



4. INTRODUÇÃO

É desconhecida a origem dos blocos de alvenaria de pedra utilizados na edificação do castelo de Almourol.

Foi realizado um estudo a um conjunto de amostras, caídas das muralhas do castelo para, por um lado caraterizar os materiais constituintes e determinar a sua origem, por outro lado conhecer as suas características físico-mecânicas para eventuais intervenções na correção de patologias existentes.

Este estudo consistiu, inicialmente, num conjunto de imagens obtidas por observação ao microscópio e, posteriormente, numa série de ensaios.

4.1. ENSAIOS

Foram realizados os ensaios para a determinação da porosidade, da absorção de água por capilaridade, da velocidade de propagação de ultra-sons, do desgaste em meio húmido (slake duability), da resistência à compressão simples (uniaxial) e da resistência à carga pontual em laboratório e, posteriormente, foi realizado “in situ” o ensaio com o esclerómetro, visto tratar-se de um ensaio não destrutivo.

4.1.1. Ensaio em Laboratório

4.1.1.1. Introdução

Não havendo documentação sobre a origem do granito utilizado para a construção das muralhas e da torre de menagem do castelo de Almourol, procedeu-se à análise de uma amostra retirada das muralhas do castelo. Trata-se de um granito de cor clara com predominância de feldspato e quartzo, com cristais de biotite e alguns minerais ferromagnesianos. Tem granulometria média e apresenta semelhanças com o granito existente na zona de Portalegre e Alpalhão.

Este granito tem localização no Lugar de Maria Ribeira da tapada dos veados, freguesia de Santa Eulália, concelho de Elvas e Distrito de Portalegre.

Através da figura 57, numa análise macroscópica, verifica-se que se trata de um granito com partículas de dimensão média a fina, predominantemente biotítico, com cor cinzenta homogénea.

Algumas heterogeneidades ocorrem raramente (encraves e filonetes pegmatíticos).



Figura 57. Fotografia macroscópica do granito de Portalegre.



Este tipo de granito calco-alcálico ocorre no núcleo da estrutura anular de Santa Eulália, no Alto Alentejo.

A exploração deste granito é feita por Pedreiras com fracturação bastante favorável à extração de bloco com dimensões de interesse comercial.

No catálogo sobre rochas ornamentais portuguesas, publicado pelo Ministério da Indústria e Energia, encontra-se informação sobre este granito que apresenta as seguintes características físico-mecânicas:

- 1-Resistência mecânica à compressão – 175,5 MPa
- 2-Resistência mecânica à compressão após teste de gelividade - 138,0 MPa
- 3- Resistência mecânica à flexão - 15,7 MPa
- 4- Massa volúmica aparente – 2643 Kg/m³
- 5-Absorção de água à P. At. N.- 0,19 %
- 6-Porosidade aberta - 0,51 %
- 7-Coefficiente de dilatação linear térmica – 10° per 5,7° C
- 8-Resistência ao desgaste – 0,2mm
- 9-Resistência ao choque: altura mínima de queda - 70cm

Após 25 ciclos de gelo-degelo não se notou qualquer alteração na cor ou na estrutura dos provetes.

É uma rocha com utilização recomendada tanto para exteriores como para interiores.

Numa análise microscópica constata-se a presença dos seguintes minerais:

- Minerais essenciais: Microclina;
Oligoclase;
Quartzo;
Biotite;
- Minerais acessórios: Moscovite;
Esfena;
Titanite;
Zircão;
Apatite;
- Minerais opacos: Rocha de textura hipodimórfica granular com muito ligeira alteração dos feldspatos em caulinite.



Após toda esta análise do granito de Portalegre através de referências bibliográficas foram realizados ensaios para aferir algumas propriedades geotécnicas das pedras aplicadas na edificação das muralhas e torre de menagem do castelo de Almourol.

4.1.1.2. Preparação dos provetes

Para a realização dos ensaios foram preparados um conjunto de provetes extraídos de pedras caídas junto às muralhas do castelo.

Inicialmente procedeu-se ao corte das pedras para preparação dos provetes (figura 58).



Figura 58. Corte da pedra para preparação dos provetes.

Foram extraídos da rocha vários provetes com dimensões normalizadas (figura 59).



Figura 59. Provetes com dimensões normalizadas.

Após o corte, os provetes, foram identificados (figuras 60 e 61).



Figura 60. Provetes identificados.



Figura 61. Provetes identificados.

4.1.1.3. Ensaio para a determinação da Porosidade

O ensaio para determinação da porosidade foi realizado de acordo com a norma EN1926, utilizando o equipamento, representado na figura 8. Para a saturação em vácuo, é necessário um exsiccador, um compressor e um conjunto de tubos de borracha e válvulas. Requer um depósito de água destilada e um balão erlenmeyer que é colocado entre o compressor e o exsiccador.

Para a porosidade é necessário conhecer o volume de vazios cuja determinação obriga a submeter as amostras a vácuo para retirar todo o ar dos poros antes de saturar.

Na figura 62 pode ver-se a constituição do equipamento.

Legenda:

1- Exsicador

2-Água destilada

3-Compressor

4- Válvulas W, V, A

5-Água

6-Manómetro

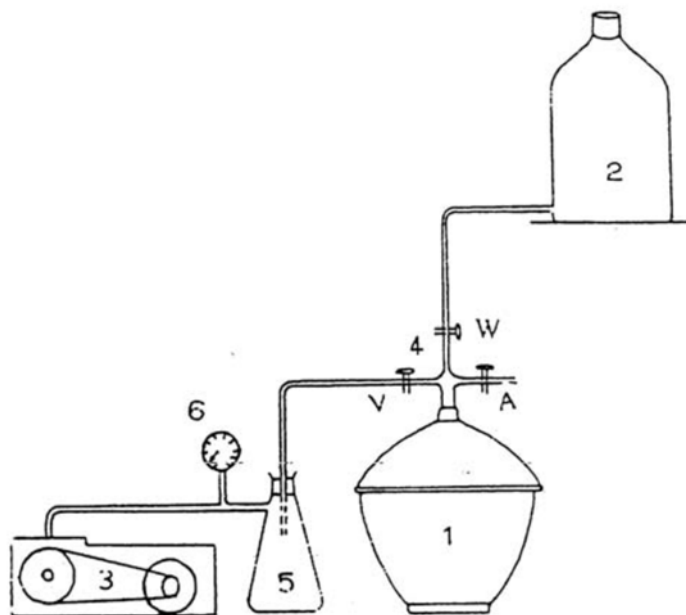


Figura 62. Equipamento para a determinação da porosidade.

4.1.1.3.1. Aparelhos e utensílios

Foi utilizado neste ensaio um exsicador, um compressor, um manómetro, balão de erlenmeyer e água destilada.

4.1.1.3.2. Procedimento

O ensaio para determinar a porosidade aberta consistiu em submeter os corpos de prova de granito a vácuo (cerca de 0.7 mbar), como se demonstra na figura 63, durante três horas.



Após este período, os provetes são saturados em água e submetidos, novamente, a vácuo durante um novo período de três horas.

As amostras foram colocadas no excicador fechando-se as válvulas A e W e abrindo a válvula V, estabelecendo-se assim o vácuo.

