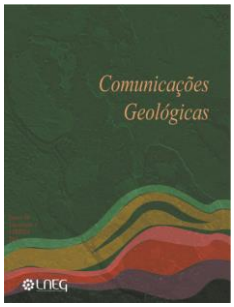
Versão online: http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/208

Comunicações Geológicas

Comunicações Geológicas (2015) 102, 1, 83-90
ISSN: 0873-948X; **e-ISSN:** 1647-581X

Geologia de Engenharia de rochas xistosas: os xistos negros da EN17 em Coimbra e os filitos de Vila Velha de Ródão

Engineering Geology of schist rocks: the EN17 black schist in Coimbra and the Vila Velha de Ródão filites



M. Quinta-Ferreira[1,2*], I. Fernandes[3], F. Loureiro[4], J. Alves[1], R. Perdigão[1], M. dos A. Ribeiro[4], P. S. Andrade[1,2], J. Neves[5]

Artigo original
Original article

© 2015 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: Apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na caracterização de rochas xistosas provenientes de duas áreas distantes em Portugal: os xistos negros da estrada EN17 em Coimbra e os filitos de Vila Velha de Ródão (VVR). Na EN17 correspondem a taludes escavação, enquanto em VVR correspondem a um maciço onde se pretendeu efetuar uma escavação subterrânea. A caracterização e os ensaios realizados foram adaptados ao tipo de amostras disponíveis, que são blocos de rocha na EN17 e tarolos de sondagens em VVR. Descreve-se a rocha, apresentam-se as propriedades índice, as propriedades mecânicas e a durabilidade. Comparam-se os resultados obtidos, entre si com resultados publicados. Confirma-se a variabilidade das características mecânicas devido à anisotropia, à composição mineralógica e ao grau de alteração das rochas. Analisam-se as relações entre ensaios expeditos, martelo Schmidt e carga pontual, com a resistência.

Palavras-chave: Xistos, propriedades geotécnicas, ensaios de laboratório.

Abstract: The results obtained in the characterization of schist rocks from two distant areas in Portugal are presented: black shales of the road EN17 in Coimbra and phyllites of Vila Velha de Ródão (VVR). At EN17 the shale is exposed on excavation slopes, while in VVR the phyllites belong to a rock mass where an underground excavation is planned. The characterization and tests performed were adapted to the type of samples available, which are blocks of rock at EN17 and drill cores at VVR. The rock is described, the index properties, the mechanical properties and the durability is presented. The results obtained were compared both among themselves, but also with other already published results. It is confirmed that the variability of the mechanical properties is essentially due to anisotropy, mineralogical composition and weathering. The relationship between expeditious tests, Schmidt hammer and point load, and strength is analyzed.

Keywords: Schist, geotechnical properties, laboratory tests.

[1] Dep. Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. Rua Sílvio Lima. 3030-790 Coimbra.
[2] Centro de Geociências, Universidade de Coimbra, Rua Sílvio Lima, Pólo II, 3030-790 Coimbra.
[3] Dep. Geologia, FCUL/ICT, Edifício C6, Campo Grande, 1749-016 Lisboa.
[4] Dep. Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, FCUP/ICT, Rua Campo Alegre 687, 4169-007 Porto.
[5] EDP Produção S.A.
[*] Autor correspondente/Corresponding author: mqf@dct.uc.pt,

1. Introdução

A construção de estruturas de engenharia civil exige que sejam devidamente caracterizados os maciços rochosos interessados, o que implica a determinação das propriedades físicas, mecânicas e de alterabilidade do material rocha. Nos casos em que os maciços são constituídos por rochas anisotrópicas a determinação das propriedades e a previsão do comportamento é uma tarefa mais complexa dado que as propriedades mecânicas destas rochas são fortemente condicionadas pela direção de aplicação das forças relativamente aos planos de clivagem ou foliação (Hudson e Harrison, 1997; Niandou *et al.*, 1997; Nasseri *et al.*, 2003; Gao *et al.*, 2015). Estudos diversos permitiram definir curvas típicas que relacionam os valores de resistência à compressão com o ângulo entre a direção de aplicação da força e os planos de clivagem ou de foliação (Brown *et al.*, 1977), sendo que os valores mais elevados de resistência tendem a ser obtidos quando a força é aplicada perpendicularmente ou paralelamente (*e.g.* Goshtasbi *et al.*, 2006). Há no entanto outros fatores que condicionam a resistência à compressão, tais como a litologia e o grau de alteração da rocha. Nestas rochas anisotrópicas, as variações de litologia podem observar-se à escala da amostra de mão, ou seja, à escala dos provetes ensaiados em laboratório, mas também à escala microscópica. Pinho (2003) refere que é comum encontrar intercalações de rochas essencialmente pelíticas com níveis mais grauvacóides, apresentando propriedades mecânicas diferentes conforme a litologia predominante.

A alteração dos maciços expostos em taludes depende de um conjunto de fatores que podem dividir-se em internos (relativos ao maciço), externos (ex. condições atmosféricas e vegetação) e geotécnicos, estes relacionados com as características geométricas e de drenagem do talude (Huisman, 2006). As características internas são de grande importância, tal como atrás referido, uma vez que rochas de natureza e composição diversa oferecem diferente resistência à alteração.

