

5. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

5.1 INTRODUÇÃO

Um dos aspectos mais importantes ligados aos estudos de terrenos para fins de engenharia civil é o da respectiva classificação, nomeadamente no que se refere à definição dos parâmetros que melhor caracterizam uma formação do ponto de vista de Geologia de Engenharia.

Embora a importância desses parâmetros varie de caso para caso, consoante o tipo de estrutura a projectar, há que basear a classificação, para ser universal, sempre nos mesmos parâmetros e procurar quantificar as designações respectivas a partir de observações e ensaios simples expeditos.

Uma primeira classificação dos materiais geológicos do ponto de vista da Geologia de Engenharia, bem como da engenharia civil, é em solos e em rochas. Às formações constituídas por solos é atribuída a designação genérica de maciços terrosos, enquanto as que são essencialmente constituídas por material rocha se designam por maciços rochosos.

No primeiro grupo cabem os terrenos que se desagregam facilmente quando agitados dentro de água. Dada a indefinição das condições de agitação da água, facilmente se depreende que poderá haver uma apreciável zona de "sombra" onde caiem os chamados "terrenos de transição". A forma de se vir a obviar essa indefinição é o da utilização de ensaios simples que permitam a quantificação dos parâmetros que caracterizam a agitação da água e a desagregação do terreno que dela resulta.

Relativamente aos solos existem já critérios de classificação universalmente aceites que serão devidamente estudados na disciplina de Mecânica dos Solos.

Quanto às rochas (sobretudo aos maciços rochosos, já que é o comportamento destes e não do material rocha que interessa na generalidade dos problemas do âmbito da Geologia de Engenharia) não há ainda nenhuma classificação universal, embora existam propostas de vários autores com muitos pontos semelhantes. Essa circunstância levou a que fossem criados respectivamente em 1972 e em 1975 dois grupos de trabalho, o primeiro no âmbito da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) e o segundo da Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAEG), com a preocupação de estabelecerem sistemas de classificação que pudessem vir a ser aceites internacionalmente.

Esta diferença entre o grau de desenvolvimento e aceitação das classificações de solos e de rochas deve-se, por um lado, a que a classificação de solos é, em si, mais simples e, por outro lado, à diferença de idades entre a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas.

Do ponto de vista da Geologia de Engenharia, a classificação dos terrenos deverá basear-se quer em critérios geológicos, quer em parâmetros que visem as aplicações práticas do domínio da engenharia civil.

5.2 CLASSIFICAÇÕES GEOLÓGICAS

Quando se pretende fazer o estudo de uma dada formação interessada num problema de engenharia civil é corrente iniciá-lo por uma classificação geológica. Reconhece-se que esta classificação não é absoluta para fins de engenharia, mas atribui-se-lhe utilidade.

Embora certos autores (cada vez mais raros) menosprezem o seu papel, chegando ao ponto de propor o seu abandono, o certo é que continua a utilizar-se sistematicamente em trabalhos de Geologia de Engenharia a classificação geológica dos terrenos, em virtude da sua informação implícita. Como exemplo do que se afirma poder-se-á referir o caso de maciços calcários, ou constituídos por outras rochas solúveis, em que a simples designação alerta para a possibilidade de ocorrência de situações, tais como fenómenos de dissolução ou outros problemas idênticos, que poderão ser de muita importância em determinadas obras de construção civil. Conforme é conhecido, aqueles fenómenos poderão estar na origem da formação de vazios nos maciços, por vezes de grandes dimensões (cavernas), que estão na origem de fenómenos de subsidência e de colapsos da superfície dos terrenos (Figura 5.1), ou ditar comportamentos hidráulicos típicos (Figura 5.2) associados à permeabilidade em grande que se processa através da rede de discontinuidades.

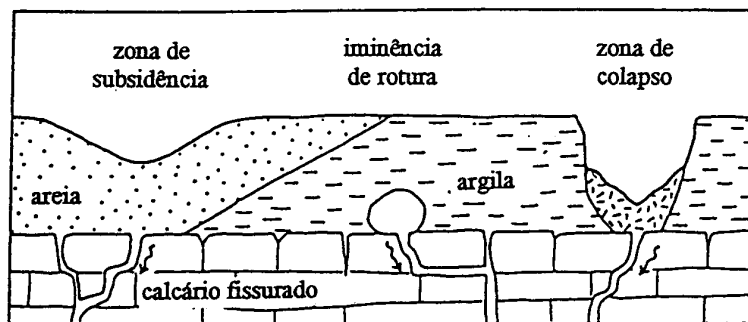


Figura 5.1 – Corte esquemático representativo dos fenómenos de subsidência e de colapso associados a maciços de calcário.



Figura 5.2 – Hidrogeologia dum maciço sedimentar:

A - zona de recarga; B – zona de cavidades saturadas; C – zona de transferência.

É evidente que é insuficiente dizer-se que um dado maciço é granítico, xistoso ou basáltico quando se pretende informar um projectista de uma barragem ou de uma ponte das características do respectivo maciço de fundação. O estado de alteração do material, o seu estado de fracturação, a presença ou ausência de material de enchimento das diaclases e sua qualidade são factores que fazem variar extraordinariamente as características do maciço.

Para obviar a esta dificuldade, os geólogos ao fazerem a classificação dos terrenos, além da designação litológica das formações, apresentam em regra a descrição da qualidade do material constituinte em termos do seu estado de alteração e de fracturação, ou de outras condições locais, como por exemplo as hidrogeológicas. Tais descrições, embora muito informativas, têm o inconveniente de serem até certo ponto subjectivas, por se basearem normalmente na opinião do autor da classificação. Outro autor utilizaria eventualmente outra designação para as mesmas características do mesmo material. O granito muito alterado de um pode ser o granito medianamente alterado de outro; o grés brando de um pode ser o grés duro de outro; a areia fina de um pode ser a areia média de outro.