Ao fim de três horas, fechou-se a válvula V e abriu-se a válvula W a fim de deixar entrar água no excicador (lentamente) de modo a que as amostras ficassem submersas.

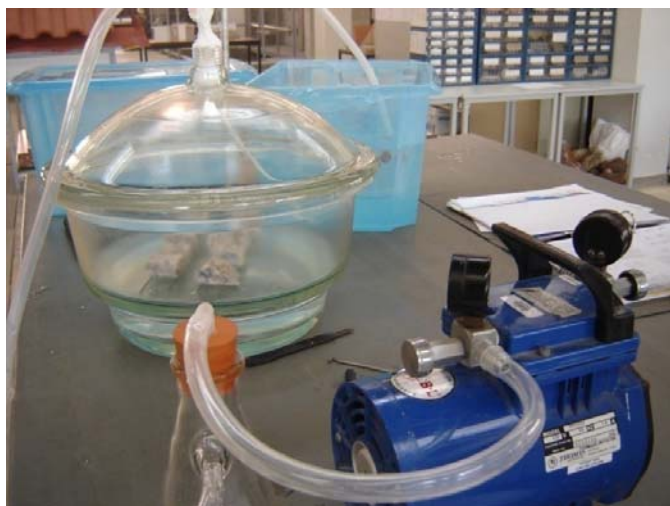


Figura 63. Amostras colocadas no excicador.

Novamente, a válvula W foi fechada e a válvula V aberta, restabelecendo-se o vácuo por mais três horas.

Ao fim das três horas, a válvula V foi fechada e a bomba de vácuo desligada.

Nesta fase a válvula A foi aberta deixando entrar ar no excicador até ser restabelecida a pressão atmosférica, o que provoca uma pressão adicional que força, ainda mais, a entrada da água nos poros dos provetes (figura 64).



Figura 64. Processo de restabelecimento da pressão atmosférica.



A porosidade aberta foi determinada pela seguinte expressão:

$$P (\%) = (W_{\text{sat}} - W_{\text{seco}}) / (W_{\text{sat}} - W_{\text{submerso}}) \times 100$$

[3.1]

em que

W_{sat} – peso da amostra saturada

W_{seco} – peso da amostra seca

W_{submerso} – peso da amostra saturada imersa em água (figura 65)

Na figura 65 pode ver-se o equipamento utilizado para a realização das pesagens submersas, balança digital de alta precisão e balde.



Figura 65. Processo para obtenção do peso da amostra saturada imersa em água, W_{submerso} .

No quadro 2 estão projetados os resultados deste ensaio.



Quadro 2. Resultados obtidos no ensaio de porosidade.

Resultados do Ensaio de Porosidade							
Referência dos Provetes	Massa submersa Msub (g)	Massa Saturada Msat (g)	Massa seca Ms (g)	Volume $V=(M_{sat}-M_{sub})/\rho_w$ (cm ³)	Volume dos poros $V_v=(M_{sat}-M_s)/\rho_w$ (cm ³)	Porosidade $n=(100V_v/V)\%$ (%)	Absorção de Água $M_{sat}-M_s/M_s \times 100$ (%)
A	1385,7	2245,7	2234,2	860,000	11,500	1,34	0,51
B	1366,5	2206,6	2195,4	840,100	11,200	1,33	0,51
C	1367,9	2208,7	2198,3	840,800	10,400	1,24	0,47
D	1508,6	2433,7	2424,4	925,100	9,300	1,01	0,38
E	1534,3	2475,8	2465,8	941,500	10,000	1,06	0,41
F	1529,5	2468,5	2458,4	939,000	10,100	1,08	0,41

ρ_w = Massa específica da água (Kg/m³)

No gráfico 1 verifica-se, como seria espectável, que com o aumento da porosidade há um aumento proporcional da absorção de água.

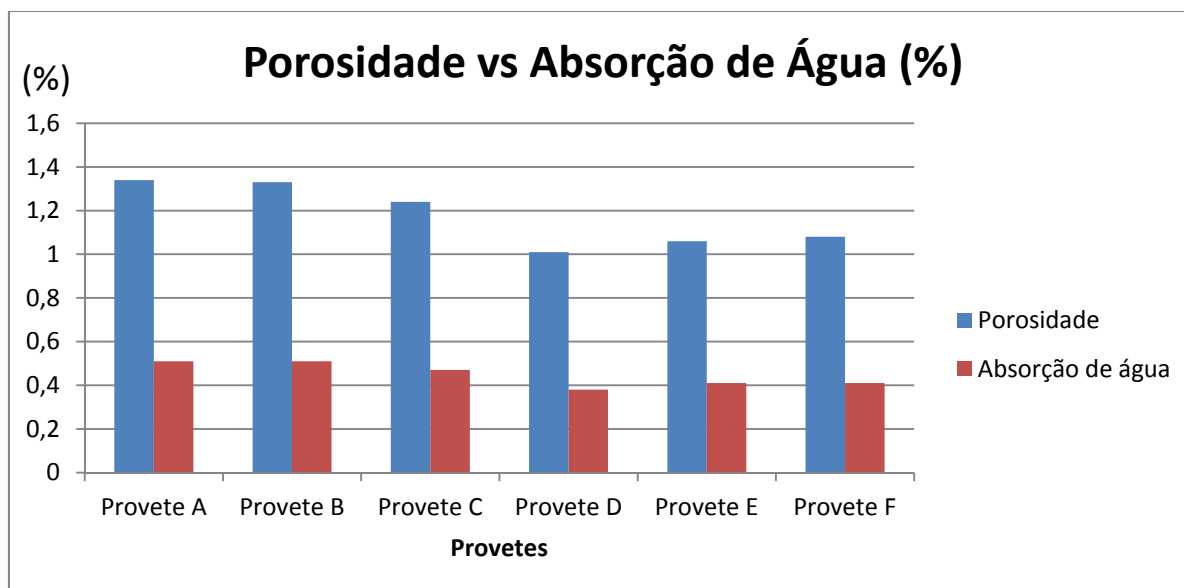


Gráfico 1. Relação de porosidade com absorção de água.



4.1.1.3.3. Conclusão

Na análise dos resultados constata-se que as amostras com maior valor de porosidade vão ter um valor de absorção de água, também, mais elevado.

4.1.1.4. Ensaio de Absorção de água por capilaridade

Através da absorção capilar poderá obter-se o preenchimento dos espaços intersticiais, poros ou canais existentes nas rochas, sendo esta absorção devida à existência de uma tensão superficial.

Entende-se por capilaridade o transporte de líquidos através dos poros pela existência de uma tensão superficial existente nos tubos capilares.

Este ensaio é descrito na norma NP EN 1925:2000, sendo apenas aplicado a pedras naturais cuja porosidade aberta seja superior ou igual a 1%.

A estimativa da água absorvida por capilaridade baseia-se na medição do peso dos provetes imersos ao longo de vários intervalos de tempo.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade pode ser estimado através da seguinte expressão:

$$C=(m_i-m_d)/(A\sqrt{t_i})$$

[3.2]

em que,

C= Coeficiente de absorção de água

m_i = Massas sucessivas do provete durante o ensaio (g)

m_d = Massa do provete seco (g)

A= Área da face imersa em água (m²)

t_i = Tempos decorridos desde o início do ensaio (s)

4.1.1.4.1. Aparelhos e utensílios

Foi utilizado um recipiente com base plana (figura 66), de material não absorvente, sobre o qual foram colocados os provetes (figura 67).

