

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Classificação/Descrição de Maciços Rochosos

Neste capítulo, são estudados os parâmetros, geralmente usados, para caracterização geomecânica de maciços rochosos.

Um dos aspetos mais importantes ligados aos estudos de terrenos para fins de engenharia civil, é o da respetiva classificação, nomeadamente no que se refere à definição dos parâmetros que melhor caracterizam uma formação do ponto de vista de Geologia de Engenharia ^[7]. Embora a importância desses parâmetros varie de caso para caso, consoante o tipo de estrutura a projetar, há que basear a classificação, para ser universal, sempre nos mesmos parâmetros e procurar quantificar as designações respetivas a partir de observações e ensaios simples e 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 ^[7].

Pode definir-se um *maciço rochoso* como um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados ^[22]. A rocha intacta constitui a matriz do maciço rochoso, sendo ela o material que forma os blocos. As superfícies que os delimitam são denominadas de *descontinuidades*.

A porção do maciço analisado, relativamente à obra considerada, define a validade de se admitir o meio homogéneo ou heterogéneo, isotrópico ou anisotrópico, contínuo ou descontínuo. Não se pode dizer que os maciços rochosos são essencialmente heterogéneos, anisotrópicos e descontínuos ^[3].

2.1.1. Classificação Litológica

Segundo Clerici et. al. (1990), a descrição litológica do maciço rochoso deve incluir, de forma sintética, a cor, composição mineralógica básica, a presença de dobras, falhas (estruturas importantes) na escala do levantamento, a presença de estratificação e xistosidade. Devem ter-se claros, o grupo genético, estruturas principais e textura.

Uma descrição litológica ou petrográfica para aplicação em engenharia deve-se apoiar-se em conceitos petrográficos de uso corrente na geologia, porém deve ser simplificada e objetiva, evitando-se nomenclaturas complexas cujo emprego não proporcione resultados práticos ^[22].

É importante destacar que nem sempre a classificação litológica expressa a variabilidade, que uma rocha apresenta num mesmo local. É necessário, em certos casos, discriminar variedades de um mesmo litotipo, com o objetivo de melhor expressar o comportamento do meio rochoso, para fins de engenharia.

- **Solos**

Os solos são materiais que resultam do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. A alteração mecânica resulta da ação de agentes como a água, congelamento da água nos poros e fendas das rochas, temperatura, vegetação (ação das raízes e dos troncos das plantas em via de crescimento), vento e gravidade; a alteração mecânica deixa os minerais da rocha de origem inalterados e identificáveis com esta. A decomposição química entende-se como o processo em que há modificação química ou mineralógica dos minerais da rocha de origem; é devida principalmente ao oxigênio, ao CO₂ e aos ácidos orgânicos em dissolução na água e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o produto último do processo de decomposição. Os minerais argilosos são um grupo de minerais cristalinos complexos, constituídos principalmente de silicatos de alumínio ^[17].

De entre os principais tipos de solos podemos citar ^[16]:

- a) *Solos Residuais* - são os que permanecem no local da rocha de origem, observando-se uma gradual transição do solo até a rocha.
- b) *Solos Sedimentares* - são os que sofrem a ação de agentes transportadores, podendo ser aluvionares (transportados pela água), eólicos (pelo vento), coluvionares (pela ação da gravidade) e glaciares (pelas geleiras).
- c) *Solos de Formação Orgânica* - são os de origem essencialmente orgânica, seja de natureza vegetal (plantas, raízes), seja animal (conchas).

- **Rocha**

Material constituinte da crosta terrestre, proveniente da solidificação do magma ou de lavas vulcânicas, ou da consolidação de depósitos sedimentares, tendo ou não sofrido transformações metamórficas. Esses materiais apresentam elevada resistência, somente modificável por contatos com o ar ou a água, em casos muito especiais. Em relação às suas dimensões, classificam-se em *bloco de rocha* quando com diâmetro médio superior a 1 m,

matacão quando entre 1 m e 25 cm e *pedra* entre 25 cm e 76 mm. Ao material não consolidado que recobre as rochas e destas provêm por intemperismo, denomina-se solo ^[19].

Rocha alterada é a que apresenta, pelo exame macro ou microscópico, indícios de alteração de um ou vários de seus elementos mineralógicos constituintes, tendo geralmente diminuídas as características originais de resistência.

Quanto à sua gênese as rochas podem ser classificadas em ^[17]:

- a) *Rochas ígneas* - são as resultantes do arrefecimento e consolidação de material fundido ou “magma”. Se formadas a grandes profundidades são chamadas de intrusivas, e de extrusivas quando se formam na superfície através do arrefecimento da “lava”; granito, basalto, gabro, andesito, diorito, sienito.
- b) *Rochas Sedimentares* - formadas pela deposição de detritos oriundos da desagregação de rochas preexistentes; siltito, argilito, grés, conglomerados, calcário, xisto.
- c) *Rochas Metamórficas* - provêm da transformação ou metamorfismo das rochas ígneas ou sedimentares (elevadas temperaturas, elevadas pressões); mármore, quartzito, gnaisse, xisto cristalino, ardósia.

Uma rocha, classificada sob o ponto de vista geológico, poderá apresentar diferentes resistências ao desmonte, segundo o grau de alteração que já sofreu. Mesmo conservando bem nítida a estrutura da rocha matriz, a sua resistência mecânica poderá ser bastante reduzida, devido à alteração sofrida pelos seus minerais constituintes. A mesma observação pode ser feita com relação às classificações da Mecânica dos Solos, pois um solo caracterizado como argiloso poderá, apenas pela variação do teor de humidade, apresentar comportamentos diferentes com relação à resistência oferecida ao desmonte ^[20].

2.1.2. Classificação Geológica/Geomecânica

A maioria da superfície da terra, e parte do fundo dos mares, estão cobertos por uma camada de sedimentos granulares, que resultaram, principalmente, da desintegração mecânica e da decomposição química das rochas, onde tais sedimentos se encontram numa forma solta ou ligados por um cimento fraco que não mude a sua forma de um agregado de partículas, classificando-se como solos. É esta forma granular que distingue os solos (numa forma geral para a engenharia) de rochas ^[17].

Relativamente aos solos existem já critérios de classificação universalmente aceites. 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 respetivamente 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 [7].

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

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 [7].

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 e o caso de terrenos argilosos montmoriloníticos em que a designação deixa desde logo prever a possibilidade de fenómenos de expansibilidade e retração relevantes que poderão ser de muita importância em determinadas obras de construção civil [7]. Conforme é conhecido, estes 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, ou ditar comportamentos hidráulicos típicos (Figura 2.1) associados à permeabilidade em grande que se processa através da rede de discontinuidades [33].



Figura 2.1 - Hidrogeologia de um maciço sedimentar. (A) zona de recarga; (B) zona de cavidades saturadas; (C) zona de transferência [33].

É notório que é insuficiente dizer-se que um dado maciço é granítico, xistoso ou basáltico, quando se pretende informar um projetista de uma barragem ou de uma ponte das características do respetivo maciço de fundação. O estado de alteração do material, o seu estado de fracturação, a presença ou ausência de material de enchimento das descontinuidades e sua qualidade, são fatores que fazem variar extraordinariamente as características do maciço ^[7].

A caracterização geológico-geomecânica¹ de um maciço rochoso, constitui-se do levantamento de “atributos” do meio rochoso que, isolada ou conjuntamente, condicionam o seu comportamento. A natureza das suas características varia de local para local, em função da história geológica da região estudada ^[19].

Neste estudo, são considerados a litologia, o grau de alteração, o grau de fracturação e propriedades relativas às descontinuidades, de entre outros atributos, para caracterizar o maciço na área de pesquisa.

2.1.2.1. Grau de alteração dos maciços rochosos

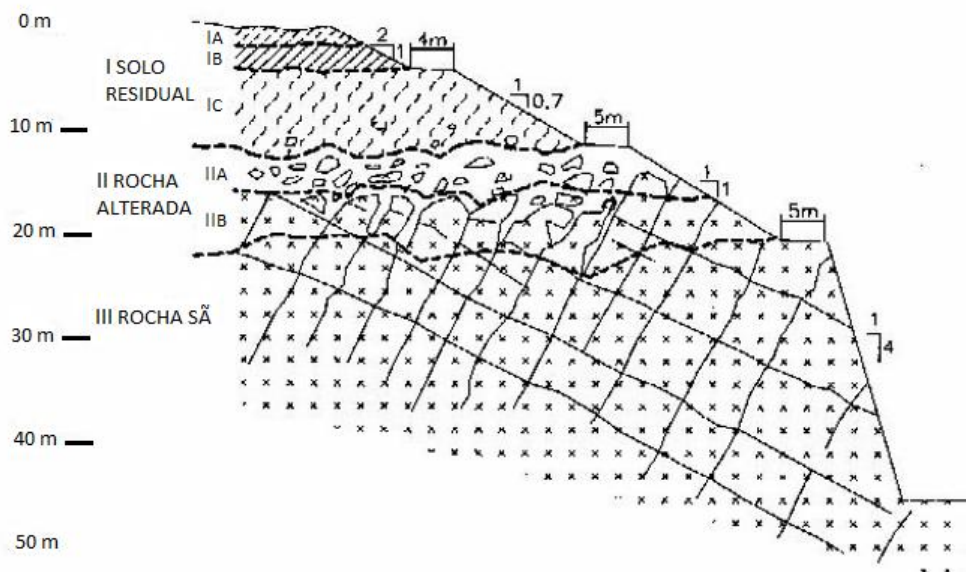
A alteração da rocha é o resultado de um processo evolutivo causado pela ação de diversos agentes, designadamente; água, gelo, vento, oxigénio e anidrido carbónico. Este efeito não se limita apenas à superfície, também se estende em profundidade, dependendo da existência ou não de canais que permitam a percolação de água e a comunicação com a atmosfera. Como consequência desta alteração, dá-se um decréscimo da sua resistência, permeabilidade, aumento da porosidade, deformabilidade e da respetiva estabilidade ^{[6], [8]}. As características de qualidade de maciços rochosos são pois, fundamentalmente consequência do seu estado de alteração.

¹Utiliza-se o termo “geológico-geomecânica” por considerar-se mais geral, na prática de Geologia de Engenharia, Mecânica de Solos e de Rochas e Engenharia de Solos e de Rochas. O termo “Geotecnia” refere-se, num número muito grande de casos, a trabalhos relacionados a solos.

Caracterização do estado de alteração

A avaliação do estado de alteração dos maciços é normalmente composta, usando critérios definidos a partir da predominância de processos naturais da formação de solos ou de meteorização, nos horizontes de solo; de graus de alteração mineralógica, nos horizontes de rocha e das percentagens relativas de solo e rocha para definir horizontes de transição ^[19]. Segundo Vaz (1996), os perfis de intemperismo disponíveis seguem dois modelos: o americano, de Deere & Patton (1971), onde o perfil de intemperismo é constituído por dois horizontes com subdivisões, resultando em três horizontes de solo e três de rocha, com diferentes propriedades físicas e que permanecem recobrando o maciço rochoso (Figura 2.2); e o europeu, de Dearman (1976), cujo perfil de intemperismo possui seis horizontes (dois de solo e quatro de rocha), sendo aplicado para todos os tipos de rocha, apesar de ter sido desenvolvido para rochas graníticas.

A ISRM (1983) considera que a meteorização ou alteração afeta, geralmente, as paredes das descontinuidades mais do que o interior do maciço, e produz tanto a desintegração mecânica quanto a decomposição química do mesmo. Vulgarmente, os dois efeitos atuam em conjunto, mas dependendo do regime climático, um dos efeitos pode ser dominante. A desintegração mecânica causa a abertura de descontinuidades e a formação de fissuras pelo fraturamento da rocha. A decomposição química causa a descoloração da rocha e pode levar a eventual decomposição de minerais silicáticos em minerais argilosos.



	Zonas	Descrição	RQD (%) ($\emptyset=Nx$)	Recuperação Provável (%) ($\emptyset=Nx$)	Permeabilidade Relativa	Resistência Relativa
I Solo Residual	IA Horiz. A	Solo superficial com raízes e matéria orgânica; zona de lixiviação e eluviação; Pode ser porosa	-	0	Média a alta	Baixa a média
	IB Horiz. B	Zona tipicamente rica em argila; concentrações de Fe, Al e Si; possibilidade de cimentação; ausência de estruturas reliquiárias	-	0	Baixa	Baixa (alta se cimentado)
	IC Horiz. C	Presença de estruturas reliquiárias; graduação para materiais silteosos e arenosos; menos de 10% de matações; frequentemente macáceo; formação do saporlito	0 ou não aplicável	0 a 10	Média	Baixa a média (influência das estruturas reliquiárias)
II Rocha Alterada (solo residual até rocha parcialmente alterada)	IIA Transição	Altamente diversificada, desde materiais terrosos e rochosos; areia comumente fina a grossa; 10 a 95% de matações; alteração esferoidal presente	0 a 50	variável de 10 a 90	Alta (perdas de água comuns)	Média a baixa (se estruturas reliquiárias forem de baixa resistência)
	IIB Rocha parcialmente alterada	Material rochoso, rocha branda a dura; descontinuidades em diversos graus de alteração; feldspatos e micas parcialmente alterados	50 a 75 em geral	> 90 em geral	Média a alta	Média a alta*
III Rocha Sã	-	Descontinuidades sem alteração e películas de óxido de ferro; feldspatos e micas inalteradas	> 75 (> 90 em geral)	100 em geral	Baixa a média	Muito alta*

* Considerando apenas o maciço intacto, sem estruturas geológicas com atitudes desfavoráveis.

Figura 2.2 - Características principais dos horizontes de um perfil de alteração de rochas ígneas e metamórficas (adaptado de Deere & Patton, 1971).

Segundo a Figura 2.2, num perfil de solo, geralmente pode acompanhar-se o perfil de evolução da desagregação da rocha sã, até à sua formação final como solo residual. Normalmente, em encostas formadas por rochas graníticas temos os horizontes de alteração bem definidos, sendo que a transição entre rocha sã e solo propriamente dito dá-se pela formação do saprolito, que é o grau máximo de decomposição da rocha, onde ainda se observa algum vestígio de estrutura da rocha, notando-se uma estrutura intermediária entre solo e rocha.