Daqui a necessidade de acompanhar, tanto quanto possível, a classificação de um dado material de grandezas quantitativas que mantenham o seu valor independentemente da pessoa que classifica ou, pelo menos, da definição da terminologia utilizada.

5.2.1 Classificação tendo em consideração o estado de alteração das rochas e a estrutura geológica de maciços rochosos

As características de qualidade de maciços rochosos são fundamentalmente consequência do seu estado de alteração e de fracturação. A ocorrência de água percolando nos maciços actua também, com frequência, na respectiva estabilidade. Importa desde já referir os dois primeiros parâmetros considerados - estado de alteração e grau de fracturação - e fazer considerações sobre os critérios de classificação de maciços neles baseados.

O estado de alteração é vulgarmente indicado à custa da sua descrição baseada em métodos expeditos de observação. Em solos, por exemplo, é de grande utilidade a indicação da facilidade com que se desmonta o material com determinados tipos de ferramentas. Em rochas é costume referir-se a maior ou menor facilidade com que se parte o material, utilizando um martelo de mão, ou a sua coloração e brilho como consequência da alteração de certos minerais como feldspatos e minerais ferromagnesianos.

O número de graus a considerar em relação ao estado de alteração de uma dada formação varia necessariamente com o tipo de problema e, conseqüentemente, com a necessidade de pormenorizar a informação respectiva. Na maioria dos casos parece adequado considerarem-se cinco graus de alteração dos maciços rochosos conforme se esquematiza na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Graus de alteração de maciços rochosos.

Símbolos	Designações	Características
W₁	são	sem quaisquer sinais de alteração
W₂	pouco alterado	sinais de alteração apenas nas imediações das discontinuidades
W₃	medianamente alterado	alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável
W₄	muito alterado	alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável
W₅	decomposto (saibro)	o maciço apresenta-se completamente friável com comportamento de solo

Sempre que se realizam sondagens com recuperação contínua de amostra, um indicador muito utilizado para informar quanto ao estado de alteração das rochas atravessadas, mas também influenciado pelo estado de fracturação destas, é o da percentagem de recuperação resultante das operações de furação. A percentagem de recuperação obtém-se multiplicando por 100 o quociente entre a soma dos comprimentos de todos os tarolos obtidos numa manobra e o comprimento do trecho furado nessa manobra.

Embora se desconheça qualquer tabela de classificação de rochas em face de percentagem de recuperação, e apesar de se ter em conta que este valor pode ser altamente influenciado pela qualidade do equipamento de furação, pela competência do operador e por particularidades litológicas ou estruturais das formações geológicas, é vulgar considerar que um maciço rochoso é pouco alterado (logo, em princípio, de boa qualidade) quando se obtêm percentagens superiores a 80%,

muito alterado (logo de má qualidade) para percentagens inferiores a 50% e medianamente alterado para valores intermédios.

Quanto ao estado de fracturação de um maciço há vários critérios razoavelmente semelhantes entre si que caracterizam em regra, o espaçamento entre diaclases. No geral contêm igualmente 5 classes correspondendo cada uma às designações de muito próximas, próximas, medianamente afastadas, afastadas e muito afastadas. Apresenta-se na Tabela 5.2 a classificação elaborada pela respectiva comissão da ISRM.

Tabela 5.2 – Graus de fracturação de maciços rochosos.

Símbolos	Intervalo entre fracturas (cm)	Designação
F₁	> 200	muito afastadas
F₂	60 - 200	afastadas
F₃	20 - 60	medianamente afastadas
F₄	6 - 20	próximas
F₅	< 6	muito próximas

A avaliação do grau de fracturação de um maciço pode ser igualmente feita através da contagem do número de diaclases por metro. É evidente que embora exista uma relação entre este índice e os valores anteriores, a extrapolação dos resultados só será aceitável se o afastamento entre descontinuidades for idêntico.

Relacionado com os estados de alteração e fracturação, Deere (1967) desenvolveu um sistema de classificação baseado num índice que designou por RQD (“Rock Quality Designation”), indicativo da qualidade de maciços rochosos, definido a partir dos testemunhos de sondagens realizadas com recuperação contínua de amostra.

Este índice, que tem vindo a ser muito utilizado internacionalmente, é definido como a percentagem determinada pelo quociente entre o somatório dos troços de amostra com comprimento superior a 10 cm e o comprimento total furado em cada manobra. Em função dos valores do RQD, são apresentadas na Tabela 5.3 as designações propostas por Deere para classificar a qualidade dos maciços rochosos.

Em princípio, a determinação do RQD deve ser feita apenas em sondagens com diâmetro superior a 55 mm, cuidadosamente realizadas em que sejam utilizados amostradores de parede dupla ou tripla.

Tabela 5.3 – Classificação dos maciços com base no RQD.