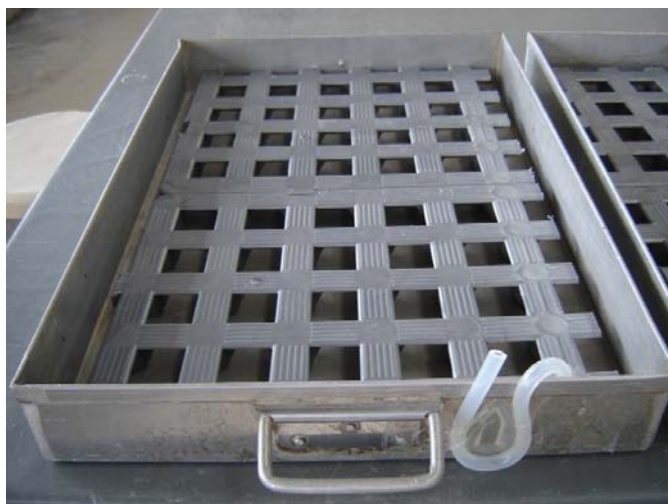


Figura 66. Recipiente com base plana, de material não absorvente.



Figura 67. Colocação dos provetes.

No recipiente foi colocado um dispositivo que permitiu assegurar um nível de água constante (figura 68).

Foi utilizado um cronómetro com resolução de um segundo para controlar os tempos de medição.



Figura 68. Dispositivo que permitiu ter um nível de água constante.

Na secagem dos provetes foi utilizada uma estufa e para a pesagem dos provetes uma balança com precisão de 0,01g.

4.1.1.4.2. Procedimento

Efetuuou-se a secagem dos provetes na estufa até atingirem massa constante e de seguida foram colocados no exsicador até atingirem a temperatura ambiente.

De seguida efetuou-se a pesagem (md) e medições dos provetes, calculando-se a área da base a ser imersa.

Foram colocados os provetes no suporte que se encontrava no recipiente de base plana introduzindo-se, de seguida, uma altura de água de cerca 3mm acima da base dos provetes, como demonstra a figura 69, acionando-se o cronómetro.



Figura 69. Altura de água de 3mm acima da base dos provetes.

Durante o ensaio o nível de água foi mantido constante através da adição de água. Os resultados obtidos foram os representados no quadro 3:

Quadro 3. Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade				
	Peso inicial Ms (g)	Peso após as 72 horas Msat (g)	Absorção de Água $Msat - Ms / Ms \times 100$ (%)	Coefficiente de absorção de água C (%)
A	2327,0	2329,2	0,09	0,88
B	2191,7	2193,1	0,06	0,58
C	2445,6	2446,9	0,05	0,54
D	2192,4	2194,1	0,08	0,64
E	2417,1	2418,5	0,06	0,51
F	2452,5	2454,3	0,07	0,67
Média			0,07	0,64

4.1.1.4.3. Conclusão

Na análise dos resultados deste ensaio verifica-se que os valores obtidos na absorção de água são inferiores aos valores obtidos anteriormente no ensaio da porosidade.

Verifica-se, também, que em relação aos valores da pedra de granito de Portalegre, os valores para a absorção de água são 0,19%, valor inferior ao que aqui se determinou.

4.1.1.5. Ensaio para determinação da velocidade de propagação de Ultras sons

Este ensaio foi realizado segundo a norma inglesa, British Standards: BS 1881:Part 203 (1986).

Trata-se de um ensaio não destrutivo, muito utilizado para determinar as propriedades de vários materiais onde se incluem as rochas.

É muito utilizado nos estudos para a reabilitação de monumentos pois permite uma avaliação do estado de degradação das rochas.

Para a realização deste tipo de ensaio é muito utilizado o PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Test) apresentado na figura 70.



Figura 70. PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Test).

A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra sónicas longitudinais (m/s) permite avaliar, indiretamente, a coesão, a homogeneidade, o grau de alteração e a própria qualidade das rochas, através da deteção de fendas e sua profundidade e inclinação, e deteção de vazios.

A posição dos transdutores determina o tipo de transmissão que poderá ser direta, semidireta ou indireta conforme estes possam ser colocados em superfícies opostas e alinhados, em superfícies adjacentes ou na mesma superfície, respetivamente, como se demonstra na figura 71.

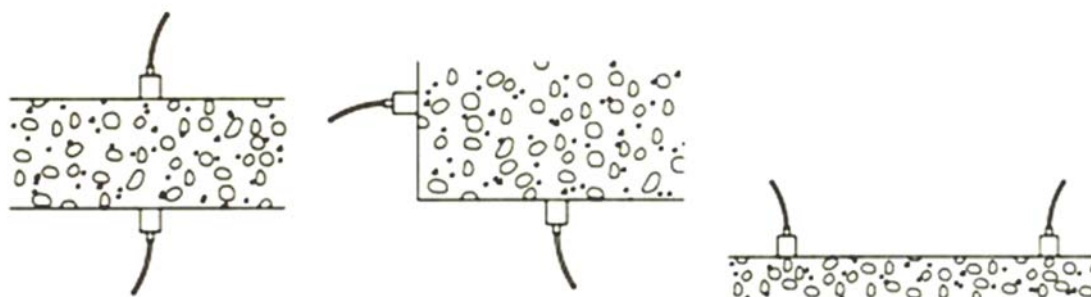


Figura 71. Possíveis posições dos transdutores.

Normalmente, a transmissão direta é a mais adequada uma vez que a máxima energia do impulso é transmitida segundo a direção normal ao transdutor emissor e o comprimento do percurso pode ser medido com maior precisão (Nepomuceno, 1999). No caso da aplicação em revestimentos de paredes, esta não é, obviamente, uma situação possível, pelo que se adota normalmente o método indireto, embora conduza a uma maior incerteza nos resultados (Santos *et al.*, 2003). Neste caso, a velocidade de propagação das ondas é uma velocidade “aparente”, uma vez que o percurso das ondas está sujeito a maior incerteza e se adota, geralmente, a mesma distância entre transdutores.

O ensaio de ultra-sons mede o tempo de transmissão do impulso emitido pelo transdutor emissor, através do elemento, até ao transdutor recetor, conhecendo-se o comprimento do mesmo elemento.

O cálculo da velocidade é dado pela expressão:

$$V = D / t \text{ (m/s)}$$

[3.3]

Onde:

V – Velocidade de propagação de ultra-sons (m/s)

D – Distância entre os transdutores

t - Leitura do aparelho (μ s)

4.1.1.5.1. Aparelhos e utensílios

Este ensaio é realizado com recurso ao equipamento de medição de velocidade de ultra-sons.

O aparelho é composto por um gerador de impulsos, mostrador digital e transdutores com frequência de 50 Hz

A figura 72 ilustra o ágar-ágar, material gelatinoso utilizado para promover um melhor contato entre os transdutores e os provetes.



Figura 72. Material gelatinoso para um melhor contacto entre os transdutores e os provetes.

4.1.1.5.2. Procedimento

O aparelho deve ser previamente calibrado utilizando-se uma barra padrão em que o tempo de propagação é conhecido.

