

Estudo mecânico e petrográfico da fração filitosa do CXG de Vila Velha de Rodão

Fábio Ernesto Capucho Loureiro

Mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

2014

Orientador

Doutora Isabel Fernandes, Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Coorientador

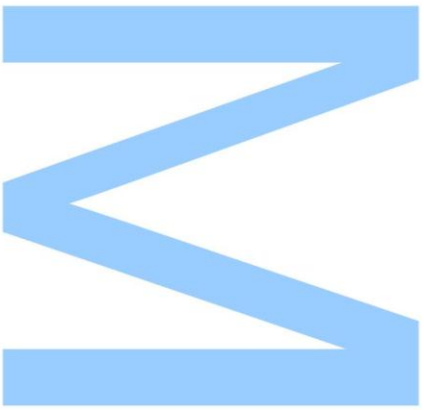
Doutora Maria dos Anjos Ribeiro, Professora Associada, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

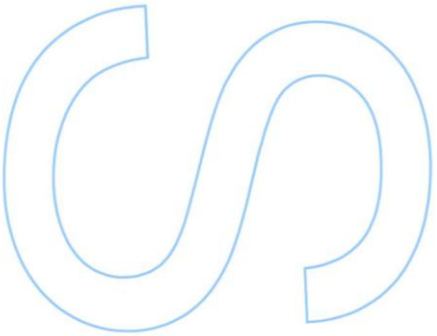


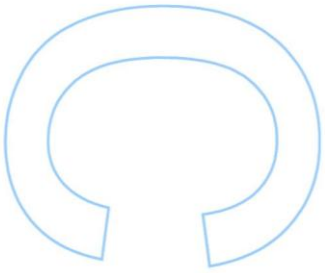


Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.
O Presidente do Júri,

Porto, _____/_____/_____







Agradecimentos

Um trabalho não é obra de uma só pessoa, mas sim o resultado de um esforço desenvolvido com o apoio e incentivo de muitas pessoas. Durante o processou que culminou na realização deste trabalho, foram vários os intervenientes que de uma forma ou outra contribuíram para a sua concretização. A todos, desejo expressar o meu sincero agradecimento por terem contribuído para que pudesse chegar a este patamar.

À Professora Doutora Isabel Fernandes, por quem tive o privilégio de ser orientado. Expresso o meu sincero agradecimento pelas críticas e sugestões durante a realização deste trabalho, exigindo sempre o melhor de mim. Agradeço o interesse e apoio que forneceu, bem como a simpatia e boa disposição demonstradas para comigo.

À Professora Doutora Maria dos Anjos, pela sua orientação e disponibilidade para esclarecimento e dúvidas e por todas as sugestões dadas ao longo do trabalho. A sua forma de estar para com a minha pessoa foi uma mais-valia durante a realização deste trabalho

Ao Professor Doutor Luís Calado, por ter disponibilizado o seu tempo para me auxiliar com a realização dos ensaios mecânicos. Sem a sua permissão para concluir os ensaios no IST, o trabalho prático desta dissertação não teria sido concluído.

Ao Dr. Jorge Neves e à EDP, SA, pela disponibilidade e interesses demonstrados na realização deste trabalho, tendo facultado o material necessário à realização dos ensaios.

À D. Irene, do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, pelo cumprimento das

suas funções profissionais, contribuindo deste modo, com a elaboração das lâminas delgadas.

À minha colega Sara Leal, por toda a disponibilidade e paciência demonstrada durante a realização deste trabalho, estando sempre disponível para me ajudar mesmo quando já não estava presente pela faculdade.

À minha colega Rita Lamas, pela paciência e dedicação demonstrada para com a minha pessoa, exigindo sempre o melhor de mim, e no auxílio demonstrado na revisão desta dissertação.

A todos os meus colegas que acompanharam o meu percurso académico até então. Para uma boa prestação a nível intelectual, é preciso uma boa disposição a nível emocional, e tive a sorte de poder ter sempre com quem contar. Em especial, um agradecimento à minha colega Carla Correia, pelo companheirismo demonstrado, e aos meus colegas de mestrado com quem partilhei a experiência de frequentar duas universidades.

À minha família, por me ter apoiado ao longo de todo este percurso, e especialmente nesta ultima etapa. Aos meus pais em especial, pois não estaria hoje nesta posição não fosse a sua crença e mim e a educação e moral que me incutiram

A todos, dedico o resultado deste trabalho

Resumo

Nos tempos de hoje, constatamos a existência de uma íntima ligação entre a construção de qualquer grande obra de engenharia e a geologia. Para além do reconhecimento dos maciços rochosos *in situ*, a caracterização a nível mecânico e o estudo petrográfico constituem fontes de informações relevantes para os intervenientes neste tipo de projeto.

A construção de grandes estruturas envolve custos muito elevados. A interligação entre diferentes áreas e conhecimento assume uma grande importância, pois contribui para a racionalização de custos.

Na presente dissertação foi feita a caracterização geológica, petrográfica e mecânica da fração mais filitosa das rochas do Complexo Xisto-Grauváquico que afloram no Sinclinal de Vila Velha de Rodão. O estudo envolveu a cartografia geológica de uma área restrita com produção de um perfil transversal geológico interpretativo da estrutura local. O perfil foi realizado segundo uma orientação perpendicular ao eixo do sinclinal. As propriedades mecânicas foram avaliadas de forma expedita *in situ* recorrendo ao Martelo de Schmidt.

De forma a avaliar o comportamento mecânico destas rochas, foram realizados, em laboratório, ensaios de compressão uniaxial, carga pontual e velocidade de ultrassons sobre trechos de tarolos de sondagem. A caracterização mineralógica e textural foi efetuada em lâminas delgadas observadas ao microscópio ótico.