RQD	Qualidade do Maciço Rochoso
0 - 25%	muito fraco
25 - 50%	fraco
50 - 75%	razoável
75 - 90%	bom
90 - 100%	excelente

Exemplo 1

$$RQD (\%) = \frac{\sum l_i (> 10 \text{ cm})}{L} \times 100$$

L - Comprimento total furado numa manobra $L = \sum l_i$

$L = 200 \text{ cm (ex.)}$

$$RQD = (38+17+20+35)/200 \times 100 = 55\%$$

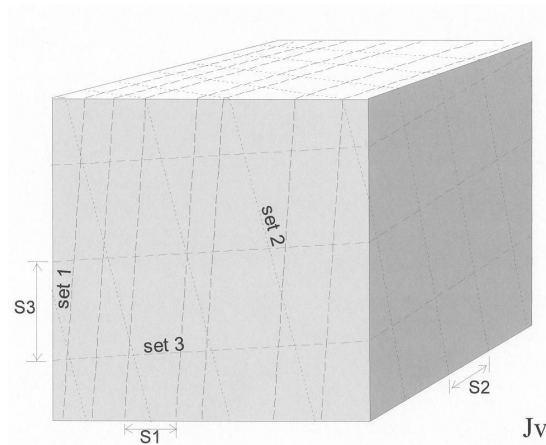
Quando não haja amostragem obtida por sondagens mas sejam identificáveis os traços das descontinuidades em afloramentos rochosos ou em escavações, poder-se-á estimar o valor do RQD recorrendo à relação proposta por Palmström (1982):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

onde J_v representa o índice volumétrico (somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento, para o conjunto das famílias).

De notar que o RQD é um parâmetro dependente da direcção de amostragem podendo o seu valor variar significativamente em função da orientação das sondagens. O uso do índice volumétrico, para estimar o valor do RQD, pode apresentar-se como benéfico por reduzir tal dependência.

Exemplo 2



$$J_v = 1/S1 + 1/S2 + 1/S3 + \text{juntas dispersas } n/5$$

Exemplo:

$$S1 = 0,1 \text{ m}$$

$$S2 = 0,5 \text{ m}$$

$$S3 = 2,0 \text{ m}$$

$$J_v = 10 + 2 + 0,5 = 12,5$$

O parâmetro RQD deve representar a qualidade do maciço rochoso “*in situ*”. Quando se realizam sondagens em maciços com forte anisotropia, nos quais se incluem muitas das formações xistentas que ocorrem em Portugal, é frequente o desenvolvimento de novas fracturas no material das amostras, segundo os planos de fraqueza, resultantes da descompressão que se regista em consequência da sua retirada do maciço. Quando da observação de amostras obtidas por furação, deverá ter-se cuidado de distinguir as fracturas naturais das decorrentes do processo de furação ou daquelas que foram causadas quer pelo manuseamento do equipamento, devendo estas últimas ser ignoradas na determinação do RQD.

Do mesmo modo, quando se recorra à observação de superfícies escavadas tendo em vista a utilização da relação devida a Palmström, as fracturas provocadas pelo uso de explosivos devem ser ignoradas.

A classificação dos maciços rochosos baseada nos valores do RQD, embora útil, é bastante limitada. De facto, além das fracturas, outras descontinuidades que caracterizam a estrutura geológica das

formações, podem, de forma idêntica, imprimir um dado comportamento a um maciço. Estão neste caso, por exemplo, as superfícies de estratificação e de xistosidade.

5.2.2 Descrição Geotécnica Básica (“Basic Geotechnical Description” - BGD)

Este sistema classificativo constitui um passo interessante no sentido estruturar a informação essencial tendo em vista as aplicações aos domínios da engenharia civil. Proposta pela ISRM, a “descrição básica” foi elaborada com as seguintes intenções:

- ser um código de linguagem que permita a descrição de maciços rochosos, com referência, em particular, ao seu comportamento mecânico, de forma não ambígua, isto é, que diferentes observadores de um dado maciço rochoso o classifiquem da mesma forma;
- conter informação tanto quanto possível quantitativa que possibilite a resolução de problemas práticos;
- ser baseada, de preferência, em medições muito simples em vez de o ser apenas na observação directa dos maciços rochosos ou de tarolos de sondagem neles realizados.

Para ter em atenção estes aspectos, este sistema classificativo considera deverem ser incluídos os seguintes parâmetros na “descrição básica”, alguns dos quais já anteriormente foram referidos:

- a caracterização geológica;
- duas características estruturais dos maciços rochosos: espessura de camadas e espaçamento entre fracturas;
- duas características mecânicas: compressão simples do material rocha e o ângulo de atrito das descontinuidades.

A aplicação da “descrição básica” deve fazer-se após realizado um zonamento prévio do maciço a classificar, isto é, depois de identificar as zonas em que, dentro de cada uma, haja certa uniformidade de propriedades. Este zonamento pode ser feito com base em variações de litologia, de estado de alteração, de grau de fracturação, etc..

No que respeita à caracterização geológica é recomendado fazer referência por um lado à classificação litológica e petrográfica, composição mineralógica, textura, cor, etc., por outro lado ao grau de alteração das rochas ($W_1 \dots W_5$ – ver Tabela 5.1), à natureza das descontinuidades e das estruturas geológicas (dobras, falhas, atitude das famílias de descontinuidades, etc.) dos maciços rochosos.

Em relação às duas características estruturais, o espaçamento das descontinuidades que constituem fracturas e a espessura das camadas, a ISRM propôs que fossem adoptados idênticos valores para os limites das várias classes. As designações das classes dos espaçamentos das fracturas ($F_1 \dots F_5$)

e as das espessuras das camadas ($L_1 \dots L_5$) (cujos valores são coincidentes) são, respectivamente apresentadas nas Tabela 5.2 e Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Espessura das camadas.

Símbolos	Espessura da camada (cm)	Designação
L_1	> 200	muito espessas
L_2	60 - 200	espessas
L_3	20 - 60	espessura mediana
L_4	6 - 20	delgadas
L_5	< 6	muito delgadas

Nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6 são apresentadas, respectivamente, as classificações relativas às duas características mecânicas: a resistência à compressão simples ($S_1 \dots S_5$) e o ângulo de atrito das descontinuidades ($A_1 \dots A_5$), este definido a partir da tangente à envolvente de rotura correspondente à tensão normal de 1 MPa.