O estado de alteração pode ser caracterizado tátil-visualmente, baseando-se em variações do brilho e cor dos minerais da rocha, e também na friabilidade da mesma. Destaca-se que os critérios de avaliação são relativos, devendo comparar-se variedades de um mesmo tipo litológico ^[3].

Classificação considerando o estado de alteração de maciços rochosos

As características de qualidade de maciços rochosos, são fundamentalmente consequência do seu estado de alteração e de fracturação. A percolação de água nos maciços, atua também, com frequência, na respetiva 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 ^[7].

Segundo Oliveira (1980), 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 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 respetiva. Na maioria dos casos parece adequado considerarem-se cinco graus de alteração dos maciços rochosos (rochas) conforme se esquematiza na Tabela 2.1 ^[7].

Tabela 2.1 - Graus de alteração de maciços rochosos (ISRM, 1981).

Símbolos	Designações	Descrição
W1	São	Sem quaisquer sinais de alteração
W2	Pouco alterado	Sinais de alteração, apenas nas imediações das descontinuidades
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

No caso da realização de 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 mesma manobra ^[7]. Este processo é descrito com maior ênfase no ponto 2.1.2.4.

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 ^[7].

A avaliação do grau de alteração/meteorização do maciço rochoso realiza-se através da observação direta do afloramento e comparação com os índices standards visualizados na Tabela 2.1. A Figura 2.3 apresenta exemplos de maciços rochosos afetados por diferentes graus de alteração.

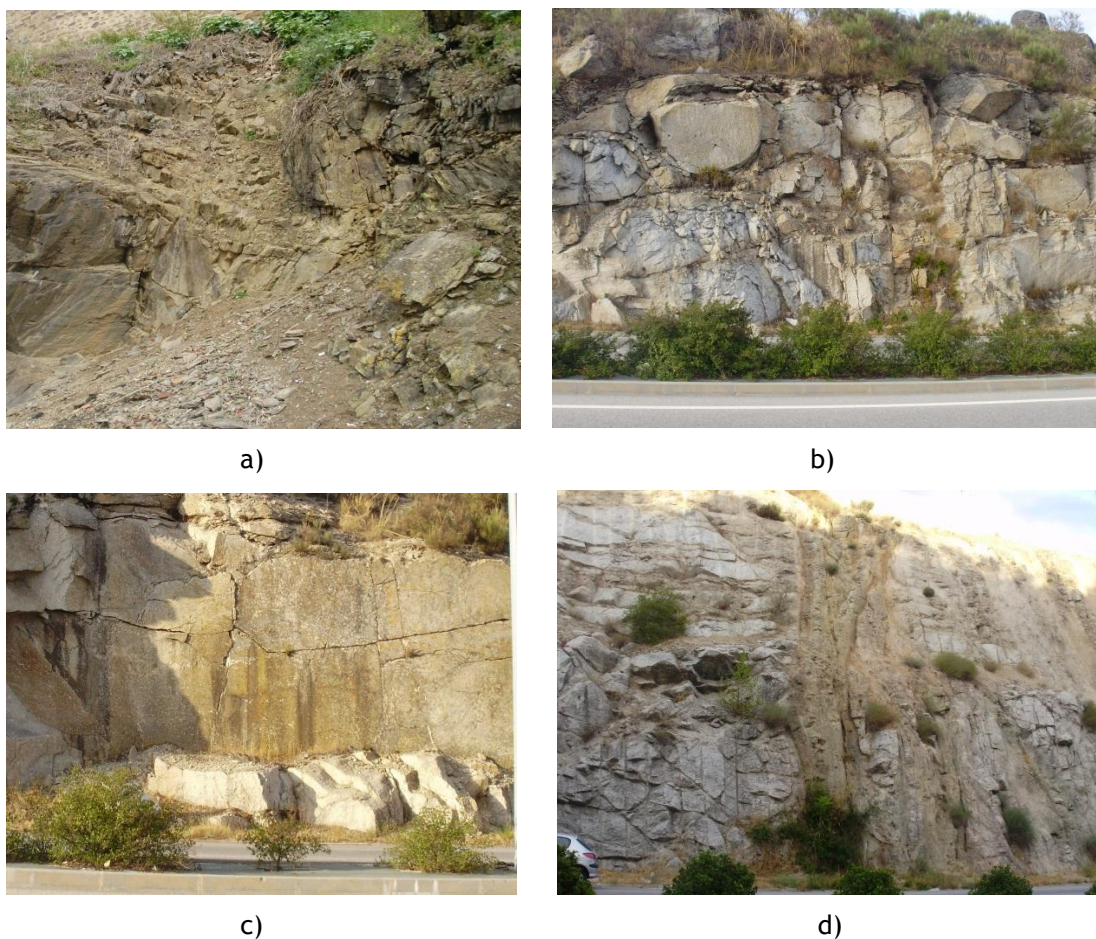


Figura 2.3 - Diferentes graus de alteração em maciços rochosos. a) rocha xistosa desintegrada e bastante alterada, perdendo alguma da sua estrutura original (maciço rochoso, Mértola); b) rocha granítica ligeiramente descolorada, apresentando grau de alteração médio, mantendo a sua estrutura original (talude na VICEG, Guarda); c) rocha granítica em bom estado de alteração com fraturas de descompressão paralelas à superfície (talude na VICEG, Guarda); d) Talude de rocha granítica de vários graus de alteração, com presença de um filão de quartzo (VICEG, Guarda).

O estado de fracturação de maciços rochosos é um indicador extremamente importante no que respeita ao seu comportamento, abrangendo vários critérios razoavelmente semelhantes entre si, que caracterizam, em regra, o espaçamento entre diaclases. Este espaçamento pode ser medido ao longo de uma linha de observação, a partir de uma face exposta ^[19].

2.1.2.2. Volumetria dos blocos

A volumetria dos blocos é um indicador bastante relevante no comportamento dos maciços rochosos, em que as dimensões dos blocos são determinadas pelo espaçamento das descontinuidades, pelo número de famílias e pela persistência das descontinuidades que delimitam os potenciais blocos.

De acordo com Vallejo (2002), o número de famílias e a orientação determinam a forma dos blocos de rocha, que podem ter a aparência de cubos, paralelepípedos, romboedros, prismas, etc.. Contudo as formas geométricas regulares são mais a exceção do que a regra, uma vez que as descontinuidades de qualquer família são raramente paralelas de um modo consistente. É nos maciços sedimentares que ocorrem normalmente blocos com formas mais regulares.

2.1.2.3. Tipos de Descontinuidades

O termo descontinuidade faz referência a qualquer plano de separação no maciço rochoso, podendo ter origem sedimentar, como as superfícies de estratificação ou laminação, diagenético ou tectónico, como as diaclases ou falhas. Na Tabela 2.2 estão agrupados os diferentes tipos de descontinuidades, em sistemáticas, quando aparecem em famílias, e singulares, quando aparece um único plano que atravessa o maciço rochoso. Este último pode ser mais contínuo e persistente que as descontinuidades sistemáticas, podendo chegar, como no caso das falhas, a dimensões de vários quilómetros. Enquanto que, as famílias são caracterizadas por uma orientação estatística pelas suas características gerais, as descontinuidades singulares requerem uma descrição e um tratamento individualizado. Podem chegar a controlar o comportamento mecânico do maciço tendo maior influência que as descontinuidades sistemáticas [3].

As diaclases são os planos de descontinuidade mais frequentes nos maciços rochosos e correspondem à superfície de fracturação ou rotura da rocha, afetando qualquer tipo de rocha.

Atendendo à sua origem distinguem-se os vários tipos [3]:

- Diaclases de origem tectónica associadas a dobras e falhas. As diaclases associadas a falhas dispõem-se paralelamente à superfície da falha e com uma frequência que diminui ao aumentar a distância da mesma;
- Diaclases em rochas ígneas formadas por contração durante e depois do deslocamento do corpo ígneo. Geralmente apresentam uma disposição característica em três famílias ortogonais entre si;
- Diaclases de relaxamento devida a uma redução da carga litostática. Dispõem-se subparalelamente à superfície topográfica e a sua frequência diminui em profundidade.

Tabela 2.2 - Tipos de descontinuidades ^[3].

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	Planos de estratificação. Planos de laminação. Diaclases ou juntas. Planos de xistosidade.	Falhas. Diques. Discordâncias.
Lineares	Interseção de descontinuidades planares. Lineações.	Eixos de dobras.

2.1.2.4. Classificação da qualidade do maciço rochoso segundo o índice RQD

Relacionando os dois critérios já apresentados, 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 de testemunhos de sondagens realizadas com recuperação contínua da 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 de RQD obtidos, o autor apresenta a classificação representando a qualidade do maciço rochoso segundo mostra a Tabela 2.3 ^[17].

Tabela 2.3 - Classificação da qualidade dos maciços com base no RQD ^[3].

RQD	Qualidade Maciço Rochoso
0 - 25%	Muito fraco
25 - 50%	Fraco
50 - 75%	Razoável
75 - 90%	Bom
90 - 100%	Excelente

Para estimar o RQD, apenas se consideram os fragmentos ou pedaços de testemunhos de material são, excluindo aqueles com um grau significativo de alteração (a partir de grau W4 inclusive), para o qual se considera um RQD = 0%. O cálculo do RQD deve ser realizado a cada manobra de sondagem ou sempre que ocorra uma mudança litológica, sendo recomendável que cada manobra não exceda 1,5 m ^[3]. Em princípio, a determinação do RQD deve ser feita

apenas em sondagens que utilizam amostradores de parede dupla ou tripla, com diâmetro (NX) de pelo menos 54,7 mm [23].

Na figura 2.4 mostra-se um exemplo, de forma esquemática, como se obtém a percentagem de RQD.

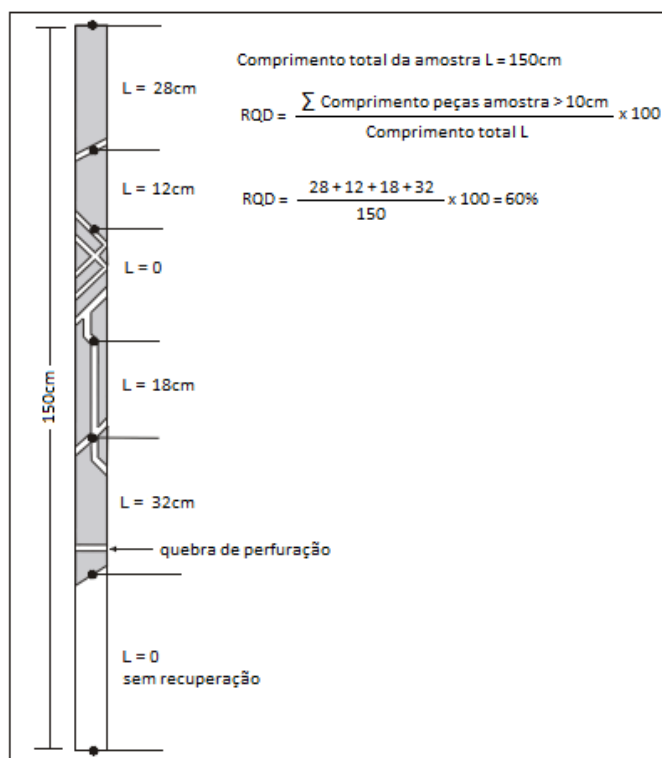


Figura 2.4 - Procedimento para medição e cálculo de RQD (adaptado de Deere, 1989).

No caso de não existir amostragem obtida por sondagens, mas que 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 Palmstrom, 1975 (ISRM 1981):

$$RQD = 115 - 3,3 J_V \quad \text{para } J_V > 4,5$$

$$RQD = 100 \quad \text{para } J_V \leq 4,5$$

O parâmetro J_V representa o número total de descontinuidades que intercetam por unidade de volume (1 m³) o maciço rochoso. Uma vez que nem sempre é fácil ter a percepção tridimensional do afloramento, o valor de J_V pode ser determinado, contando as descontinuidades de cada família que intercetam o maciço rochoso, ao longo de um certo comprimento, medido perpendicularmente à direção de cada uma das famílias presentes [3].

$$J_v = \Sigma n^{\circ} \text{descontinuidades} / \text{comprimento médio} \quad (1)$$

Para exemplo, num maciço com três famílias de descontinuidades (J_1 , J_2 e J_3):

$$J_v = (n^{\circ} J_1/L_1) + (n^{\circ} J_2/L_2) + (n^{\circ} J_3/L_3) \quad (2)$$

O comprimento a medir dependerá do espaçamento de cada família, variando normalmente entre 5 e 10 metros.

De acordo com os valores de J_v , são normalmente utilizadas as seguintes designações para descrever as dimensões dos blocos:

Tabela 2.4 - descrição do tamanho dos blocos em função do número de descontinuidades, (ISRM, 1981).

Descrição	J_v (descontinuidades/m ³)
blocos muito grandes	< 1
blocos grandes	1 a 3
blocos tamanho médio	3 a 10
blocos pequenos	10 a 30
blocos muito pequenos	> 30

Quando J_v é superior a 60, considera-se que o maciço rochoso está bastante esmagado.

Outra forma, menos precisa mas mais facilmente executável de estimar o valor de J_v é contar o número total de descontinuidades que intercetam um comprimento L, em qualquer direção, correspondendo este valor à frequência das descontinuidades, λ [3].

$$\lambda = n^{\circ} \text{descontinuidades} / L \quad [m] \quad (3)$$

ou

$$\lambda = 1 / \text{espaçamento médio das descontinuidades} \quad [m] \quad (4)$$

A determinação do RQD pode assim ser feita a partir da frequência das descontinuidades, obtendo-se um valor teórico mínimo para o RQD:

$$RQD \approx 100 \exp^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1) \quad [\%] \quad (5)$$

É de notar que o RQD é um parâmetro dependente da direção de amostragem, podendo o seu valor variar significativamente em função da orientação das sondagens. O uso deste índice

volumétrico, para estimar o valor do RQD, pode apresentar-se como benéfico por reduzir tal dependência ^[8].