Os ensaios realizados pretendem contribuir para o conhecimento das características mecânicas de rochas anisotrópicas e avaliar a influência dos planos de anisotropia e eventuais variações composicionais nas propriedades destas rochas.

Palavras-chave: petrografia, mecânica, litologias, ensaios

Abstract

Nowadays, there is an intimate connection between the construction of any large construction of engineering and geology. The site investigation in situ can be complemented by a study on mechanical and petrographic level characteristics which constitute a source of relevant information to the people involved in this type of project.

The construction of large structures implies very high costs. The interconnection between different areas of expertise is of great importance as it contributes to the rationalization of costs.

Geological and mechanical characterization of the Schist-greywacke rocks that outcrop in Syncline of Vila Velha de Rodão was made. The study involved the geological mapping of a restrict area with production of an interpretative geological cross-section of the local structure. The cross section was developed according to an orientation perpendicular to the axis of the syncline. The mechanical properties were expeditiously evaluated using the Schmidt Hammer in situ.

In order to evaluate the mechanical performance of these rocks, uniaxial compression, point load and ultrasound velocity tests were performed in laboratory on samples of rock obtained by core drilling. The mineralogical and textural characterization was performed on thin sections observed under the optical microscope.

These assays aim to contribute to the knowledge of the mechanical properties of anisotropic rocks and assess the influence of anisotropy plans and possible compositional variations in the properties of the rocks.

Keywords: petrography, mechanical, lithology, assays

Índice

Agradecimentos i
Resumo iii
Abstract v
Índice vii
Índice de Tabelas x
Índice de Figuras xii
Índice de Fotografias xiv
Lista de abreviaturas xix
Introdução 1
1. Introdução 3
2. Objetivos e plano de trabalho 5
3. Estrutura do trabalho 6
Capítulo 1 9
Enquadramento Geográfico e Geológico 9
1.1. Enquadramento Geográfico 11
1.2. Enquadramento geológico 12
1.2.1 Litostratigrafia 15
1.2.2 Estrutura 18
1.2.2.1 Deformação Sarda 19
1.2.2.2 Deformação Varisca 19
1.2.2.3.Deformação Tardi-Varisca 22
1.2.2.4 Deformação Alpina 23
Capítulo 2 25
Mecânica das Rochas: conceitos gerais 25
Capítulo 3 29
Metodologias 29
3.1. Amostragem (Sondagens) 31
3.1.1. Perfuração 31
3.1.3. Sondagens à rotação com carotagem 33
3.2. Petrografia 37
3.2.1. Análise macroscópica 37
3.2.2. Análise microscópica 37
3.3. Materiais e Métodos 38
3.3.1. Listagem das carotes 38
3.3.2. Equipamento usado e procedimento seguido no trabalho laboratorial 40

3.3.2.1 Análise macroscópica e microscópica 40
3.3.2.2. Martelo de Schmidt/ Esclerómetro 41
3.3.2.3. Ensaio de compressão uniaxial 42
3.3.2.4. Ensaio de carga pontual 43
3.3.2.5. Ultrassons 44
3.4. Ensaios 46
3.4.1 *In Situ* 46
3.4.1.1. Martelo de Schmidt ou esclerómetro portátil 46
3.4.2. Ensaios laboratoriais 47
3.4.2.1. Ensaio de compressão uniaxial 47
3.4.2.2. Ensaio de carga pontual 56
3.4.2.3. Ultrassons 62
Capítulo 4 65
Trabalho de Campo e amostragem 65
4.1. Descrição litológica e estrutural 68
4.2. Relação de estratificação e foliação 75
4.3. Perfil geológico interpretativo 76
Capítulo 5 78
Resultados dos ensaios e interpretação 78
5.1. Análise das carotes 80
5.1.1. Ângulo da xistosidade com o eixo da carote 80
5.1.2. Estado de alteração 80
5.1.3. Comprimentos 81
5.2. Caracterização macroscópica e microscópica 81
5.2.1. AM 15 – Sondagem CH10 81
5.2.2. AM 16 – Sondagem CH3 85
5.2.3. AM 18 – Sondagem CH 10 91
5.2.4. AM 29 – Sondagem CH 15 95
5.2.5. AM 42 – Sondagem CH11 99
5.2.6. AM 49 – Sondagem CH13 103
5.2.7. AM 50 – Sondagem CH15 106
5.2.8. L2 – Sondagem CH11 110
5.3. Ensaios mecânicos 113
5.3.1. Ensaios com martelo de Schmidt 113
5.3.2. Ultrassons 115
5.3.3. Carga pontual 118

5.3.4. Compressão uniaxial 123
6.5. Estudo da correlação entre ensaios 133
Capítulo 6 138
Considerações Finais 138
Referências Bibliográficas 144

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Graus de alteração (adaptado de Williamson *et al*, 1988). 35
Tabela 3.2 Listagem das sondagens. 38
Tabela 3.3 Tabela de amostras, com indicação da profundidade de cada trecho de sondagem. 39
Tabela 3. 4 Algumas velocidades observadas para diferentes tipos de rocha (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002). 45
Tabela 3.5 Tabela de classificação das rochas com base no ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Vallejo *et al.,* 2002). 50
Tabela 3.6 Valores esperados de E, ν e σc para diferentes tipos de rochas (adaptado de Rocha, 1981). 53
Tabela 3.7 Classificação da resistência em função do índice de resistência à carga pontual (seg. Nilsen & Palmstrøm, 2000). 61