Tabela 5.5 – Resistência à compressão simples.

Símbolos	Resistência à compressão simples (MPa)	Designação
S_1	> 200	muito elevada
S_2	60 - 200	elevada
S_3	20 - 60	média
S_4	6 - 20	baixa
S_5	< 6	muito baixa

Tabela 5.6 – Ângulo de atrito das fracturas.

Símbolos	Ângulo de atrito	Designação
A_1	$> 45^\circ$	muito elevado
A_2	$35^\circ - 45^\circ$	elevado
A_3	$25^\circ - 35^\circ$	médio
A_4	$15^\circ - 25^\circ$	baixo
A_5	$< 15^\circ$	muito baixo

Em rochas exibindo comportamento anisotrópico nítido, devem ser registados os valores das resistências médias obtidas nas diferentes direcções, e, ainda, a direcção para a qual ocorre o valor mais baixo das resistências.

Na descrição geotécnica básica, cada zona em que o maciço é subdividido pode ser abreviadamente caracterizada por uma descrição geológica sintética, seguida dos símbolos classificativos correspondentes aos parâmetros avaliados, por exemplo, "Granito W_2, L_1, F_3, S_2, A_3 ". Sempre que o maciço apresente características especiais ou as necessidades do projecto o requeiram, deverão ser incluídas na "descrição básica" as informações complementares julgadas úteis.

5.3 CLASSIFICAÇÕES PARA FINS DE ENGENHARIA

Os critérios de classificação apresentados, que se designaram genericamente por classificações geológicas, utilizam essencialmente elementos de análises micropetrográficas, de análises químicas e os que resultam essencialmente da observação macroscópica de amostras ou afloramentos. As classificações de terrenos para fins de engenharia lançam mão de outros critérios, nos quais os ensaios físicos de caracterização ganham relevo.

A classificação dos solos é tema que será devidamente aprofundado na disciplina de Mecânica dos Solos. Para as rochas não há ainda sistemas de classificação geomecânica aceites pela generalidade da comunidade técnica. Contudo, os critérios mais correntes de classificação do "material rocha" baseiam-se, na sua maioria, nos parâmetros módulo de elasticidade (E), resistência à compressão simples (σ_c) e velocidades de propagação das ondas ultrassónicas (V_p e V_s), por serem, por um lado, valores que facilmente podem ser obtidos através de ensaios e, por outro, por caracterizarem de modo significativo o comportamento mecânico da rocha.

Do mesmo modo que a fissuração em provetes de rocha afecta os valores das velocidade de propagação das ondas, também a fracturação ou as descontinuidades nos terrenos, principalmente se

estas estiverem abertas, irão afectar as velocidades de propagação que se obtêm em ensaios realizados “*in situ*”.

Assim, no que se refere a maciços rochosos, como critérios de classificação utilizam-se com frequência quer o valor da velocidade de propagação de ondas elásticas, quer o quociente das velocidades de propagação de ondas elásticas medidas respectivamente no campo (num maciço) e num provete (em laboratório).

A avaliação da qualidade do maciço rochoso feita com base no primeiro destes critérios (velocidades) não distingue o efeito da fracturação do maciço da qualidade da rocha que o constitui, já que podem obter-se idênticas velocidades em dois maciços diferentes em que a pior qualidade da rocha de um deles é “compensada” pelas perturbações causadas pela presença de um maior número de descontinuidades no outro.

Com o último daqueles critérios (quociente de velocidades) já é possível avaliar o efeito das descontinuidades no comportamento do maciço rochoso ao serem comparadas as velocidades de propagação das ondas no maciço – $V_{P,m}$ – com os valores da velocidade de propagação de idêntico tipo de ondas determinado laboratorialmente em provetes de rocha – $V_{P,l}$ – do mesmo maciço e submetidos, para simulação das condições de campo, a uma tensão de compressão correspondente ao peso dos terrenos de cobertura “*in situ*”. Em princípio, se no maciço não existissem descontinuidades e se o meio fosse isotrópico, o valor do quociente seria igual à unidade. O desvio desse valor deve-se, em regra, à presença dessas descontinuidades e ao atraso que elas introduzem na propagação das ondas longitudinais.

Na Tabela 5.7 apresenta-se uma classificação da qualidade dos maciços rochosos baseada nos valores do quociente $V_{P,m}/V_{P,l}$, ou da relação entre os módulos de elasticidade dinâmicos obtidos “*in situ*” ($E_{d,m}$) e em laboratório ($E_{d,l}$), e apresenta-se a correlação destes quocientes com os valores do RQD e com a frequência das fracturas do maciço.

Tabela 5.7

Qualidade do Maciço Rochoso	$V_{P,m}/V_{P,l}$	$E_{d,m}/E_{d,l}$	Frequência das fracturas	RQD
muito fraca	< 0,4	< 0,2	> 15	0 - 25%
fraca	0,4 – 0,6	0,2 – 0,4	15 – 8	25 - 50%
razoável	0,6 – 0,8	0,4 – 0,6	8 – 5	50 - 75%
boa	0,8 – 0,9	0,6 – 0,8	5 – 1	75 - 90%
excelente	0,9 – 1,0	0,8 – 1,0	< 1	90 - 100%

Uma informação quanto à qualidade do maciço rochoso, baseada nos resultados da prospecção sísmica, pode também ser dada pelo amortecimento do sinal quando da realização da prospecção sísmica “*in situ*”. Se há um amortecimento rápido da onda o maciço rochoso é, em geral, de boa qualidade, mas no caso de a amplitude se mantiver por algum tempo a rocha é em regra de má qualidade. Note-se, no entanto, que os critérios acima referidos, baseados na velocidade de propagação das ondas, perdem o sentido quando se está em presença de maciços fortemente anisotrópicos já que os valores medidos variam apreciavelmente de acordo com a direcção da solicitação do ensaio.