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 fraturas 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, deve haver cuidado de distinguir as fraturas 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 ^[9].

A classificação dos maciços rochosos, baseada nos valores do RQD, embora útil, é bastante limitada. De facto, além das fraturas, 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 ^[3].

2.1.2.5. Resistência ao Deslizamento

A resistência de um maciço rochoso é função da resistência da rocha intacta e das descontinuidades presentes nele. Segundo o grau de fracturação, o comportamento e propriedades resistentes de um maciço rochoso podem ser definidas pela ^[3]:

- Resistência da rocha intacta (isótropa ou anisótropa);
- Resistência ao corte de uma família ou famílias de descontinuidades, de acordo com a escala do problema a analisar (famílias representativas do maciço rochoso);
- Resistência global de um sistema de blocos rochosos com comportamento isótropo.

Em análises da estabilidade, geralmente, assume-se que a rocha se comporta como um material que segue a teoria de rotura de Mohr-Coulomb, no qual a resistência ao corte da superfície deslizante é expressa em termos de coesão (c) e do ângulo de atrito (ϕ) ^[44]. Os valores destes dois parâmetros de resistência, relacionam-se intimamente com as condições geológicas de cada local. Ilustra-se na Figura 2.5 a sua aplicação para três condições diferentes, apresentando as rectas de Mohr-Coulomb, ilustrando os possíveis comportamentos da resistência ao corte para três tipos de descontinuidades.

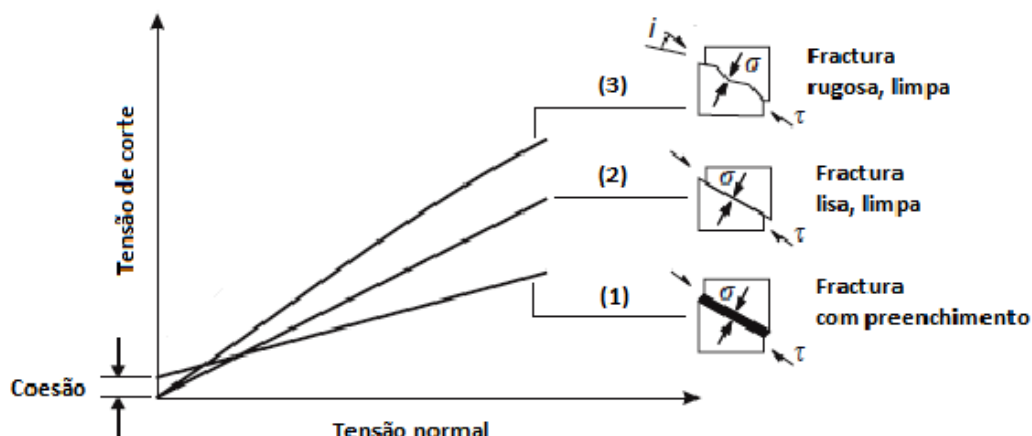


Figura 2.5 - Relação entre tensão de corte e normal em superfície deslizante para três tipos de descontinuidades em diferentes condições geológicas ^[44].

A Figura 2.5 registra que ^[44]:

Na condição (1), numa descontinuidade com preenchimento, é necessário ter em conta a natureza desse mesmo preenchimento. Se este é uma argila de má qualidade ou farinha de falha, é provável que o ângulo de atrito seja baixo, embora possa ser observada alguma coesão no caso do preenchimento se encontrar intacto. No caso de o preenchimento ser um material mais resistente, provocando a selagem das paredes da descontinuidade, então a coesão poderá ser significativa e deverá ser considerada para análises de estabilidade.

Na condição (2), numa descontinuidade sem qualquer preenchimento e de paredes lisas, coesão é nula e o ângulo de atrito (ϕ_b) está relacionado com o tamanho do grão da rocha, sendo geralmente menor nas rochas de grão fino, que nas de grão grosseiro.

A condição (3) mostra que numa descontinuidade com superfícies rugosas, a coesão é nula e o ângulo de atrito é composto por duas componentes: o ângulo de atrito da superfície da rocha (ϕ_b) e uma componente (i) relacionada com a rugosidade (asperezas) da superfície e a razão entre a resistência da rocha e a tensão normal aplicada. Com o aumento da tensão normal, as asperezas são progressivamente aplanadas e o ângulo de atrito total diminui.

Comportamento das Descontinuidades

Vários critérios de resistência (rotura) para descontinuidades têm sido formulados nas últimas décadas, porém o primeiro entendimento sobre o comportamento das descontinuidades das rochas foi estabelecido pelo critério de Patton (1966) a respeito da influência da rugosidade na resistência das descontinuidades. Este autor realizou ensaios de corte direto sobre amostras com descontinuidades artificiais e constatou que a resistência ao corte depende do ângulo de atrito do material e da inclinação das rugosidades ^[3]. Esta resistência foi definida por:

$$\tau = \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\phi_b + i) \quad (6)$$

Onde:

τ - tensão de corte ao longo da descontinuidade;

σ_n - tensão normal no plano da descontinuidade;

ϕ_b - ângulo de atrito básico da superfície;

i - ângulo de inclinação da rugosidade.

Posteriormente Barton (1971) descreveu a resistência ao corte de juntas artificiais, com base em dados experimentais e observou evidências físicas da influência das propriedades das superfícies das juntas, através da resistência à compressão e rugosidades das paredes, no comportamento geomecânico. Com base em inúmeros estudos experimentais em juntas naturais e artificiais, chegou-se a uma equação empírica para a resistência ao corte das juntas, definida pelo critério de Barton e Bandis (1983), mostrando que:

$$\tau = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \left(JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right) \quad (7)$$

Onde:

τ - tensão de corte ao longo da descontinuidade (Figura 2.6);

σ_n - tensão normal no plano da descontinuidade (Figura 2.6);

JCS - resistência à compressão uniaxial da rocha na parede da descontinuidade;

JRC - coeficiente de rugosidade da descontinuidade que varia no intervalo de 0 - 20.

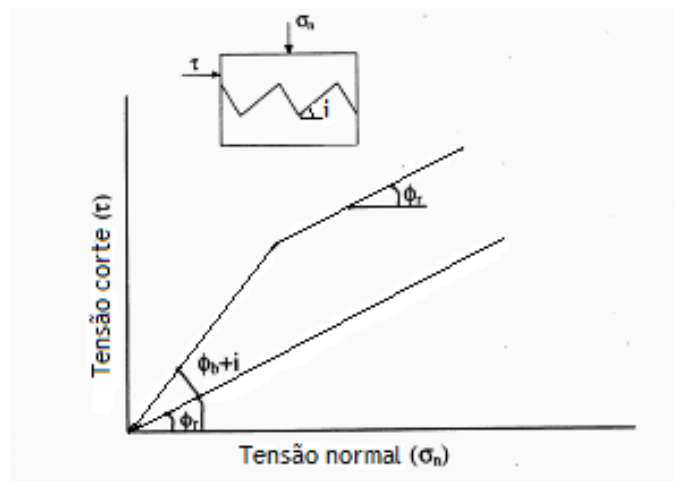


Figura 2.6 - Envolvente bilinear de ruptura de pico obtida a partir de ensaios de corte direto (adaptado de Patton, 1966).

O JRC pode ser obtido através da fórmula em baixo (8) proposta por Barton et al. (1985) e derivados a partir dos ensaios de rampa inclinada (*tilt test*), onde blocos de rochas intercetados por juntas são retirados do maciço rochoso e inclinados até que a parte superior do bloco deslize em relação à parte inferior (Figura 2.7).

O coeficiente de rugosidade de discontinuidades (JRC) também pode ser obtido por comparação do perfil de rugosidades típicas, apresentado por Barton e Choubey (1977), conforme mostra a Figura 2.8, variando de 0 para discontinuidades lisas até 20 para discontinuidades para alta rugosidade.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)_{ensaio}} \quad (8)$$

Onde:

α - ângulo no qual se dá o deslizamento do bloco superior;

σ_n - tensão normal no plano da discontinuidade;

JCS - resistência à compressão uniaxial da rocha na parede da discontinuidade;

ϕ_r - ângulo de atrito residual.

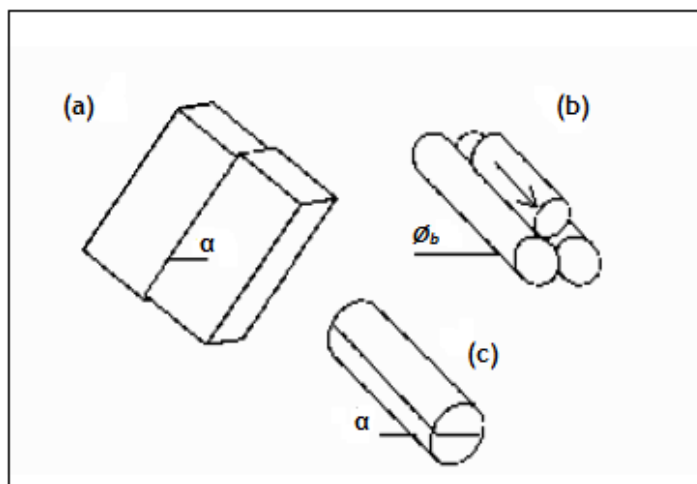


Figura 2.7 - Esquema de ensaios de rampa inclinada: (a) Simulação de uma discontinuidade a deslizar em blocos retangulares; (b) Testemunhos de sondagem; (c) Simulação de discontinuidade longitudinal em corpo de prova cilíndrico (adaptado de Montoya, 2002).

Como no *tilt test* esquematizado na Figura 2.7(b), obtém-se o ângulo de atrito básico do material (ϕ_b) e em razão dos efeitos de intemperismo, foi proposta por Barton e Choubey (1977) a formula (9) que utiliza o Martelo de Schmidt para obter o ângulo de atrito residual (ϕ_r). Salienta-se ainda que, no caso da parede da discontinuidade se encontrar sã, pode

considerar-se que $\phi_r = \phi_b$. Sabe-se que os valores típicos do ϕ_b para as rochas ígneas em descontinuidades planas sem que haja desgaste ou meteorização andam na ordem dos 29° a 38° [3].

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R} \quad (9)$$

Onde:

ϕ_b - ângulo de atrito básico obtido do *tilt test* (Figura 2.7b);

r - valor de ressalto (obtido com o esclerómetro de Schmidt L) para descontinuidades alteradas, húmidas ou secas;

R - valor de ressalto (obtido com o esclerómetro de Schmidt L) para descontinuidades sãs e secas.

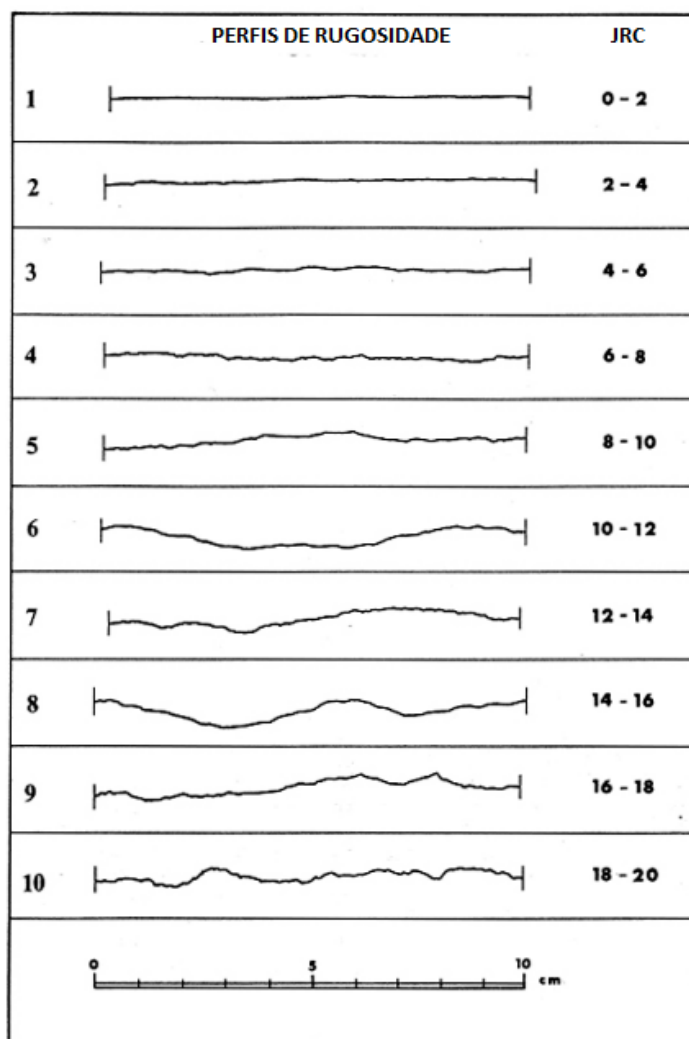


Figura 2.8 - Perfis tipo para estimar o coeficiente de rugosidade (JRC) (Barton e Choubey, 1977) [3].

Resultados experimentais comprovaram a dependência da escala de valores de JRC e JCS. Barton et al. (1985) apresentaram uma formulação na qual correlacionam o índice de rugosidade e a resistência à compressão uniaxial da parede da descontinuidade, obtidos em ensaios de laboratório com aqueles da descontinuidade “*in situ*”:

$$JRC_n = JRC_0 \left[\frac{L_n}{L_0} \right]^{-0,02JRC_0} \quad (10)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left[\frac{L_n}{L_0} \right]^{-0,03JCS_0} \quad (11)$$

Onde:

JRC_n - coeficiente de rugosidade da descontinuidade “*in situ*”;

JRC_0 - coeficiente de rugosidade da descontinuidade em laboratório;

JCS_n - resistência à compressão uniaxial não confinada da rocha das paredes da descontinuidade “*in situ*”;

JCS_0 - resistência à compressão uniaxial não confinada da rocha das paredes da descontinuidade em laboratório;

L_n - dimensão da resistência à compressão uniaxial não confinada da rocha das paredes da descontinuidade e corpo de prova considerado “*in situ*”, limitado ao espaçamento de juntas transversais, delimitando os blocos do maciço;

L_0 - dimensão do corpo de prova considerado em laboratório.

