes associadas a este tipo de actividades. Uma boa cartografia geológica revela-se fundamental para o arranque de um projecto de Geoengenharia.

A Geologia de Engenharia contribui, em conjunto com a Geotecnia, para a Geoengenharia. A Geologia detém o conhecimento profundo da crosta terrestre onde se desenvolverá a obra subterrânea e constitui a base do trabalho a desenvolver, sendo ao modelo geológico que se deverá recorrer para interpretar e esclarecer dúvidas. Existem actividades do âmbito da Geologia, como a cartografia, reconhecimento de campo, e as campanhas de prospecção, que, quando interpretadas à luz da Geologia de Engenharia e, em conjunto com a caracterização geotécnica do maciço, permitem definir o modelo geológico-geotécnico. A parametrização e a monitorização são actividades de colaboração entre a Geologia de Engenharia e

a Geotecnia. As actividades que envolvem o cálculo e o dimensionamento da escavação são da responsabilidade do geotécnico, que, obrigatoriamente, deverá ser crítico perante os resultados obtidos nos cálculos realizados, tendo presente que nos modelos numéricos se torna difícil a simulação de materiais naturais, muitas vezes com estruturas heterogéneas associadas.

Por último, salienta-se que num Projecto de Geoengenharia é fundamental a intervenção de Geólogos de Engenharia e de Geotécnicos, numa equipa indissociável, trabalhando como um todo e com o mesmo objectivo. Cada elemento deve constituir um elo imprescindível, perfeitamente conhecedor quer das suas funções e competências, quer das dos restantes intervenientes.

Dada a particularidade da Geoengenharia, que lida com materiais naturais, as empreitadas para a construção de obras subterrâneas deveriam ser âmbito de legislação específica.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] LOMBARDI, G., 2001 – “Geotechnical Risks for Project Financing of Tunnels in Non-Urban Areas”. *Tribune*, nº20, ITA-AITES, pp. 19-23.
- [2] GOODMAN, R.E., 1993 – “*Engineering Geology - Rock in Engineering Construction*”. John Wiley and Sons, New York.
- [3] HOEK, E., 1999 – “Putting Numbers to Geology - an Engineer’s Viewpoint”. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, pp. 1-19.
- [4] GALERA FERNÁNDEZ, J.M., 2000 – “Caracterización geomecánica de macizos rocosos”. *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. Carlos López Jimeno - UPM, Madrid, pp. 143-182.
- [5] HOEK, E., 2001 – “*Rock Engineering - Course Notes*”. [www.rockscience.com](http://www.rockscience.com).
- [6] CLAYTON, C.R.I., MATHEWS, M.C., SIMONS, N.E., 2000 – “Site Investigation”. Blackwell Science, Oxford, England.
- [7] BROCH, E., 1985 – “Development of Unlined Pressure Shafts and Tunnels in Norway”. *Norwegian Hydropower Tunnelling*. Tapir Publ., Trondheim, Norway, pp. 23-30.
- [8] BUEN, B., PALMSTRÖM, A., 1985 – “Design and Supervision of Unlined Hydropower Shafts and Tunnels with Head up to 590 meters”. *Norwegian Hydropower Tunnelling*. Tapir Publ., Trondheim, Norway, pp. 65-72.
- [9] QUIRALTE LÓPEZ, F., 1998 – “Investigaciones in situ”. *Ingeo Túneles - Libro 1*. Carlos López Jimeno - Entorno Grafico, Madrid, pp. 69-97.