

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E ANÁLISE DA
ESTABILIDADE DE TALUDES NA PLANIFICAÇÃO
DE OBRAS DE ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA**
GEOMECHANICAL CHARACTERIZATION AND
SLOPE STABILITY ANALYSIS IN UNDERGROUND
EXCAVATION PLANNING

João Paulo Meixedo

Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto
CERENA, Centro de Investigação em Recursos Naturais e Ambiente
jme@isep.ipp.pt

Ana Cristina Meira Castro

Departamento de Matemática, Instituto Superior de Engenharia do Porto
CERENA, Centro de Investigação em Recursos Naturais e Ambiente
amc@isep.ipp.pt

Sumário: O desenvolvimento das sociedades contemporâneas, e consequente densa ocupação da superfície terrestre, tem levado a uma tendência crescente da procura de espaços suplementares, surgindo o espaço subterrâneo como uma das alternativas disponíveis mais apetecíveis. Nesse sentido, as geo-engenharias, de onde se destaca a engenharia geotécnica, representam um papel de destaque em obras desta natureza, lançando mão de disciplinas como a geologia, a geomecânica aplicada, a resistência dos materiais, e o desmonte e movimentação de rocha. A necessidade de caracterização e de previsão do comportamento do maciço é fundamental para um dimensionamento adequado das estruturas resistentes para a sua sustentação. No presente artigo, os autores debruçam-se sobre o problema da segurança dos

maciços rochosos e conseqüente vital importância da caracterização da geomecânica para assegurar a estabilidade de um maciço com vista à escavação e construção de um túnel; apontando as correctas metodologias de estudo.

Palavras-chave: Escavação subterrânea, maciço rochoso, mecânica das rochas, geomecânica, descontinuidade.

Abstract: The development of contemporary society and the consequent dense occupation of the Earth's surface, has led to a growing trend in the demand for additional spaces. The underground space is one of the most desirable alternatives available. In this context, Geotechnical Engineering represents a major role in constructions of this nature, releasing hand of disciplines such as geology, geomechanics, mechanics of materials, and rock blasting. The need for characterization and prediction of the behaviour of the rock mass is essential to a proper sizing of structures resistant to its support. In this paper, the authors focus on the problem of safety of rock masses and consequent vital importance of characterization of geomechanics to ensure its stability during the excavation and construction of a tunnel; pointing out the correct study methodologies.

Keywords: Underground excavation, rock mass, rock mechanics, geomechanics, discontinuity.

Introdução

A escavação de túneis apresenta-se como uma actividade de grande complexidade de execução e sujeita a várias condicionantes. Entre elas destaca-se o tipo de formação geológica que é necessário atravessar, pelo que um criterioso conhecimento não só das mais variadas técnicas e processos construtivos, como

também do terreno onde se pretende implantar a estrutura, é de importância fulcral para o sucesso da empreitada. No caso das vias de comunicação rodoviárias e ferroviárias, a necessidade de construção de túneis pode estar aliada à necessidade de vencer limitações topográficas e geomorfológicas, ou mesmo relacionada com constrangimentos de carácter ambiental.

Para o desenvolvimento de um projecto de escavação, a abertura de um túnel seja rodoviário ou ferroviário, o desenvolvimento de uma mina ou outro tipo de construção, surge como prioridade fundamental a rigorosa elaboração de um estudo do maciço, relativamente às suas propriedades geológicas, geotécnicas e geomecânicas (H. I. Chaminé *et al.*, 1995, 2010).

No presente artigo pretende-se analisar a importância da caracterização geológico-geomecânica e zonamento geotécnico do maciço a ser intersectado, por forma a que os projectistas e demais intervenientes possam retirar conclusões válidas e indicadores importantes que auxiliem na procura e definição de soluções de engenharia a adoptar, especialmente tendo em conta a envolvente da obra a executar.

O objectivo último é o de apresentar uma correcta metodologia de avaliação e caracterização geomecânica de maciços rochosos.

Maciços rochosos: caracterização geológica e geomecânica

A caracterização e avaliação geomecânica de maciços rochosos é parte integrante daquilo a que podemos chamar engenharia das geociências, e que compreende disciplinas como a resistência dos materiais, a mecânica dos solos e a mecânica das rochas. Esta “engenharia de maciços rochosos”, que envolve parâmetros operacionais relativos a aspectos geométricos, mecânicos, construtivos, de segurança operacional, sem esquecer os relacionados com prazos e custos, é uma área de intervenção que envolve geo-profissionais como engenheiros geotécnicos, engenheiros de minas, engenheiros geólogos, geólogos aplicados ou engenheiros civis. Trata-se de um estudo evolutivo, que acompanha as diferentes fases de um projecto de obras subterrâneas, desde o estudo de viabilidade, até à fase de serviço, passando pelas fases de projecto e construção (J. S. Griffiths, 2002).