Segundo Hoek (2000), o ângulo de atrito interno básico da rocha (ϕ_b), é fundamental para o entendimento da resistência ao corte da superfície das descontinuidades. O valor do ângulo é aproximadamente igual ao valor do ângulo de atrito residual (ϕ_r), porém, como descrito anteriormente, ele é geralmente obtido por meio de testes em amostras, previamente cortadas e retificadas.

A determinação do ângulo de atrito das descontinuidades nos maciços rochosos, segundo Hu e Cruden (1992), é essencial na avaliação da estabilidade dos taludes desses maciços. No entanto, como o ensaio de corte direto para determinação do ângulo de atrito interno, requer um transporte mais cuidadoso das amostras do campo para o laboratório, corte da amostra na forma específica para a realização do ensaio e posterior retificação das suas superfícies, às vezes são necessários diversos dias, apenas para que uma amostra seja ensaiada. Desde que foi sugerido por Hoek e Bray (1974) que o ângulo de atrito poderia ser obtido pelo referido e simples ensaio de “*tilt test*”, quando claramente há uma fratura existente na superfície da rocha. Outros autores como Cawsey e Farrar (1976) e Barton e Choubey (1977) têm estimado o ângulo de atrito interno de descontinuidades artificiais de acordo com este ensaio [26].

No que respeita ao ângulo de atrito determinado pelo ensaio “*tilt test*”, para os diferentes tipos de rocha, geralmente as de grão fino e com elevado teor em mica, tendem a possuir baixo ângulo de atrito, enquanto rochas de grão grosseiro e rochas de elevada resistência têm elevado ângulo de atrito. Em seguida indicam-se gamas de valores de referência de ângulos de atrito em função de tipos de rocha ^[3]:

- Rochas de baixo atrito, metamórficas, (ângulo de atrito entre cerca de 21° a 30°): xisto micáceo, argila xistosa, marga;
- Rochas de médio atrito, sedimentares, (ângulo de atrito entre cerca de 25° a 37°): arenito, siltito, cré, gneisse, ardósia;
- Rochas de elevado atrito ígneas, (ângulo de atrito entre cerca de 29° a 38°): basalto, granito, calcário, conglomerado.

Os valores indicados deverão ser usados unicamente como um guia, já que os valores reais podem assumir ampla variação em função das condições locais.

Influência da pressão de água

Quando no maciço rochoso existe água sob pressão, as superfícies das discontinuidades são compelidas a afastar-se e a tensão normal (σ_n) sofre uma redução de valor. Em condições de estabilidade, isto é, quando decorre um período de tempo suficientemente longo para que as pressões da água tenham atingido o equilíbrio, a tensão normal reduzida será dada segundo a expressão ^[34]:

$$\sigma'_n = (\sigma_n - u) \quad (12)$$

Onde u representa a pressão da água, correntemente designada por *pressão neutra*. A tensão normal reduzida (σ'_n) é usualmente conhecida por *tensão normal efetiva*, e deve ser esta utilizada em vez da tensão normal (σ_n) nas equações anteriormente apresentadas.

2.2. Descrição das Descontinuidades

As discontinuidades condicionam de uma forma definitiva as propriedades e o comportamento resistente, deformacional e hidráulico dos maciços rochosos. A resistência ao corte das discontinuidades é o aspeto mais importante na determinação da resistência dos maciços rochosos duros fraturados e para criar uma estimativa é necessário definir as

características e propriedades dos planos de descontinuidade ^[3]. Neste ponto são descritos os critérios de descontinuidades e são definidos parâmetros físicos e geométricos que condicionam as suas propriedades e o seu comportamento mecânico. A descrição e medida destes parâmetros para cada família, devem ser realizadas segundo a orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, resistência das paredes, abertura, preenchimento e infiltrações.

Alguns destes parâmetros, como a rugosidade, resistência das paredes, abertura e preenchimento, determinam o comportamento mecânico e a resistência ao corte das descontinuidades.

Além das características mencionadas, pode citar-se ainda, o número de famílias de descontinuidades. O comportamento geomecânico do maciço rochoso é influenciado pelo número de famílias de descontinuidades, que por sua vez determina a extensão do maciço que se pode deformar sem envolver a rotura da rocha intacta.

2.2.1. Orientação

As descontinuidades sistemáticas apresentam-se em famílias com orientação e características mais ou menos homogêneas ^[3]. A orientação relativa e o espaçamento de diferentes famílias de um maciço rochoso, definem a configuração dos blocos que formam o maciço. A orientação das descontinuidades no que respeita a estruturas e obras de engenharia, é condicionada pela presença de instabilidades e roturas a seu favor ^[8]. Na Figura 2.9 apresentam-se exemplos da influência da orientação dos planos de fraqueza em obras como taludes, barragens e tuneis.

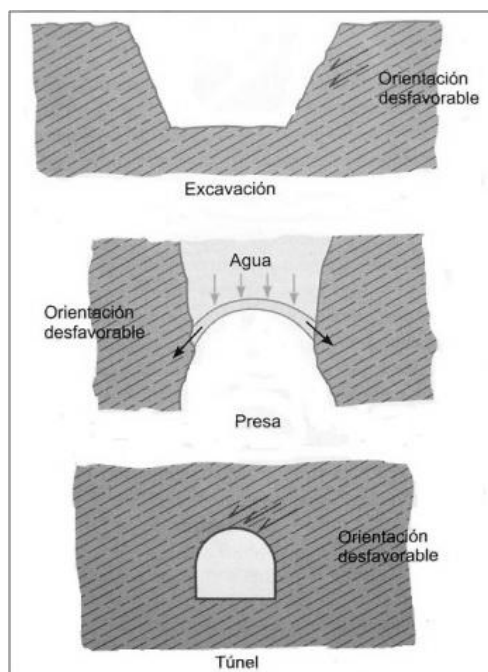


Figura 2.9 - Influencia da orientação de descontinuidades no que respeita a obras de engenharia [3].

A orientação de uma descontinuidade no espaço é definida pela sua direção (direção da linha de máxima pendente do plano de descontinuidade em relação ao Norte, “strike”) e pelo seu mergulho do plano (inclinação em relação à horizontal da respetiva linha, “dip”) como mostra a Figura 2.10. A orientação da descontinuidade é feita no campo através de bússola de geólogo. No capítulo Metodologias, no ponto 3.1.2, descreve-se o processo usado na determinação da atitude das descontinuidades do presente estudo.

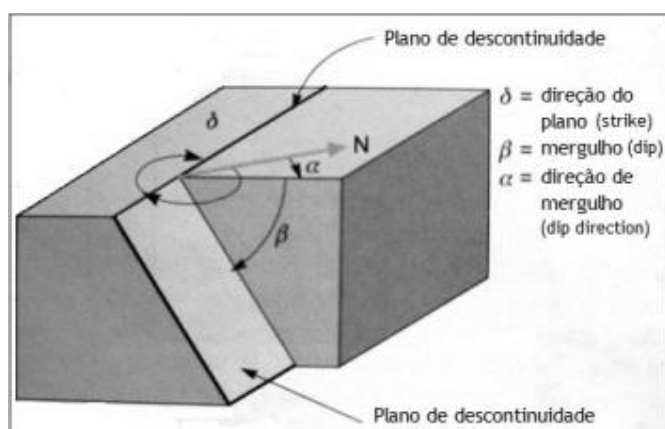


Figura 2.10 - Esquema representativo da orientação de descontinuidades (adaptado de Vallejo, 2002).

É aconselhável medir um número suficiente de orientações de descontinuidades para definir adequadamente cada família. O número de medidas dependerá da dimensão da zona

estudada, da aleatoriedade das orientações dos planos e do detalhe de análises. No caso de as orientações serem constantes, pode reduzir-se o número de medidas [3].

A representação gráfica da orientação das diferentes famílias de descontinuidades pode realizar-se segundo, projeções estereográficas, representando os polos ou planos com valores médios das diferentes famílias; diagramas de rosetas permitem representar um grande número de medidas de orientação de forma quantitativa (Figura 2.11); blocos diagrama, permitindo uma visão geral das famílias e respetivas orientações, como mostra a Figura 2.13; símbolos em mapas geológicos, que indicam a direção e a direção de mergulho para os diferentes tipos de descontinuidades [3].

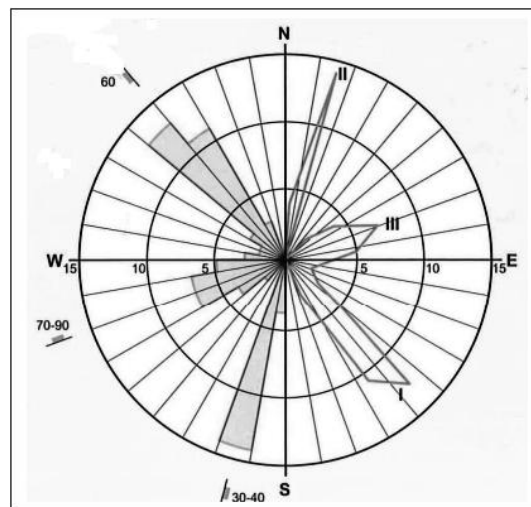


Figura 2.11 - Representação dos dados de orientação segundo dois métodos (ISRM, 1981).

2.2.1.1. Compartimentação dos Maciços Rochosos

Como já referido anteriormente, os parâmetros relativos às descontinuidades que determinam a forma e dimensão dos blocos que compartmentam os maciços rochosos, são a orientação e número de famílias, o desenvolvimento e o espaçamento.

Os desenhos da Figura 2.12 ilustram como estas propriedades podem influenciar a estabilidade da fundação. Em ambos os casos existem duas famílias de descontinuidades: a família A (*set A*) mergulha cerca de 40° no sentido da face do talude e a família B (*set B*) mergulha para o interior com uma pendente elevada [9].

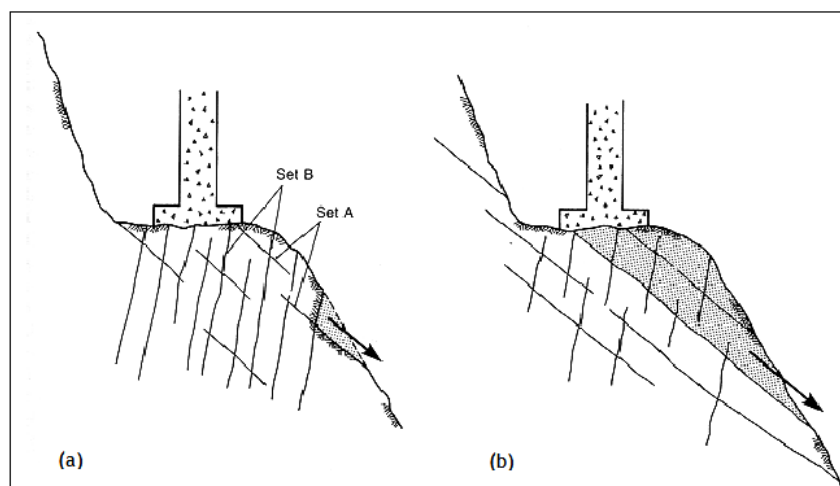


Figura 2.12 - Influência do desenvolvimento e orientação das descontinuidades numa fundação ^[9].

- (a) Descontinuidades contínuas mergulhando para o interior do talude - fundação estável;
- (b) Descontinuidades contínuas mergulhando para fora da face do talude - fundação instável.

No caso da Figura 2.12(a) as descontinuidades da família A são descontínuas (pouco persistentes) e mais espaçadas que as da família B. Esta fundação deverá ser estável porque as descontinuidades aflorando na face do talude não são contínuas e apenas um pequeno bloco instável se forma junto da face. Pelo contrário, na Figura 2.12(b) as descontinuidades mergulhando no mesmo sentido da face do talude são extensas e possibilitam o movimento do conjunto da fundação sobre aquelas, constituindo as descontinuidades da família B fraturas de tração (*tension cracks*). Um exemplo típico da situação referida, pode corresponder ao de uma formação de arenito estratificado contendo uma família conjugada de descontinuidades pouco persistentes. Se as camadas mergulham para o interior do talude a fundação pode ser estável, e se mergulham para fora da face com um ângulo de 40° , que é frequentemente maior que o ângulo de atrito das superfícies de estratificação do arenito, é provável que a fundação venha a escorregar sobre estas descontinuidades ^[9].

As condições mostradas na Figura 2.12 ilustram também a influência do espaçamento das descontinuidades nos assentamentos. Neste exemplo, o espaçamento das descontinuidades é tal que a sapata assenta predominantemente na rocha intacta. Consequentemente é pouco provável a ocorrência do fecho das descontinuidades e o assentamento será função do módulo de deformabilidade da rocha intacta. Contudo, no caso duma rocha muito fraturada, o assentamento pode ocorrer como resultado do fecho das descontinuidades, particularmente se o preenchimento incluir um material compressível, tal como argila, sendo neste caso o assentamento função do módulo de deformabilidade do maciço rochoso que constitui o conjunto da fundação.

Quanto à estabilidade global da fundação registre-se que uma rocha intensamente fraturada pode ser suficientemente indentada para evitar o movimento do conjunto da fundação num tipo de rotura em bloco como o mostrado na Figura 2.12(b). Por outro lado, o destaque de blocos de pequena dimensão pode gerar-se como resultado da ação do gelo ou da ação erosiva de um rio e, em consequência poderá dar-se o descalce da fundação (Figura 2.12(a)).

2.2.2. Espaçamento entre Descontinuidades

O espaçamento de descontinuidades (espaçamento médio ou modal de cada família de descontinuidades) condiciona o tamanho dos blocos individuais que compõem um maciço rochoso. Como a resistência ao corte de um maciço rochoso e os mecanismos de rotura e deformação atuantes dependem do tamanho dos blocos, os modos de rotura de taludes em rocha estão diretamente relacionados à presença de descontinuidades.