Para a caracterização geomecânica dos maciços rochosos é importante determinar a resistência do material rocha, habitualmente obtida em ensaios de compressão uniaxial. Atendendo à necessidade de preparação cuidadosa dos provetes para ensaios, são frequentemente utilizados ensaios expeditos tais como o martelo de Schmidt e a carga pontual, estando publicadas várias correlações entre os diferentes ensaios (*e.g.* Broch e Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; Greminger, 1982; Forster, 1983).

O estado do conhecimento das características geotécnicas das rochas metassedimentares que afloram na zona centro, pode ser obtido, por exemplo, a partir dos trabalhos de Andrade (2004), Andrade e Saraiva (2010), Loureiro *et al*. (2015) e Quinta Ferreira *et al.* (2015). Embora exista um número elevado de estruturas de engenharia construídas nessa zona, destacando-se pontes, túneis, barragens ou taludes de escavação para vias de comunicação, alguns com mais de 100 anos, considera-se insuficiente o conhecimento atual das rochas metassedimentares. Procurando contribuir para a melhoria do conhecimento destas rochas, apresentam-se os resultados do estudo em dois tipos de estruturas: em taludes de escavação nos xistos negros da Estrada Nacional 17 (EN17) próximo de Coimbra e num local em que esteve prevista a construção de um túnel hidráulico, junto à aldeia de Foz do Cobrão, em Vila Velha do Rodão. Trata-se de dois maciços constituídos por rochas metassedimentares com forte anisotropia devida à foliação.

Os xistos negros da EN17 apresentam um comportamento evolutivo que tem levado à ocorrência de numerosas instabilizações de taludes, pelo que aqui se procura contribuir para o esclarecimento deste comportamento problemático. O Grupo das Beiras, pertencente ao Complexo Xisto-Grauváquico (GB-CXG) aflora nas duas zonas estudadas. São formações ante-Ordovícicas constituído alternâncias de metagrauvaques, com alternâncias de metassiltitos a metargilitos.

Analisam-se os aspetos comuns, procuram-se explicar as diferenças encontradas, comparando os resultados obtidos com outros já publicados e tecem-se algumas considerações acerca da especificidade destas rochas.

2. Materiais e métodos

Na EN17 as amostras de xistos negros foram recolhidas superficialmente em dois taludes de escavação, tendo sido designadas como Ceira e Cabouco. As amostras Ceira foram obtidas num talude recente, escavado menos de um ano antes da recolha das amostras. As amostras Cabouco (Fig. 1a) foram recolhidas num talude de escavação antigo, que se estima ter cerca de um século. São amostras constituídas por blocos de rocha, de dimensões variadas e de formas irregulares. Estes xistos negros encontram-se muito foliados e tectonizados. A idade dos xistos negros que afloram na faixa de cisalhamento Porto-Tomar, amostrados próximo de Coimbra, é atribuída ao Devónico ou eventualmente ao Silúrico, em consequência da imbricação tectónica destes níveis na sequência do Grupo das Beiras No local estudado próximo da aldeia de Foz do Cobrão, em Vila Velha de Ródão, as amostras recolhidas, designadas por amostras VVR (Fig. 1b), correspondem a filitos ante-Ordovícicos do Supergrupo Dúrico-Beirão, Grupo das Beiras. Afloram sob o sinclinal de orientação NW-SE de Vila Velha de Rodão. A estratificação é bem marcada e em muitos locais paralela à xistosidade, que constitui a foliação principal, em geral subvertical, com inclinação superior a 75 º. As amostras VVR foram selecionadas de sondagens à rotação, com recolha de testemunho de 50 mm de diâmetro, realizadas para o estudo geológico-geotécnico do maciço em profundidade. Atendendo a que a foliação é subvertical verifica-se que a foliação é subparalela ao eixo das sondagens (1 a 5 º), o que limita o estudo quanto à influência da anisotropia nas características mecânicas.

Na tabela 1 encontra-se informação sobre os trabalhos ou ensaios realizados com as amostras, a indicação das recomendações da International Society of Rock Mechanics (ISRM) que foram seguidas e os equipamentos utilizados. Atendendo às especificidades de cada um dos locais alguns dos ensaios foram realizados apenas num dos conjuntos de amostras. Destacam-se os ensaios de abrasão (Los Angeles) e de desgaste em meio húmido (Slake Durability), com interesse para as amostras Ceira e Cabouco de modo a caracterizar a resistência à abrasão. Os ensaios de caracterização física incluíram a determinação do teor em água, da porosidade, densidade e absorção de água. A caracterização mecânica foi realizada através

