

3. Metodologias

No presente capítulo descrevem-se as diversas metodologias, aplicadas no decorrer deste estudo. Para além da descrição das técnicas utilizadas, apresentam-se as especificações técnicas que foram tidas em conta em cada um dos ensaios.

3.1. Estudo do Diaclasamento

No sentido de avaliar o diaclasamento da zona de pesquisa, recorreu-se fundamentalmente ao estudo das propriedades e identificação das principais famílias de diaclases existentes no maciço rochoso. A Figura 3.1 mostra a zona de pesquisa dividida segundo quatro setores analisados.



- 1 - Setor Norte
- 2 - Setor Este
- 3 - Setor Sul
- 4 - Setor Oeste

Figura 3.1 - Divisão da zona de estudo segundo as faces Norte, Sul, Este e Oeste do maciço rochoso.

A análise de estabilidade de blocos, em fundações rochosas, requer o conhecimento de informação fidedigna de dois tipos de características das descontinuidades ^[9]:

- Orientação e dimensões de descontinuidades, as quais definem a forma e a grandeza dos blocos e a direção segundo a qual o bloco pode deslizar;
- Propriedades de resistência ao deslizamento das descontinuidades, que determinam a resistência ao escorregamento dos blocos.

O primeiro passo, na investigação das descontinuidades, consiste na análise da orientação e identificação das famílias de diaclases, que podem determinar blocos de rocha potencialmente instáveis [9].

Neste caso, para a análise do diaclasamento, procedeu-se à observação e medição “*in situ*” das diaclases em função da sua atitude, espaçamento, abertura, persistência e preenchimento das aberturas. Para facilitar a sua identificação, foi usado um software informático (*openstereo* [35]), para que os dados recolhidos fossem tratados segundo a elaboração de histogramas.

3.1.1. Determinação do Espaçamento

Na frente dos quatro setores de estudo, com recurso a uma fita de 50 metros, foi medido o espaçamento baseado na técnica “*Scanline*”. O método consistiu na introdução de uma linha na superfície do maciço rochoso, onde as distâncias entre as diaclases adjacentes fossem medidas com a linha colocada perpendicularmente aos traços expostos das mesmas, conforme sugere a ISRM (1981). O levantamento de dados residiu na anotação dos valores de espaçamento para todas as diaclases que intercetaram a dita linha ao longo do seu comprimento. Escolheu-se o perfil mais adequado de cada face do maciço de forma a intercetar o maior número de diaclases.



Figura 3.2 - Colocação da fita métrica de forma a determinar a fracturação do maciço rochoso (setor Oeste).

Após identificação das mesmas, foi elaborada uma carta de densidades de diaclasamento, onde é representada a posição da linha, mostrando um perfil e o corte correspondente a esse perfil para cada setor do maciço. Foram elaborados também histogramas com as medidas de espaçamento, abertura e preenchimento para cada setor.

Estes histogramas de frequência foram preparados através de uma folha de cálculo, que permitiu determinar o espaçamento médio de diaclases para os respetivos setores e o intervalo em que se encontra o espaçamento modal.

Os intervalos da classe estão representados da Tabela 2.5 do capítulo 2, e são sugeridos pela ISRM (1981). Os histogramas foram construídos de duas formas:

- Os dados recolhidos foram considerados para cada setor analisado;
- Os dados recolhidos foram considerados para o registo total de espaçamento do maciço.

Seguiu-se o mesmo procedimento para a análise da abertura de diaclases, conforme recomendado pela ISRM (1981). Elaborou-se, ainda, um diagrama circular de percentagens relativo ao tipo de preenchimento das diaclases.

3.1.2. Medição da Atitude do Diaclasamento

Com recurso a bússola de geólogo, procedeu-se à medição das atitudes da estrutura geológica, ou seja, determinou-se a orientação dos planos.

O melhor método para a medição da atitude de um plano, depende da natureza do afloramento e do grau de precisão pretendido. Assim, a inclinação do plano pode afetar a escolha do método, pois é muito mais fácil fazer medições com elevada precisão em estruturas planares fortemente inclinadas, do que em superfícies pouco inclinadas ^[13]. Como o maciço em estudo é composto, na grande maioria, por diaclases fortemente inclinadas, com inclinação subvertical e muito inclinada, seguiu-se o sistema descrito em baixo, que visa a determinação da direção e ângulo de inclinação de cada plano.

A orientação, ou atitude duma descontinuidade no espaço define-se pela direção (*strike*) que normalmente se identifica como a linha de intersecção de um plano horizontal com a superfície planar considerada. É definida medindo o azimute da linha horizontal da superfície planar. A inclinação (*dip*) representa o declive da superfície numa direção perpendicular à direção da superfície considerada (Figura 3.3) ^[12].

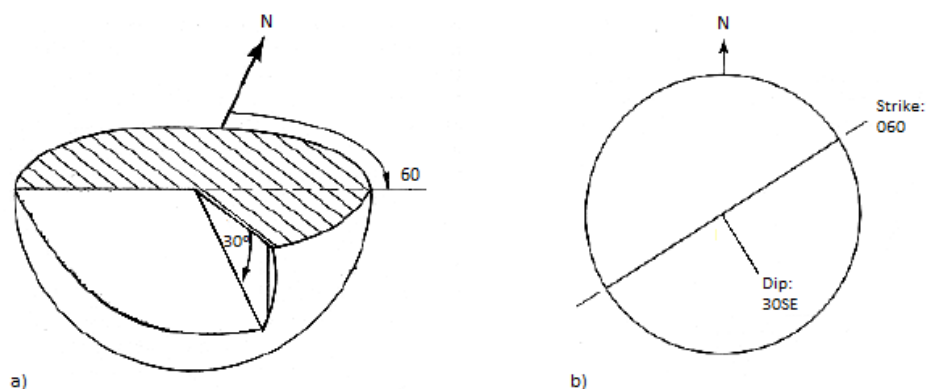


Figura 3.3 - Terminologia definindo a orientação do plano duma descontinuidade: (a) vista isométrica; (b) vista em planta, (adaptado de [9]).