Durante o estudo de viabilidade, o estudo geológico-geotécnico incide sobre a recolha de toda a informação disponível, sob os pontos de vista topográficos, geomorfológicos, geológicos e de hidrogeologia geral (M. J. Afonso *et al.*, 2004; J. M. Carvalho *et al.*, 2004). Esta fase inicial compreende igualmente a análise de fotografias aéreas e imagens de satélite, bem como um reconhecimento geomorfológico e geológico de superfície, incidindo sobre a litologia/estratigrafia e a geologia estrutural. Poderão ser levados a cabo alguns trabalhos expeditos de prospecção geológica e geotécnica. O objectivo último é o da criação de um modelo geológico que permita definir a implantação da obra.

Os estudos levados a cabo na fase de projecto compreendem prospecção geológica, geotécnica e mecânica *in situ*, bem como a realização de ensaios laboratoriais, que permitam a elaboração de um zonamento geotécnico, com base na classificação geomecânica obtida (ATSM, 2001, 2010). Essa informação complementar vai permitir apontar com rigor a localização do emboquilhamento e a definição dos métodos de escavação, e ainda a selecção do tipo de sustimento primário (IAEG, 1976, 1981a, 1981b).

Na terceira fase – a de construção – os estudos geológico-geotécnicos mantêm-se, permitindo definir com exactidão o tipo de sustimento definitivo, e tendo ainda como missão a detecção de eventuais situações anómalas que levem a adaptações ao projecto. Durante esta fase é necessário levar a cabo trabalhos de prospecção que acompanhem a frente de avanço, ir produzindo cartografia das superfícies de escavação e fazendo o registo de ocorrências. É fundamental observar o comportamento do maciço e realizar ensaios *in situ*.

À medida que a escavação do túnel avança é necessária a adaptação dos métodos construtivos e consequente organização de trabalhos às reais condições deparadas no terreno de forma a:

- Garantir que os métodos de escavação sejam os mais ajustados relativamente ao maciço, e a respectiva selecção dos equipamentos seja a mais adequada de forma a responder da melhor forma às dificuldades impostas;
- Garantir que os avanços executados na escavação sejam os mais apropriados, conseguindo desta forma a estabilidade temporária da frente de escavação;

- Garantir que o suporte utilizado seja o mais ajustado e adaptado às reais condições de maciço, garantindo a segurança da escavação, evitando o colapso do túnel, e gastos desnecessários em suporte caso este se encontre sobredimensionado;
- Prever a ocorrência de cunhas, devido à intersecção das discontinuidades do maciço que possam deslizar na calote e hasteias do terreno, e estabilizar eventuais possíveis situações de risco o melhor e mais rapidamente possível;
- Prever e caracterizar a ocorrência de outras entidades geológicas e de outro tipo, que sejam de importância para a obra e sua evolução, como sejam a existência de falhas, poços, minas ou cavernas.

Por último, na fase de serviço, é necessário continuar a avaliar o comportamento da obra, por meio de observação e instrumentação.

Fronteira geomecânica entre solo e rocha

O interesse pelo estudo do comportamento geomecânico dos maciços rochosos é algo que remonta apenas a meados do século passado. Até aí, no que diz respeito a interesse relacionado com obras de engenharia, apenas os solos, ou rochas desagregadas eram objecto de análise. Enquanto a rocha pode, de acordo com Vallejo [2002], ser definida como sendo um agregado natural, duro e compacto de partículas minerais com fortes uniões coesivas permanentes, consideradas como um sistema contínuo, um solo, de acordo com o mesmo autor, é agregado natural de grãos minerais unidos por forças de contacto normais e tangenciais às superfícies das partículas adjacentes, separáveis por meios mecânicos de pouca energia.

A dificuldade reside na definição de fronteiras nessa zona de sombra que são os terrenos de transição, compreendendo os solos duros e as rochas brandas. Os critérios fundamentais de distinção baseiam-se nas propriedades mecânicas como o valor do módulo de deformabilidade, da resistência à compressão uniaxial e da resistência ao corte (valor da coesão e ângulo de atrito). Na TABELA I são apresentados valores que permitem uma análise comparativa.

TABELA I - Critérios de distinção entre solo e rocha.

TABLE I - Soil vs. rock distinction criteria.

Parâmetros	Solos	Rochas	Rochas de baixa resistência
Módulo de deformabilidade (MPa)	< 50	4×10^2 a 10^5	4×10^2 a 4×10^3
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	< 2	2 a 3×10^2	2 a 20
Coesão (MPa)	< 0,25	0,4 a 3×10^2	0,4 a 50
Ângulo de atrito	< 40°	< 65°	< 45°

Fonte/Source: Costa, 2007.