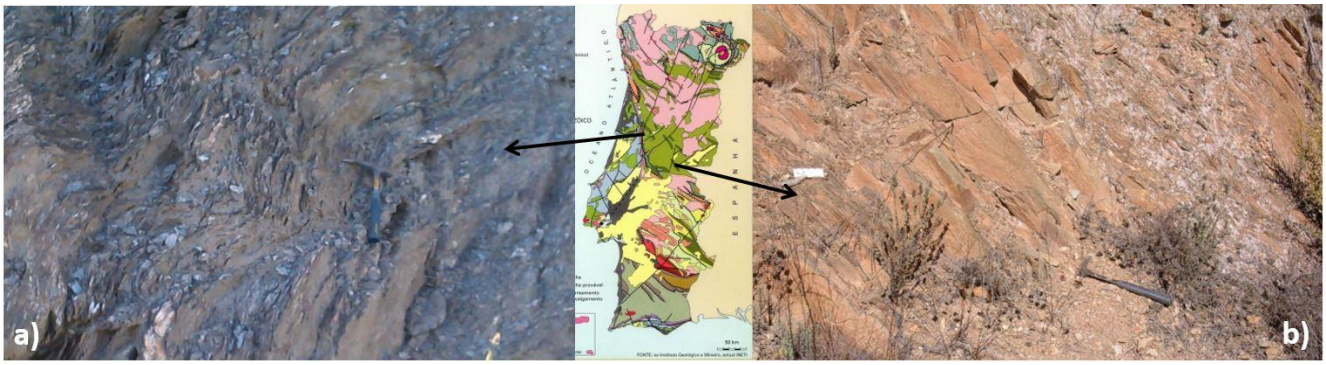


Fig. 1. Aspeto em afloramento: a) dos xistos negros de Coimbra no Cabouco; b) dos xistos de VVR.

Fig. 1. Outcrop view of: a) Coimbra black schist at Cabouco; b) of VVR schists.

Tabela 1. Procedimentos, normas e equipamentos utilizados.

Table 1. Procedures, standards and equipment used.

Tarefa ou ensaio	EN17	VVR
Descrição do maciço	ISRM (1979b; 1981)	ISRM (1979b; 1981)
Caraterização mineralógica	Difração de raio-X Philips	Análise petrográfica Nikon Eclipse E 400 POL
Teor em água, porosidade, densidade	ISRM (1979c) Parte 1: 3	----
Martelo de Schmidt	ISRM (1978b) CONTROLS, modelo 45-D0561	ISRM (1978b) CONTROLS, modelo 45-D0561
Carga Pontual	ISRM (1985) CONTROLS, modelo 58-E0048 Amostras saturadas, secas ao ar e em estufa	ISRM (1985) CONTROLS, modelo 58-E0048 Amostras secas ao ar
Los Angeles	ISRM (1978c) NP EN 1097-2 (2002)	
Slake durability test	ISRM (1979c) Parte 2: 4	----
Velocidade de propagação de ultrassons	----	ISRM (1978a) CONTROLS, modelo 58-E0048
Compressão uniaxial	----	ISRM, 1979a INSTRON, modelo 1343

dos seguintes ensaios: a) *in situ*, com determinação da dureza através do uso do Martelo de Schmidt; b) em laboratório, com determinação da velocidade de ultrassons, a realização de ensaios de carga pontual e de ensaios de compressão uniaxial. O Martelo de Schmidt foi utilizado em cinco ou seis pontos de ensaio, determinando a média para os valores mais altos em cada local.

A resistência à compressão uniaxial foi determinada com o ensaio de compressão uniaxial, quer estimada a partir da dureza de Schmidt, utilizando o ábaco de Miller assumindo-se um peso volúmico de 27 kN/m^3 (Knodel *et al*., 2007), quer com o ensaio de carga pontual. Para as amostras VVR, antes da realização dos ensaios de compressão uniaxial foi determinada a velocidade de propagação de ondas P, utilizando o método direto (ISRM, 1978a), num aparelho com frequência nominal de 54 kHz. De acordo com a norma ISRM (1979a) a relação altura/diâmetro dos provetes para os ensaios de compressão uniaxial deve ser de pelo menos de 2,5 a 3. Verificou-se que nestas rochas com clivagem/foliação muito fina, é difícil preparar provetes com a dimensão exata, ficando frequentemente os provetes danificados. Por essa razão, houve uma variação milimétrica na altura dos provetes, sendo o comprimento de referência de 125 mm. Os topos foram retificados para garantir o paralelismo necessário à execução do ensaio. Os provetes de menores dimensões, ou com topos irregulares, foram utilizados para os ensaios de carga pontual (ISRM, 1985), desde que o comprimento/diâmetro fosse superior a 1. Sempre que possível estes provetes foram ensaiados em duas posições distintas, de modo a obter-se a resistência paralelamente e perpendicularmente à foliação.

3. Resultados

3.1 Xistos negros da EN17 em Coimbra

Nos afloramentos dos xistos negros na EN17 em Coimbra, observa-se um grau de alteração moderado (W3) no talude de Ceira e muito alterado (W4) no Cabouco. O espaçamento médio das fraturas em Ceira é moderado (F3 – espaçamento de 200 a 600 mm), enquanto no Cabouco o espaçamento é próximo (F4 – espaçamento de 60 a 200 mm). Estas amostras correspondem a rochas xistosas de taludes que tendem a apresentar problemas de instabilidade. São constituídas principalmente por quartzo, caulinite, clorite, vermiculite, moscovite e rara pirite, conforme determinado por difração de raios-X (Fig. 2).