A atitude de um plano representa-se geralmente por uma notação que contém, claramente explícitas, a direção e a inclinação do mesmo. Como exemplos:

- N60E, 30 S - A direção é de 60° para Este do Norte, inclinando o plano 30° para Sul;
- 060, 30 S - A direção é 60° (azimute) e o ângulo de inclinação é 30° para Sul.

Em ambos os exemplos é representado em primeiro lugar a direção do plano seguida do ângulo de inclinação e respetivo sentido. Para o estudo realizado foi usada a convenção descrita no exemplo (b), ou seja, a determinação do azimute e do ângulo de inclinação do plano.

Antes de se iniciar o registo das respetivas atitudes foi indispensável definir, a partir do conhecimento da superfície, zonas do maciço com características próprias, no que se refere à atitude das diaclases, e só depois, dentro de cada zona, se fez o respetivo tratamento estatístico.

Portanto, a atitude mediu-se utilizando uma bússola de geólogo com transferidor graduado de 0° a 360° de forma a medir os ângulos horizontais, com nível de bolha para manter a horizontalidade e provida de clinómetro graduado de 0° a 90°, para medir ângulos verticais. O método usado para definição da atitude seguiu a técnica da **regra da mão direita** (Figura 3.4), em que a direção é representada em relação ao Norte magnético e a inclinação em relação à horizontal (Figura 3.5).

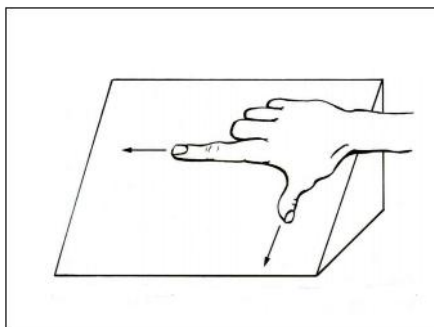


Figura 3.4 - Método da regra da mão direita para medição e registro da direção e inclinação, (adaptado [13]).



(a)



(b)

Figura 3.5 - Medição da direção e inclinação, respetivamente (setor Oeste).

Levantamento de dados

Após a identificação das diaclases, foram recolhidas as medidas de direção e inclinação das mesmas, com o intuito de elaborar diagramas de frequência, que permitissem definir as famílias presentes.

Construção de diagramas de frequência e de histogramas com a inclinação das diaclases

Feito o inventário, trataram-se estatisticamente os dados e representaram-se graficamente, utilizando o software *OpenStereo 0.1.2 devel* [35], que permitiu a determinação da atitude preferencial das zonas mapeadas, bem como a representação dos grandes círculos (projeções hemisféricas), correspondentes aos planos característicos de cada estrutura planar identificada e representação polar com respetivas curvas de densidades.

Outra configuração usada, de maneira a representar a atitude das famílias mais representativas e empregando o mesmo software, foi a aplicação do diagrama de roseta (Figura 2.11). Trata-se de um método de simples execução, expondo graficamente a orientação das diaclases, dispondo de uma base circular dividida de 0° a 360° em sectores de 10° , correspondentes às direções das diaclases e em que o número de medições para cada família é dado pelo comprimento do respetivo setor, medido a partir do centro do círculo. Não indica a inclinação individual das descontinuidades no gráfico, sendo somente indicado o intervalo de variação das inclinações pertencentes a cada família.

De acordo com este programa informático, a representação dos planos e respetivos polos foi feita com o auxílio de uma rede de projeção, *igual área (Schmidt)*, tal como a representada na Figura 3.6. Nas aplicações práticas de engenharia, a utilização desta projeção é preferível para o tratamento de dados das orientações das descontinuidades, já que permite uma representação gráfica com menores distorções ^[9]. Os “*círculos maiores*” da rede representam planos com retas de níveis orientadas na direção N-S e pendores intervalados dum valor constante, igual a 10° ^[9].

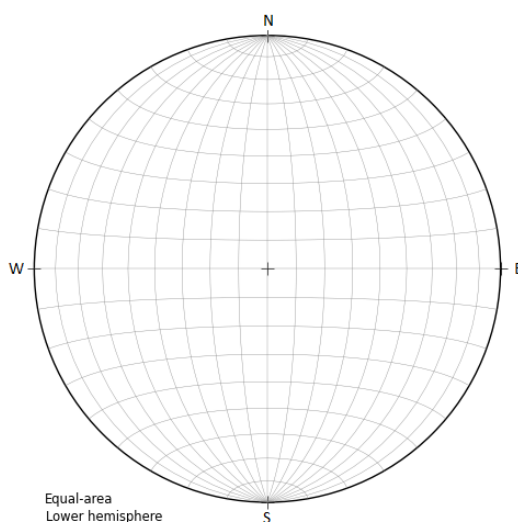


Figura 3.6 - Rede de projeção *igual área (Schmidt)* ^[35].

3.2. Escala de Alteração do Maciço

Para a avaliação qualitativa do estado de alteração optou-se pelo uso de um método simples, o mais claro possível, baseando-se numa observação direta da consistência da rocha, da sua cor, do brilho dos seus minerais, e do ensaio “*in situ*” da “dureza” determinada com o martelo de *Schmidt*, permitindo assim, uma fácil interpretação dos principais estádios de evolução no processo de alteração da rocha.