Tabela 5.1 Ângulos entre os planos de xistosidade e o eixo das carotes. 80
Tabela 5.2 Resultados medidos usando o martelo de Schmidt. 113
Tabela 5.3 Média com os 6 valores mais altos medidos em cada local. 114
Tabela 5.4 Valores (em MPa) obtidos em filitos do CXG da CZI (seg. Andrade & Saraiva, 2010). 115
Tabela 5.5 Resultados relativos ao ensaio de ultrassons. 116
Tabela 5.6 Velocidades Vp (m/s) para filitos (seg. Sharma & Singh, 2008). 117
Tabela 5. 7 Velocidades Vp (m/s) para filitos do CXG da ZCI (seg. Andrade & Saraiva, 2010). 118
Tabela 5.8 Resultados relativos ao ensaio de carga pontual. 118
Tabela 5.9 Tabela com a média de valores para cada uma das direções de aplicação da carga e *Ia*(50). 120
Tabela 5.10 Classificação da resistência em função do índice de resistência à carga pontual (seg. Nilsen & Palmstrøm, 2000). 121
Tabela 5.11 Tabela com valor médio de *Is* para diferentes tipos de rochas (adaptado de Singh *et al*. 2012). 122
Tabela 5.12 Is(50) (MPa) para filitos do CXG da ZCI (seg. Andrade & Saraiva, 2010). 122
Tabela 5.13 Valores de resistência à compressão uniaxial (MPa), em filitos (seg. Ho & Li, 2001). 123
Tabela 5.14 Valores referentes ao valor máximo de tensão (σc), deslocamento (ε), módulo de deformabilidade tangente (Et) e módulo de deformabilidade secante (Es). 123
Tabela 5.15 Valores médios da tensão máxima suportada (σc). 126
Tabela 5.16 Tabela de classificação das rochas com base no ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Vallejo *et al.,* 2002). 127
Tabela 5.17 Valores médios medidos da tensão máxima suportada (σc). 131
Tabela 5.18 Valores esperados de E, e σ_c para xistos (adaptado de Rocha, 1981). 131
Tabela 5.19 Valores relativos a E e σ_c para rochas filitosas (adaptado de Feng *et al*.,2013). 132
Tabela 5.20. Valores médios de resistência à compressão uniaxial (MPa) para filitos do CXG da ZCI (seg. Andrade & Saraiva, 2010). 132

Tabela 5.21 Tabela com valor médio de resistência à compressão uniaxial (σ_c) para diferentes tipos de rochas (adaptado de Singh *et al*., 2012)..... 132
Tabela 5.22 Tabela com a representação dos valores de índice de carga pontual medidos face ao que seria de esperar usando o cálculo com base no gráfico. 134
Tabela 5.23 Tabela com a representação dos valores de compressão medidos face ao que seria de esperar usando o cálculo com base no gráfico. 136

Índice de Figuras

Fig. 1.1 Carta topográfica 303 – Sarnadas do Ródão (Vila Velha de Rodão) à escala 1:25.000 (seg. Instituto Geográfico do Exército, 1993). 11
Fig. 1.2 Cartografia Geológica da área onde se situa o Sinclinal de Vila velha de Rodão (seg. Carvalho *et al*., 2009 a qual se baseia em Ribeiro *et al*., 1965). 13
Fig. 1.3 Cartografia Geológica do Sinclinal de Vila Velha de Rodão (seg. Metodiev & Romão, 2008). 14
Fig. 1.4 Extrato da Carta Geológica 24 D (seg. Ribeiro *et al*., 1967). 15
Fig. 1.5 Sequência litoestratigráfica do Sinclinal de Vila Velha de Rodão (seg. Metodiev & Romão, 2008). 18
Fig. 1.6 Evolução estrutural da ZCI durante o ciclo Varisco (seg. Dias & Ribeiro, 1994). 19
Fig. 1.7 Fase Pré-Varisca (Sarda) – discordância angular (seg. Diez Balda *et al.* 1990). QA – Quartzito Armoricano; GB – Grupo das Beiras (CXG). 19
Fig. 1.8 Fase Varisca D1 – Dobramento principal e cavalgamentos com vergência para NE (seg. Metodiev & Romão, 2008). 20
Fig. 1.9 Esquema estrutural dos cavalgamentos Vinagra-Foz do Cobrão e Chão das Servas-Carregais (seg. Metodiev *et al*., 2009). 21
Fig. 1.10 Fase Varisca D2 – evolução dos acidentes da fase D1 com geometrias em *duplex* e criação dos cavalgamentos Vinagra-Foz do Cobrão, Portas do Rodão-Perdigão e Vale do Cobrão; todos com direção NW-SE e vergência para NE (seg. Metodiev & Romão, 2008). 21
Fig. 1.11 Fase Varisca D2 – dobras (Sobral Fernando) e cavalgamentos (Chão das Servas-Carregais) com vergência oposta (para SW). Descolamento do tipo *thin-skinned* e constituição de zona Triangular (Delta) - Foz do Cobrão (seg. Metodiev & Romão, 2008). 22

Fig. 3.1 Exemplos de tubos de sondagem duplos e triplos (seg. Vallejo *et al*, 2002). 32
Fig. 3.2 Ângulo entre a anisotropia e a tensão aplicada. a) tensão aplicada perpendicularmente b) tensão aplicada a 45° c) tensão aplicada paralelamente (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002). 36
Fig. 3.3 Exemplo de um martelo de Schmidt ou Esclerómetro (retirada de Humboldt Construction Materials Testing Equipment). 41
Fig. 3.4 Ábaco de Miller para o cálculo da dureza a partir do *martelo Schmidt* (adaptado de Vallejo *et al*., 2002). 47
Fig. 3.5 Esquema da aplicação de forças numa carote (seg. Vallejo *et al.*, 2002). 48
Fig. 3.6 Relação L/D (seg. ISRM 1979). 48
Fig. 3.7 Evolução do módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson ($\boldsymbol{\nu}$) e variação do volume da unidade de volume ($\Delta \mathbf{V}/\mathbf{V}$) (seg. Rocha, 1981). 51
Fig. 3.8 Comportamento típico de uma rocha quando sujeita a compressão (seg. Rocha, 1981). 51
Fig. 3.9 Variação do módulo de Young com a deformação (seg. Hudson & Harrison, 2007). 54
Fig. 3.10 Módulo tangente (seg. ISRM 1979). 55
Fig. 3.11 Módulo da secante (seg. ISRM 1979). 55