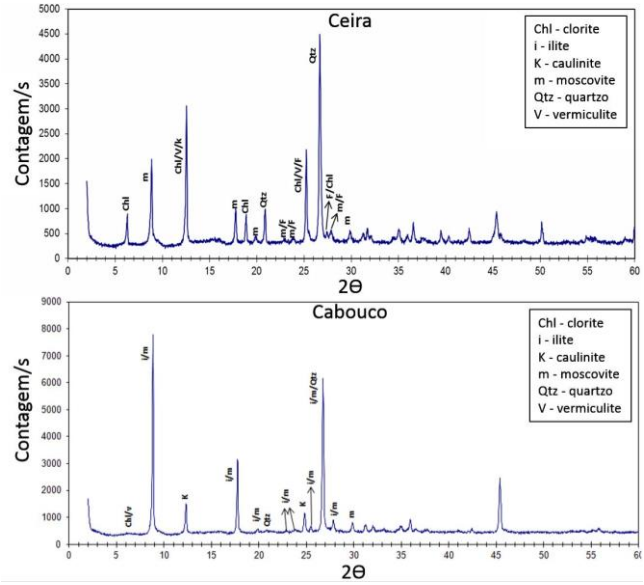


Fig. 2. Resultados do ensaio de difração dos Raios X para Ceira e Cabouco.

Fig. 2. X-ray diffraction results for Ceira and Cabouco.

Recorrendo à utilização do Martelo de Schmidt do tipo L, foi estimada a resistência à compressão uniaxial das amostras de Ceira, obtendo-se valores variando entre 24 MPa e 52 MPa, com uma média de 39,5 MPa e um desvio padrão de 10,2 MPa (Tab. 2). No Cabouco não foi possível utilizar o martelo de Schmidt porque o xisto se apresentava muito alterado e muito fraturado, não permitindo fiabilidade nos resultados.

Tabela 2. Estimativa da resistência à compressão uniaxial com base na dureza de Schmidt no talude de Ceira.

Table 2. Estimation of uniaxial compressive strength from Schmidt hardness (Ceira slope).

Locais	1A	2A	3A	4B	5B	6B
Dureza Schmidt	27	22	31	27	16	25
σ_c (MPa)	44	32	52	46	24	39
Média (MPa)			39,5			
Desvio padrão (MPa)			10,2			

O teor em água em várias condições de molhagem (Tab. 3), comparado com o teor em água natural, mostra um aumento após submersão durante 24 h, 48 h e por saturação no vácuo, que aumenta até 1,97 vezes nas amostras menos alteradas e até 3,36 vezes nas amostras maia alteradas, mostrando que a alteração aumentam os vazios da rocha e a sua capacidade de retenção de água.

Relativamente ao ensaio de carga pontual realizado em laboratório, o padrão de redução da resistência com o aumento do teor em água foi confirmado, tal como se ilustra na tabela 3. Obtiveram-se valores de $Is_{(50)}$ de 1,93 MPa para o xisto de Ceira e de 0,71 MPa para o xisto do Cabouco ensaiados com teores em água resultantes da secagem ao ar. Com a saturação das amostras a resistência diminuiu respetivamente para 85 % e para 70 % do inicial. Com a secagem em estufa a resistência aumenta respetivamente 175 % e 280 %. Estes valores mostram que as amostras mais alteradas sofrem maiores variações de resistência quer pela molhagem, quer pela secagem (Tab. 3) sendo portanto mais vulneráveis à ocorrência de instabilizações.

Tabela 3. Alguns resultados dos xistos negros.

Table 3. Black schists results.

Propriedades:	Ceira	Cabouco
Índice		
W_{nat} (%)	0,65	1,21
W_{24h} (%)	1,14	3,35
W_{48h} (%)	1,25	3,6
W_{sat} (%)	1,28	4,06
γ_d (kN/m^3)	27,3; 27,9$^{\#}$	25,3; 25,5$^{\#}$
n (%)	2,8; 2,9$^{\#}$	10,1; 10,6$^{\#}$
Resistência		
Martelo Schmidt	25	--
$Is_{(50)}$ nat (MPa)	1,93	0,71
$Is_{(50)}$ sat (MPa)	1,64	0,50
$Is_{(50)}$ seco (MPa)	3,38	1,99
σ_c (MPa)*	42	16
Abrasão		
Los Angeles	26	46
ID_2 sat (%)	96,8	93,4
ID_2 seco (%)	98,8	96,2

$^{\#}$ gama de valores

* calculado a partir do ensaio de Carga Pontual

Com a realização do ensaio de desgaste em meio húmido e a obtenção dos valores relativos ao segundo ciclo do Índice de Durabilidade (ID_2) confirmou-se que o xisto do Cabouco apresenta pior desempenho, por se encontrar mais alterado. O aumento da alteração tende a aumentar a porosidade, diminuindo

o peso volúmico e a resistência quer à abrasão quer à carga pontual (Fig. 3).