Como já referido no capítulo 2, no que diz respeito à alteração da rocha, existem propostas de vários autores com muitos pontos semelhantes: DIXON (1969), BARROS (1971), BIENIASWKI (1973), ROCHA (1981), IRSM (1981), CARVALHO (1987), CAVALEIRO (1994), VALLEJO (2002).

A Tabela 3.1 apresenta critérios, denominações e símbolos normalmente utilizados na avaliação do estado de alteração e do grau de intensidade deste, nas rochas. As características da rocha observadas no campo, no momento da descrição da mesma, definem o estado de alteração. Baseado na Tabela 2.1 do capítulo 2 e nas propostas dos referidos autores, tomando o granito como rocha de referência, o critério usado estabelece uma escala de cinco graus de alteração, que variam de *rocha sã* a *rocha decomposta*. Segundo Cavaleiro (1994) esta análise foi correlacionada com o ensaio “*in situ*” da “dureza” (R), de forma a simplificar a interpretação dos principais estádios de evolução, no processo de alteração da rocha.

Tabela 3.1 - Avaliação qualitativa do processo de alteração da rocha ^{[2], [4]}.

Símbolos	Classificação	Descrição
W1	Granito sã	Caracteriza-se por ostentar feldspatos com cor branca-leitosa, brilho nacarado. As micas apresentam brilho e a biotite mostra-se bem negra e brilhante. É uma rocha coerente, necessitando de uma forte pancada com a marreta para atingir a rotura. A "dureza" Schmidt (R) exhibe valores superiores a 40.
W2	Granito pouco alterado	Os feldspatos ainda brancos mostram leve impregnação de óxidos de ferro. Mostram-se baços. Sinais de alteração apenas, nas imediações das descontinuidades. Elevada resistência ao impacto do martelo. Só o uso da marreta parte a rocha facilmente. Os valores da "dureza" Schmidt (R) estão compreendidos entre 30 e 39.
W3	Granito alterado	Feldspatos de cor creme, pouco pulverulentos. Apresentam manchas castanho claro provocadas pela impregnação de óxidos e hidróxidos de ferro provenientes da lixiviação da biotite. A rotura atinge-se com pancada seca do martelo. A "dureza" Schmidt (R) mostra valores compreendidos entre 20 e 29.
W4	Granito muito alterado	Os feldspatos são pulverulentos e desagregam-se com certa facilidade. A biotite está praticamente lixiviada, descorada. Com o simples pressionar do martelo consegue-se partir a rocha. Ainda assim a rocha conserva as estruturas originais. Os valores da "dureza" de Schmidt (R) são inferiores a 19.
W5	Granito decomposto	Trata-se, praticamente, de quase um saibro que se desagrega com pressão forte dos dedos. A rocha é totalmente friável, possui comportamento de solo. Os feldspatos argilizados esboram-se. Os grãos de quartzo soltam-se facilmente da rocha "apodrecida". A biotite desapareceu dando lugar a produtos micáceos. O "martelo" Schmidt (R) não regista qualquer valor.

Com base neste critério elaborou-se uma tabela onde são representadas as zonas correspondentes aos critérios definidos. A identificação e delimitação foi relativamente fácil nas zonas de contacto do maciço, apenas o setor Norte não foi tão evidente, visto ser uma zona do maciço coberto por solo residual, dificultando a delimitação do setor.

3.3. Dureza de *Schmidt*

A resistência à compressão simples da rocha pode ser correlacionada com a sua dureza. Esta dureza, nas rochas, é um conceito diferente daquele que é considerado nos minerais. Geralmente é associada com a chamada dureza de *Schmidt* (R) que é determinada através do ensaio com o martelo de *Schmidt*. Esta dureza é um parâmetro que nos dá informação do comportamento de um material, quando submetido a determinadas deformações.

O ensaio foi realizado com um aparelho da marca *Proceq*, segundo as recomendações de Vallejo, 2002.

Trata-se de um ensaio que permite estimar, de forma aproximada, a resistência à compressão uniaxial mediante uma simples correlação (Figura 3.10), sendo aplicável fundamentalmente em maciços rochosos, mas também em discontinuidades ^[3]. Opera segundo o “disparo” de uma massa normalizada contra o material a ensaiar, registando o valor de ressalto numa escala do aparelho (Figura 3.8). Este valor resulta da energia absorvida na deformação plástica e de rotura da rocha no local de impacto, a qual se correlaciona com a dureza da superfície que recebeu o impacto ^[14]. Permite obter resultados imediatos “*in situ*”, de uma forma económica e não destrutiva. No entanto, para que se alcancem valores homogéneos, esta prova, que apresenta um certo grau de imprecisão de resultados, deve ser realizada em superfícies frescas e lisas, livre de fissuras, existindo uma grande dispersão de valores registados, quando as superfícies se mostram alteradas ou irregulares. É um método de uso limitado em rochas muito moles (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Colocação do martelo de Schmidt ^[14].

O Martelo Schmidt, para realização de ensaios, é oferecido em modelos apropriados às diferentes energias de impacto, visando atender às necessidades de teste de uma ampla variedade de tipos e tamanhos de materiais. Inicialmente usado para avaliar a dureza do betão (SCHMDT, 1950) veio, com o passar do tempo, a estimar também a resistência à compressão uniaxial da rocha ^[49]. Trata-se de um pequeno aparelho metálico, de geometria cilíndrica, de fácil utilização, especialmente devido à sua portabilidade.

Dos oito modelos de martelos, existentes no mercado, utilizou-se o martelo tipo L, com uma **energia de impacto (R)** igual a 0.735 N.m. O martelo usado neste trabalho foi o tipo L-9 com uma energia de impacto (R) de 0.735 N.m, três vezes menor que o modelo tipo N, (R) igual a 2.207 N.m.