Evolução histórica

O problema da segurança de maciços rochosos em escavações subterrâneas esteve inicialmente relacionado com a actividade mineira e com necessidade de manter a integridade do tecto dos túneis e galerias. Remonta há mais de cem anos a tentativa de geo-profissionais de quantificar a segurança, através da definição de um grau de previsibilidade de estabilidade ou instabilidade. Ritter, em 1879 (H. I. Chaminé *et al.*, 1995, 2010) é genericamente aceite como tendo sido pioneiro na tentativa de estabelecer uma aproximação empírica formal no planeamento e projecto de túneis, tendo em consideração parâmetros estabilidade do maciço.

Após esta primeira sistematização empírica por parte de Ritter, surgiram as primeiras teorias (K. Terzaghi, 1943), destacando-se Terzaghi, em 1946, com o seu *Rock Load Mass Classification System* (K. Terzaghi, 1946, 1965; K. Terzaghi *et al.*, 1987, 1996) Seguidamente, o aparecimento do RQD (*Rock Quality Design Index*), numa publicação editada por Deere em 1963 (D. U. Deere, 1963) e revista em 1967 (D. U. Deere *et al.*, 1967), veio fazer escola (D. U. Deere, 1989; D. U. Deere *et al.*, 1988). O RQD é obtido após a realização de uma sondagem carotada, sendo dado pela medida do comprimento total, em percentagem, de tarolos, cujo comprimento é no mínimo o dobro do seu diâmetro. Esta medida permite aferir do grau de fracturação do maciço.

Outras técnicas complementares merecem igualmente destaque, por incorporarem, no RQD, uma análise das descontinuidades em termos de orientação,

preenchimento e espaçamento, tal como o RSR (*Rock Structure Rating*), estabelecida por Wickham e outros autores em 1972 (G. E. Wickham *et al.*, 1972, 1974), a classificação Q (*Rock Quality Index*) de Barton (N. Barton *et al.*, 1977, 1980, 2008; N. Barton, 2000, 2006) e o RMR (*Rock Mass Rating*), inicialmente apresentada em 1989 (Z. T. Bieniawski, 1989) e finalmente estabelecida por Bieniawski em 1973 e refinada em 1979 (Z. T. Bieniawski, 1973, 1975, 1976, 1979). Seguem-se posteriores refinamentos por parte do mesmo autor (Z. T. Bieniawski, 1984, 1989, 1993; Z. T. Bieniawski *et al.*, 2006, 2007). As classificações de Barton e Bieniawski mantêm-se como as classificações geomecânicas empíricas mais correntes. Em termos de trabalhos de autores portugueses, importa fazer uma referência ao Dimensionamento Empírico de Suporte, de Manuel Rocha, em 1976 (M. Rocha, 1981).

Em 1978, a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1978), tentou fazer uma síntese de todos estes trabalhos, acabando por criar a BGD – *Basic Geotechnical Description of Rock Masses* (ISRM, 1981, 2007). Esta classificação utiliza como parâmetros o estado de fracturação, a resistência à compressão uniaxial e o ângulo de atrito das descontinuidades. O estudo destes parâmetros associado ao estado de alteração do maciço, permite qualificar o maciço rochoso, em termos de capacidade suporte.

Mais recentemente, têm feito escola as classificações SRC - *Surface Rock Classification*, de Vallejo (L. I. González de Vallejo *et al.*, 1983, 2002, 2003) e GSI – *Geological Strength Index*, de Hoek, apresentada em 1994, com refinações posteriores (E. Hoek, 2007).

Descontinuidades

Um maciço rochoso não é mais do que uma matriz rochosa entrecortada por descontinuidades, o que lhe confere uma estrutura em blocos. A própria matriz rochosa não é um meio contínuo, homogéneo e isotrópico; antes possuindo micro-descontinuidades, fissuras e poros. Tudo factores que concorrem para a ocorrência de ruptura. Por outro lado, o facto de as propriedades mecânicas

variarem segundo a orientação das descontinuidades, confere-lhe características anisotrópicas. A heterogeneidade, por seu lado, é observável na variabilidade das propriedades físicas e mecânicas ao longo do maciço.

Uma descontinuidade, segundo a definição de Manuel Rocha (M. Rocha, 1981) é *qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de uma dada unidade geológica. Essa descontinuidade pode ser de origem sedimentar, diagenética ou tectónica; compreendendo entidades como falhas, diaclases, estratificação ou xistosidade*. As descontinuidades condicionam as propriedades geomecânicas do maciço rochoso em termos deformabilidade, permeabilidade e resistência ao corte. Na TABELA II são apresentados diferentes tipos de descontinuidades.

TABELA II - Tipos de descontinuidades.
TABLE II - Different types of geological failures.