Esta operação consiste em fazer coincidir a leitura do mostrador digital com o valor de referência para a barra padrão, através do botão de ajuste do aparelho (figuras 73 e 74).

No caso do aparelho utilizado neste trabalho, o tempo de transmissão da barra padrão foi de $25.9 \mu\text{s}$.

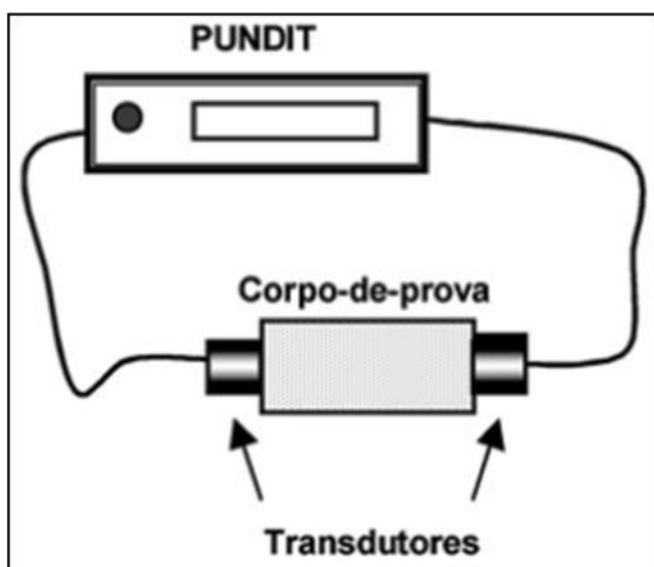


Figura 73. Demonstração de calibração do aparelho.



Figura 74. Calibração do aparelho.

Foi colocado o material gelatinoso, para melhorar a ligação entre o transdutor e a superfície (figura 75), garantindo que esta, inicialmente, se encontre isenta de sujidades, lisa e plana.



Figura 75. Colocação do material gelatinoso entre o transdutor e a superfície do provete.

Após a aplicação do material gelatinoso posicionaram-se os transdutores e a leitura foi feita segundo a direção longitudinal e transversal.

Foram estudados provetes saturados e provetes secos. Na figura 76 pode ver-se a orientação dos eixos considerados para o estudo.

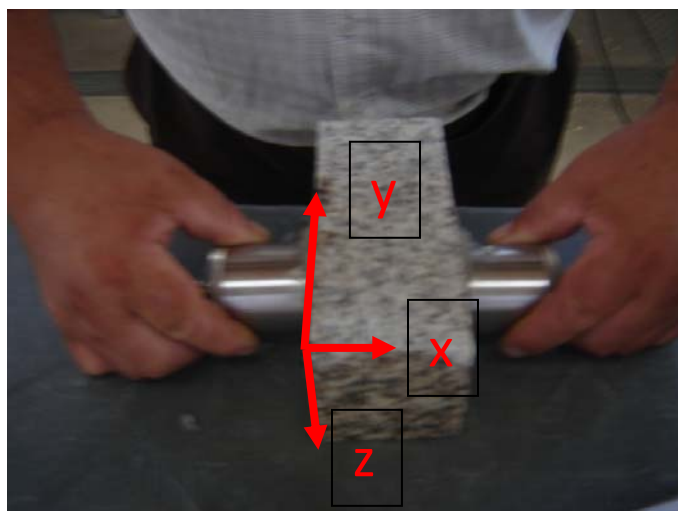


Figura 76. Três direções de leitura.



Nos quadros 4 e 5 estão apresentados os resultados obtidos para os provetes húmidos e para os provetes secos.

Quadro 4. Resultados obtidos de velocidade propagação nos provetes húmidos.

Resultados para os Provetes húmidos										
	Transversal x			Longitudinal y			Transversal z			
	t (μs)	D (mm)	V(m/s)	t (μs)	D (mm)	V(m/s)	t (μs)	D (mm)	V(m/s)	Média de Velocidades
A	17,5	70,73	4041,7	40,5	179,17	4423,9	17,5	70,48	4027,4	4164,3
B	16,3	68,39	4195,7	40,7	179,54	4402,2	15,5	68,83	4440,6	4346,8
C	16,1	68,54	4257,1	42,7	178,93	4190,4	15,9	68,82	4328,3	4258,6
D	17,2	72,00	4186,0	47,3	179,09	3786,3	17,2	72,35	4001,2	3991,2
E	17,9	72,81	4067,6	47,2	177,76	3766,1	17,5	73,74	4135,4	3989,7
F	16,8	72,69	4326,8	45,6	178,49	3914,3	17,9	72,37	4043,0	4094,7
Média										4140,9

Quadro 5. Resultados obtidos de velocidade propagação nos provetes secos.

Provetes secos										
	Transversal x			Longitudinal y			Transversal z			
	t (μs)	D (mm)	V(m/s)	t (μs)	D (mm)	V(m/s)	t (μs)	D (mm)	V(m/s)	Média de Velocidades
A	16,8	70,73	4210,1	41,4	179,17	4327,8	17,1	70,48	4121,6	4219,8
B	15,8	68,39	4328,5	41,9	179,54	4285,0	15,4	68,83	4469,5	4361,0
C	15,8	68,54	4338,0	42,7	178,93	4190,4	15,7	68,82	4383,4	4303,9
D	18,1	72,00	3978,0	47,5	179,09	3770,3	17,7	72,35	4087,6	3945,3
E	18,1	72,81	4022,6	48,3	177,76	3680,3	17,4	73,74	4237,9	3980,3
F	19,4	72,69	3746,9	48,1	178,49	3710,8	18,1	72,37	3998,3	3818,7
Média										4104,8



4.1.1.5.3. Conclusão

Seria expectável, neste ensaio, que a uma maior porosidade correspondesse uma menor velocidade de propagação dos ultras sons pois o som propaga-se mais lentamente na presença de vazios e, assim, quanto maior é a porosidade, menor será a velocidade propagação das ondas. No entanto, verificou-se que nos provetes húmidos deste ensaio, os maiores valores de velocidade de propagação dos ultras sons corresponderam aos provetes com maior porosidade (A, B, C).

Os provetes secos, como seria expectável, apresentaram uma média de valores mais baixa do que os provetes húmidos, pois neste caso, sem a presença da água no preenchimento dos vazios, os ultras sons propagam-se mais lentamente.

No entanto, seria de esperar que nos provetes secos a uma maior porosidade correspondesse, também, uma menor velocidade de propagação dos ultras sons, o que não aconteceu na maioria dos provetes. A análise destes valores incoerentes requer ensaios complementares e a repetição destes ensaios mantendo as condições dos ensaios agora realizados.

4.1.1.6. Desgaste em meio húmido (slake duability)

Este ensaio foi realizado utilizando o equipamento e método recomendados pela Sociedade Internacional da Mecânica das Rochas.

Tratando-se, neste caso, de rochas duras o tempo de ensaio foi de 30 minutos correspondendo a 600 rotações.

- **Aparelhos e utensílios**

Dois tambores cilíndricos de rede com abertura de 2,00mm, comprimento de 100mm e diâmetro de 140mm e bases metálicas, sendo uma delas amovível (figura 77);

Duas tinas para colocação dos tambores em imersão, com apoios para encaixe dos eixos dos tambores que estão ligados ao motor.