Figura 3.8 - Martelo de Schmidt tipo L-9.

Antes da sua utilização, o martelo deve ser calibrado através da realização de um ensaio em material próprio (Bigorna) fornecido pelo fabricante. Para o martelo tipo L-9 o valor de dureza deve ser ^[49]:

$$R = 73 \pm 2$$

Convém notar que a calibragem do aparelho se torna muito importante face à resistência do material da mola. No caso de o martelo não mostrar valores dentro deste intervalo, deve proceder-se à sua correção através da seguinte fórmula ^[49]:

$$R = R_r \times 73/R_a$$

Onde:

R_r - valor de R obtido na rocha;

R_a - valor de R obtido no material de calibragem;

R - valor de R para o material ensaiado.



Figura 3.9 - Batente de aço (bigorna) para teste de calibração.

O martelo, usado no ensaio, registou um valor de $R = 72$ no batente fornecido pelo fabricante, pelo que não houve necessidade de qualquer correção nos valores. No caso dos valores de R obtidos na bigorna serem inferiores a 66 (tipo L), o equipamento deve ser desmontado, limpo e recalibrado, pois não se encontra em condições de realizar medições.

Como já referido, a utilização deste equipamento tem como base a aplicação de uma pancada através de uma massa de aço numa superfície de rocha proporcionando valores de “ressalto” (R) lidos a partir de uma escala, para cálculo posterior da média. Este valor de R , o valor da densidade da rocha ensaiada e a orientação do martelo, são então correlacionados com os valores da resistência à compressão uniaxial, podendo ser lidos a partir do ábaco de conversão (Figura 3.10).

Para a realização do ensaio o martelo foi posicionado na direção perpendicular à parede da diaclase. É recomendável, a realização de um número significativo de ensaios para avaliar a resistência da parede de cada uma das descontinuidades a ensaiar. O procedimento de ensaio foi seguido conforme sugere a ISRM, ou seja, que para cada diaclase sejam realizados pelo menos 10 determinações, com locais de impacto sucessivamente distintos. Para cada grupo de 10 determinações, desprezaram-se os cinco valores inferiores e determinou-se o valor médio do recuo com os restantes. Este é o valor considerado representativo para estimar o parâmetro da resistência à compressão uniaxial (JCS).

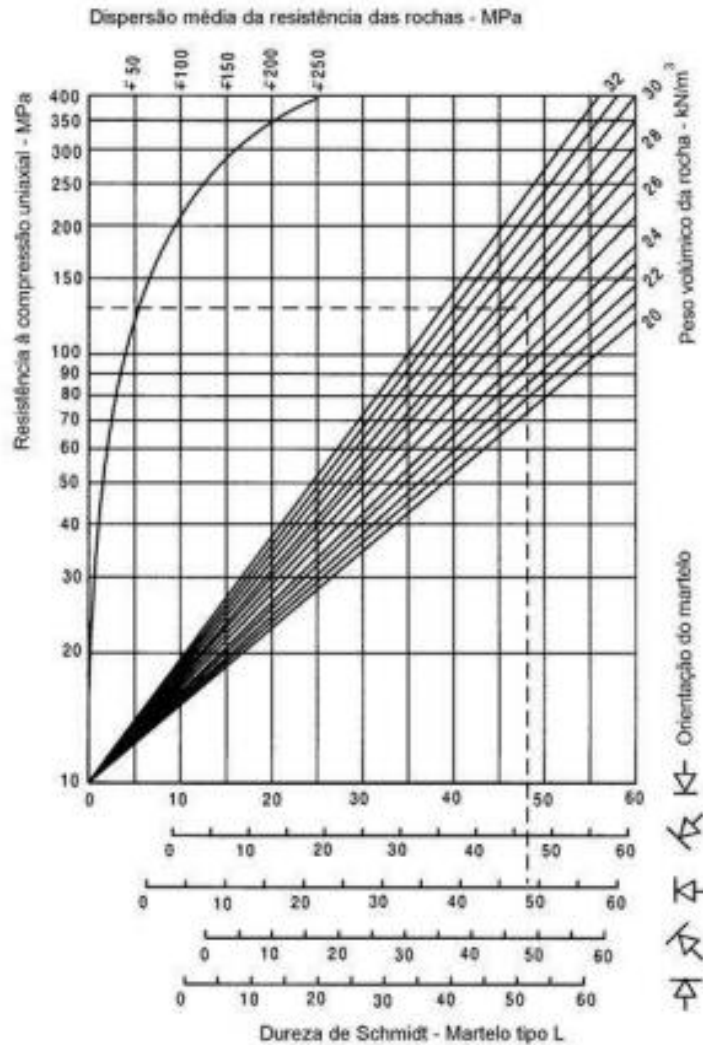


Figura 3.10 - Ábaco de correlação entre densidade, resistência à compressão uniaxial e resposta obtida com o martelo de Schmidt Tipo L - Estimativa para valor de JCS (Deere & Miller, *apud* Vallejo, 2002).

São vários os autores que apresentam propostas de classificação da resistência a partir do martelo de Schmidt. Apesar de, este ensaio permitir a obtenção de forma rápida e simples da dureza (R), existe uma grande diversidade de propostas, talvez devido à existência de uma grande dispersão das leituras feitas com o martelo. Como referido anteriormente, deve dar-se especial importância aos cuidados a ter na execução dos ensaios, como a limpeza da zona a ensaiar, de forma a eliminar a camada superficial da rocha meteorizada e a posição do martelo, uma vez que a não utilização de forma adequada, pode influenciar os resultados (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Visualização de zona limpa para ensaio e posicionamento do martelo.