Da caracterização efetuada nos taludes de Ceira e Cabouco foi possível proceder à parametrização das classificações geomecânicas, apresentando-se a síntese dos resultados na tabela 4, confirmando as piores características do talude do Cabouco.

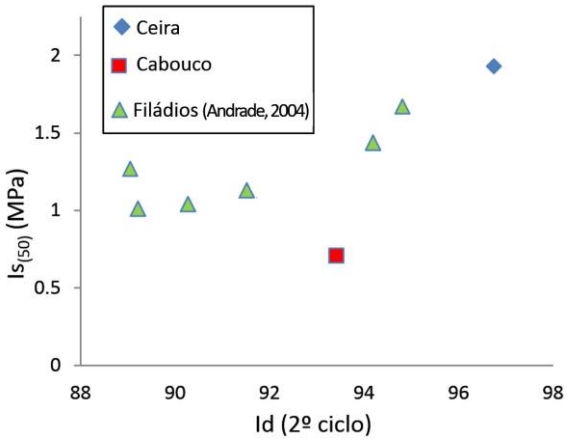


Fig. 3. Relação entre Id_2 e $Is_{(50)}$ nos xistos negros.

Fig. 3. Relation between Id_2 and $Is_{(50)}$ for the black schists.

Tabela 4. Classificações RMR e GSI aplicadas nos taludes dos xistos negros.

Table 4. RMR and GSI results for the black schist slopes.

	Ceira	Cabouco
RMR*	55	36
RMR classe	III	IV
GSI**	50	31
GSI***	42-52	23-33

* Bieniawski (1989)
** Usando a fórmula de Hoek (1994)
*** Usando o gráfico de Marinos e Hoek (2001)

3.2 Xistos de Vila Velha de Ródão (VVR)

A observação dos taludes das estradas existentes na área estudada mostra que o GB-CXG apresenta um padrão de alteração e fracturação muito heterogéneo, condicionado pelas alternâncias já referidas. Assim, as zonas predominantemente grauvacóides estão moderadamente alteradas (W3) e mostram fraturas próximas (F4), enquanto os níveis mais filitosos mostram fraturas em geral muito próximas (F5, espaçamento <60 mm), e estão muito alterados (W4). A foliação é evidente e mostra-se aberta, levando a que o maciço se fragmente facilmente. Foi utilizado o Martelo de Schmidt para determinar a dureza e estimar a resistência à compressão uniaxial nos afloramentos (Tab. 5), que varia entre 23 e 68 MPa, com 38,4 MPa de média e 20,9 MPa de desvio padrão.

O exame petrográfico permitiu confirmar que a litologia das amostras VVR apresenta variações tanto à escala macro como à escala microscópica, mostrando intercalações ricas em quartzo e domínios muito finos de composição pelítica. A sequência apresenta muito baixo grau de metamorfismo, estando preservada a estratificação. A observação microscópica revela que a rocha é dominantemente constituída por micas, quartzo microcristalino e matéria orgânica, apresentando uma textura anisotrópica muito fina (Fig. 4). Verifica-se, também a esta escala, que por vezes predomina o quartzo microcristalino correspondendo aos domínios grauvacóides.

Tabela 5. Estimativa da resistência à compressão uniaxial com base na dureza de Schmidt em talude junto à Foz do Cobrão.

Table 5. Estimation of uniaxial compressive strength from Schmidt hardness (Foz do Cobrão slope).

Locais	1	2	3	4	5
Dureza Schmidt	16	17	16	36	31
σ_c (MPa)	23	25	23	68	53
Média (MPa)			38,4		
Desvio padrão (MPa)			20,9		

Os tarolos de sondagens selecionados para a realização de ensaios de laboratório são constituídos por filito são (W1) a ligeiramente alterado (W2), com coloração cinzenta, bastante diferente da rocha amarelo-avermelhado observada à superfície. Conforme já referido, a foliação é subparalela ao eixo dos provetes (Fig. 5 e 6).

Na tabela 6 apresentam-se os valores da velocidade de propagação das ondas P (V_P) e da resistência à compressão uniaxial nos mesmos 18 provetes. As velocidades variam entre 521 m/s e 3378 m/s, com uma média de 1657 m/s e um desvio padrão de 711 m/s. O ensaio de resistência à compressão uniaxial mostrou uma média de 38,9 MPa, com um desvio padrão de 15,7 MPa, um mínimo de 4 MPa e um máximo de 77 MPa. A figura 6 mostra os padrões de rotura mais frequentes obtidos nos ensaios.