Os deslocamentos de maciços rochosos submetidos a ciclos de carga e descarga são análogos aos respeitantes à compressão simples em rochas (ver *Propriedades Índice e classificação das rochas*), apesar de os estados de tensão serem em regra triaxiais e não uniformes.

Determinado tipo de materiais, tal como grande parte das rochas xistosas, exibem um comportamento francamente anisotrópico que é necessário ter em consideração quando se pretendem analisar as suas características.

Vários autores têm procurado estabelecer sistemas de classificação de maciços rochosos com vista a uma caracterização da estabilidade desses maciços quando interessados por obras de engenharia, nomeadamente obras subterrâneas.

Reconhece-se, assim, de interesse apresentar alguns desses sistemas de classificação e simultaneamente ilustrar algumas das aplicações práticas. Como se irá verificar, estes sistemas de classificação baseiam-se, por vezes, em parâmetros e classificações referidos nos itens precedentes.

5.4 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

As classificações geomecânicas são utilizadas para caracterizar os maciços rochosos através de um conjunto de propriedades identificadas por observação directa e ensaios realizados *in situ* ou em amostras recolhidas em sondagens. O interesse destas classificações consiste também em sistematizar o conjunto de elementos geotécnicos que interessa caracterizar num determinado maciço rochoso.

Entre as várias classificações geomecânicas referem-se as de Bieniawski (Sistema RMR) e Barton (Sistema Q).

5.4.1 Classificação de Bieniawski (Sistema RMR)

Bieniawski publicou esta classificação em 1976, tendo por base uma vasta experiência colhida em obras subterrâneas. A classificação de Bieniawski ou Sistema RMR (“Rock Mass Rating”) é, actualmente, muito divulgada e tem sido sucessivamente refinada à medida que são incluídos os

resultados de análises de um maior número de casos práticos. Neste texto será apresentada a versão de 1989.

A classificação geomecânica é baseada no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros que Bieniawski considerou contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos, tendo em atenção especial o caso das obras subterrâneas. O somatório dos pesos atribuídos a cada um destes parâmetros constitui um índice, usualmente designado por RMR, ao qual corresponde uma das cinco classes de qualidade de maciços, consideradas pelo autor. Os parâmetros utilizados são os seguintes:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. RQD ("Rock Quality Designation");
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condição das descontinuidades;
5. Influência da água;
6. Orientação das descontinuidades.

A aplicação da classificação a um maciço rochoso implica a divisão deste em várias regiões estruturais (zonas) a serem classificadas separadamente. As fronteiras destas regiões coincidem usualmente com as estruturas geológicas principais, tais como falhas ou mudanças do tipo de rocha. Nalguns casos, dentro do mesmo tipo de rocha, as mudanças significativas no espaçamento das descontinuidades, ou das características destas, podem obrigar à subdivisão do maciço rochoso num maior número de regiões estruturais de menor dimensão.

A Tabela 5.8 permite determinar os pesos relativos a cinco das características (1. a 5.). O peso relativo à condição descontinuidades (4.) pode ser determinado através da Tabela 5.9 se houver uma descrição mais detalhada das juntas. Neste caso, o valor do peso é determinado através da soma dos cinco parâmetros característicos destas referidos nessa tabela. No caso de não haver valores disponíveis para utilizar esta tabela deverá ser escolhida a descrição da Tabela 5.9 mais próxima da realidade.

A orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação traduz-se num peso (6.) que constitui um factor corrector do somatório e é determinado através da Tabela 5.10. A direcção das descontinuidades aqui referida corresponde à do "strike" (recta horizontal) do plano destas. Tratando-se por exemplo da escavação de um túnel, a abertura no sentido da inclinação da descontinuidade corresponderá à indicada na Figura 5.3.a e a abertura contra a inclinação à Figura 5.3.b.

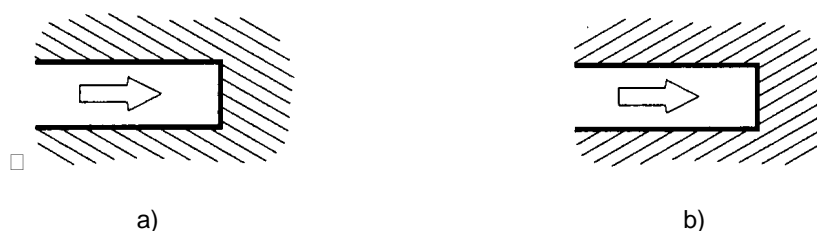


Figura 5.3 – Orientação de um túnel em relação aos planos de descontinuidades.

A Tabela 5.11 classifica o maciço rochoso em cinco classes de acordo com o valor do índice RMR, dando ainda indicações do tempo médio de auto-sustentação para vãos não revestidos em túneis (períodos de tempo durante os quais deverá ser colocado o suporte sob pena de ocorrer o colapso previsível da abertura). São também dadas estimativas relativas às características resistentes do maciço rochoso, nomeadamente, a coesão e o ângulo de atrito.