Motor que transmite ao cilindro um movimento de rotação com velocidade de 20 r.p.m. durante um período de 30 minutos para o caso em estudo.

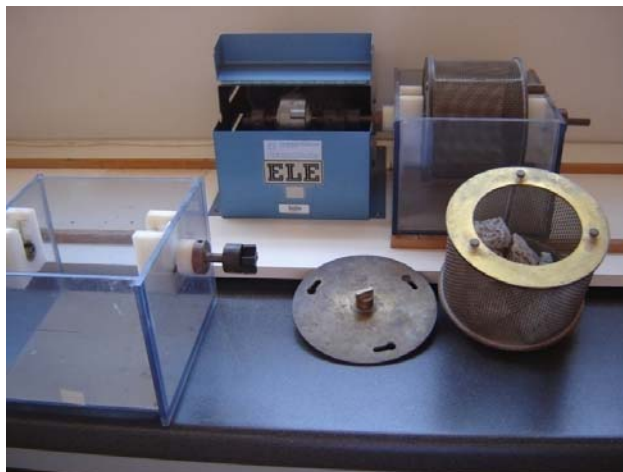


Figura 77. Tambor cilíndrico e tinas de água.

- **Procedimento**

Tomam-se de uma amostra representativa, dez fragmentos de forma irregular com massas variando entre 40 a 60g num total compreendido entre 450 a 550g.

Coloca-se a amostra no tambor e seca-se em estufa a 105°C durante pelo menos 24 horas. Após o arrefecimento, pesa-se e regista-se a massa A (MA) correspondente ao tambor e ao provete seco.

Introduz-se o tambor na tina com um nível de água máximo a 20.00mm abaixo do eixo do tambor (figura 78).



Figura 78. Colocação do tambor na tina.

Liga-se o eixo ao motor e aciona-se a uma velocidade de 20 r.p.m. durante o tempo estabelecido para o ensaio, ou seja, 30 minutos.

Retira-se o tambor, remove-se a tampa e seca-se na estufa, pelo menos 24 horas.

Após arrefecimento pesa-se (figura 79), e regista-se a massa B (MB), correspondente à massa do tambor e do provete.



Figura 79. Pesagem do tambor após secagem em estufa.

Repetem-se os dois últimos passos, determina-se no final do último a massa C (MC) do tambor e do provete seco correspondente ao segundo ciclo de ensaio.

Limpa-se o tambor e determina-se a sua massa D (MD).

Além destes dez fragmentos correspondentes ao provete seco, foram retirados da mesma amostra representativa outros dez fragmentos, mas estes destinados a um provete húmido (figura 80).



Figura 80. Conjunto de dez fragmentos destinados ao provete húmido.

O provete húmido esteve imerso durante 24 horas (figura 26) passando depois para o tambor e seguidamente procedeu-se de igual forma ao provete seco.



O valor do ensaio é apresentado sob a forma de percentagem correspondente à fração retida no tambor no final dos dois ciclos.

O valor do índice de durabilidade de slake (Id_2) ao fim do segundo ciclo é dado pela expressão:

$$Id_2 = (MC \sim MD) / (MA \sim MD) \times 100 \%$$

[3.4]

Nos quadros 6 e 7 apresenta-se a percentagem de material perdido no final do primeiro e do segundo ciclo, respetivamente.

Quadro 6. Percentagem perdida no 1º ciclo seco e 1º ciclo húmido.

1º Ciclo seco		1º Ciclo húmido	
MA (g)	2309,7	MA (g)	2308,7
MB (g)	2304,2	MB (g)	2303,8
MD=Peso do tambor (g)	1817,8		
Diferença	5,5	Diferença	4,9
Percentagem perdida (%)	1,19	Percentagem perdida (%)	1,00

Quadro 7. Percentagem perdida no 2º ciclo seco e 2º ciclo húmido.

2º Ciclo seco		2º Ciclo húmido	
MB (g)	2304,2	MB (g)	2303,8
MC (g)	2302,8	MC (g)	2302,2
MD=Peso do tambor (g)	1817,8		
Diferença	1,4	Diferença	1,6
Percentagem perdida (%)	0,29	Percentagem perdida (%)	0,33
Total percentagem perdida nos dois ciclos (%)	1,48	Total percentagem perdida nos dois ciclos (%)	2,33



- **Conclusão**

Após estes dois ciclos, com provetes inicialmente secos e húmidos, verifica-se que há uma maior percentagem de material perdido no final do ensaio que se iniciou com os provetes húmidos. Este fato ocorre porque nos provetes húmidos a água preenche os poros das amostras provocando tensões e, conseqüentemente, uma desagregação mais fácil.

4.1.1.7. Compressão uniaxial

O comportamento e resistência das rochas resulta das suas características mineralógicas, estruturais e texturais.

No caso da compressão uniaxial, é determinada a tensão que provoca a rotura dos provetes quando submetidos a uma tensão de compressão dada pela prensa através de uma carga constante.

Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D 2938 – 95, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of intact Rock Core Specimens*.

A resistência à compressão uniaxial exprime-se em MPa (N/mm²) e é determinada através da expressão

$$\sigma = F/A$$

[3.5]

onde,

σ – Resistência à compressão (MPa)

F - Força de rotura (N)

A – Área de secção transversal do provete (mm²)

Os provetes utilizados tinham forma regular com uma altura L, uma largura L1 e uma espessura L2 que se apresenta no quadro 8.

Quadro 8. Dimensões dos provetes utilizados no ensaio de compressão.

Provete	L(mm)	L1(mm)	L2(mm)	A(mm ²)
A	179,17	70,73	70,48	4985
B	179,54	68,39	68,83	4707
F	178,49	72,69	72,37	5260
C	178,93	68,54	68,82	4717
D	179,09	72,00	72,35	5209
E	177,76	72,81	73,74	5369

Como demonstrado na figura 81, para cada provete foram registadas as irregularidades e as descontinuidades existentes, tais como fissuras.



Figura 81. Conjunto de dez fragmentos destinados ao provete húmido.

4.1.1.7.1. Aparelhos e utensílios

Os ensaios foram realizados numa prensa de compressão ilustrada na figura 82.



Figura 82. Prensa para compressão.

Antes do ensaio todos os provetes foram submetidos a corte para regularização das faces (figura 83).



Figura 83. Regularização das faces dos provetes.

Os provetes utilizados tinham forma prismática, base quadrada de cerca de sete centímetros de aresta e altura de dezoito centímetros (figura 84).



Figura 84. Provetes com dimensões descritas no quadro 8.

4.1.1.7.2. Procedimento

Foram colocados os provetes, um de cada vez, na prensa e submetidos a uma velocidade de aplicação de carga de 13,2 KN/s e foram registados os valores correspondentes à tensão de rotura, como exemplificado nas figuras 85 e 86.

Os provetes apresentaram fratura frágil notando-se esmagamento dos cristais de feldspato que deixaram uma tonalidade branca na superfície de rotura.



Figura 85. Fase de compressão uniaxial.