Segundo Vallejo (2002), o espaçamento entre os planos de descontinuidades condiciona o tamanho dos blocos da matriz rochosa e, por tanto, define o papel que terá sobre o comportamento mecânico do maciço rochoso, e a sua importância em relação à influência das descontinuidades. Em maciços rochosos com grandes espaçamentos, de vários metros, nos processos de deformação e rotura prevalecerão as propriedades da matriz rochosa ou dos planos de descontinuidade de acordo com a escala de trabalho considerada e com a situação da obra de engenharia relativamente às descontinuidades; se os espaçamentos forem menores, de vários decímetros a 1 ou 2 metros, o comportamento do maciço é determinado pelos planos de fraqueza; por último, se o espaçamento for muito pequeno o maciço estará muito fraturado apresentando um comportamento isotrópico, controlado pelas propriedades do conjunto de blocos mais ou menos uniformes.

Se os espaçamentos são extremamente pequenos, a orientação das descontinuidades é, segundo a ISRM (1983), de pequena importância. A rotura pode ocorrer tanto por rotação, como por queda de pequenos pedaços de rocha. Se o maciço rochoso apresenta várias famílias de descontinuidades que podem contribuir para que ocorram deslizamentos, e a sua resistência ao corte é baixa, **a importância do espaçamento aumenta** (ISRM, 1983). As características de percolação também são diretamente afetadas pela frequência das descontinuidades no maciço.

Quando se procede ao estudo do espaçamento de descontinuidades, é conveniente realizar uma análise da distribuição dos valores medidos por cada família, já que algumas características dos maciços assumem resultados com alguma dispersão. Para tal, estes valores representam-se em histogramas, permitindo determinar de maneira rápida, várias estatísticas de interesse, designadamente; a moda (s), o mínimo (S_{\min}) e o máximo (S_{\max}) de campo obtido das observações do espaçamento, para cada conjunto de descontinuidades. São também

possíveis visualizações de curvas de frequência para cada família, do respetivo valor modal e dispersões [8], [9].

A determinação, no campo, dos valores de espaçamento pode ser feita utilizando-se a técnica designada “*scanline*”, ou através de medidas efetuadas com o auxílio de uma fita métrica e que consideram apenas as descontinuidades adjacentes que compõem famílias, num intervalo nunca menor do que 3 m, em cada afloramento estudado (ISRM, 1983).

Geralmente, as superfícies expostas dos afloramentos rochosos, não permitem a realização das medidas do espaçamento na direção perpendicular às superfícies. O que se mede são espaçamentos aparentes, sendo necessário aplicar as correções necessárias de forma a obter o espaçamento real. A Figura 2.13 representa a face de um afloramento em que apenas se podem medir os espaçamentos aparentes de três famílias de descontinuidades. Colocando a fita perpendicular ao traço dos planos de cada família, mede-se a distância (d), que deverá ser corrigida para calcular o espaçamento real [3]:

$$S = d \cdot \text{sen } \alpha \quad (13)$$

Onde:

S - espaçamento real;

d - distância média medida com a fita métrica;

α - ângulo entre a linha de medição e a direção da família.

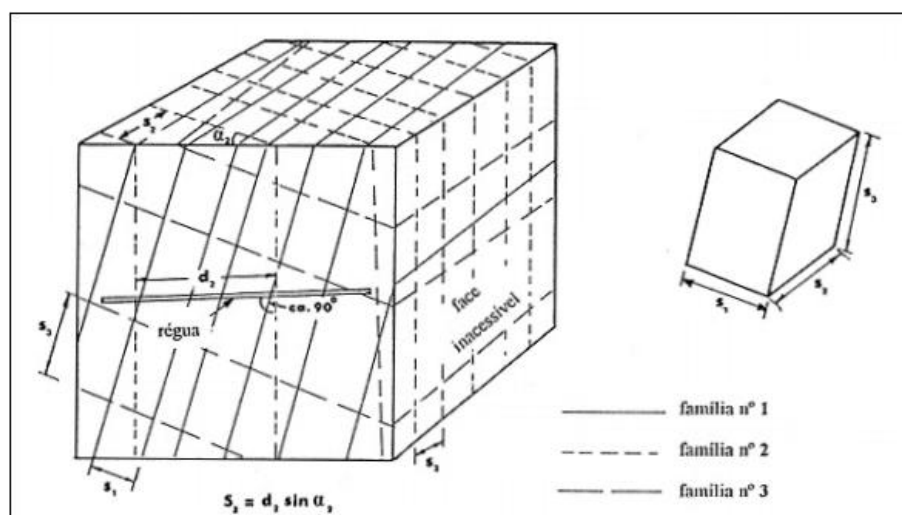


Figura 2.13 - Medição do espaçamento de uma face exposta de um afloramento (ISRM, 1981).

O intervalo de espaçamento descreve-se segundo os termos apresentados na Tabela 2.5 conforme sugere a ISRM (1981):

Tabela 2.5 - Descrição do espaçamento de diaclases segundo (ISRM, 1981).

	Designação	Espaçamento (mm)
F5	Extremamente fechado	< 20
	Muito fechado	20 a 60
F4	Fechado	60 a 200
F3	Moderadamente largo	200 a 600
F2	Largo	600 a 2000
F1	Muito largo	2000 a 6000
	Extremamente largo	> 6000

A Figura 2.14 apresenta exemplos de discontinuidades com diferentes espaçamentos.



Figura 2.14 - Exemplos de espaçamentos de diaclases em afloramentos. a) Maciço rochoso de boa qualidade com diaclases diagonais com espaçamentos na ordem de 0,5 - 1,5 m (maciço Castelo de Marialva); b) Maciço rochoso com família de diaclases na diagonal com continuidade alta e espaçamento moderado (Mértola).

2.2.2.1. Técnica “Scanline”

Um método semelhante ao anterior como forma a determinar o espaçamento das discontinuidades é a técnica “scanline”^[15] (Figura 2.15). É compreendida pela introdução de uma linha na superfície do maciço rochoso. O levantamento de dados consiste na anotação dos valores de espaçamento para todas as discontinuidades, que intercetam a *scanline* ao longo do seu comprimento.

Nos trabalhos práticos, uma linha presa na superfície da rocha através de pequenos pedaços de arame, fixos por pregos martelados na própria rocha é considerada uma “scanline” para levantamento de dados. Os pregos devem estar espaçados em intervalos de aproximadamente

3 m ao longo da linha, que deve ser mantida tão esticada e tão reta quanto possível. É ideal que cada localização da *scanline* seja fotografada com seu número ou posição adequadamente identificado.

Uma vez que a *scanline* esteja instalada, é feita a recolha de dados, anotando as características em baixo descritas, para cada descontinuidade que a intercepe (Figura 2.15):

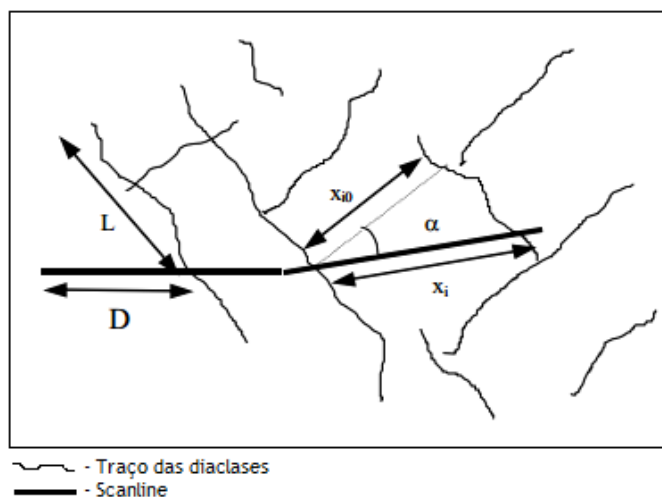


Figura 2.15 - Conjunto de dados do espaçamento utilizando a técnica de “scanline” (adaptado de *Brady & Brown, 1985*).

Onde:

- D - distância ao longo da *scanline*, desde o seu início até ao ponto em que a descontinuidade interceta a linha;
- L - comprimento da descontinuidade, medido acima da *scanline*;
- X_{i0} - espaçamento real;
- X_i - espaçamento entre duas descontinuidades;
- α - ângulo entre a normal à descontinuidade e a *scanline*.

Como mostrado na Figura 2.15, o espaçamento aparente entre duas descontinuidades é X_i e o ângulo entre a normal à descontinuidade e a *scanline* é α , o espaçamento real X_{i0} pode ser calculado da seguinte forma ^[19]:

$$X_{i0} = X_i \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

Obtém-se o espaçamento real medido, apenas quando $\alpha = 0^\circ$. Em casos extremos, quando a descontinuidade e a *scanline* são paralelas ($\alpha = 90^\circ$), nenhuma interseção será observada. No entanto, para que se execute essa medição, é necessário que se “levante” *scanline* na

respetiva face e que seja efetuada em duas direções ortogonais, nomeadamente na horizontal e na vertical ^[15].

2.2.3. Persistência das descontinuidades

A persistência ou continuidade define-se como a extensão em área de uma descontinuidade. É um dos parâmetros que maior influência tem no comportamento dos maciços rochosos, mas também é um dos mais difíceis de determinar, dada a exiguidade de acessos à medição de tais áreas ^[7].

A persistência de um plano de descontinuidade é a sua área de superfície medida pelo comprimento segundo a direção do plano e segundo o seu mergulho. É um parâmetro de grande importância, mas difícil de quantificar a partir da observação de afloramentos, em que normalmente se veem os traços dos planos de descontinuidade, de acordo com um mergulho aparente ^[3].

A dificuldade desta avaliação leva a que muitas vezes se recorra à representação gráfica, através de blocos-diagrama obtidos por visualizações de campo (Figura 2.16), com os quais se pretende representar a importância relativa das várias famílias de descontinuidades em termos da persistência. De facto, através destas representações, é possível perceber que as descontinuidades de uma dada família são mais extensas do que as de outras, tendendo as de menor área a terminar contra as principais, ou até no seio da própria rocha ^[8].

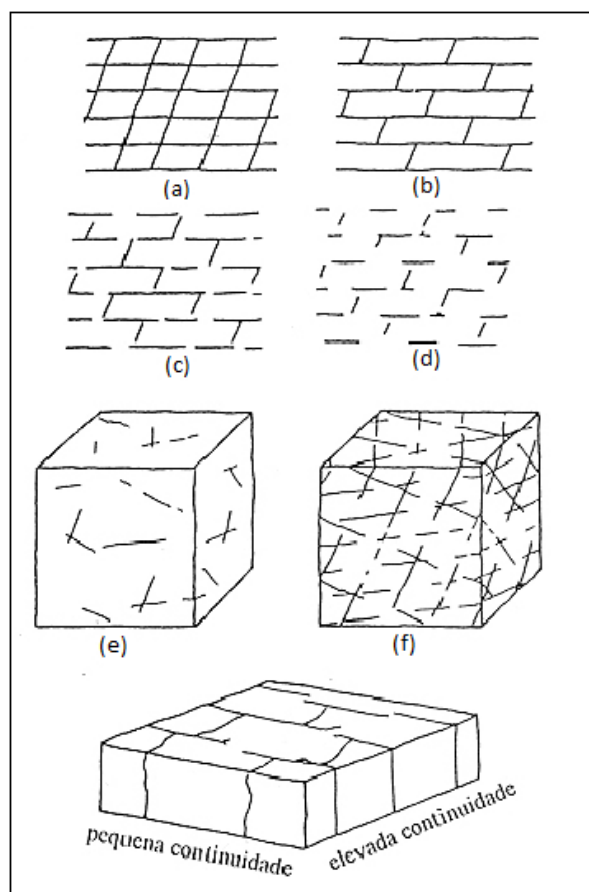


Figura 2.16 - Representação de diagramas, sob diferentes modelos de persistência ou continuidade de várias famílias de descontinuidades (ISRM, 1981).

Uma quantificação da persistência poderá fazer-se através da medida do comprimento do traço da superfície das descontinuidades, em superfícies expostas do maciço e, a partir destas medições, estimar as áreas médias das diversas famílias de descontinuidades. De acordo com o valor modal do comprimento do traço das descontinuidades pertencentes a uma mesma família, é usual utilizar a terminologia seguinte (Tabela 2.6) para descrever a continuidade ou persistência das descontinuidades ^[8]:

Tabela 2.6 - Descrição da persistência ou continuidade (ISRM, 1981).

Continuidade	Comprimento (m)
Muito pequena	< 1
Pequena	1 a 3
Média	3 a 10
Elevada	10 a 20
Muito elevada	> 20

2.2.4. Caracterização da Rugosidade

A rugosidade é um fator que tem especial incidência na resistência ao deslizamento numa descontinuidade, principalmente se esta se apresentar fechada e sem prévios movimentos. A sua importância como fator favorável à resistência diminui com os aumentos da abertura, da espessura, do enchimento ou do valor do deslocamento devido a anteriores movimentos de escorregamento [8].

De uma maneira geral a rugosidade pode ser caracterizada (Figura 2.17):

- pela *curvatura* - ondulações em grande escala que se as paredes juntas e em contacto, provocam dilatação positiva durante o movimento de deslizamento uma vez que são demasiado grandes para que sejam “cortadas”. Estas ondulações não são manifestáveis à escala das amostras ensaiadas em laboratório ou “*in situ*” e determinam, na prática, a direção do deslizamento em relação ao plano médio da descontinuidade definido pelo ângulo de incidência i .
- pelas *asperidades* - irregularidades de superfície, detetáveis a pequena escala, que tendem a ser danificadas durante os deslocamentos por corte, salvo se as paredes apresentarem elevada resistência e/ou as tensões de compressão serem baixas, casos em que a dilatação pode também ocorrer, embora à escala das irregularidades; estas últimas determinam, então, o aumento da resistência ao deslizamento da descontinuidade em função dos ângulos de incidência e da relação entre a resistência da matriz rochosa e as tensões normais aplicadas sobre a descontinuidade.