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	Planos de estratificação	Falhas Filões Discordâncias
	Planos de laminação	
	Planos de xistosidade	
	Diaclases e fracturas	
Lineares	Intersecção de descontinuidades planares	Eixos de dobras
	Lineações	

Sob o ponto de vista geotécnico, importa determinar a amplitude (e respectiva variação ao longo do plano de diaclasamento); bem como a eventual existência de preenchimento (caracterizar a sua natureza). Não existindo preenchimento, é necessário caracterizar as paredes, distinguindo se são lisas, estriadas ou polidas; e ainda se são planas, onduladas ou denteadas.

Caracterização e compartimentação do maciço - metodologia

A indispensabilidade de estabelecer uma análise metodológica sistemática prende-se com a necessidade de uniformizar critérios, para evitar (ou reduzir

ao mínimo) o grau de subjectividade presente neste tipo de estudo, facilitando a comunicação entre os diferentes agentes (profissionais de engenharia) envolvidos (E. P. Neto, 2008).

Qualquer que seja a metodologia adoptada, deverá seguir princípios orientadores, que passa por considerar os seguintes aspectos:

- a)* - A examinação lógica e sistemáticas de todos os factores;
- b)* - Não omitir informações básicas sobre o afloramento;
- c)* - Elaborar descrições precisas sobre o maciço;
- d)* - Recolher um número de dados estatisticamente representativos.

As etapas da análise sistemática propostas pela ISRM seguem uma ordem hierárquica que pode ser esquematizada como segue:

- Descrição de características gerais, relativas a geologia estrutural, tipo de descontinuidades e composição mineralógica e textural, bem ainda como ao grau de alteração;
- Divisão em zonas geotécnicas;
- Descrição pormenorizada de cada zona geotécnica, utilizando a terminologia indicada pela ISRM;
- Descrição dos parâmetros geológicos e geométricos; isto é: definição do número de famílias de descontinuidades, e respetiva orientação e características;
- Caracterização global e classificação geomecânica, com o objectivo de definir a qualidade e resistência do maciço.

A referida caracterização e descrição do maciço, com vista à divisão em zonas geotécnicas, pressupõe, como primeiro passo, a elaboração de uma cartografia das superfícies expostas do maciço, em cima da qual será posteriormente estabelecido o zonamento geotécnico, tendo em conta aspectos como a heterogeneidade litológica, os elementos geológico-estruturais presentes, o grau de fracturação e o grau de alteração.

Em termos práticos, é necessário proceder à identificação do afloramento (localização, extensão, geometria), realizar fotografias e elaborar esquemas de campo e proceder a uma descrição geológica geral, a qual

deverá incluir uma caracterização das unidades geológicas locais e regionais, uma completa descrição e caracterização de litologias, a descrição de macro estruturas e dos traços geológico-estruturais gerais do maciço, bem ainda como a identificação de zonas alteradas e meteorizadas e a identificação da presença de água. O zonamento geotécnico deverá incluir a identificação de zonas singulares; isto é: onde se detecte a presença de elementos não sistemáticos.

Parâmetros dos maciços rochosos – bloco unitário

A existência de fracturação vai fazer com que o maciço fique dividido em blocos, cujo tamanho depende genericamente do número de famílias de descontinuidades e pelo espaçamento de cada uma delas. De acordo com a ISRM, a classificação em função do número de famílias é efectuada de acordo com o esquematizado na TABELA III.

TABELA III - Classificação do maciço em função do número de famílias de descontinuidades.

TABLE III - Rock mass classification according to the number of families of discontinuities.

Tipo de maciço	Número de famílias
I	maciço compacto
II	uma família de descontinuidades
III	uma família de descontinuidades e algumas descontinuidades ocasionais
IV	duas famílias de descontinuidades
V	duas famílias de descontinuidades e algumas descontinuidades ocasionais
VI	três famílias de descontinuidades
VII	três famílias de descontinuidades e algumas descontinuidades ocasionais
VIII	quatro ou mais famílias de descontinuidades
IX	maciço de rocha esmagada, com aspecto idêntico ao de um solo

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

Para além da questão associada ao risco, da determinação da forma e da dimensão do bloco unitário depende a definição do tipo de desmonte. Enquanto a forma é definida através do número de famílias de descontinuidades e respectiva orientação, a dimensão do bloco determina-se com base no espaçamento e continuidade das descontinuidades, bem como do número de famílias. O processo passa pela determinação do índice de tamanho (I_b – *block size index*), que fornece a dimensão média dos blocos-tipo:

$$I_b = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}$$

onde: e representa o espaçamento da família i e n o número de famílias.

O número total de descontinuidades que intercetam uma unidade de volume, por seu lado, é obtido através da determinação do índice volumétrico (J_v):

$$J_v = \frac{\sum_{i=1}^n nd}{c}$$

onde: nd representa o número de descontinuidades e c o comprimento medido.