3.4. *Tilt Test*

Ângulo de atrito interno básico (ϕ_b)

Segundo Cruden e Hu (1992), a determinação do ângulo de atrito interno das descontinuidades do maciço rochoso, é essencial para a avaliação da estabilidade dos taludes desses maciços. Uma das maneiras de se obter o ângulo de atrito interno da rocha é por meio do *tilt teste*.

Este ensaio permite estimar o ângulo de atrito de descontinuidades ou o ângulo de atrito interno básico de descontinuidades lisas, a partir do qual se podem avaliar o ângulo de atrito residual e posteriormente o coeficiente de rugosidade das juntas (JRC) ^[3]. Tendo em vista a determinação destes dois parâmetros, foi adotado o critério de Barton e Choubey (1977). O ensaio possibilita a sua realização tanto em campo como em laboratório. Para o caso deste trabalho, foi realizado em laboratório com provetes extraídos de amostras de material proveniente do local de estudo.

Dado o presente estudo incidir sobre um Monumento Nacional, a recolha de amostras para estes ensaios não foi uma tarefa de fácil execução por não ser permitida a recolha de elementos constituintes do castelo. No entanto, foi possível recolher dois blocos de pedra pertencentes a diaclases do maciço rochoso, intactos e sem fissuração, das quais apenas foi possível extrair três provetes por bloco.

Para a apresentação de resultados fidedignos nos ensaios de laboratório, os blocos recolhidos revelaram-se insuficientes. No entanto, e dada a impossibilidade de recolha de mais blocos do

local de estudo, foram solicitados corpos de prova de uma outra investigação a decorrer no mesmo local de estudo.¹

No Laboratório de Mecânica das Rochas da Universidade da Beira Interior foram realizados os ensaios de *tilt test*, para quinze diferentes provetes de rocha extraídos de cinco distintos blocos de rocha granítica (provenientes do topo, base da muralha e maciço rochoso), tendo sido extraídos três provetes de cada bloco (Figura 3.14). Posto isto, foi possível determinar o ângulo de atrito básico (ϕ_b) de cada um deles.

Os materiais e equipamentos utilizados foram:

- Quinze corpos de prova polidos e retificados de rocha
- Mesa de madeira construída para o ensaio

Na tabela 3.2 estão registadas as dimensões dos corpos de prova.

Tabela 3.2 - Designação, origem e dimensão dos provetes ensaiados.

	Designação	Origem	Quantidade de provetes	Dimensão (mm)
Castelo Marialva	Bloco 1	Maciço rochoso	3	139 x 54
	Bloco 2	Maciço rochoso	3	139 x 54
	Bloco 3	Silhar original base muralha	3	110 x 54
	Bloco 4	Silhar original topo muralha	2	110 x 54
			1	139 x 54
Bloco 5	Silhar reconstrução	3	139 x 54	

Dispondo de três provetes cilíndricos de rocha, o método consiste em colocar dois provetes paralelos e juntos sobre uma superfície de apoio horizontal, colocando o terceiro sobre eles e apoiado em ambos. A base de apoio inclina-se progressivamente até que o provete superior deslize sobre os inferiores, obtendo-se assim o ângulo α (Figura 3.12). Neste caso, α define o ângulo de atrito interno básico ϕ_b , do material, que corresponde à resistência de descontinuidades planas e lisas sem que estejam meteorizadas.

¹ Tese de Doutoramento em Mecânica das Rochas de Nelson Barata Antunes

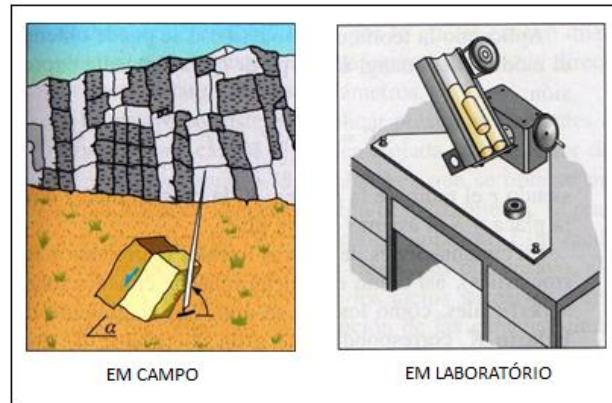


Figura 3.12 - Ensaio *Tilt test* para determinação do ângulo de atrito básico das descontinuidades (Barton, 1981) [3].

Foi construída uma mesa de madeira especialmente para a realização deste ensaio (Figura 3.13), tendo aproximadamente 30 cm de comprimento, 20 cm de largura e 3,5 cm de altura, conforme o modelo representado:

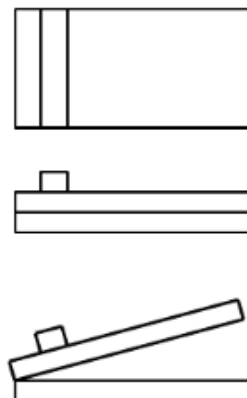


Figura 3.13 - Representação esquemática da mesa construída para o ensaio.



Figura 3.14 - Bloco amostrado e aparelho de extração de provetes.

Cada um dos provetes de rocha foi cortado e retificado para que o teste fosse realizado. Uma vez preparados, como já descrito, foram colocados em cima da mesa de ensaio e monitorizou-se o início do deslocamento (a uma velocidade mais ou menos constante) até que o provete superior deslizesse perante os de baixo sobre a superfície lateral (parede) e assim determinou-se o ângulo de atrito (Figura 3.15). O ensaio foi realizado sob baixo valor de tensão normal, resultante do peso do bloco superior da parede.