Finalmente refira-se que o índice RMR tem sido correlacionado com o valor do módulo de deformabilidade do maciço rochoso. De entre as várias relações sugeridas merece especial destaque a expressão proposta em 1983, baseada na análise de um número razoável de casos observados (Figura 5.4).

$$\text{Bieniawski (1978)} \quad E_m = 2 \text{ RMR} - 100 \quad (\text{RMR} > 50)$$

$$\text{Serafim e Pereira (1983)} \quad E_m = 10^{\frac{\text{RMR}-10}{40}}$$

(Nota: Valores de E_m em GPa)

Tabela 5.8 – Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) - "Rock Mass Rating - RMR".

Parâmetros		Coeficientes							
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
2	Pesos	R.Q.D.	15	12	7	4	2	1	0
		Pesos	90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %		
3	Espaçamento das descontinuidades	Pesos	20	17	13	8	3		
		Pesos	> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)	Pesos	20	15	10	8	5		
		Pesos	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
5	Presença de água	Pesos	30	25	20	10	0		
		Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão de água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água		
Pesos		15	10	7	4	0			

Tabela 5.9 – Classificação da condição das descontinuidades - RMR (1989).

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Tabela 5.10 – Efeito da orientação das descontinuidades - RMR (1989).

Direcção perpendicular ao eixo do túnel				Direcção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabela 5.11 – Classes de maciços - RMR (1989).

Peso global	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15 m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão
Coesão da massa rochosa (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	> 45	35-45	25-35	15-25	<15

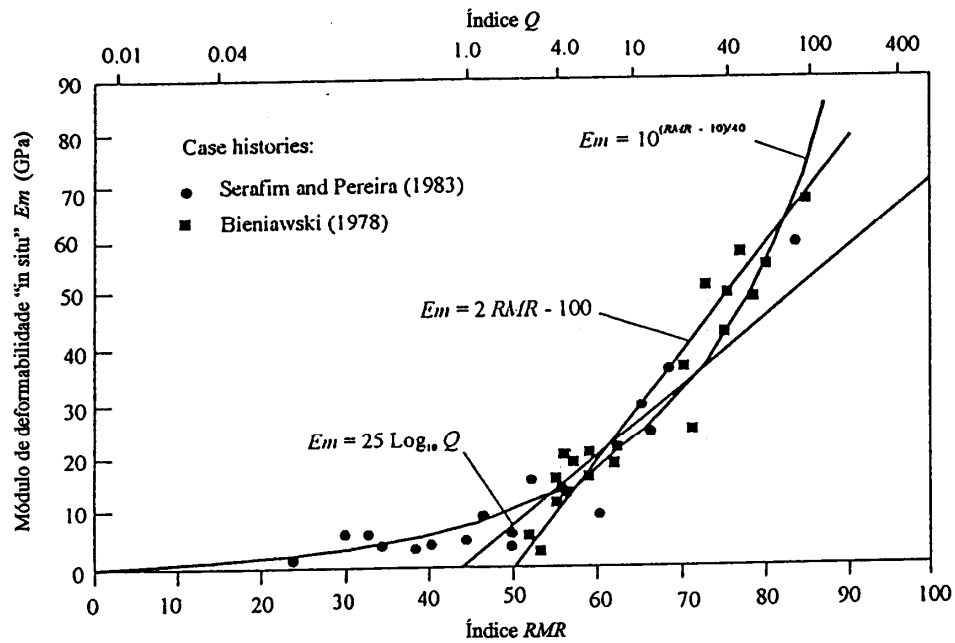


Figura 5.4 – Estimativa do módulo de deformabilidade.

5.4.2 Classificação de Barton (Sistema Q)

Com fundamento na observação dum grande número de escavações subterrâneas, Barton, Lien e Lund, do Norwegian Geotechnical Institute, propuseram, em 1974, uma classificação que assenta na definição de um índice de qualidade Q baseado na análise de 6 factores considerados relevantes para a caracterização do comportamento dos maciços rochosos.

O valor numérico do índice Q apresenta um largo campo de variação, entre 10^{-3} e 10^3 , e é determinado pela expressão seguinte:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Os parâmetros da expressão de Barton têm o significado indicado nas Tabela 5.12 a Tabela 5.17.

É de salientar que os três quocientes que compõem a expressão correspondem a três aspectos relativos ao maciço rochoso:

1. RQD / J_n caracteriza a estrutura do maciço rochoso e constitui uma medida do bloco unitário deste; o seu valor, variável entre 200 e 0,5, dá uma ideia genérica da dimensão dos blocos;
2. J_r / J_a caracteriza as descontinuidades e/ou o seu enchimento sob o aspecto da rugosidade e do grau de alteração; este quociente é crescente com o incremento da rugosidade e diminui com o grau de alteração das paredes em contacto directo, situações a que correspondem aumentos da resistência ao corte; o quociente diminui, tal como a resistência ao corte, quando as descontinuidades têm preenchimentos argilosos ou quando se encontram abertas;
3. J_w / SRF representa o estado de tensão no maciço rochoso; o factor SRF caracteriza o estado de tensão no maciço rochoso, em profundidade, ou as tensões de expansibilidade em formações incompetentes de comportamento plástico, sendo a sua avaliação feita quer a partir de evidências de libertação de tensões (explosões de rocha, etc.), quer a partir da ocorrência de zonas de escorregamento ou de alteração localizada; o factor J_w representa a medida da pressão da água, que tem um efeito adverso na resistência ao escorregamento das descontinuidades.

Refira-se que o sistema Q considera os parâmetros J_n , J_r e J_a como tendo uma importância relativa superior ao papel desempenhado pela orientação das descontinuidades. Contudo, o parâmetro orientação não é totalmente ignorado, pois está implícita a sua contribuição nos factores J_r e J_a , dado que na ponderação destes deverão ser consideradas as descontinuidades mais desfavoráveis.