Uma vez determinada a dimensão dos blocos, a partir do índice volumétrico, podem ser classificados de acordo com a TABELA IV.

TABELA IV - Classificação do tamanho dos blocos, em função do índice volumétrico.

TABLE IV - Block classification according to the volumetric index.

Índice volumétrico (descontinuidades / m ³)	Tipologias
< 1	blocos muito grandes
1 - 3	blocos grandes
3 - 10	blocos médios
10 - 30	blocos pequenos
> 30	blocos muito pequenos

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

Em função do tamanho e forma dos blocos, os maciços podem ser classificados de acordo com a TABELA V.

TABELA V - Classificação dos maciços, em função do tamanho e forma dos blocos.

TABLE V - Rock mass classification according to the size and shape of blocks.

Tipo	Descrição	Classe
compacto	poucas descontinuidades ou muito espaçadas	I
cúbico	blocos aproximadamente equidistantes	II
tabular	blocos com uma dimensão muito menor que as outras	III
colunar	blocos com uma dimensão muito maior que as outras	IV
irregular	grandes variações no tamanho e forma dos blocos	V
esmagado	blocos com dimensões bastante pequenas	VI

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

Parâmetros dos maciços rochosos – descontinuidades

As descontinuidades condicionam as propriedades dos maciços rochosos, em termos de resistência, de deformabilidade e de coeficiente hidráulico. A descrição das diferentes famílias de descontinuidades passa por avaliar parâmetros geológico-geotécnicos (fig. 1) tais como [BGD, ISRM 1981]:

a) - Atitude geológica (orientação espacial, em termos da sua direcção e inclinação);

A direcção é o ângulo em relação ao Norte magnético e a inclinação é o ângulo formado com a horizontal, pela linha de maior declive.

b) - Espaçamento (distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes e da mesma família);

TABELA VI - Classificação dos maciços, em função do espaçamento das descontinuidades.

TABLE VI - Rock mass classification according to the space between discontinuities.

Intervalos (cm)	Simbologia		Designações	
> 200	F1	F1-2	muito afastadas	afastadas
60 – 200	F2		afastadas	
20 – 60	F3	F4	medianamente afastadas	medianamente afastadas
6 – 20	F4	F4-5	próximas	próximas
< 6	F5		muito próximas	

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

c) - Continuidade (comprimento da descontinuidade);

TABELA VII - Classificação dos maciços, em função da continuidade das descontinuidades.

TABLE VII - Rock mass classification according to the continuity of the discontinuities.

Distância (m)	Continuidade
< 1	muito pouco contínuas
1 - 3	baixa continuidade
3 - 10	continuidade média
10 - 20	continuidade alta
> 20	continuidade muito alta

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

e) - Rugosidade (aspereza na superfície de descontinuidades);

TABELA VIII - Classificação dos maciços, em função da rugosidade das descontinuidades.

TABLE VIII - Rock mass classification according to the roughness of the discontinuities.

Forma do perfil	Classe	Descrição	Designação
denteado	I	rugosa	R1-2
	II	lisa	
	II	estriada	
ondulado	IV	rugosa	R3
	V	lisa	
	VI	estriada	
plano	VII	rugosa	R4-5
	VII	lisa	
	IX	estriada	

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

e) - Resistência da superfície (resistência à compressão uniaxial);

TABELA IX - Classificação dos maciços, em função do estado da resistência das paredes.

TABLE IX - Rock mass classification according to the resistance of the walls.

Grau	Descrição	Características	Resist. comp. uniaxial (MPa)
R ₀	rocha muito branda	pode ser marcada pela unha do polegar	0,25 - 10
R ₁	rocha branda (I)	pode ser cortada às fatias por um canivete	1 - 5
R ₂	rocha branda (II)	pode ser cortada às fatias por um canivete, com dificuldade	5 - 25
R ₃	rocha razoavelmente resistente	fragmenta-se com pancada seca de martelo de geólogo	25 - 50
R ₄	rocha resistente	fragmenta-se com pancadas insistentes de martelo de geólogo	50 - 100
R ₅	rocha muito resistente	fragmenta-se com muitas pancadas de martelo de geólogo	100 - 250
R ₆	rocha extremamente resistente	apenas se obtém lascas percutindo com o martelo de geólogo	> 250

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

f) - Abertura (menor distância entre blocos que formam a descontinuidade);

TABELA X - Classificação dos maciços, em função da abertura das descontinuidades.

TABLE X - Rock mass classification according to the width of discontinuities.