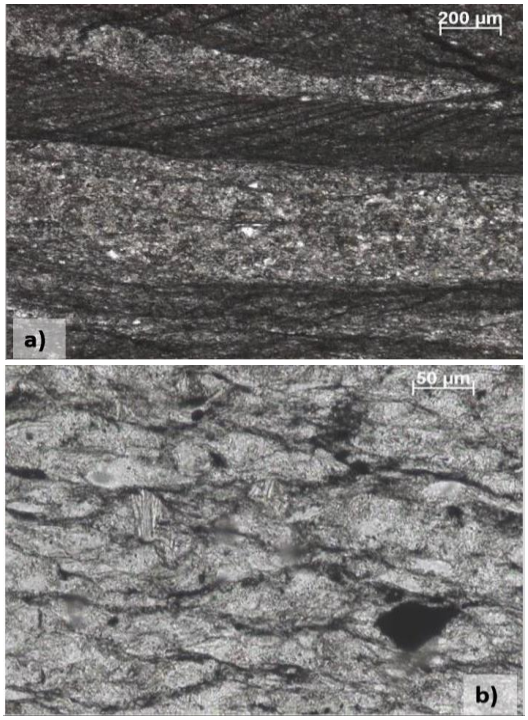


Fig. 4. Aspetos ao microscópio ótico das amostras VVR, mostrando níveis com quartzo microcristalino e foliação marcada pelo alinhamento dos filossilicatos.

Fig. 4. Optical microscope aspects of the VVR samples, showing microcrystalline quartz seams and foliation marked by phyllosilicates alignment.

Fig. 5. Exemplos de amostras ensaiadas mostrando a variabilidade de composição e o baixo ângulo entre a foliação e o eixo das amostras: a) grauvacóide, de granularidade mais grosseira e planos de foliação pouco evidentes; b) porção filitosa de granularidade muito fina.

Fig. 5. Examples of tested samples showing composition variability and the low angle between the foliation planes and specimens axis: a) weak foliated coarse-grained greywackes; b) very fine-grained phyllite.

Fig. 6. Aspetos da rotura das amostras em compressão uniaxial: a) amostra de composição mais siliciosa, de granularidade mais grosseira, com superfícies de rotura serrilhadas; b) amostra de composição mais filitosa com rotura ao longo de planos lisos, muito próximos, correspondentes à foliação.

Fig. 6. Failure modes under uniaxial compression: a) siliceous coarse-grained sample with rough or irregular failure surfaces; b) fine-grained phyllite with smooth closed spaced failure surfaces, corresponding to foliation.

Quanto ao ensaio de carga pontual (Tab. 7) a média da resistência perpendicularmente às descontinuidades é cerca de 1,8 vezes maior do que a definida paralelamente à foliação. Os ensaios perpendiculares apresentam também maior dispersão (de 0,24 até 4,62 MPa), maior desvio padrão e maior coeficiente de variação. Efetuou-se o cálculo da resistência à compressão uniaxial utilizando um fator de multiplicação de 22, tal como apresentado na norma da ISRM (1985), obtendo-se valores da resistência ligeiramente inferiores dos valores calculados com o martelo de Schmidt, e mesmo com o ensaio de compressão uniaxial.

Tabela 6. Velocidade de propagação das ondas P e resistência à compressão uniaxial das amostras VVR.

Table 6. P waves propagation velocity and uniaxial compressive strength of VVR samples.

Amostra	Velocidade das ondas P V_P (m/s)	Resistência à compressão uniaxial σ_c (MPa)
A2	2404	28
A3	3378	51
A10	1437	4
A11	1168	27
A30	1623	61
A38	1736	41
A51	1563	33
A54	1344	46
A57	1136	36
A65	1761	49
A66	521	27
A69	1374	48
A76	1488	27
A80	1894	31
A88	694	40
A91	1437	38
A96	3049	37
A100	1812	77
Média	1657	38,9
Desvio Padrão	711	15,7
Coef. Variação	0,43	0,40

Tabela 7. Resumo dos ensaios de carga pontual $\mathbf{Is}_{(50)}$ nos xistos VVR.

Table 7. Point Load test results ($\mathbf{Is}_{(50)}$) of the VVR schists.

	Perp. (⊥)	Paral. (//)	Todas $Is_{(50)}$	σ_c $Is_{(50)}x22$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Média	1,91	1,05	1,66	36,6
Desvio Padrão	1,39	0,43	1,25	27,6
Coef. Variação	0,73	0,41	0,75	0,75
Mínimo	0,24	0,39	0,24	5,19
Máximo	4,62	1,70	4,62	101,6
Nº provetes	25	10	35	35

4. Discussão

A mineralogia e heterogeneidade das rochas metassedimentares permite explicar parcialmente a variabilidade do seu comportamento. Acresce a influência da alteração que se traduz pelo aumento da porosidade, pela redução da resistência mecânica e da resistência ao desgaste.

Na determinação da resistência, os ensaios de compressão uniaxial apresentam importantes limitações nas rochas anisotrópicas: os resultados dependem da orientação da força relativamente às descontinuidades; tendem a ser ensaiados apenas os provetes de melhor qualidade, uma vez que os restantes fragmentam antes ou durante a preparação. Por outro lado, a dimensão dos provetes (altura 2,5 a 3 vezes o diâmetro, ISRM, 1979a) implica que nas rochas em que a foliação é uma estrutura penetrativa, definindo planos de fraqueza muito próximos entre si, cada provete possua um número elevado de descontinuidades. Em alternativa, mas menos fiáveis, podem ser utilizados ensaios expeditos, tais como o martelo de Schmidt (ISRM, 1978b) ou a carga pontual (ISRM, 1985).