Baseado no sistema de classificação Q são propostas recomendações quanto ao tipo de suporte necessário à estabilidade de maciços rochosos interessados na construção de túneis. Na Figura 5.5 apresenta-se um gráfico proposto por Grimstad e Barton (1993) que permite estimar o tipo de suporte em função do valor designado por Dimensão Equivalente, D_e , da escavação. Esta grandeza é obtida dividindo o vão, diâmetro ou altura da escavação por um índice, ESR (Excavation Support Ratio), que constitui um factor de segurança definido em função do tipo de obra (Tabela 5.18).

O módulo de deformabilidade (em GPa) do maciço rochoso pode também ser estimado através da expressão de Barton (1992):

$$E_m = 25 \log Q$$

Conforme se pode observar na Figura 5.4, esta expressão quando comparada com a proposta por Serafim e Pereira, correlacionando o módulo de deformabilidade com o valor do RMR, evidencia uma menor aproximação aos valores determinados a partir dos deslocamentos medidos em casos concretos de obras.

Existem expressões que correlacionam os índices RMR e Q. No gráfico da Figura 5.6 está representado um vasto conjunto de situações objecto de estudo, sendo a expressão $RMR = 9 \ln Q + 44$ a que melhor correlaciona aqueles índices.

Tabela 5.12 – RQD - Designação da qualidade da rocha (Q.1).

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Rock Quality Designation"		R.Q.D.	
A.	Muito mau	0-25	1. Quando o RQD for < 10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q 2. Intervalos de 5 no RQD têm precisão suficiente (100, 95, 90, ...)
B.	Mau	25-50	
C.	Médio	50-75	
D.	Bom	75-90	
E.	Muito bom	90-100	

Tabela 5.13 – J_n - Índice das famílias de juntas (Q.2).

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Joint set number"		J_n	1. Nas intersecções utilizar $3 \times J_n$ 2. Nas embocaduras utilizar $2 \times J_n$
A.	Nenhuma ou poucas descontinuidades presentes	0,5 - 1,0	
B.	Uma família de descontinuidades	2	
C.	Uma família mais descontinuidades esparsas	3	
D.	Duas famílias de descontinuidades	4	
E.	Duas famílias mais descontinuidades esparsas	6	
F.	Três famílias de descontinuidades	9	
G.	Três famílias mais descontinuidades esparsas	12	
H.	Quatro ou mais famílias, descontinuidades esparsas, maciços muito fracturados	15	
I.	Rocha esmagada, tipo terroso	20	

Tabela 5.14 – J_r - Índice de rugosidade das juntas (Q.3).

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Joint roughness number"		J_r	1. As descrições das alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem de pequena e média dimensão, respectivamente 2. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3 m 3. J_r igual a 0,5 pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direcção de menor resistência
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
b) Contacto entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento			
A.	Juntas descontínuas	4	
B.	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C.	Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D.	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E.	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F.	Descontinuidades lisas, planas	1,0	
G.	Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c) Não há contacto entre as paredes de rocha no escorregamento			
H.	Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	
I.	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	

Tabela 5.15 – J_a - Grau de alteração das descontinuidades (Q.4).

Descrição do Parâmetro		Valor	
"Joint alteration number"		J _a	ϕ_r (°) aprox.
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A.	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epibolito)	0,75	-
B.	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1,0	25-35
C.	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2,0	25-30
D.	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3,0	20-25
E.	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc., e pequenas quantidades de argilas expansivas	4,0	8-16
b) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F.	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, etc	4,0	25-30
G.	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6,0	16-24
H.	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8,0	12-16
I.	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite (contínuo, mas com espessura < 5 mm); o valor de J _a depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc	8-12	6-12
c) Não há contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J.	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8-12	6-24
K.	Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas, com pequena fracção de argila	5,0	-
L.	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10,13, 13-20	6-24

Nota: Os valores do ângulo de atrito residual (ϕ_r) devem considerar-se como um guia aproximado das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração

Tabela 5.16 – J_w - Índice das condições hidrogeológicas (Q.5).

Descrição do Parâmetro		Valor		Notas
"Joint water reduction"		J_w	Pressão da água aprox. (MPa)	1. Os factores nos casos C a F são estimados para condições naturais; o parâmetro J_w deverá ser aumentados caso sejam efectuadas drenagens 2. Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados
A.	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, isto é < 5 l/min localmente	1,0	$< 0,1$	
B.	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1-0,25	
C.	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25-1	
D.	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,3	0,25-1	
E.	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2-0,1	> 1	
F.	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	0,1-0,05	> 1	

Tabela 5.17 – SRF - Factor de redução de tensões (Q.6).

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas	
"Stress Reduction Factor"		SRF		
a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas			1. Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem	
A.	Zonas de fraqueza frequentes, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvente muito descomprimido (todas as profundidades)	10,0		
B.	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação ≤ 50 m)	5,0		
C.	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação > 50 m)	2,5	2. No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência da matriz rochosa é então pouco significativa. Em maciços muito pouco fracturados e sem argila,	
D.	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5		
E.	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidades da escavação ≤ 50 m)	5,0		
F.	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades da escavação > 50 m)	2,5		
G.	Juntas abertas, rocha muito fracturada e descomprimida (todas as profundidades)	5,0		
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha			σ_c / σ_1	σ_t / σ_1
H.	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	> 200	> 13
I.	Tensões médias	1,0	200-10	13-0,66
J.	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5-2,0	10-5	0,66-0,33
K.	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5-10	5-2,5	0,33-0,16
L.	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10-20	$< 2,5$	$< 0,16$
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M.	Pressão moderada da rocha esmagada	5-10		
N.	Pressão elevada da rocha esmagada	10-20		
d) Rochas expansivas: actividade química expansiva devida à presença da água				
O.	Pressão de expansão moderada	5-10		
P.	Pressão de expansão elevada	10-15		

Tabela 5.18 – Índice de segurança ESR para diferentes obras subterrâneas (Q).