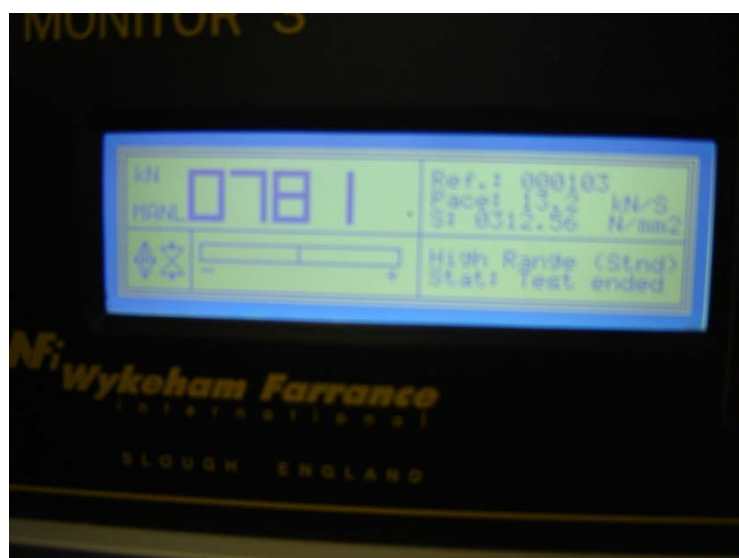


Figura 86. Valor da tensão de rotura.

No quadro 9 apresenta-se os resultados (tensão de rotura) obtidos no ensaio de compressão uniaxial dos provetes secos e dos provetes húmidos.



Quadro 9. Valores da tensão de rotura dos 6 provetes.

		Massa(g)	L(mm)	L1(mm)	L2(mm)	A(mm ²)	F(kN)	σ (MPa)
SECO	A	2327,0	179,17	70,73	70,48	4985	781	156,7
	B	2191,7	179,54	68,39	68,83	4707	629	133,6
	F	2445,6	178,49	72,69	72,37	5260	654	124,3
	Média do valor de resistência à compressão dos provetes secos							138,2
SATURADO	C	2192,4	178,93	68,54	68,82	4717	468	99,2
	D	2417,1	179,09	72,00	72,35	5209	504	96,7
	E	2452,5	177,76	72,81	73,74	5369	566	105,4
	Média do valor de resistência à compressão dos provetes saturados							100,4

4.1.1.7.3. Conclusão

Após a análise do último quadro de resultados exposto, verifica-se que a média do valor da resistência à compressão dos provetes saturados é significativamente mais reduzida que o valor da média da resistência à compressão dos provetes secos.

Em comparação com os valores da resistência à compressão de outras rochas graníticas semelhantes, nomeadamente da zona de Portalegre, verifica-se que o valor da média dos provetes secos está abaixo do valor da resistência mecânica à compressão, coincidindo com o valor da resistência mecânica à compressão após teste de gelividade.

Estes resultados são coerentes com os resultados dos diferentes ensaios realizados, nomeadamente com os valores obtidos para a porosidade. O granito de Almourol tem maior valor de porosidade, apresenta maior capacidade de absorção de água e menor resistência à compressão. Deve ter-se em consideração que, neste caso, se trata de uma pedra já utilizada na construção.



No gráfico 2 podemos observar os resultados do ensaio de compressão uniaxial em provetes secos e provetes saturados.

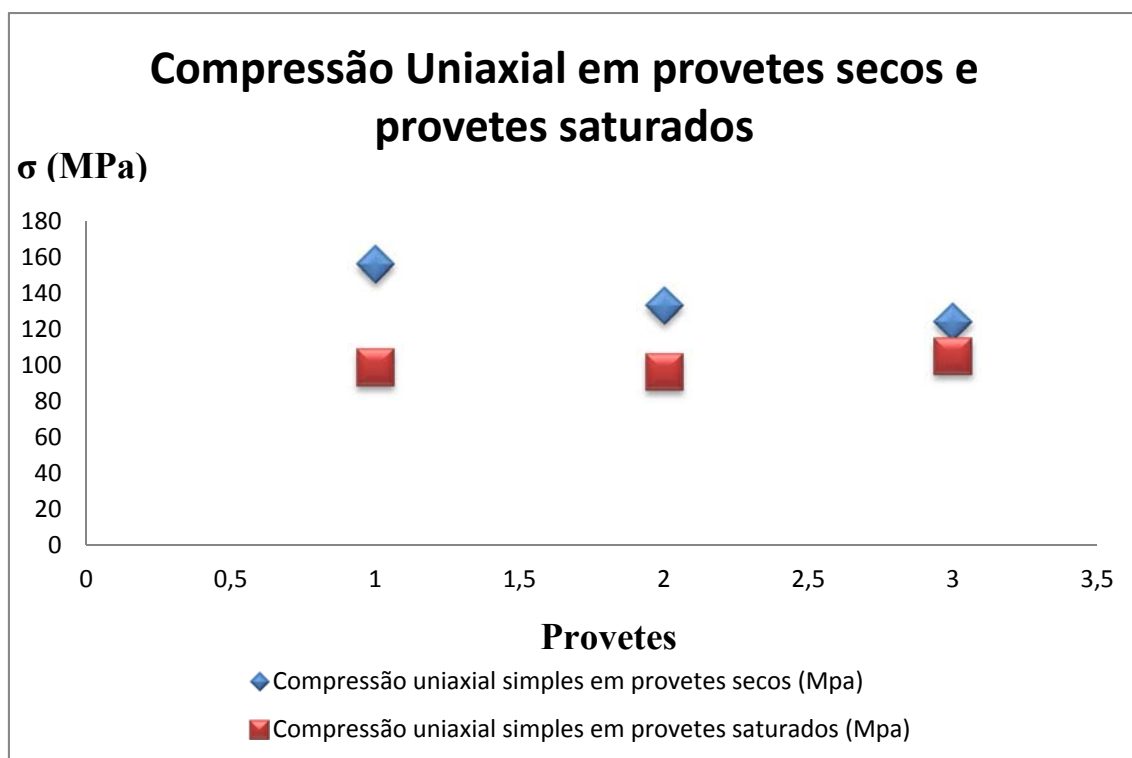


Gráfico 2. Valores do ensaio de compressão uniaxial em provetes secos e provetes saturados.

Já o resultado da média dos valores dos provetes saturados encontra-se muito abaixo dos restantes valores.

4.1.1.8. Ensaio para a determinação da Carga Pontual

Este ensaio realiza-se segundo as recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1985).

Trata-se de um ensaio expedito em que se pretende determinar a resistência dos materiais rochosos.

Pode ser utilizado para estimar outros parâmetros de resistência com os quais se relaciona como a resistência à compressão uniaxial, ISRM (1985).



A aplicação de uma carga concentrada P pelas ponteiros do equipamento, como se pode ver na figura 35, provoca, na amostra, uma força de tração normal à carga aplicada, que eventualmente provoca a rotura segundo um ou mais planos com a mesma orientação da carga, Broch e Franklin (1972).

O ensaio de carga pontual é mais tolerante às irregularidades das amostras do que os ensaios de carga não pontual executados sobre amostras irregulares, dado que a região de tensões críticas se vai situar no interior da amostra onde as irregularidades da superfície têm menor efeito.

O ensaio de carga pontual é muito realizado dado a sua facilidade de execução, simplicidade, fácil manuseamento e transporte do equipamento.