Abertura (mm)	Descrição	
< 0,1	muito fechadas	Fechadas
0,1 - 0,25	fechadas	
0,25 - 0,5	parcialmente fechadas	
0,5 - 2,5	moderadamente abertas	entre-abertas
2,5 - 10	medianamente abertas	
> 10	abertas	
10 - 100	muito abertas	Abertas
100 - 1000	extremamente abertas	
> 1000	cavernosas	

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

g) - enchimento (material que preenche a abertura das descontinuidades);

As propriedades físicas dessa camada de baixa resistência de material existente entre as paredes de uma descontinuidade, controlam o comportamento da descontinuidade, pelo que é necessário seguir a seguinte metodologia de caracterização de maciços em função do enchimento das descontinuidades: medição da espessura do enchimento; descrição do enchimento (identificação do material, mineralogia e tamanho do grão); medição dos índices de campo (resistência à compressão simples) e determinação do grau de humidade (estimativa, em termos qualitativos, da permeabilidade).

h) - grau de fracturação (distância média medida entre descontinuidades, independentemente da família);

TABELA XI - Classificação dos maciços, em função do grau de alteração.

TABLE XI - Rock mass classification according to the degree of alteration.

Grau de alteração	Nomenclatura	Significado		
sã ou ligeiramente alterada	W ₁	W ₁₋₂	sem sinais de alteração da matriz rochosa	sã e compacta, descontinuidades
ligeiramente alterada	W ₂		alterações na cor original da matriz rochosa	fechadas e sem permeabilidade
moderadamente alterada	W ₃	W ₄	menos de metade do material decomposto em solos	sã, interceptada por descontinuidades
muito alterada	W ₄	W ₄₋₅	mais de metade do material decomposto em solos	alterada, muito
completamente alterada	W ₅		todo o material decomposto e/ou desagregado em solo	decomposta e permeável

Fonte: Adaptado de ISRM, 2007. *Source: Adapted from ISRM, 2007.*

Por vezes é referenciada, na literatura, uma classe W₆, que corresponde a um maciço totalmente convertido em solo residual (GSE, 1995).

i) - Percolação (fluxo de água nas paredes das descontinuidades).

Fluxo de água através da rede de descontinuidades. É necessária a avaliação/previsão da posição dos níveis freáticos, bem como a realização de ensaios de permeabilidade (W. C. B. Gates, 2003).

A fig. 1 apresenta, de forma resumida, uma representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das discontinuidades.

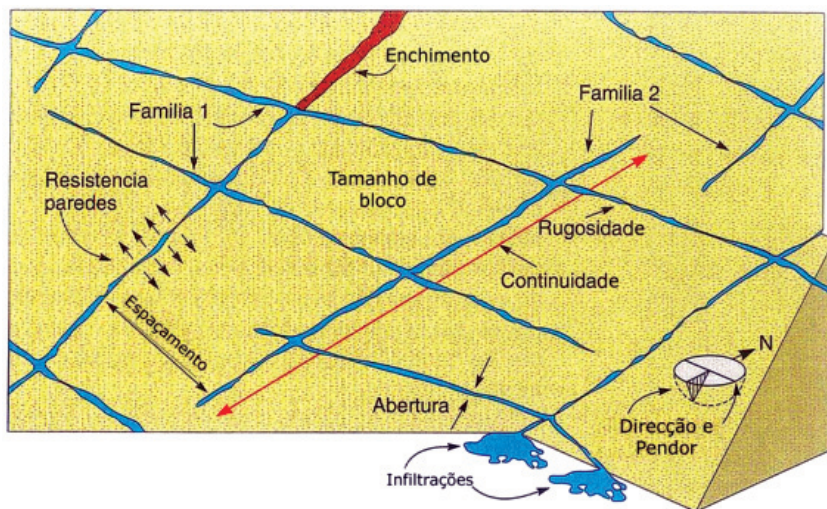


Fig. 1 - Representação esquemática das propriedades geológico-geotécnicas das discontinuidades (adaptado de Hudson, 1989, in González de Vallejo *et al.*, 2002).

Fig. 1 - Schematic representation of the geological-geotechnical properties of discontinuities (adapted from Hudson, 1989, in González de Vallejo *et al.*, 2002).

Conclusão

Quando se fala em risco em engenharia não se pode deixar de parte a caracterização geomecânica dos maciços rochosos, vital em qualquer obra de engenharia que envolva movimento de terras, com especial ênfase nos casos de obras subterrâneas, onde os vazios criados pela escavação e conseqüente alívio de tensões, podem ser responsáveis pela subsidência dos maciços, com as conseqüências que daí advêm. Para além da questão de segurança de pessoas e bens, há a considerar a conservação funcional das estruturas.