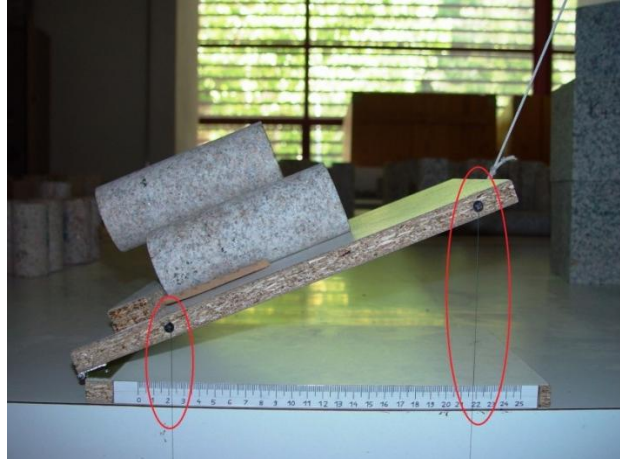


Figura 3.15 - Realização do ensaio *tilt test* na mesa de ensaio.

Desta forma foram realizados 30 ensaios para cada conjunto de provetes, de maneira a obter uma média do ângulo e diminuir o erro, também para que o escorregamento da amostra fosse realizado em diferentes direções, uma vez que há anisotropia na superfície da descontinuidade, mesmo quando retificada. Para medir o valor da hipotenusa do triângulo formado, usou-se um paquímetro de forma a avaliar a distância entre os dois parafusos que se observam na Figura 3.15. O valor encontrado e considerado para o efeito de cálculo é fixo e tem a distância de 210,50 mm (hipotenusa). O valor do cateto adjacente varia de acordo com o ângulo obtido, podendo ser lido com o auxílio de dois fios de nylon presos aos parafusos com a ajuda de papel milimétrico fixo numa das laterais da mesa. Assim, de acordo com a seguinte relação trigonométrica, pôde-se determinar o valor do ângulo de atrito interno básico da rocha ϕ_b :

$$\phi_b = \cos^{-1} \left(\frac{\text{cateto adjacente}}{\text{hipotenusa}} \right) \quad (15)$$

3.5. Resistência Mecânica à Compressão Uniaxial

Embora pese o facto de as rochas que constituem os maciços se encontrarem em geral submetidas a estados de tensão triaxiais, tem interesse o estudo do comportamento das

rochas quando submetidas a compressão simples, pois permite pôr em evidência fenómenos com interesse fundamental na mecânica dos maciços rochosos.

O ensaio visa determinar a tensão que provoca a rotura da rocha (σ_c), quando submetida a esforços de compressão.

O ensaio realizou-se sobre provetes de rocha cilíndricos retirados dos blocos já mencionados, recolhidos no maciço e Muralha da Torre de Menagem, aos quais foi aplicada, gradualmente, uma força axial até atingir a rotura, seguindo as recomendações da ISRM. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica das Rochas da Universidade da Beira Interior, utilizando o equipamento específico, conforme ilustrado na Figura 3.18.



Figura 3.18 - Realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial.

A ISRM estabelece uma série de recomendações em relação às dimensões dos provetes:

- Os provetes devem ser cilíndricos com uma relação $L/D = 2,5$ a 3 com $D > 54$ mm. O diâmetro D será pelo menos 10 vezes maior que o maior tamanho do grão da rocha;
- As bases do provete devem ser planas e perpendiculares às faces do cilindro;
- Devem ser realizados no mínimo 5 ensaios para uma correta caracterização da matriz rochosa.

As dimensões dos provetes utilizados não respeitaram a relação L/D recomendada, nem o diâmetro mínimo recomendado, o que se deveu ao facto de se querer utilizar equipamentos de carotagem com diâmetros mais usuais no mercado e cuja aquisição não fosse muito dispendiosa.

Os resultados dos ensaios de laboratório dependem, tanto de fatores referentes à natureza e condição da rocha, como das condições do ensaio. Em relação às condições do ensaio, os fatores mais importantes são ^[14]:

- Forma e volume do provete;
- Preparação e corte do provete;
- Direção de aplicação da carga (em rochas com anisotropia);
- Velocidade de aplicação da carga.

De forma a minimizar a influência de aplicação da carga a ISRM recomenda tempos de carga de 0,5 a 1,0 MPa, correspondendo aproximadamente a um tempo de 5 a 10 minutos para alcançar a resistência de pico. Nos ensaios realizados, o equipamento foi ajustado para uma velocidade de 0,5 MPa, tratando-se de um valor “baixo”, uma vez que uma aplicação rápida pode provocar roturas violentas e uma sobre elevação da resistência do material.

3.6. Velocidade de Propagação de Ultra-sons

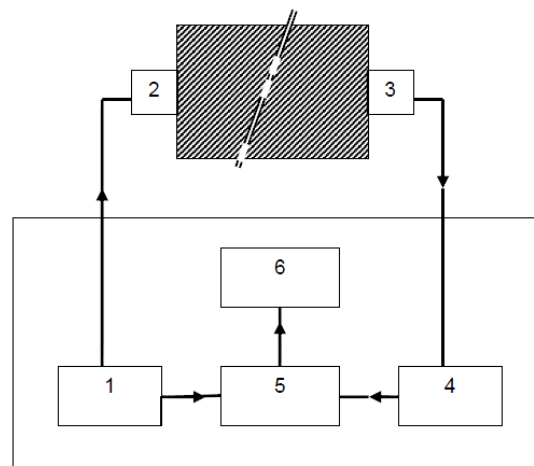
As primeiras tentativas de aplicar a técnica dos ultra-sons datam de 1940, quando Obert realizou experiências em betão. A onda sonora era então produzida pelo impacto de um objeto na superfície de betão e o equipamento de medida não oferecia grande precisão. O grande interesse pelas potencialidades desta técnica de ensaio e as melhorias proporcionadas pelo surgimento de novos equipamentos de medição permitiram que nos anos 70 fossem produzidas as primeiras versões portáteis e de leitura digital, idênticas às que hoje são utilizadas ^[45].