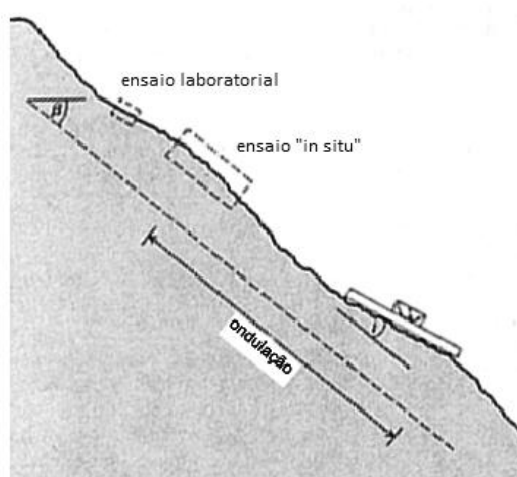


Figura 2.17 - Ondulação e tipos de rugosidade de uma superfície de descontinuidade (ISRM, 1981).

Regista-se que, para uma mesma descontinuidade, a rugosidade pode apresentar-se com valores perfeitamente distintos consoante a direção, pelo que, quando se pretende estudar um problema que envolva a análise ao escorregamento, importa antever qual a direção provável do movimento [7].

Se a direção dum potencial escorregamento é conhecida, a rugosidade poderá ser amostrada através de perfis lineares paralelos a essa direção (Figura 2.18). Em muitos casos, a direção relevante será a da reta de maior declive (escorregamentos planares), mas noutros, quando o escorregamento é controlado pela intersecção de duas descontinuidades planas, a direção do potencial escorregamento será paralela à linha de intersecção daqueles planos. Se a direção do potencial escorregamento é desconhecida, a rugosidade deverá ser amostrada nas três dimensões do espaço [8].

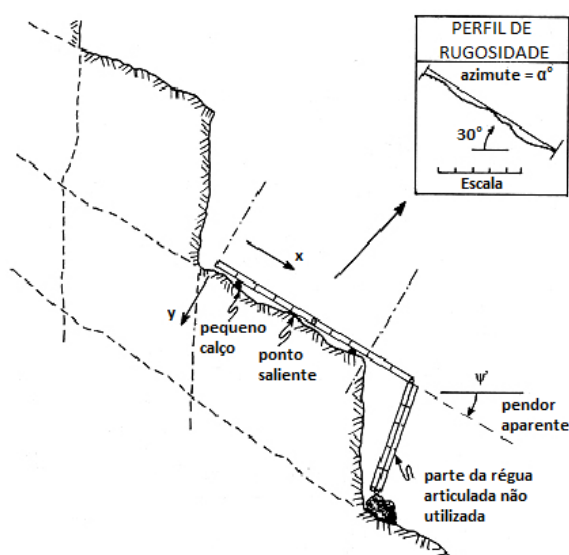


Figura 2.18 - Método para determinação da rugosidade de descontinuidades ao longo de uma direção de potencial deslizamento (ISRM, 1981).

Sempre que em estádios preliminares dos estudos de caracterização geotécnica, haja limitações que impeçam as determinações antes referidas, a descrição da rugosidade poderá limitar-se à utilização de termos descritivos baseados em duas escalas de observação: *pequena* (alguns centímetros) e *intermédia* (vários metros). A escala intermédia da rugosidade é dividida em três graus (em patamar, ondulada e planar) e sobreposta à rugosidade de pequena escala, esta também dividida em três graus (rugosa, lisa e espelhada), resultando por combinação nove classes (Tabela 2.7 e Figura 2.19). Também é possível acrescentar a cada uma destas classes a informação relativa à curvatura (rugosidade a uma grande escala de observação), indicando o comprimento de onda e amplitude das ondulações.

Tabela 2.7 - Escalas de caracterização de rugosidade (baseado de ISRM, 1981).

Classe	Descrição	
I	Rugosa ou irregular, em patamares	(rough or irregular, stepped)
II	Lisa, em patamares	(smooth, stepped)
III	Espelhada (*), em patamares	(slickensided (*), stepped)
IV	Rugosa ou irregular, ondulada	(rough or irregular, undulating)
V	Lisa, ondulada (smooth, undulating)	(smooth, undulating)
VI	Espelhada (*), ondulada	(slickensided (*), undulating)
VII	Rugosa ou irregular, planar	(rough or irregular, planar)
VIII	Lisa, planar	(smooth, planar)
IX	Espelhada (*), planar	(slickensided (*), planar)

O termo “espelhado” (*slickensided*) só deverá ser usado quando existirem sinais evidentes de deslizamento prévio ao longo da descontinuidade.

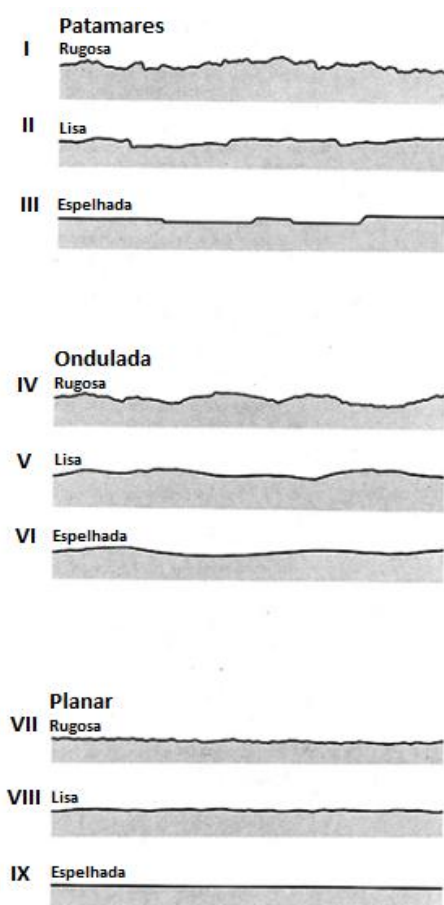


Figura 2.19 - Perfis típicos de rugosidade. O comprimento dos perfis está no intervalo entre 1 e 10 metros (ISRM, 1981).

A partir dos perfis de rugosidade, obtidos por técnicas análogas, Barton e Choubey propuseram, em 1977, uma correlação com o parâmetro JRC anteriormente referido, que permite estimar a resistência de pico duma descontinuidade em relação ao deslizamento (Figura 2.8).

2.2.5. Resistência das Paredes

De acordo com Vallejo (2002), a resistência da parede de uma descontinuidade influencia a sua resistência ao corte e a sua deformabilidade, dependendo do tipo de matriz rochosa, do grau de alteração e da existência ou não de preenchimento. No caso de descontinuidades são e limpas, a resistência seria a mesma da matriz rochosa, mas na maior parte dos casos é menor devido à meteorização das paredes, ou seja, os processos de alteração afetam em maior grau os planos de descontinuidade em relação à matriz rochosa. Por este motivo, para a resistência das paredes de descontinuidade deve ser estimado o grau de meteorização da matriz rochosa, segundo a Tabela 2.8.

O estado de alteração da rocha junto às paredes das descontinuidades tem, não só forte influência na resistência ao corte dos maciços rochosos, principalmente se as descontinuidades estiverem fechadas, isto é, se houver contacto entre os dois bordos, como também condiciona a sua deformabilidade ^[8].

A ocorrência de pequenos deslizamentos segundo as descontinuidades, causados por tensões de corte desenvolvidas no interior dos maciços, pode originar áreas de contacto muito pequenas das asperidades, levando a que localmente seja excedida a resistência à compressão da rocha junto à parede, e, em consequência, a esmagamentos pontuais com redução da rugosidade ^[8].

Os maciços rochosos apresentam-se, frequentemente, alterados perto da superfície por ação dos agentes de desgaste e, algumas vezes estão também alterados por processos hidrotermais. Processo de alteração que geralmente afeta mais a rocha junto às paredes das descontinuidades do que no interior dos blocos que constituem os maciços rochosos. Em resultado disso, a resistência da parede é apenas uma fração daquela que se regista no interior dos blocos de rocha ^[8].

Tabela 2.8 - Descrição do grau de meteorização (Vallejo, 2002).

Terminação	Descrição
Fresca (Sã)	Não se observam sinais de meteorização na matriz rochosa.
Descolorada	Observam-se mudanças de cor original na matriz rochosa. É conveniente o grau de mudança. Deve ser mencionado se a observação da mudança de cor se restringe a um ou alguns minerais.
Desintegrada	A rocha alterou-se para estado de solo, mantendo-se a estrutura original. A rocha é friável, mas os grãos minerais não estão decompostos.
Decomposta	A rocha alterou-se para estado de solo, alguns ou todos os minerais estão decompostos.

Enquanto a resistência da rocha pode ser avaliada em ensaios de compressão uniaxial ou triaxial, a camada relativamente fina da rocha mais alterada junto à parede, que mais afeta a resistência ao corte e deformabilidade, só pode ser estimada por via indireta recorrendo a testes ou ensaios simples cujos resultados possam ser correlacionados com a resistência à compressão simples.

Então neste caso, a resistência da parede pode estimar-se (no campo) com o Martelo (*esclerómetro de Schmidt*), aplicado diretamente sobre a descontinuidade, seguindo o procedimento descrito no ponto 3.3 do capítulo da Metodologia, ou a partir dos índices de campo (Tabela 2.9), onde geralmente, a resistência da parede rochosa está compreendida entre as classes R0 a R6.

Em ambos os casos as medidas devem realizar-se sobre paredes representativas do estado de alteração das descontinuidades, considerando também as descontinuidades mais frequentes ou mais significativas no maciço rochoso ^[3].

Tabela 2.9 - Estimação aproximada e classificação da resistência à compressão uniaxial de solos e rochas (ISRM, 1981).

Grau	Descrição	Identificação de campo	Aproximação da variação da resistência à compressão uniaxial (MPa)
S1	Solo muito mole	O punho penetra facilmente vários cm.	< 0,025
S2	Solo mole	O dedo penetra facilmente vários cm.	0,025 - 0,05
S3	Solo firme	Necessário uma pequena pressão para afundar o dedo.	0,05 - 0,10
S4	Solo rígido	Necessário uma forte pressão para afundar o dedo.	0,10 - 0,25
S5	Solo muito rijo	Com certa pressão pode marcar-se com a unha.	0,25 - 0,50
S6	Solo duro	Marca-se com dificuldade ao pressionar com a unha.	> 0,50
R0	Rocha extremamente fraca	Pode-se marcar com a unha.	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito fraca	A rocha esmigalha-se sob o impacto da ponta do martelo de geólogo. Corta-se facilmente com navalha.	1,0 - 5,0
R2	Rocha fraca	Corta-se com dificuldade com navalha. Ao golpear com a ponta do martelo produz pequenas marcas.	5,0 - 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser cortada com navalha. Amostras podem fraturar-se com golpe forte do martelo.	25 - 50
R4	Rocha resistente	Amostras requerem mais que um golpe de martelo para fraturar.	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	Amostras requerem muitos golpes de martelo para fraturar.	100 - 250
R6	Rocha extremamente resistente	Amostras podem apenas ser lascadas com martelo.	> 250

2.2.6. Abertura e Preenchimento

A abertura define-se como sendo o espaço vazio ou preenchido, que separa as paredes adjacentes das descontinuidades (Figura 2.20). Pode considerar-se o preenchimento como qualquer material que ocorre entre os planos das descontinuidades e que possui propriedades distintas do material da rocha (calcite, quartzo, argila, silte, milonito de falha, brecha, etc..). É importante porque pode modificar ou controlar completamente a resistência ao corte e a condutividade hidráulica das descontinuidades. As paredes opostas não se tocam e o preenchimento ocupa todo o espaço vazio entre as mesmas, a resistência, a deformabilidade e a permeabilidade do material que preenche a descontinuidade condicionam o comportamento do maciço rochoso ^[25].

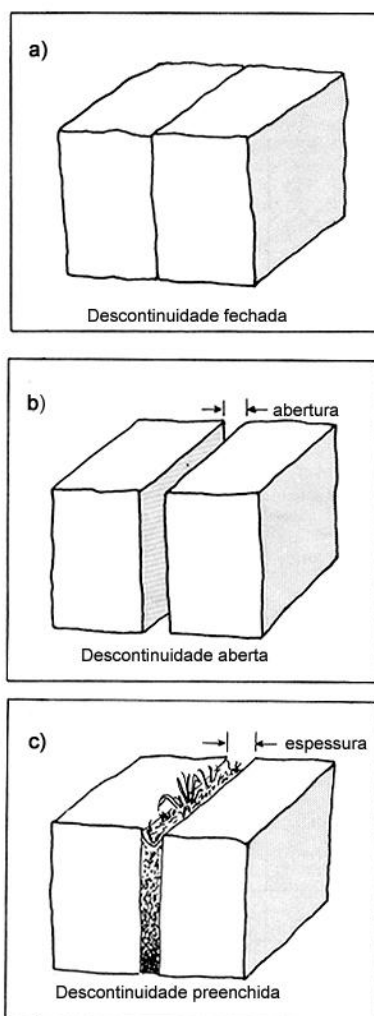


Figura 2.20 - Representação esquemática de definições sugeridas da abertura de descontinuidades abertas e largura de descontinuidades preenchidas, (ISRM, 1981).

As grandes aberturas podem resultar de anteriores deslizamentos de descontinuidades com rugosidade apreciável, de movimentos gerados por tensões de tração, do arrastamento de materiais de enchimento (argila, por exemplo) ou de fenômenos de solução. As descontinuidades verticais ou muito inclinadas, que abriram em resultado de trações associadas à erosão dos vales ou retraimento glaciário podem atingir grandes aberturas. Naturalmente que a abertura das descontinuidades varia bastante ao longo da sua extensão, o que dificulta, ou mesmo impossibilita, a sua medida [8].

Em função do valor da abertura podem classificar-se as descontinuidades de acordo com as designações da Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Descrição da abertura, (ISRM, 1981).

Descrição	Abertura (mm)
Muito fechadas	< 0,1
Fechadas	0,1 - 0,25
Parcialmente fechadas	0,25 - 0,5
Abertas	0,5 - 2,5
Largas	2,5 - 10
Muito largas	10 - 100
Extremamente largas	100 - 1000
Cavernosas	> 1000

Como já referido, a abertura e o tipo de enchimento das discontinuidades faz-se sentir, de modo notável, em todos os parâmetros geotécnicos de um maciço: resistência, deformabilidade e permeabilidade. Segundo ISRM, a abertura e a sua variação têm influência na resistência ao deslizamento, já que a uma maior abertura corresponde uma diminuição de contactos entre as paredes da discontinuidade, podendo daí resultar concentrações de tensões conduzindo a esmagamentos pontuais das asperidades das paredes da discontinuidade.