Fig. 3.12 Evolução da velocidade de propagação das ondas longitudinais numa peça sujeita a compressão (Rocha, 1981). 56
Fig. 3.13 Esquema de um aparelho para ensaio de carga pontual (seg. Vallejo *et al.*, 2002). 57
Fig. 3.14 Esquema de uma prensa no ensaio de carga pontual (seg., ISRM 1985). 58
Fig. 3.15 Validade dos ensaios (seg. ISRM, 1985). 59
Fig. 3.16 Gráfico dos valores de F em função do diâmetro equivalente (seg. ISRM 1985). 61
Fig. 3.17 Posições possíveis dos transdutores. a) transmissão direta, b) transmissão semidirecta e c) transmissão indireta (Retirado de Controls Instruction Manual). 63

Fig. 4.1 Localização do perfil geológico num excerto da carta topográfica 303 – Sarnadas do Ródão (Vila Velha de Rodão). 67
Fig. 4.2 Representação dos pontos GPS retirados ao longo do caminho, de modo a auxiliar a realização do perfil geológico. a) Vista geral da zona de estudo. b) Ampliação da zona contendo os pontos 356 a 364. 68
Fig. 4.3 Representação esterográfica da atitude da estratificação. A variação da direção da estratificação é mínima e sempre no quadrante NW-SE. Para as inclinações, registaram-se valores verticais/sub-verticais, podendo inclinar tanto para NE como para SW. 76
Fig. 4.4 Representação esterográfica da atitude de foliação. A orientação da foliação é semelhante à da estratificação, apresentando direção NW-SE e inclinação vertical/sub-vertical tanto para NE como para SW. 76

Fig. 5. 1 Ábaco de Miller com projeção dos resultados da resistência de filitos à compressão uniaxial 114
Fig. 5.2 Gráfico força/deslocamento correspondente ao provete 2. 128
Fig. 5.3 Gráfico referente ao provete 65. O valor da força a que ocorre a rotura é mais elevado do que o anterior, pois a rocha é de natureza mais gresosa, sendo que a os planos de foliação menos nítidos 129
Fig. 5.4 Gráfico referente ao provete número 10. Observa-se a existência de vários picos seguidos de trechos descendentes, que podem corresponder ao fecho de fraturas presentes na amostra 130
Fig. 5.5 Gráfico relativo à correlação entre o índice de carga pontual (Is) e os valores de ultrassons. A correlação observada não é muito significativa 133
Fig. 5.6 Gráfico relativo, à correlação entre a resistência à compressão uniaxial e os valores de ultrassons. A correlação apresentada é mais significativa que no caso anterior 135

Índice de Fotografias

Foto 3.1 Lupa binocular usada na observação microscópica. 40
Foto 3.2 Microscópio ótico de polarização. 41
Foto 3.3 Exemplo de medição em campo com recurso ao martelo de Schmidt. 42
Foto 3.4 Equipamento para ensaio de compressão uniaxial e dimensão das amostras. 42
Foto 3.5 Equipamento usado no ensaio de carga pontual. 43
Foto 3.6 Equipamento usado na medição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas em a) e b). 44

Foto 4.1 Litologias pertencentes ao CXG evidenciando alguns sinais de alteração (W3 a W4), como pode ser observado pela sua coloração. Estes filitos e grauvaques foram submetidos a processos de dobramento que afetou a região a uma escala global e que podem ser observados a uma escala menor dentro de cada uma das unidades estratigráficas. 69
Foto 4.2 Verticalização da estratificação devido aos processos de deformação e metamorfismo na região. É possível observar que ao longo dos estratos a fracturação é bastante evidente, sendo que neste caso esta se encontra com preenchimento de quartzo. 70
Foto 4.3 Lineação sub-horizontal nas litologias do CXG provocada pelos processos de deformação. 70
Foto 4.4 Intercalação entre litologias mais gresosas e litologias mais filitosas. É possível observar uma foliação mais bem marcada nas litologias de carácter mais filitoso. 71
Foto 4.5 Intercalação dos diferentes níveis. 71
Foto 4.6 Lineação de intersecção de atitude concordante com a medida anteriormente. 72
Foto 4.7 Estratificação no CXG, inclinando para SW, materializando uma dobra secundária da estrutura sinclinal. 72
Foto 4.8 Falha com cataclase em aproximadamente 0,7 m, atravessando o quartzito. 73
Foto 4.9 Falha de idade posterior rejeitando outra já existente segundo o movimento indicado pelas setas. 74
Foto 4.10 Espelho de falha apresentando estrias de movimento. A fracturação e a alteração são bastante evidentes. 75

Foto 5.1 A Amostra da esquerda (a) apresenta uma coloração acinzentada apenas com indícios de oxidação nas zonas fraturadas (W2) enquanto a da direita (b) está alterada (W3). 80
Foto 5.2 Aspeto são das amostras, como se pode confirmar pela coloração homogénea apresentada. 81
Foto 5.3 Amostra AM 15. A sua coloração é caracterizada por intercalações de níveis acinzentados, uns mais claros e outros mais escuros. Estes últimos refletem a presença de matéria orgânica. 82