O ensaio de ultra-sons consiste na determinação da velocidade de propagação dum impulso ultra-sónico, entre dois pontos, tendo em vista a obtenção da informação sobre as características dos elementos ensaiados ^[46]. Baseia-se no princípio da propagação das ondas elásticas, segundo o qual a sua velocidade de propagação depende das propriedades elásticas do meio ^[45].

Trata-se de um ensaio bastante útil, pois permite avaliar as características dos materiais de forma não-destrutiva.

No ensaio, utilizou-se um equipamento do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), onde o procedimento é descrito quer no manual do equipamento (Pundit Manual, 1994), quer pela recomendação BS1881, B.S.I. (1986), para condições de humidade 0% e 100%, utilizando transdutores com frequência de 56Khz.

O impulso é conduzido a um transmissor emissor e, depois de atravessar o corpo ensaiado, é captado por outro transmissor recetor, onde é transformado novamente em impulso elétrico e conduzido de volta à unidade central (Figura 3.16 e Figura 3.17).



Legenda:

1 - Gerador de impulsos
2 - Transdutor emissor
3 - Transdutor recetor

4 - Amplificador
5 - Unidade de medição do Tempo
6 - Mostrador digital

Figura 3.16 - Representação esquemática do ensaio de ultra-sons ^[45].



Figura 3.17 - Medição da velocidade de propagação de ultra-sons, com equipamento PUNDIT ^[14].

3.7. Porosidade Aberta, Absorção de Água e Densidade Aparente

A presença de poros na estrutura interna das rochas, diminui a sua resistência e por conseguinte afeta o seu desempenho mecânico. As propriedades físicas da porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente, conjugadas, podem fornecer informação adicional sobre o comportamento mecânico das rochas ^[14].

Segundo a especificação do LNEC E 216-1968, determinaram-se as propriedades físicas da porosidade, absorção de água e densidade aparente, todas obtidas no Laboratório de Mecânica das Rochas da Universidade da Beira Interior. Descreve-se de seguida a metodologia usada.

Os provetes retirados dos blocos levaram-se à ebulição durante 2 horas. Passado esse tempo, deixaram-se arrefecer até à temperatura ambiente do laboratório. De seguida retirou-se a temperatura e pesaram-se os provetes em suspensão.

Após estas pesagens, retirou-se o provete da água, limpou-se com o pano de camurça húmido de modo a remover a água superficial e pesou-se de imediato.

Posteriormente colocaram-se os provetes na estufa a 105°C, durante 16 horas e pesaram-se de novo.

Utilizando os valores obtidos, foi determinada a absorção de água, recorrendo à seguinte expressão:

$$A = \frac{m_2 - m_3}{m_3} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

A - absorção de água;

m_2 - massa do provete saturado, em gramas;

m_3 - massa do provete seco, em gramas.

A porosidade estabelece uma relação entre o volume de vazios e o volume do provete. Este parâmetro é bastante eficiente e informativo, já que, por um lado, caracteriza a rocha para os mais diversos fins, por outro, as propriedades mecânicas de uma rocha serão acentuadamente influenciadas em função do volume e ligação das fissuras e poros.

A determinação da porosidade aberta foi feita com base nas pesagens obtidas, recorrendo à seguinte expressão:

$$P_a = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (17)$$

Onde:

m_1 - massa do provete imerso, em gramas;

m_2 - massa do provete saturado, em gramas;

m_3 - massa do provete seco, em gramas.

Dado que a densidade aparente é o parâmetro que relaciona a porosidade aberta de uma dada pedra natural com a sua absorção de água, estas três características podem ser determinadas em simultâneo. A densidade aparente foi estimada de acordo com a seguinte expressão:

$$\frac{m_3}{m_2 - m_1} \cdot d^t \quad (18)$$

Onde:

m_1 - massa do provete imerso, em gramas

m_2 - massa do provete saturado, em gramas

m_3 - massa do provete seco, em gramas

d^t - densidade da água à temperatura ambiente.

3.8. Resistência ao corte

Como forma de determinar a resistência ao corte (deslizamento) das diaclases, seguiu-se o critério de Barton e Bandis (1983) de acordo com a expressão (7) no capítulo Revisão bibliográfica.

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

O coeficiente de rugosidade das paredes (JRC) foi determinado através da Expressão (8) proposta por Barton et al. (1985).

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

Posto isto, e de acordo com a expressão de Barton e Choubey (1977) determinou-se o ângulo de atrito residual (ϕ_r), já que na maioria das vezes a parede da diaclase está alterada, o ângulo de atrito residual é inferior ao ângulo da rocha sã (ϕ_b)^[3]. Este parâmetro junto com os dados obtidos com o martelo de Schmidt permite o cálculo do ângulo de atrito residual (ϕ_r).

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

3.9. Análise granulométrica e equivalente de areia (EA)

O presente ensaio, visa a determinação do equivalente de areia do solo residual da alteração do granito (W5) do local de estudo. A especificação seguida (LNEC E 199-1967), destina-se a fixar o modo de determinação deste ensaio, característica que exprime, segundo uma escala convencional de 0 a 100, a quantidade e qualidade dos elementos finos plásticos existentes num solo. Esta quantificação obtém-se estabelecendo a relação volumétrica entre os elementos arenosos, não floculáveis e a totalidade dos elementos. Este ensaio deve ser sempre realizado em solos não plásticos e de baixa plasticidade, ou solos contendo argilas de alta plasticidade, mas em pequena percentagem.