Por sua vez, é evidente a diferença de comportamento em termos de resistência ao corte entre discontinuidades preenchida por um material pétreo, por vezes mais resistente e menos deformável do que o restante material que constitui o maciço, e o de uma discontinuidade preenchida, por um material argiloso brando, de elevada deformabilidade e baixa resistência ao corte. Devido à enorme variedade de ocorrências possíveis, ditando comportamentos extremamente diferenciados, importa para cada situação proceder a um estudo cuidadoso das características do enchimento das discontinuidades, sendo de particular importância analisar os aspetos relacionados com a geometria (espessuras médias e sua variação), o tipo de material de enchimento (mineralogia, dimensão das partículas, grau de alteração, potencial expansivo) e as respetivas resistências ao corte (tal como as características de deformabilidade e permeabilidade) ^[8].

Relativamente ao tipo de enchimento, faz-se sentir de modo notável em todos os parâmetros geotécnicos de uma dada formação geológica. É evidente a diferença de comportamento, em termos de resistência ao corte e deformabilidade, entre uma discontinuidade preenchida por um material argiloso brando e por um material pétreo, por vezes mais resistente e menos deformável do que o próprio material que constitui o maciço. Como é, também, evidente a diferença de comportamento em termos hidráulicos de uma discontinuidade preenchida por um material poroso e permeável de uma outra preenchida por um impermeável. Nas falhas, o

material de enchimento das respectivas caixas corresponde muitas vezes ao material rochoso adjacente esmagado pelo processo de tectonização que afetou o maciço, podendo encontrar-se em fases mais ou menos avançadas de esmagamento e alteração, desde as brechas de falha (milonitos) às argilas de falha [7].

A Figura 2.21 apresenta exemplos de aberturas em diaclases com e sem preenchimento.

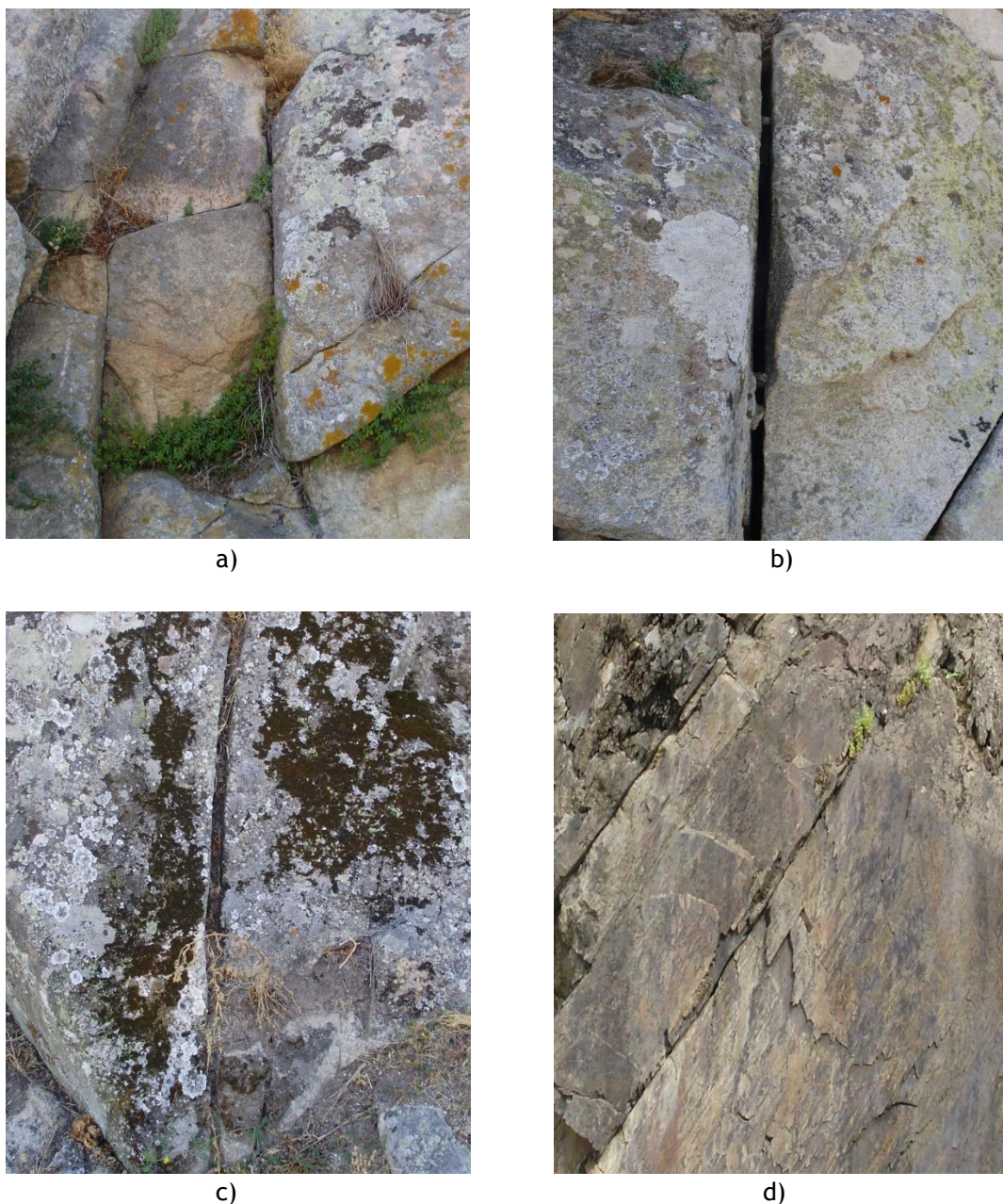


Figura 2.21 - Exemplos de aberturas em discontinuidades. a) Duas famílias de diaclases em rocha granítica, com abertura “larga” preenchidas com vegetação; b) Diaclase “lisa-ondulada”, de abertura “muito larga” sem preenchimento; c) Diaclase “lisa”, de abertura “muito larga” com preenchimento argiloso e matéria orgânica; d) Diaclase em rocha xistosa, com abertura “larga” sem preenchimento.

2.2.7. Água nas discontinuidades e percolação

O fluxo de água subterrânea altera, geralmente, a condição de estabilidade dos taludes dando origem a diversos efeitos nefastos, sendo de salientar ^[31]:

- A pressão da água reduz a estabilidade dos taludes, por diminuição da resistência ao deslizamento, ao longo das potenciais superfícies de rotura;
- As variações do teor em água de certas rochas, particularmente nos xistos argilosos, podem causar uma acelerada alteração da rocha com um correspondente decréscimo da resistência ao deslizamento das discontinuidades;
- A água que preenche as discontinuidades ao gelar aumenta de volume, podendo provocar a fracturação da rocha, originando o aparecimento de blocos de menores dimensões. Por sua vez, a formação de gelo junto da superfície, pode obturar os caminhos de drenagem resultando daí um incremento das pressões da água no interior do talude, o que contribui para o decréscimo das condições de estabilidade;
- A erosão dos solos da superfície e do preenchimento das discontinuidades, que ocorre como resultado da circulação da água, pode levar ao aumento da abertura e, conseqüentemente, à diminuição das condições de estabilidade.

De entre os aspetos citados, o efeito mais importante da presença da água, nos maciços rochosos reside normalmente na redução das condições de estabilidade resultante da pressão exercida pela água nas paredes das discontinuidades.

De acordo com Hoek & Bray (1981), há dois modos de se obterem os dados relativos às distribuições de pressão da água dentro de um maciço rochoso:

- A dedução do padrão de fluxo de água subterrânea a partir da avaliação da permeabilidade do maciço rochoso e da avaliação das fontes de água;
- Medida direta dos níveis de água em furos de sonda ou poços, ou a medida da pressão de água através de piezómetros instalados nos furos de sonda.

As pressões da água subterrânea são geralmente o principal fator em problemas de estabilidade de taludes ^[26]. A compreensão do papel da água subterrânea é, portanto uma exigência essencial para qualquer geometria de talude. De acordo com Brown (1982), o monitoramento das pressões da água subterrânea, por meio de piezómetros, é uma forma segura de estabelecer a contribuição da água subterrânea e para conferir efetivamente as medidas de drenagem.

Terzaghi (1950) afirma que a água que percola no interior de um talude exerce, em virtude da sua viscosidade, uma pressão sobre as partículas de solo, conhecida como pressão de

percolação. Esta pressão atua na direção do fluxo e a sua intensidade cresce, proporcionalmente, influenciando a velocidade de percolação. A presença de água pode reduzir a resistência das rochas intactas, bem como das discontinuidades causadas por processos de alteração, saturação e erosão do material de preenchimento.

Resumindo, a pressão da água pode agir no sentido de destabilizar as vertentes ao reduzir as forças resistentes aos escorregamentos e ao aumentar as tensões desencadeadoras do movimento.

Segundo Fiori & Carmignani (1995), existem dois extremos no comportamento da água subterrânea nos maciços, um ocorre em solos porosos, conglomerados ou em rochas intensamente fraturadas, e o outro extremo, em maciços rochosos muito pouco fraturados. No maciço rochoso, com famílias de discontinuidades numerosas e muito pouco espaçadas, a água comporta-se como em solos porosos. O grau de conectividade entre os vazios é elevado e as variações do nível freático são graduais, ocorrendo somente em grandes áreas. Por outro lado, em maciços rochosos pouco fraturados, com poucas famílias de discontinuidades e, especialmente, onde o espaçamento das discontinuidades é grande, a pressão da água varia, consideravelmente, de uma discontinuidade a outra ou de local para local. Os níveis freáticos erráticos podem surgir onde diques, falhas ou camadas com ângulo de mergulho elevado, atuam como aquícludes (barreiras geológicas). A percolação de água por meio dos maciços rochosos resulta do fluxo através das discontinuidades.

Detalhes geológicos aparentemente pouco significativos podem ter efeitos apreciáveis sobre a distribuição de pressões da água nas discontinuidades e, conseqüentemente, sobre a estabilidade do talude ^[30]. A determinação do nível do lençol freático, do caminho preferencial de percolação e da pressão da água, pelo menos de forma aproximada pode prever problemas de estabilidade ou dificuldades na construção.

Assinala-se que, no caso das obras de retenção de água, é frequente proceder-se a intervenções no sentido de melhorar as características de permeabilidade do terreno de fundação, consistindo aquelas quer na injeção de caldas de cimento através de furos abertos no terreno com o objetivo do preenchimento de vazios (como sejam as discontinuidades abertas), quer na abertura de furos de drenagem para alívio da pressão da água no interior do maciço. Já no que respeita à melhoria das condições de estabilidade em escavações, como sejam os casos de taludes e túneis, é frequente proceder-se à realização de furos de drenagem igualmente para alívio das pressões da água no maciço ^[3].

Pode dizer-se que as hipóteses clássicas para a análise do fluxo de água subterrânea em taludes de rocha são ^[19]:

- O fluxo ocorre somente através de fissuras ou descontinuidades, e a permeabilidade da rocha é considerada insignificante, como primeira aproximação.
- O movimento do fluxo é laminar. Condições de fluxo turbulento apenas ocorrem quando existem valores muito grandes, em relação à abertura das descontinuidades e gradientes hidráulicos mais altos do que os normais.

O fluxo de água através de microfaturas da rocha e o fluxo turbulento em fissuras com superfícies rugosas são dois fenômenos que podem também ocorrer, quando existem problemas de estabilidade de taludes em rocha.

2.2.7.1. Modelos de fluxo em maciços rochosos

Segundo Louis (1976), têm-se cinco grupos de maciços rochosos, classificados segundo sua textura, estrutura e imperfeições (Figura 2.22).

- Meio poroso, predominantemente homogêneo, contendo somente pequenos poros;
- Meio fraturado poroso, onde as fissuras determinam o comportamento hidráulico do maciço rochoso;
- Meio poroso contendo barreiras impermeáveis, onde as descontinuidades são preenchidas por material composto de partículas impermeáveis;
- Meio poroso com pequenos vias em que descontinuidades preenchidas por material impermeável contêm canais através dos quais a água pode fluir;
- Meio cárstico contendo passagens largas e cavernas de várias formas geométricas, criadas pela dissolução e remoção da rocha pelo fluxo de água subterrânea.

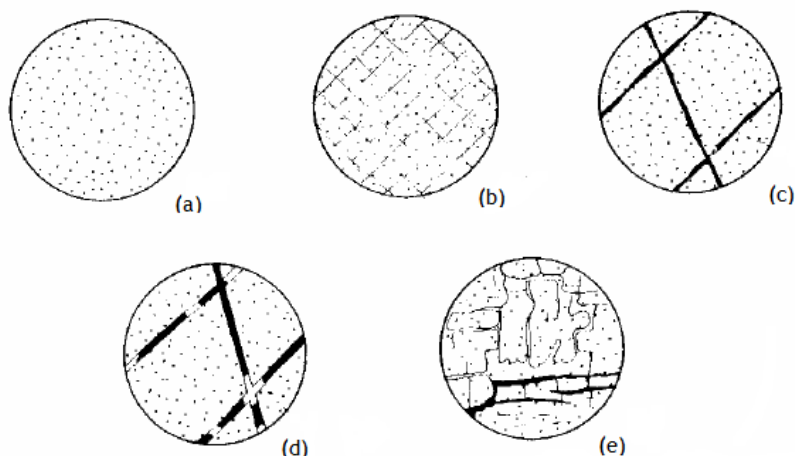


Figura 2.22 - Grupos de maciços rochosos ^[32]. (a) Meio poroso intergranular; (b) Meio poroso fraturado; (c) Meio poroso com barreiras impermeáveis; (d) Meio poroso contendo canais; (e) Meio cárstico.

É importante destacar, que a definição de um maciço rochoso como sendo um meio contínuo ou descontínuo depende ainda da escala relativa em que se avalia o talude, e de características das famílias de descontinuidades presentes, tais como o espaçamento e persistência (Figura 2.23).