Foto 5.4 Aspeto da talisca em a) e foliação bem marcada em b). Não são visíveis indícios de alteração na amostra. Em termos estruturais, é possível identificar uma foliação bem marcada. 82
Foto 5.5 Aspeto geral da lâmina em N// a) e NX b). Observa-se uma mineralogia homogénea em grãos de dimensões bastante reduzidas. 83
Foto 5.6 Aspeto anastomosado da foliação. N// em a) e NX em b). 83
Foto 5.7 Intercrescimento de moscovite e clorite transversas à foliação (N//). 84
Foto 5.8 Biotite detrítica, indicando que não foram os processos metamórficos os responsáveis pela sua formação (NX). 84
Foto 5.9 Turmalina apresentando indícios de zonamento (N//). 85
Foto 5.10 Plagioclase em NX, identificável pelas suas maclas características. 85
Foto 5.11 Amostra AM 16. A sua cor acinzentada e a presença de uma foliação bastante marcada são evidentes. Este aspeto estrutural é observado de forma clara, dada a ocorrência de uma fratura ao longo do plano de foliação. 86
Foto 5.12 a) Níveis lenticulados. b) Aspeto da foliação. A amostra apresenta ligeira alteração. A intercalação com níveis mais escuros revela presença de matéria orgânica. 86
Foto 5.13 Aspeto geral da lâmina em N// a) e NX b). É evidente a presença de uma foliação bem marcada, sendo possível observar este aspeto em locais onde a acumulação de mateira orgânica é mais acentuada. 87
Foto 5.14 Aspeto lenticulado da foliação, visto à lupa. Níveis mais ricos em quartzo (claros) intercalados com níveis mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica (escuros). Presença também de algumas microfraturas com preenchimento de sílica. 87
Foto 5.15 Foliação marcada em níveis mais ricos de matéria orgânica contornando os clastos (foliação anastomosada). Fotografia com recurso à lupa binocular. 88
Foto 5.16 Clasto de quartzo com forma bastante euédrica. Observa-se clastos de biotite adjacentemente ao clasto de quartzo (N//). 88
Foto 5.17 Clasto lítico de quartzo e moscovite. N// a) NX b). 89
Foto 5.18 Zircão em N// a) e NX b). 89
Foto 5.19 Biotite detrítica envolta em níveis com foliação bastante bem marcada e acumulação acentuada de matéria orgânica (NX). 90
Foto 5.20 Clasto de quartzo com dissolução intensa nos seus bordos (NX). 90
Foto 5.21 Grãos de biotite a passar a clorite, ambas em N//. 91
Foto 5.22 Matéria orgânica concentrada nas zonas de foliação mais marcada. Mais uma vez o aspeto anastomosado desta é bastante evidente (NX). 91
Foto 5.23 Amostra de mão AM 18. Mais uma vez a amostra é caracterizada por coloração acinzentada, com níveis mais escuros devido à presença de matéria orgânica. 92
Foto 5.24 Aspeto da talisca em a) e da foliação em b). Amostra não alterada, como foliação sub-paralela ao eixo da sondagem. 92
Foto 5.25 Aspeto geral da lâmina. N// a) e NX b). Observa-se uma maior acumulação de matéria orgânica nos locais onde a foliação é mais acentuada. É possível também observar clastos de quartzo de granularidade fina mas heterogénea. 92
Foto 5.26 Foliação anastomosada marcada por grande acumulação de matéria orgânica, contornando um clasto de quartzo (NX). 93
Foto 5.27 Aspeto lenticulado à lupa. Os domínios mais ricos em minerais siliciosos são contornados por domínios mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica. 93

Foto 5.28 Veio de quartzo e calcite atravessando a foliação N// a) e NX b). 94
Foto 5.29 Intercrescimento entre quartzo e moscovite em N// a) e NX b). 94
Foto 5.30 Os processos de metamorfismo originaram blastese de clorite (N//). 95
Foto 5.31 Amostra AM 29. A sua coloração é acinzentada e não apresenta alteração. 95
Foto 5.32 Aspeto da talisca em a). A estratificação encontra-se paralela à foliação b). 96
Foto 5.33 Aspeto geral da lâmina em N// a) e NX b). São observáveis níveis estratigráficos mais ricos em quartzo (mais claros), e níveis mais ricos em matéria orgânica e filossilicatos (mais escuros). Os mais ricos em matéria orgânica e filossilicatos apresentam clivagem bem marcada. 96
Foto 5.34 Intercalação dos diferentes níveis estratigráficos, afetados por uma clivagem tectónica. 97
Foto 5.35 a) Relação entre a clivagem e a estratificação (NX). b) Movimento da estratificação provocada por clivagem tectónica (NX). 97
Foto 5.36 Clivagem de fratura sem reorientação dos minerais. a) N// e b) NX. 97
Foto 5.37 Orientação das micas e matéria orgânica nos níveis afetados por clivagem de fratura. Agregados de quartzo e epídoto adjacentes à mesma (N//). 98
Foto 5.38 Lentícula de quartzo associada a aglomerados de epídoto, ambos em contacto com opacos. N// a) e NX b). 98
Foto 5.39 Epídoto e clorite ocorrendo intercalados entre domínios ricos em filossilicatos e matéria orgânica (N//). 99
Foto 5.40 Matéria orgânica assumindo a forma de esferólitos. Este fenómeno é observado nos locais onde se encontram aglomerados de clorite e epídoto (NX). 99
Foto 5.41 Amostra AM42. Apresenta pouca alteração, sendo que a coloração da amostra apresenta uma tonalidade acinzentada. 100
Foto 5.42 Aspeto da talisca em a) e da estratificação em b). Em concordância com outras amostras, a foliação dispõe-se de forma paralela à estratificação. 100
Foto 5.43 Aspeto geral em N// a) e NX b). Bastante visíveis os níveis mais claros ricos em quartzo, e os níveis mais escuros afetados mais intensamente por clivagem e ricos em filossilicatos e matéria orgânica. 101
Foto 5.44 Cristais de quartzo preenchendo uma microfratura (NX). 101
Foto 5.45 Cristais de epídoto em N//. Estes ocorrem nos domínios mais claros e ricos em sílica. 102
Foto 5.46 Aglomerados de cristais de epídoto em N// a) e NX b). 102
Foto 5.47 Indícios de oxidação identificada pela tonalidade avermelhada (N//). 102
Foto 5.48 Amostra AM 49: rocha de tonalidade cinzenta caracterizada por uma foliação, sendo que localmente se observa uma coloração mais escura devido à presença de matéria orgânica. 103
Foto 5.49 Aspeto da talisca em a) e da foliação em b). Não se observam indícios de alteração (rocha sã). 103
Foto 5.50 Aspeto geral da lâmina, com domínios mais ricos em quartzo (mais claros) e outros em que predominam os filossilicatos e a matéria orgânica, marcando a estratificação (S0). N// em a) e NX em b). 104
Foto 5.51 Clivagem de fratura, aparecendo de forma bastante marcada nos níveis de filossilicatos e matéria orgânica (NX). 104
Foto 5.52 Comportamento dúctil dos materiais, observando-se crenulação incipiente (NX). 104