4.1.1.8.1. Aparelhos e utensílios

Na figura 33 pode ver-se o equipamento utilizado para a realização do ensaio. Este equipamento é constituído por:

- Macaco hidráulico montado em suporte metálico com duas barras verticais ligadas por uma guia transversal (figura 87);



Figura 87. Macaco hidráulico.

- Manómetro com sensibilidade adequada à resistência da rocha (figura 88);

- Sistema de aplicação de carga constituído por duas ponteiras cónicas de vértices arredondados com ângulos de 60° , colocadas no centro da peça guia transversal e na ponta do êmbolo do macaco (figura 88);



Figura 88. Duas ponteiras cónicas de vértices arredondados com ângulos de 60° .

Régua adaptada lateralmente, de modo a permitir determinar a distância D entre as ponteiras (figura 88).

4.1.1.8.2. Procedimento

Foi efetuada uma carga pontual no centro de cada um dos seis provetes até à rotura obtendo-se, assim, 12 partes da amostra (figura 89).



Figura 89. Três dos seis provetes após a rutura.

Inicialmente foi calculado o diâmetro equivalente:

$$\begin{aligned} D_e^2 &= D^2 \\ &= 4A / \pi \end{aligned} \quad \text{com } A = WD \quad [3.6]$$

Onde:

W= Largura da amostra

D = Espessura da amostra

De = Diâmetro equivalente

Utilizaram-se provetes regulares com as dimensões indicadas no quadro 9.

O valor do índice de resistência (I_s) é função do diâmetro equivalente (D_e) para os ensaios axiais, devendo fazer-se uma correção para obter um índice igual para toda a rocha podendo ser usado em correlações e classificações.

Como padrão, o índice de carga pontual é definido para o ensaio realizado sobre provetes cilíndricos de rocha com diâmetro D igual a 50 mm, em que a aplicação da carga P é feita na direção diametral, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$I_{s(50)} = \frac{P}{D^2} \quad [3.7]$$

Onde:

P= carga de rutura

D^2 =Diâmetro equivalente em cm^2

Para ensaios idênticos realizados sobre provetes cilíndricos com outros diâmetros, a relação P/D^2 deverá ser multiplicada por um fator corretivo F a fim de se obter o índice de carga pontual normalizado. O fator F obtém-se através de um gráfico apresentado no procedimento da ISRM.

$$I_s(50) = F \frac{P}{D^2} \quad F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45} \quad [3.8]$$

e $I_s = P / A$

Onde:

P = carga de rutura

A =Área em mm^2 [3.9]

Em rochas isotrópicas, em geral são necessários 10 ensaios válidos por cada tipo/qualidade de rocha que se pretende caraterizar, mas um número inferior poderá ser suficiente se a dispersão de resultados for pequena.

São considerados válidos somente os resultados dos ensaios cuja superfície de rutura contenha os pontos de aplicação da carga.

Com 10 ensaios, para calcular o valor representativo da resistência à carga pontual, é usual eliminarem-se os dois resultados mais elevados e os dois mais baixos, após o que se determina a média com os restantes 6 valores. Na figura 90 pode ver-se uma imagem com fraturas válidas e fraturas não válidas no ensaio de carga pontual.

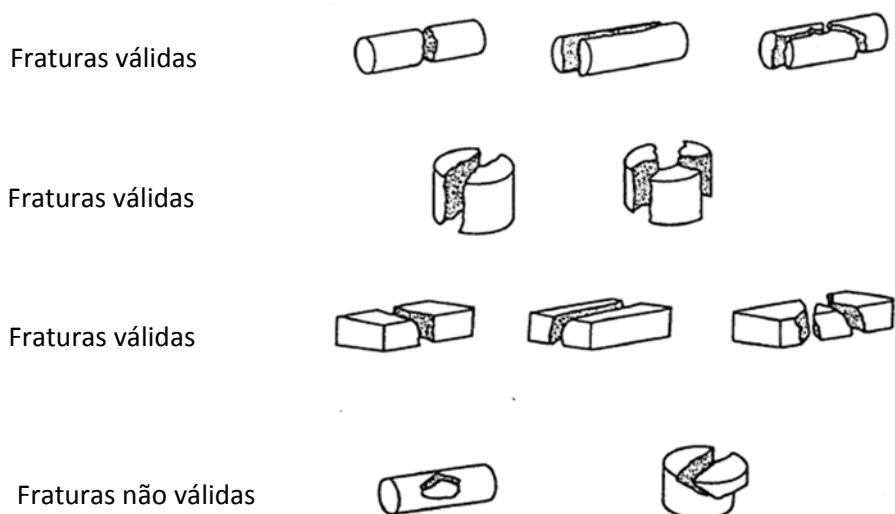


Figura 90. Fraturas válidas e não válidas nos ensaios de carga pontual.



O quadro 10 demonstra as dimensões dos provetes e os resultados obtidos no ensaio de carga pontual.

Quadro 10. Dimensão dos provetes e resultados do ensaio para determinação da carga pontual.

Dimensão dos provetes e resultados do ensaio para a determinação da Carga Pontual								
Proвете n°	W (mm)	D (mm)	A (mm) ²	D ² (mm) ²	Fator correção F	Carga P (N)	Índice de resistência Is (MPa)	Índice de resistência Is(50) (MPa)
1	35	33	1155	1089	0,83	5000	4,33	3,60
2	32	34	1088	1156	0,84	5000	4,60	3,87
3	34	31	1054	961	0,81	6000	5,69	4,61
4	34	32	1088	1024	0,82	8000	7,35	6,00
9	32	33	1056	1089	0,83	8000	7,81	6,50
11	32	32	1024	1024	0,82	10000	9,77	8,01
Média								5,44

O resultado final obtido é usualmente correlacionado com o valor da resistência à compressão simples σ_c através de uma relação linear proposta por Bieniawski:

$$\sigma_c = KI_{s(50)}$$

[3.10]

Para a rocha em estudo foi determinado o valor de K para provetes secos e provetes saturados (quadro 11).



Quadro 11. Valor de K para provetes secos e provetes saturados.

Média σ_{seco} Ensaio de compressão uniaxial (MPa)	Média σ_{saturado} Ensaio de compressão uniaxial (MPa)	Média do Índice de resistência $I_{s(50)}$ (MPa)	Valor de K obtido para provetes secos ($K = \sigma_{\text{c seco}} / I_{s(50)}$)	Valor de K obtido para provetes saturados ($K = \sigma_{\text{c saturado}} / I_{s(50)}$)
138,2	100,4	5,44	25	18

Bieniawski (1975) apresenta um fator de conversão K entre 20 e 24.

Podemos verificar que os valores de K obtidos, 18 e 24, estão muito próximos dos valores apresentados por Bieniawski (entre 20 e 24).

4.1.1.8.3. Conclusão

Como verificamos, os valores obtidos de K estão muito perto dos valores propostos por Bieniawski, apesar de se tratar de uma pedra já utilizada na construção.

O ensaio de carga pontual pode ser realizado com provetes de forma irregular e o equipamento é portátil o que permite a realização do ensaio *in situ*. Quando se conhece, previamente, a correlação entre o índice de resistência (I_{s50}) e a tensão de rotura (σ_c) para um determinado material torna-se uma grande vantagem o facto de se conseguir de tensão de rotura *in situ* a partir de amostras que não necessitem de ir a laboratório para corte, medição, retificação das faces e todo o trabalho envolvido nestas ações. Para além do trabalho e tempo dispendido, economicamente, ficará muito menos oneroso.