Os resultados do martelo de Schmidt em afloramentos permitiram estimar valores da resistência à compressão uniaxial de 39,5 ± 10,2 MPa para Ceira e de 38,4 ± 20,9 MPa para VVR, sendo valores muito mais próximos do que se antecipava. O martelo de Schmidt, sendo realizado *in situ*, deverá representar melhor as condições dos maciços rochosos. Por outro lado, apresenta limitações relacionadas com a sua profundidade de influência, por exemplo em maciços em que a alteração é variável. É, no entanto, um método simples para estimar a resistência à compressão das rochas (Kahraman, 2001).

Quanto ao ensaio de carga pontual é bastante utilizado devido à sua simplicidade e fácil preparação da amostra, podendo também ser realizado *in situ* (Kahraman, 2001). Nas amostras dos xistos negros o ensaio de carga pontual apenas foi realizado perpendicularmente à foliação por se terem utilizado fragmentos obtidos na face do talude e que apresentavam forma tabular. Nas amostras VVR, por se terem utilizado tarolos de sondagem, já foi possível aplicar a carga perpendicularmente e paralelamente à foliação, o que foi uma vantagem relativamente ao ensaio de compressão uniaxial, onde tal não foi possível devido à existência de uma única direção de caroteamento das amostras, condicionada pela verticalidade das sondagens de prospeção. Nos xistos negros, o cálculo da resistência à compressão uniaxial obtida a partir dos resultados do ensaio de carga pontual foram de 42 MPa para Ceira e 16 MPa para Cabouco, que se apresenta mais alterado. Para VVR os resultados médios da carga pontual, utilizando também o fator de multiplicação de 22, permitem calcular uma resistência à compressão uniaxial de 36,6 ± 27,6 MPa. A resistência à compressão uniaxial estimada para Ceira e VVR é próxima, havendo no entanto que ter em conta que os valores médios indicados são o resultado de uma dispersão significativa, confirmada pelo elevado coeficiente de variação, que em VVR é de 0,75.

Diversos autores sugerem um fator entre os valores de carga pontual e a resistência à compressão uniaxial de cerca de 24 (Broch e Franklin, 1972; Bieniawski, 1975), ou de 22 (ISRM, 1985), embora outros autores tenham concluído que aquele valor não é válido para rochas anisotrópicas (Greminger, 1982; Forster, 1983; Kahraman, 2001). São referidas variações entre 16 e 24 para os vários tipos de rochas, atendendo aos diferentes aspetos que influenciam os resultados nos dois ensaios. Considerando a média dos ensaios de carga pontual obtidos para as amostras VVR (1,66 MPa) e a média dos ensaios de resistência à compressão uniaxial (38,9 MPa), calculou-se um fator de 23,4, que é ligeiramente superior ao valor de 22 utilizado na tabela 6.

No estudo de rochas xistentas, Nasseri *et al*. (1997) obtiveram valores mais elevados de resistência em xistos quartzíticos do que em xistos biotíticos, estes com maior teor em biotite e menor em quartzo, sendo a formação de fraturas facilitada nas bandas de filossilicatos. Nos resultados obtidos no presente trabalho a resistência à carga pontual medida perpendicularmente à foliação foi 1,8 vezes a resistência paralela

à foliação. É segundo a foliação que se encontram maiores quantidades de minerais filitosos.

Os resultados obtidos para a velocidade de propagação das ondas P não permitem uma boa correlação com a resistência, sendo concordantes com os de outros autores para este tipo de rochas (Sharma e Singh, 2008; Andrade e Saraiva, 2010). Confirma-se que velocidade de propagação das ondas P é influenciada por vários fatores como a litologia, a densidade, a forma e dimensão, a porosidade, a anisotropia, a alteração e as descontinuidades (Sharma e Singh, 2008).

5. Conclusões

Conclui-se que os resultados dos ensaios foram fortemente influenciados pela litologia dominante em cada amostra, pela alteração, pela foliação e ainda pelo teor em água, sendo na generalidade concordantes com os resultados de outros autores.

Para os xistos negros da EN17 foi estabelecida uma relação positiva entre o desgaste e a resistência (Fig. 3). A diminuição da resistência do xisto resulta da alteração e do aumento da porosidade, traduzindo-se por um decréscimo da densidade. Observou-se também uma redução notável do $Is_{(50)}$ com o aumento do teor em água, mais evidente para as amostras mais alteradas. Os xistos do Cabouco estão mais alterados e são menos resistentes, mostrando maior quantidade de minerais de argila, tais como a caulinite e ilite. As classificações geomecânicas utilizadas (RMR e GSI) confirmam as piores propriedades dos xistos do Cabouco.

As amostras de Vila Velha de Ródão embora correspondam às bandas mais pelíticas da sequência, apresentam intercalações abundantes e de espessura variada de níveis mais siliciosos (grauvacóides). Dado que o ângulo entre a foliação e a direção de aplicação da carga é muito pequeno, os resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ondas P e de compressão uniaxial não refletem a estrutura anisotrópica da rocha. Esta dificuldade foi colmatada com a realização de ensaios de carga pontual paralela e perpendicularmente à foliação. Durante o ensaio de compressão uniaxial a fratura ocorreu geralmente ao longo da foliação. Para as amostras ricas em quartzo, a rotura tendencialmente não coincide com os planos da foliação e as superfícies são mais irregulares e ásperas, refletindo a granularidade mais grosseira da rocha. O fator de proporcionalidade médio obtido entre o ensaio de carga pontual e o ensaio de compressão uniaxial foi de 23,4.