Foto 5.53 Clasto de quartzo (NX)..... 105
Foto 5.54 Clasto de moscovite (NX). 105
Foto 5.55 Aglomerados de pequenos cristais de epídoto, coincidentes com domínios ricos em quartzo. a) N// e b) NX..... 106
Foto 5.56 Amostra AM 50 limitada por um veio preenchido por quartzo, oblíquo ao eixo da sondagem. 106
Foto 5.57 a) Aspeto da talisca. b) Alteração: Os planos são subparalelos ao eixo da sondagem e revelam indícios de alteração, com coloração amarelada. 107
Foto 5.58 Aspeto geral. N// em a) e NX em b).Os domínios de coloração mais clara apresentam abundância em cristais de quartzo, ao passo que nos mais escuros há uma predominância de filossilicatos e matéria orgânica. 107
Foto 5.59 Crenulação em NX a) e b). Pode observar-se nos níveis mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica (mais escuros), uma clivagem que atua de forma transversal à estratificação. Devido ao comportamento mais plástico dos minerais, observam-se dobramentos à escala microscópica (crenulação). 108
Foto 5.60 Clorite com crescimento perpendicular à xistosidade (folia) em N// a) e NX b). 108
Foto 5.61 Blastese de clorite e moscovite adjacente a opacos. Observa-se um grão de zircão (N//). 109
Foto 5.62 Agregados de epídoto associados a quartzo filoniano. a) N//; b) NX..... 109
Foto 5.63 Fratura preenchida por quartzo dispondo-se de forma paralela à clivagem (N//). 109
Foto 5.64 Amostra L2. A sua coloração é acinzentada, sendo que os níveis mais claros correspondem a grãos de quartzo. 110
Foto 5.65 Aspeto da talisca a) e foliação b). Observa-se pouca alteração, derivada também do facto de o quartzo ser um mineral bastante abundante na amostra. A foliação contorna estes domínios mais ricos em sílica. 110
Foto 5.66 Aspeto geral visto à lupa. a) N//; b) NX. Domínios de quartzo afetados por deformação, contornados por uma foliação marcada por níveis mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica. 111
Foto 5.67 Níveis de quartzo e micas. N// a) e NX b). Quartzo intensamente deformado e mostrando bordos saturados e subgranulados. 111
Foto 5.68 Cristal de quartzo com deformação evidente e suturação dos bordos. N// a) e NX b). 112
Foto 5.69 Quartzo estirado em forma de “ribbon” (NX). 112
Foto 5. 70 Quartzo com deformação nos seus bordos, ocorrendo de forma intercalada entre os níveis mais ricos em matéria orgânica e filossilicatos (NX). 112
Foto 5.71 Aglomerados de cristais de epídoto nos domínios mais ricos em quartzo (N//). 113
Foto 5.72 Exemplo de um ensaio de carga pontual com um resultado inválido. Como se observa, não ocorreu a rotura do provete no seu total, mas sim apenas em um dos topos..... 119
Foto 5.73 Os planos de foliação encontram-se dispostos de forma quase perpendicular ao eixo do provete, pelo que devido á sua maior fragilidade corresponderam ao local onde ocorreu a rotura da amostra. Amostra mais gresosa em a) e mais filitosa em b). 120
Foto 5.74 Aspeto dos provetes. a) Amostra com constituição mais gresosa b) Amostra com constituição mais filitosa..... 124