4.1.2. Ensaios “*in situ*” não destrutivos

4.1.2.1. Ensaio com esclerómetro

O esclerómetro ^[25] é um aparelho que permite obter *in situ*, de uma forma simples e não destrutiva, a resistência à compressão.

Sendo o esclerómetro um aparelho destinado a provetes de betão, neste caso de estudo pretendeu-se apenas avaliar a diferença de valores obtidos nas diferentes zonas estudadas, ou seja, zonas com diferentes graus de degradação da rocha.



Figura 91. Ensaio com esclerómetro.

Por se tratar de um ensaio de resistência superficial, os valores obtidos são apenas representativos de uma camada até cinco centímetros de profundidade. No entanto, o ensaio é útil para avaliar a homogeneidade do material, verificar se existe um nível mínimo de resistência e decidir sobre a necessidade de fazer ensaios mais completos.

A tensão de rotura à compressão, referente a provetes cúbicos ou cilíndricos de betão, pode ser estimada com base na sua correlação com o índice esclerométrico - valor obtido através de um impacto do esclerómetro sobre uma área de ensaio, sendo o resultado apresentado em percentagem.

[25] Esclerómetro-Aparelho que contém um veio de compressão no seu interior que ao ser comprimido contra a superfície de betão a ensaiar, a mola existente no seu interior é comprimida. Assim que o veio atinge o fim do seu curso, é libertada, instantaneamente, uma massa que choca com a sua extremidade interior. O choque é transmitido à superfície a ensaiar, a qual reage, provocando um ressalto. O mesmo veio transmite esse ressalto à massa móvel, que, ao deslocar-se, faz mover um ponteiro, visível no exterior do invólucro do aparelho, e regista o ponto máximo do ressalto da massa.

Quanto mais dura e compacta for a superfície do betão, maior será o ressalto.

O valor de referência obtido através da escala do aparelho – índice esclerométrico - permite avaliar o valor da resistência à compressão do betão e exprime-se em percentagem.

4.1.2.1.1. Descrição do ensaio

Foi utilizado neste ensaio um esclerómetro do tipo N normalmente utilizado em provetes de betão.

O ensaio decorreu em quatro zonas distintas do castelo.

Efetuuou-se o ensaio numa zona exterior às muralhas, na parte interior, na base e no topo da torre de menagem.

Na parte exterior da muralha o ensaio foi realizado em rocha muito alterada, tornando-se difícil a sua realização por serem quase inexistentes zonas planas (figura 92).



Figura 92. Rocha muito alterada.

Nos ensaios efetuados na torre de menagem, verificou-se a existência de rocha menos alterada (figura 93) mas, ainda assim, já com algum grau de desgaste.



Figura 93. Rocha menos alterada, mas já com algum grau de desgaste.



O quadro 12 demonstra os resultados obtidos no ensaio com esclerómetro.

Quadro 12. Valores obtidos do ensaio do esclerómetro.

Valores de Índice Esclerométrico			
LOCAL	SUPERFÍCIE	Nº IMPACTOS	Média Índice esclerométrico
Zona exterior das muralhas	Mais alterada	12	25
Zona interior das muralhas	Mais lisa	12	42
Base da torre de menagem	Menos alterada	12	36
Topo da torre de menagem	Menos alterada	12	48

4.1.2.1.2. Conclusão

Observando o quadro 12, verifica-se que na zona exterior das muralhas a média apresenta um valor mais baixo, como seria expectável, devido à exposição aos agentes erosivos.

Esta rocha apresenta-se com uma rugosidade mais acentuada e consequentemente com uma superfície mais alterada. Ao contrário, a zona interior das muralhas estando mais protegida apresenta uma menor rugosidade, com um valor de médio mais elevado, resultado de uma ação de desgaste menos acentuada.

Na torre de menagem, a média dos valores difere relativamente à base e ao topo da torre. Havendo um melhor estado de conservação da rocha no topo da torre de menagem, a textura é mais uniforme e o grau de alteração é menor, seria de esperar uma diferença de resultados relativamente à base.



A correlação feita entre estes valores e os resultados obtidos no ensaio de compressão seria mais precisa se a rocha fosse a mesma, o que de todo não seria possível por se tratar de rocha pertencente ao edificado, no entanto, não sendo a mesma rocha têm características muito aproximadas o que possibilita uma avaliação de resultados minimamente aceitáveis.

4.2. Análise de resultados dos ensaios efetuados

Como seria expectável, os valores do ensaio de absorção de água vão ser mais elevados nas amostras com maior porosidade e em relação com os valores da pedreira de granito da zona de Portalegre, os valores obtidos são superiores.

Verificou-se também, que no ensaio de ultras sons as amostras com maior porosidade apresentaram valores mais elevados de velocidade de propagação dos ultras sons, o que não parece coerente pois esta velocidade é maior em rochas de menor porosidade.

No ensaio de desgaste em meio húmido os provetes húmidos apresentaram valores de desgaste mais elevados, originados pelas tensões exercidas pela água que preenche os poros da rocha e provoca a sua desagregação.

Também no que diz respeito ao valor da média da resistência à compressão, verificou-se que esta é mais reduzida nos provetes saturados.

Em comparação com os valores da resistência à compressão de outras rochas graníticas semelhantes, nomeadamente da zona de Portalegre, verifica-se que o valor da média dos provetes secos está abaixo do valor da resistência mecânica à compressão, coincidindo com o valor da resistência mecânica à compressão após teste de gelividade.

Estes resultados são coerentes com os resultados dos diferentes ensaios realizados, nomeadamente com os valores obtidos para a porosidade. O granito de Almourol tem maior valor de porosidade, apresenta maior capacidade de absorção de água e menor resistência à compressão.

No ensaio com o esclerómetro, verificou-se que na zona exterior das muralhas a média apresenta um valor mais baixo, como se previa, devido à exposição aos agentes erosivos.

Esta rocha apresenta uma rugosidade mais acentuada, resultado da maior alteração superficial. Ao contrário, a zona interior das muralhas estando mais protegida apresenta



uma menor rugosidade, com um valor de médio mais elevado, resultado de uma ação de desgaste menos acentuada.

Na torre de menagem, a média dos valores difere relativamente à base e ao topo da torre.

Havendo um melhor estado de conservação da rocha no topo da torre de menagem, a textura é mais uniforme e o grau de alteração é menor, seria de esperar uma diferença de resultados relativamente à base.

4.3. Conclusão

Os ensaios realizados permitiram obter um conjunto de parâmetros que caracterizam o material, nomeadamente no que se refere à resistência, à capacidade de carga, ao peso próprio e à alterabilidade.

O estudo realizado foi meramente académico.

Pretendeu-se conhecer os ensaios, obter os parâmetros e as correlações entre parâmetros. No caso do estudo para uma intervenção seria necessário realizar um levantamento no local, proceder à identificação dos vários tipos de granitos existentes e à repetitiva caracterização.

Conhecidas as características das pedras utilizadas é possível seleccionar, de forma mais criteriosa, as pedras a utilizar em possíveis intervenções.