São apresentados, de forma sumária, as principais classificações geomecânicas utilizadas na caracterização de qualidade dos maciços rochosos, com vista à execução de túneis. Tratando-se de diferentes, e em certos casos complementares, propostas de metodologias

assentes em critérios resultantes de esforços notáveis de sistematização empírica, deverão ser entendidas como tal. É pois necessário alertar para a subjectividade presente em cada uma delas. Todavia, o denominador comum assenta na exaustiva recolha, tratamento e interpretação de dados de carácter geológico e geotécnico, realização de ensaios *in situ* e laboratoriais e subsequente elaboração de documentos cartográficos definidores da qualidade do maciço enquanto estrutura de suporte.

Esta sistematização apresenta, contudo, para além de uma não desprezável componente empírica, algumas outras limitações relacionadas com o facto da não universalidade de aplicação dos parâmetros de classificação, tendo em conta as especificidades de cada maciço rochoso e de cada projecto de engenharia. Outra limitação prende-se com a anisotropia, responsável por eventuais mecanismos de deformação e ruptura não detectáveis aquando de uma análise global do maciço (L. Fonseca, 2008). Importa ainda referir um factor que não é objecto de análise, que se prende com a interacção entre as estruturas de sustimento e a rocha (B. H. G. Brady, *et al.*, 2004).

Conclui-se que um estudo geomecânico deve ser desenvolvido quer à superfície quer em profundidade, quer *in situ*, quer em laboratório (A. C. Galiza *et al.*, 2009). O objectivo primeiro será o da detecção e caracterização das principais estruturas geológicas locais, avançando-se progressivamente com um refinamento da escala de observação, culminando na elaboração de um estudo geológico-estrutural, que passa pelo esboço de um zonamento geotécnico com a representação das principais unidades geotécnicas locais, o que se traduz na definição de um índice de qualidade geotécnica do maciço (L. Ramos, 2008).

Como complemento ao estudo, e durante todas as fases de execução e de serviço, recomenda-se estudos que incidam sobre a prospecção e inspecção geológica, de superfície e subterrânea, a escalas convenientes.

Referências bibliográficas

Afonso, M. J., Chaminé, H. I., Gomes, A., Teixeira, J., Araújo, M. A., Fonseca, P. E., Carvalho, J. M., Marques, J. M., Marques da Silva, M. A. & Rocha, F. T., (2004). Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Xeográfica, Revista de Xeografia, Território e Medio Ambiente*, Santiago de Compostela, 4: 101-115.

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2001). *Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer*, Designation D5873-00. ASTM Standards on disc: 04-08.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2010). *Standard Classifications of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, Designation D2487-10. ASTM Standards.
- Barton, N. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. Balkema, Rotterdam. 173 pp.
- Barton, N. (2006). *Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy*. Taylor & Francis, UK. 729 pp.
- Barton, N. & Bieniawski, Z.T. (2008). RMR and Q - setting records straight. *Tunnels and Tunnelling International*, Feb. 2008, pp. 26-29.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1977). Estimation of support requirements for underground excavations. In: *16th Symposium on Design Methods in Rock Mechanics Rock Mechanics*, Minnesota, ASCE, NY, pp. 163-177.
- Barton, N., Loset, F., Lien, R. & Lunde, J. (1980). Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. In: *Bergman M., ed., Proceedings, Subsurface Space, ISRM International Symposium – Rockstore'80*, Stockholm. Pergamon Press Ltd., 2: 553-561.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York. 251 pp.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. South Afr. Inst. Civ. Engrs*, 15: 335-344.
- Bieniawski, Z. T. (1975). The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, pp. 1-11.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In: Bieniawski Z. T., ed., *Proceedings of the symposium Exploration for rock engineering*, Cape Town, Balkema, 1: 97-106.
- Bieniawski, Z. T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proceedings of the 4th Congress Int. Soc. Rock Mech.*, Montreux, 2: 41-48.
- Bieniawski, Z. T. (1984). The design process in rock engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17:183-190.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York. 251 pp.
- Bieniawski, Z. T. (1993). *Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends*. Hudson J.A., (ed.), *comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects*. Pergamon Press, 33: 553-574.
- Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M. & Álvares, M. (2006). Rock Mass Excavability (RME) index. In: *Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress*, Korea. June 2006, paper #06-0254.
- Bieniawski, Z. T., Celada, B. & Galera, J. M. (2007). Predicting TBM excavability. *Tunnels and Tunnelling International*. pp. 25-28.
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T., (2004). *Rock mechanics for underground mining*, 3rd Edition, George Allen & Unwin, London. 527 pp.
- Carvalho, J. M. & Chaminé, H.I., (2004). O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Ver. Uni. Aveiro*, 16: 13-31.
- Chaminé, H. I. & Gaspar, A. F., (1995). Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear. Aplicação a uma travessa da Mina de Carvão de Germunde *Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min.*, Porto, 37: 97-111.