Foto 5.75 Provete de constituição mais gresosa sujeito ao ensaio de compressão uniaxial. a) Antes da rotura. b) Depois da rotura. Observa-se que a rotura ocorre de forma quase paralela ao eixo, ao longo dos planos de foliação que foram superfícies por vezes irregulares. 125
Foto 5.76 Provete de constituição mais filitosa sujeito ao ensaio de compressão uniaxial. a) Antes da rotura. b) Depois da rotura. Observa-se a rotura de forma bem evidente ao longo dos planos de foliação dispostos de forma quase paralela ao eixo do provete e segundo superfícies lisas. 125
Foto 5.77 Amostra sujeita a ensaio de compressão uniaxial. Antes em a) e depois da rotura b). Observa-se uma maior dificuldade na ocorrência dessa mesma rotura nos locais onde o quartzo é mais abundante. 126
Foto 5. 78 Amostra de características mais filitosas sujeita ao ensaio de compressão axial. a) Antes do ensaio. b) depois do ensaio. É possível observar que as superfícies de rotura são bastante lisas. 128
Foto 5.79 Amostra de características mais gresosas sujeita ao ensaio de compressão axial. a) Antes do ensaio. b) Depois do ensaio. Observa-se a rotura mais irregular ao longo dos planos de foliação: Apesar destes não estarem tão bem marcados, depois do momento da rotura é possível visualizar a sua atitude quase paralela ao eixo do provete..... 129
Foto 5.80 Amostra sujeita ao ensaio de compressão uniaxial. a) Antes do ensaio. b) Depois do ensaio. Observa-se a rotura através dos planos de foliação fazendo um pequeno ângulo relativamente ao eixo do provete. 130

Lista de abreviaturas

CXG	Complexo Xisto-Grauváquico
D1	1ª fase de deformação Varisca
D2	2ª fase de deformação Varisca
FA	Formação da Aboboreira
FBF	Formação do Brejo Fundeiro
FCP	Formação de Cabeço do Peão
FCC	Formação de Casal Carvalhal
FFH	Formação de Fonte da Horta
FMS	Formação de Monte de Sombadeira
FQA	Formação do Quartzito Armoricano
FRC	Formação de Ribeiro Casalinho
FRL	Formação de Ribeira da Laje
FVU	Formação de Vale da Ursa
GB	Grupo das Beiras
Ia	Strength Anisotropy Index
Is (50)	Índice de carga pontual para provetes com diâmetro de 50 mm
ISRM	International Society of Rock Mechanics
L	Comprimento do provete
L1	Lineação de intersecção
kN	Quilonewton
MPa	Megaascal
N//	Nicóis paralelos
NX	Nicóis cruzados
P	Valor de rotura da amostra no ensaio de carga pontual
QA	Quartzito Armoricano
RQD	Rock Quality Designation
SI	Série Intercalar
σc	Tensão máxima que uma amostra suporta
σ1	Direção do principal do campo de tensões
W	Índice de alteração da rocha
ZCI	Zona Centro Ibérica
Is	Índice de carga pontual

Introdução

1. Introdução

Nos dias de hoje, a atividade humana está cada vez mais interligada com a geologia. A construção de obras superficiais e subterrâneas tem tido um crescimento cada vez mais acentuado, tendo o estudo dos maciços rochosos bastante relevância, com consequente desenvolvimento da Mecânica das Rochas.

Esta ciência, como o próprio nome indica, aplica uma abordagem teórica e prática relativamente às propriedades e comportamento mecânico dos materiais rochosos. Todos os estudos realizados vão no sentido de caracterizar as tensões que envolvem o material, de forma a conhecer os valores iniciais de tensão e saber de que forma este parâmetro poderá variar, aquando da intervenção no maciço.

A Mecânica das Rochas teve o seu início por volta do ano de 1950, sendo impulsionada pela construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos e pela expansão da exploração mineira. Na década de 1960 autonomizou-se como disciplina, sendo que em 1963 foi fundada a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM).

No entanto, não é só de motivos positivos que esta ciência vive. Os casos de desastres como o da barragem de Malpasset que ruiu em 1959 ou a mina de carvão de Coalbrook na África do Sul, de que resultou a perda de inúmeras vidas são exemplo disso (Hoek, 2007).

Atualmente os campos de aplicação desta disciplina são bastante variados.

Relativamente ao uso das rochas como material para construção, a Mecânica das Rochas estuda materiais que possam ser usados em atividades à superfície, como fundações, barragens ou minas a céu aberto ou em atividades em profundidade como túneis, centrais hidroelétricas ou geotérmicas e mesmo cavernas destinadas ao armazenamento de produtos e resíduos.

A Mecânica das Rochas estuda os maciços rochosos para fins de obras de engenharia, nomeadamente a forma como estes poderão influenciar a construção de barragens, túneis e minas. Ao ser escavado, o maciço rochoso passa a estar sujeito a um nível de tensões inferior pois o material adjacente é retirado, causando uma descompressão do material, pelo que é necessário conhecer de que forma esta descompressão irá ocorrer e que medidas são necessárias para contenção e estabilização do maciço.

Como muitas outras ciências, a Mecânica das Rochas não funciona de forma independente. Para que os resultados sejam o mais rigorosos possível, encontra-se diretamente interligada com a Petrologia e com a Geologia Estrutural, por exemplo.

O conhecimento da génese das rochas desempenha um papel importante, uma vez que os diferentes processos de formação geram composições mineralógicas e texturas diferentes, que têm uma contribuição muito relevante para o comportamento reológico do material. Dos três tipos diferentes de rochas existentes (ígneas, sedimentares e metamórficas), esta dissertação terá maior incidência sobre o estudo das rochas metamórficas anisotrópicas.

O presente trabalho foi desenvolvido em diferentes etapas e tirando partido de vários métodos de estudo com vista à caracterização de rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico. Incluiu trabalho de campo com cartografia de uma área, realização de um perfil geológico e estudo de lâminas delgadas à escala microscópica das rochas estudadas.

Por fim a realização de ensaios laboratoriais permitiu o estudo mecânico das amostras. Estes ensaios foram realizados recorrendo a métodos não destrutivos e destrutivos, seguindo as normas da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM).

2. Objetivos e plano de trabalho

O principal objetivo do trabalho consistiu em determinar o comportamento mecânico dos níveis filitosos que constituem o Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) aflorante na zona do Sinclinal de Vila Velha de Rodão.