Com este trabalho procurou-se contribuir para o conhecimento das características de geologia de engenharia das rochas metassedimentares. Este estudo deverá ser alargado a outras zonas em que seja possível dispor de amostras, preferencialmente de sondagens, e assim disponibilizar resultados que possam ser utilizados em fases iniciais de projeto, como primeira aproximação às características de um local em estudo.

Agradecimentos

Pelo apoio financeiro da FCT-MEC através de fundos nacionais e, quando aplicável co-financiado pelo FEDER no âmbito da parceria PT2020, através dos projetos de investigação UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências e ainda do Projeto Estratégico PEST-OE/CTE/UI0039/2014. Especial agradecimento à EDP por disponibilizar provetes para ensaio e autorizar a publicação dos resultados.

Referências

Andrade, P., Saraiva, A., 2010. Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, **69**, 207-214.

Andrade, P. S., 2004. *Caracterização geomecânica e análise da estabilidade em maciços rochosos anisotrópicos*. Tese de Doutoramento (não publicada), Universidade de Coimbra, 147-168.

Bieniawski, Z. T., 1975. Point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, **9**(1), 1-11.

Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons.

Broch, E., Franklin, J. A., 1975. Point-load strength test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*., **9(6)**, 669-97.

Brown, E. T., Richard, L. R., Barr, M. V., 1977. Shear strength characteristics of Delabole slates. Proc. *Conf. Rock Engineering, Newcastle upon Tyne*, 33-51.

Chaminé, H. I., Gama Pereira, L. C., Fonseca, P. E., Noronha, F., Lemos de Sousa, M. J., 2003. Tectonoestratigrafia da Faixa de Cisalhamento de Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, **28**, 37-78.

Forster, I. R., 1983. The influence of core sample geometry on the axial point-load test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **20**, 291-5.

Gao, Q., Tao, J., Hu, J. e Yu, X., 2015. Laboratory study on the mechanical behaviors of an anisotropic shale rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **7**, 213-219.

Goshtasbi, K., Ahmadi, M., Seyedi, J., 2006. Anisotropic strength behaviour of slates in the Sirjan-Sanandaj zone. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, **106**, 71-75.

Greminger, M., 1982. Experimental studies of the influence of rock anisotropy on size and shape effects in point-load testing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **19**, 241–6.

Hoek, E. (1994). *Strength of rock and rock masses*. ISRM News J, **2**(2), 4-16.

Hudson, J. A., Harrison, J. P., 1997. *Engineering Rock Mechanics – An Introduction to the Principles.* Volume **1**. Pergamon, Oxford. 444.

Huisman, M., Hack, H. R. G. K, Nieuwenhuis, J. D., 2006. Predicting Rock Mass Decay in Engineering Lifetimes: The Influence of Slope Aspect and Climate. *Environmental & Engineering Geoscience*, **XII**(1), 39-51.

ISRM, 1978a. Suggested methods for determining sound velocity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **15**, 53-58.

ISRM, 1978b. Suggested Method For Determination Of The Schmidt Rebound Hardness. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **15**(3), 89-97.

ISRM, 1978c. Suggested Method For Determining Hardness and abrasiveness of rocks. Part 2. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **15**, 89-97.

ISRM, 1979a. Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**, 138-140.

ISRM, 1979b. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **15**, 319-368.

ISRM, 1979c. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. Parte 1, 3. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**(2), 141-156.

ISRM, 1981. Basic Geotechnical Description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18**, 85-110.

ISRM, 1985. Suggested method for determining point-load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **22**, 53-60.

Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **38**, 981-994.

Knodel, K., Lange G., Voigt H.-J., 2007. *Environmental Geology: Handbook of field methods and case studies* - Springer, 1127.

Loureiro, F., Fernandes, I., Ribeiro, M.A, Neves, J., Quinta-Ferreira, M., 2015. Characterization of a schist using laboratory tests. *SGEM*, Albena, Bulgaria, **1**(2), 171-178.

Marinos, P., Hoek, E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, **60**, 85-92.

Nasseri, M. H. B., Rao, K. S., Ramamurthy, T., 2003. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **40**, 3-23.

Niandou, H., Shao, J. F., Henry, J. P., Fourmaintraux, D., 1997. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **34**(1), 3-16.

Pinho, A. B., 2003. *Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência. O flysch do Baixo Alentejo*. Tese de doutoramento, Universidade de Évora. 272.

Quinta-Ferreira, M., Alves, J., Andrade, P. S., Perdigão, R., 2015. Black schist properties at road EN17, Coimbra, Portugal. *SGEM*, Albena, Bulgaria, **(1)2**, 127-134.

Sharma P. K., Singh, T. N., 2008. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, **67**, 17–22.