- Chaminé, H. I. (2010). A técnica de amostragem linear em estudos geológico-estruturais e de geoengenharia de maciços rochosos (Sumário da Lição). *Relatório do sumário da Lição elaborado para efeitos de prestação de provas públicas para obtenção do título académico de Agregado, no ramo de Geociências (Mecânica das Rochas)*, pela Universidade de Aveiro. 69 pp.
- Chaminé, H. I., Afonso, M. J., Santos Silva, R., Moreira, P. F.; Teixeira, J., Trigo, J. F., Monteiro, R.; Fernandes, P. & Pizarro, S. (2010). Geotechnical factors affecting rock slope stability in Gaia riverside (NW Portugal). In: Williams A. L., Pinches G. M., Chin C. Y., McMorran T. J. & Massey C.I., eds., *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology, IAEG'2010, Geologically Active*, Auckland, New Zealand. CRC Press: Taylor & Francis Group. pp. 2729-2736.
- Deere, D. U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. In: *Rock mechanics and engineering geology*, Vienna, Springer, 1(1): 1-18.
- Deere, D. U. (1989). Rock quality designation (RQD) after twenty years. *U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1*. Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS 67.
- Deere, D. U. & Deere, D. W. (1988). The RQD index in practice. In: *Proceedings Symposium Rock Classifications Engineering Purposes, ASTM Special Technical Publications 984*: 91-101.
- Deere, D. U., Hendron A. J., Patton F. D. & Cording E. J. (1967). Design of surface and near surface constructions in rock. In: C. Fairhurst (ed.), *Proceedings 8th U.S. Symposium Rock Mechanics*, New York, AIME, pp. 237-302.
- Fonseca, L., (2008). *Interação e avaliação entre o maciço rochoso e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas* (Tese de Mestrado) Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP.
- Galiza A. C., Ramos L. & Chaminé H. I., (2009). Geotecnia aplicada ao desmonte de maciços rochosos através de uma perfuração alinhada. *Tecnologia e Vida, Revista da Secção Regional do Norte da ANET, Porto, volume 4*, pp. 14-17.
- Gates, W. C. B. (2003). The Hydro-Potential (HP) Value: a rock classification technique for estimating seepage into excavations. In: Culligan P. J., Einstein H. H. & Whittle A.J., eds, *Proceedings, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1283- 1290.
- González de Vallejo, L. (1983). A new classification system for underground assessment using surface data. *Proceedings of the International Congress of Engineering Geology and Underground Construction*, Lisbon. 1 (II):85-94.
- González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C., (2002). *Ingeniería geológica*, Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- González de Vallejo, L. (2003). SRC Rock Mass Classification of tunnels under high tectonic stress excavated in weak rocks. *Engineering Geology*, 69: 273-285.
- GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society*, 28 (3): 207-242.
- Griffiths, J. S., (2002). Mapping in Engineering Geology. Key Issues in Earth Sciences. *The Geological Society of London*, 1, 287 pp.
- Hoek, E., (2007). Practical rock engineering. *RockScience: Hoek's Corner*, 342 pp.
- Hudson, J. A., (1989). *Rock mechanics principles in engineering practice*. Butterworths. Ciria. London.
- IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY (1976). *Guide pour la préparation des cartes géotechniques. Sciences de la Terre*. Les Presses de l'Unesco, Paris. 79 pp.
- IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT (1981a). Recommend symbols for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24: 227-234.

- IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT (1981b). Rock and soils for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24: 235-274.
- ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics*, 15 (6):319-368.
- ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.
- ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (2007). The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006 In: *Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the commission on testing methods*, ISRM Ankara, Turkey, 628 pp.
- Neto, E.P. (2007). *Estudo geológico e geomecânico em antigas explorações mineiras: o caso da mina das Azeleiras* (Tese de Mestrado). Universidade de Aveiro.
- Ramos, L. (2008). *Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte* (Tese de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP.
- Rocha, M., (1981). *Mecânica das Rochas*. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York. 528 pp.
- Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads in tunnel supports. In: *Proctor R.V. & White T.L., eds., Rock tunneling with steel supports*, Ohio, p. 17-99.
- Terzaghi, R. D. (1965). Sources of errors in joint surveys. *Geotéchnique*, 15(3): p. 287-304.
- Terzaghi, K. & Peck, R. (1987). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice. 3rd edition*, Wiley-Interscience. 592 pp.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H. R. & Skinner, E. H. (1972). Support determination based on geologic predictions. In: K.S. Lane & L.A. Garfield, (eds), *Proceedings of the 1st North American Rapid Excavation Tunneling Conference (RETC)*, Chicago. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, pp. 43-64.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H. R. & Skinner, E. H. (1974). Ground support prediction model: RSR concept. In: *Proceedings 2nd North American Rapid Excavation & Tunnelling Conference (RETC)*, San Francisco. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, pp. 691-707.