Para a execução do ensaio foram recolhidos aproximadamente 2 Kg de solo que foram secos ao ar e posteriormente fez-se a desagregação de torrões presentes na amostra. Passou-se a quantidade necessária de material pelo peneiro A.S.T.M nº 4 (4,76 mm) de forma a obter cerca de 500 g de solo. Quartearam-se duas porções de solo seco, cada uma com 120 g. A solução concentrada já estava preparada, contendo, por litro 111 g de cloreto de cálcio; 480 g de glicerina; 12,5 g de formaldeído; água destilada até perfazer os 1000 cm³. A solução diluída a usar foi preparada a partir de 125 ± 1 cm³ da solução concentrada e misturada num recipiente com $5 \pm 0,05$ dm³ de água destilada.

Determinou-se a constante K da proveta de ensaio, medindo a distância da boca da proveta e a parte inferior do cilindro do pistão, quando introduzido completamente na proveta vazia (Figura 3.19).

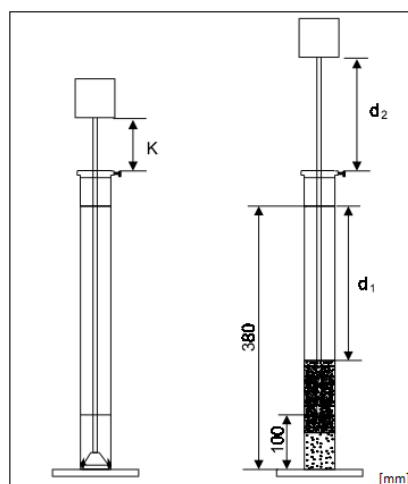


Figura 3.19 - Esquema de obtenção das medidas antes e durante a realização do ensaio (adaptado ^[42]).

K representa a constante da proveta; d_1 é a distância do nível superior da suspensão argilosa ao traço de referência superior da proveta; d_2 é a distância entre a face superior da peça guia e a face inferior do peso do pistão.

O recipiente com a solução diluída foi colocado a uma altura de 1 m em relação ao tampo da mesa de trabalho. Transferiu-se a solução através de um tubo de borracha ligado ao tubo lavador de cobre para a proveta cilíndrica até atingir o traço de referência inferior (10 cm da base). Foram adicionadas, com auxílio de um funil, as 120 g de material preparado (Figura 3.20), bateu-se fortemente por várias vezes a base da proveta sobre a palma da mão para expulsar as bolhas de ar. Deixou-se repousar durante 10 minutos.

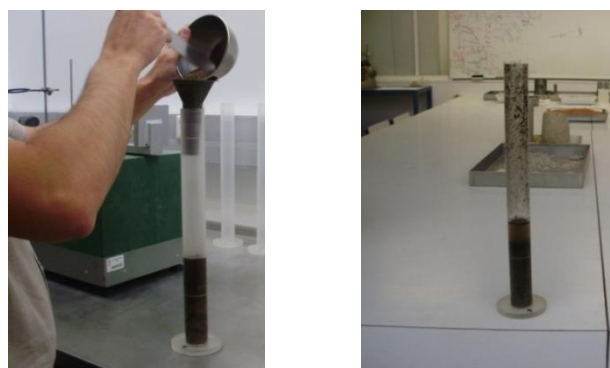


Figura 3.20 - Transferência de amostra contida no recipiente para a proveta e visualização da proveta após pancadas sobre a base, respetivamente.

Após o período de 10 minutos, tapou-se a proveta com uma rolha de borracha e fixou-se num agitador mecânico (TECNILAB) na posição horizontal (Figura 3.21), submetendo-se a uma agitação de 90 ciclos em 30 segundos com um deslocamento de cerca de 20 cm.



Figura 3.21 - Agitador mecânico durante o ensaio.

Retirou-se a proveta da máquina, colocou-se na posição vertical, destapou-se, e com o tubo de lavagem lavaram-se as paredes da mesma de cima para baixo. Introduziu-se o tubo até ao

fundo da proveta e com movimentos contínuos e lentos de vaivém fez-se subir os elementos argilosos, sendo esta operação sempre acompanhada com rodadas suaves da proveta. Após o líquido atingir o traço de referência superior da proveta (38 cm da base), retirou-se o tubo lentamente de forma a manter o nível sem parar o escoamento. Este foi regulado de maneira a que o tubo não fosse retirado totalmente antes do ajuste do nível final ao traço de referência. Deixou-se repousar sem perturbações durante 20 minutos. Após este período determinou-se a distância do nível superior da suspensão argilosa ao traço de referência superior da proveta (d_1) (Figura 3.19 e 3.22), efetuando a leitura com aproximação ao milímetro.

Fez-se descer lentamente o pistão na proveta até assentar completamente na parte sedimentada. Posto isto, determinou-se a distância entre a face superior da peça guia e a face inferior do peso do pistão (d_2). Após lavagem da proveta com água destilada, repetiu-se o ensaio mais uma vez.



Figura 3.22 - Visualização e determinação dos níveis da areia e suspensão argilosa.

Considera-se o equivalente de areia, o valor médio dos dois ensaios, se entre eles não houver uma margem de erro superior a 1%.

Os resultados na análise granulométrica são registados em impresso próprio, e com eles traça-se a curva granulométrica. A Tabela 3.3 descreve as categorias das frações granulométricas.

Tabela 3.3 - Categorias das frações granulométricas.

Seixo grosso	60 a 20 mm
Seixo médio	20 a 6 mm
Seixo fino	2 a 6 mm
Areia grossa	2 a 0,6 mm
Areia média	0,6 a 0,2 mm
Areia fina	0,2 a 0,074 mm
Material de diâmetro equivalente inferior a	0,074 mm