Considera-se um meio fraturado como sendo um meio contínuo, quando os tamanhos dos blocos unitários são desprezíveis com relação à escala do fenómeno examinado (Figura 2.23b). Neste caso, os métodos de análise para meios porosos podem ser adotados. Nos casos em que o tamanho unitário dos blocos é da mesma ordem de grandeza, com referência à escala relativa do talude e das descontinuidades abertas, os métodos de análise do fluxo de água através das descontinuidades devem ser usados. As propriedades hidráulicas de um maciço rochoso fraturado dependem da condutividade hidráulica das famílias de descontinuidades presentes ^[31].

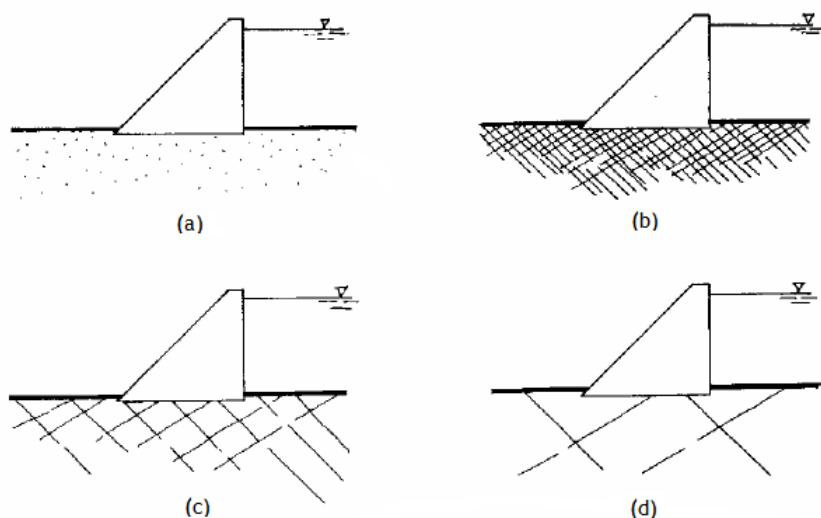


Figura 2.23 - Meios contínuos (a) e (b) e descontínuos (c) e (d) na avaliação dos problemas relacionados com o fluxo de água subterrânea ^[31].

2.3. Instabilidade em Taludes

2.3.1. Causas de Instabilização

Os principais fatores que favorecem a instabilização de uma encosta são os condicionantes geológicos, os tipos e as características do solo, águas superficiais e subterrâneas e o tipo de vegetação.

2.3.2. Tipos de Instabilidade em Taludes

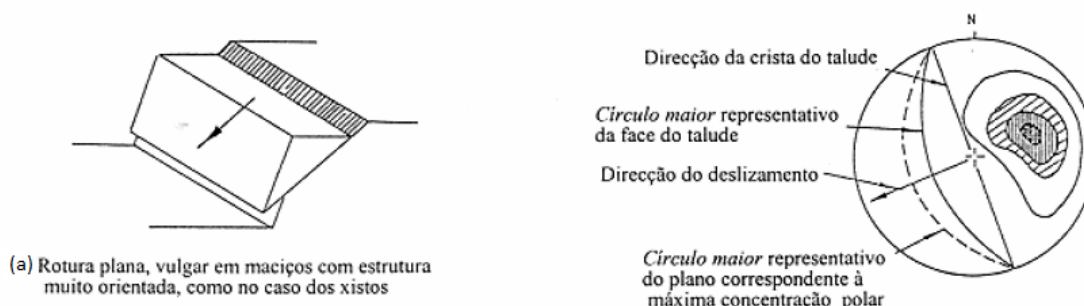
Os diferentes tipos de instabilidade possíveis em taludes rochosos estão intimamente ligados ao tipo de estruturas geológicas pelo que é importante, logo numa fase preliminar dos estudos, identificar quais as potenciais situações de instabilidade que tais estruturas podem ocasionar.

Estas situações podem, muitas vezes, ser facilmente identificadas através duma simples análise dos diagramas com a representação dos polos das descontinuidades e das respetivas curvas de isodensidades (Figura 2.24) ^[8].

Diferenciam-se quatro potenciais tipos de rotura cujas características são função das orientações relativas da face do talude e das descontinuidades ^[27]. Para cada um dos potenciais tipos de rotura, existe um método específico de análise da estabilidade, o qual tem em consideração a forma e dimensões dos blocos, a resistência ao deslizamento das superfícies de escorregamento, as pressões da água e outras forças aplicadas ^[9].

Os primeiros três tipos de instabilidade de blocos - planar, cunha e “*toppling*”- têm formas distintas, determinadas pela estrutura geológica. No caso de os blocos planares e cunhas (Figura 2.24a e 2.24b) a estrutura tem mergulho concordante com a face do talude e emerge nesta, pelo que na representação hemisférica, os polos das descontinuidades localizam-se na parte oposta do círculo maior representativo do plano da face do talude. No caso do “*toppling*” de blocos (Figura 2.24c) a estrutura mergulha no sentido contrário para o interior da face do talude, pelo que na representação hemisférica os polos e o círculo maior do plano da face situam-se do mesmo lado da área de projeção ^[9].

O quarto tipo de instabilidade, rotura circular, ocorre em solos, enrocamentos ou rochas com fraturas muito próximas e com descontinuidades não persistentes, mergulhando para fora da face do talude (Figura 2.24d). Para cortes de escavação, em maciços com rocha fraturada, a superfície de escorregamento forma-se seguindo em parte do traçado as descontinuidades com orientação aproximadamente paralela a esta superfície e na parte restante do traçado intersetando a rocha intacta ^[9].



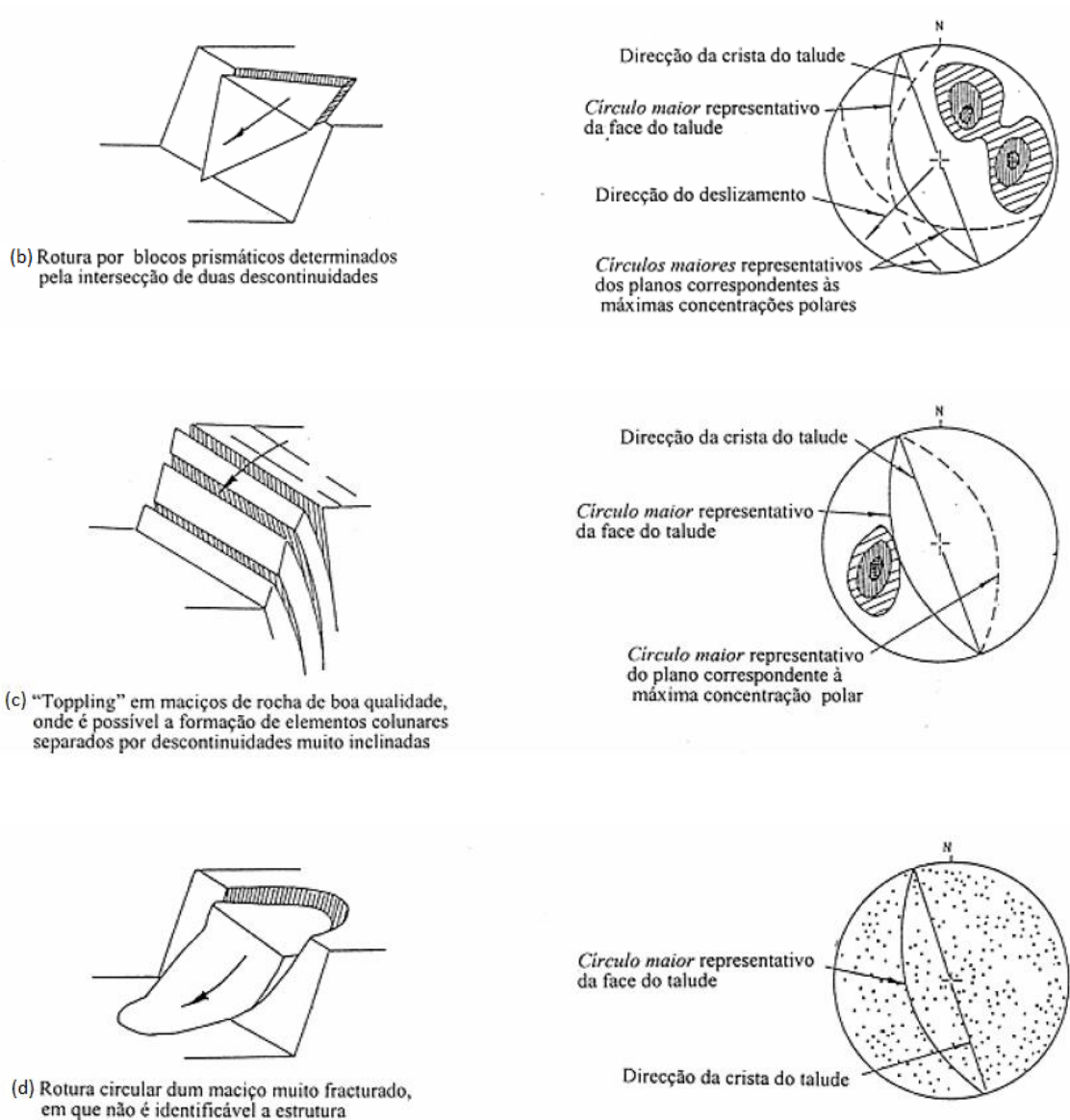


Figura 2.24 - Principais tipos de rotura de taludes e condições estruturais que lhes dão origem [27].

Devido à relativamente elevada resistência ao corte da rocha, quando comparada com a resistência ao deslizamento das descontinuidades, este tipo de rotura (circular) somente ocorre em maciços rochosos com fraturas muito próximas, onde a maior parte da superfície de deslizamento coincide com as descontinuidades. Em consequência, quando a rotura ocorre sob estas condições, a superfície de escorregamento aproxima-se de um arco circular de grande raio, determinando uma superfície de rotura pouco profunda. Análises de estabilidade deste tipo de rotura em maciços rochosos podem ser conduzidas de modo idêntico aos de estabilidade de solos, utilizando parâmetros apropriados de resistência [9].

Por uma questão de clareza, nos diagramas apresentados na Figura 2.24 aparecem apenas representados casos mais frequentes. Nas situações correntes podem verificar-se outras

combinações de estruturas geológicas que conduzem a diferentes figuras de rotura. Por exemplo, num maciço em que as descontinuidades conduzam à formação de blocos prismáticos suscetíveis de escorregar sobre duas descontinuidades, a ocorrência de uma terceira família de descontinuidades que normalmente origina a instabilidade por “*toppling*”, pode potenciar o aparecimento de *fendas de tração* dando origem a blocos instáveis com a forma de troncos de pirâmide. Estas *fendas de tração* são um fator importante a ter em conta nas análises de estabilidade dos maciços, já que frequentes vezes constituem o local privilegiado para a infiltração de escorrências superficiais da água das chuvas, que podem gerar forças que favorecem o escorregamento ^[3].

No nosso estudo de caso, este fator é de relativa importância, já que existem blocos potencialmente instáveis, que devido à meteorização e tipo de preenchimento de descontinuidades, podem gerar essas forças favorecendo o escorregamento, também no caso de ocorrerem movimentos do solo podem dar origem ao desmoronamento de blocos (Figura 2.25).

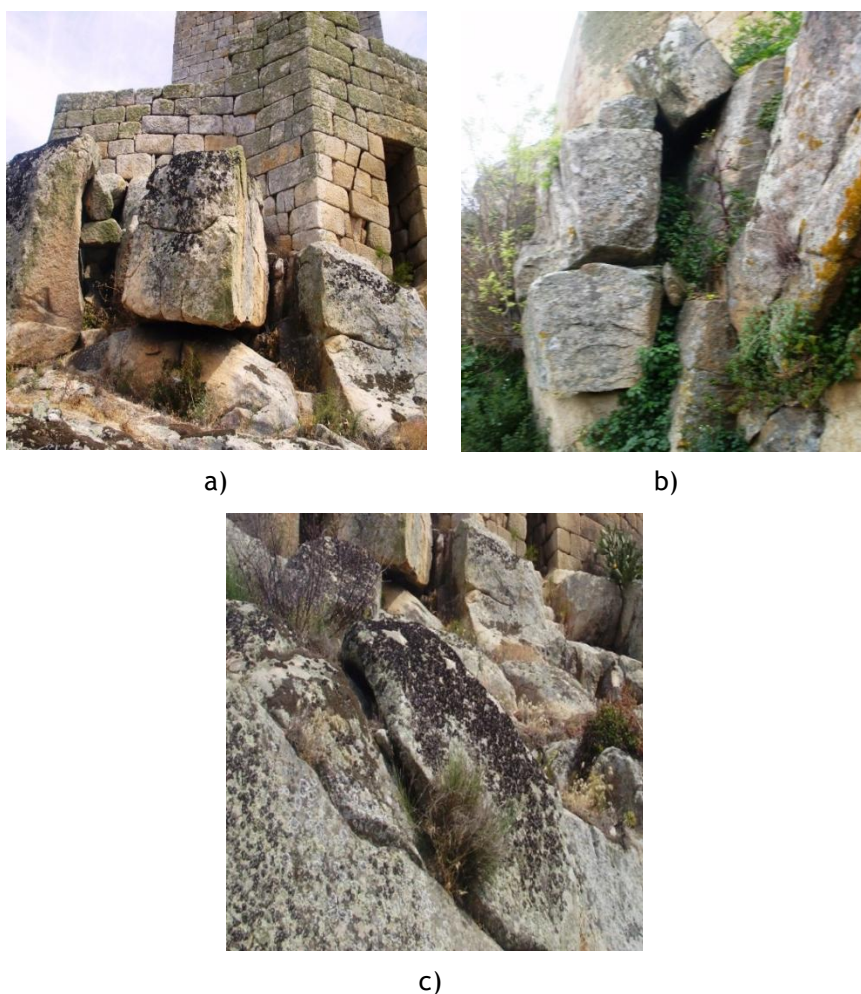


Figura 2.25 - Rotura em taludes. Imagens a) e b) blocos do maciço rochoso propícios a desmoronamento; c) bloco do maciço sujeito a rotura plana. (Maciço da Torre de Menagem do Castelo de Marialva).