Classe	Tipo de escavação	ESR
A.	Cavidades mineiras temporárias	3-5
B.	Poços verticais de secção circular Poços verticais de secção quadrada ou rectangular	2,5 2,0
C.	Cavidades mineiras definitivas, túneis de aproveitamentos hidráulicos (excepto túneis sob pressão), túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores de grandes cavidades	1,6
D.	Cavernas de armazenagem, estações de tratamento de águas, pequenos túneis rodo-ferroviários, chaminés de equilíbrio, túneis de acesso	1,3
E.	Centrais subterrâneas, túneis rodo-ferroviários de grande dimensão, abrigos de defesa, bocas de entrada, intersecções	1,0
F.	Centrais nucleares subterrâneas, estações de caminhos de ferro, fábricas	0,8

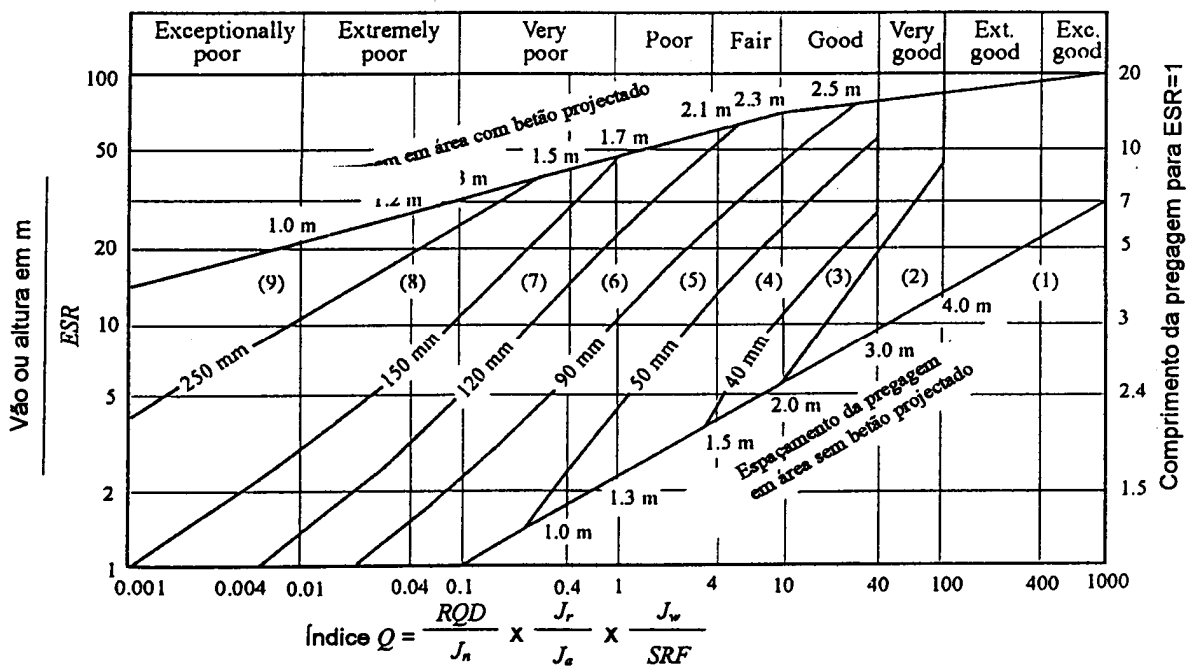


Figura 5.5 – Classes de suporte definidas para o sistema Q (Grimstad e Barton, 1993).

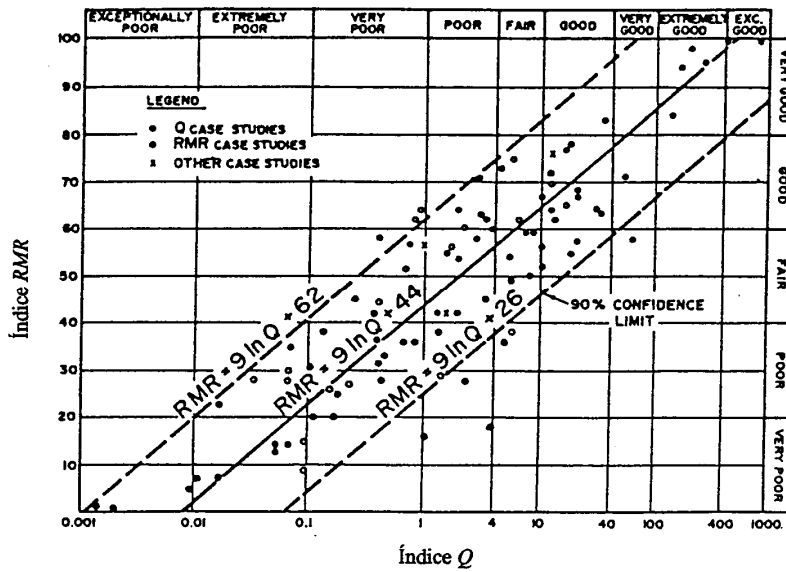


Figura 5.6 – Correlações entre os índices RMR e Q.

Bibliografia

Ingeniería geológica / Luis I. González de Vallejo... [et al.]. - Madrid [etc.] : Prentice Hall, 2002.

Practical Rock Engineering / Evert Hoek, 2000 Edition, <http://www.rocscience.com>