No local em estudo estaria prevista a construção de uma barragem e de um túnel, para o que foi necessário proceder à cartografia geológica e aplicação de métodos de prospeção, nomeadamente sondagens, para caracterização geotécnica do maciço.

Foram utilizados trechos das carotes de sondagem, procurando estudar em pormenor uma das litologias que constituem os afloramentos do CXG.

Este estudo envolveu diferentes escalas e amostras colhidas em locais diversos e profundidades variáveis de modo a identificar eventuais diferenças de comportamento dos materiais. Para tirar melhor partido das amostras e poder comparar os resultados dos ensaios, foram realizados em primeiro lugar os métodos não destrutivos e só depois os destrutivos. Sendo assim, de uma forma cronológica, a ordem de trabalhos foi:

- Recolha bibliográfica
- Trabalho de campo e recolha de amostras (trechos de carotes de sondagem)
- Análise macroscópica e microscópica das amostras
- Realização de ensaios mecânicos laboratoriais não destrutivos, seguidos de destrutivos
- Interpretação dos resultados
- Redação da dissertação

3. Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho teve como objetivos permitir uma fácil leitura e um acumular de informações que ao longo do trabalho sirvam de base para o tópico seguinte, no estudo mecânico e petrográfico da fração filitosa do CXG de Vila Velha de Rodão.

O trabalho está organizado em seis capítulos:

- Capítulo 1. Enquadramento geográfico e geológico
- Capitulo 2. Mecânica das Rochas: conceitos gerais
- Capítulo 3. Metodologia e materiais
- Capítulo 4. Trabalho de campo e amostragem
- Capítulo 5. Interpretação e discussão dos resultados
- Capítulo 6. Conclusões

O primeiro capítulo enquadra a área sobre a qual este trabalho incidiu, tanto a nível geográfico como geológico. Assim, a consulta de bibliografia e a cartografia prévia permitiram recolher a informação necessária para o planeamento do trabalho de campo.

O segundo capítulo teve por objetivo fazer uma breve introdução ao tema da Mecânica das Rochas e principais definições bem como explicar a interligação das várias metodologias aplicadas ao longo do trabalho. Com esta abordagem é possível analisar os resultados de uma forma mais precisa e fundamentada.

O terceiro capítulo refere-se aos métodos de ensaio utilizados.

Em primeiro lugar, aborda o tema das sondagens, sendo feita uma descrição mais aprofundada sobre o tipo usado e a forma de obtenção das amostras usadas ao longo do trabalho. De seguida é feito o enquadramento do uso da petrografia como método essencial numa identificação das litologias a caracterizar e qual a metodologia envolvida no processo de observação microscópica de lâminas delgadas.

Aborda-se também o tema dos ensaios mecânicos, quais as suas vantagens e limitações, os cuidados a ter para que os resultados sejam o mais rigorosos possível, e por fim, os cálculos a efetuar com a informação obtida.

Por fim é feita a caracterização das amostras recolhidas. Foi feita a listagem e descrição dessa amostras para posterior interpretação dos resultados obtidos nos ensaios.

Aqui é também feita a especificação do material usado para realizar os testes e qual o procedimento adotado tanto no campo como no laboratório.

O quarto capítulo foca-se no trabalho de campo e cartografia realizados no local de estudo. A realização de um perfil interpretativo transversal à orientação do sinclinal permitiu esboçar as formações que afloram no local e as principais estruturas que se observam à superfície.

O quinto capítulo trata os resultados obtidos ao longo do trabalho bem como a sua interpretação.

Faz-se a descrição das amostras em termos macroscópicos e microscópicos. A mineralogia e textura das rochas são os principais pontos analisados ao longo deste capítulo. Com isto é possível, por um lado verificar a classificação prévia atribuída a este tipo de litologias e por outro, compreender de que forma as características da rocha podem afetar o comportamento mecânico das amostras.

São analisados ainda os valores obtidos pelos ensaios mecânicos, sendo que estes podem ser retirados diretamente do equipamento ou recorrendo a cálculos. É também efetuado o cálculo de correlações com vista a ter uma ideia do tipo de resultados que serão de esperar.

Por fim, recorrendo a pesquisa bibliográfica, é avaliada a validade dos resultados face a valores esperados tendo em conta estudos realizados por outros autores.

O sexto capítulo compila todos os dados obtidos até então no decorrer do trabalho realizado e permite fazer a caracterização das litologias estudadas. Isto permite obter conhecimento sobre o tipo de aplicações que as rochas podem ter, ou de que forma o maciço deve ser intervencionado para o caso da construção de um projeto de grandes dimensões no local.

Capítulo 1

Enquadramento Geográfico e Geológico

1.1. Enquadramento Geográfico

A zona em estudo situa-se no concelho de Vila Velha de Rodão, no distrito de Castelo Branco, próximo da aldeia de Foz do Cobrão. Esta aldeia localiza-se a Oeste da Serra das Talhadas, na margem esquerda do rio Ocreza. A Serra das Talhadas apresenta um relevo estreito e alongado, com orientação NW-SE.

Em termos morfológicos, a grande estrutura que predomina na região é o Sinclinal de Vila Velha de Rodão que forma as Serras de Talhadas e do Perdigão. A sua extensão é de 30 km e tem um dos seus extremos em São Simão, a SSE, e o outro em Vales, a NNW.

Em termos topográficos, esta área é abrangida pela carta 303 – Sarnadas do Ródão (Vila Velha de Rodão) à escala 1:25.000 (Fig. 1.1).

Quanto à cartografia geológica, esta região encontra-se abrangida pelas folhas 24D e 28E da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000.

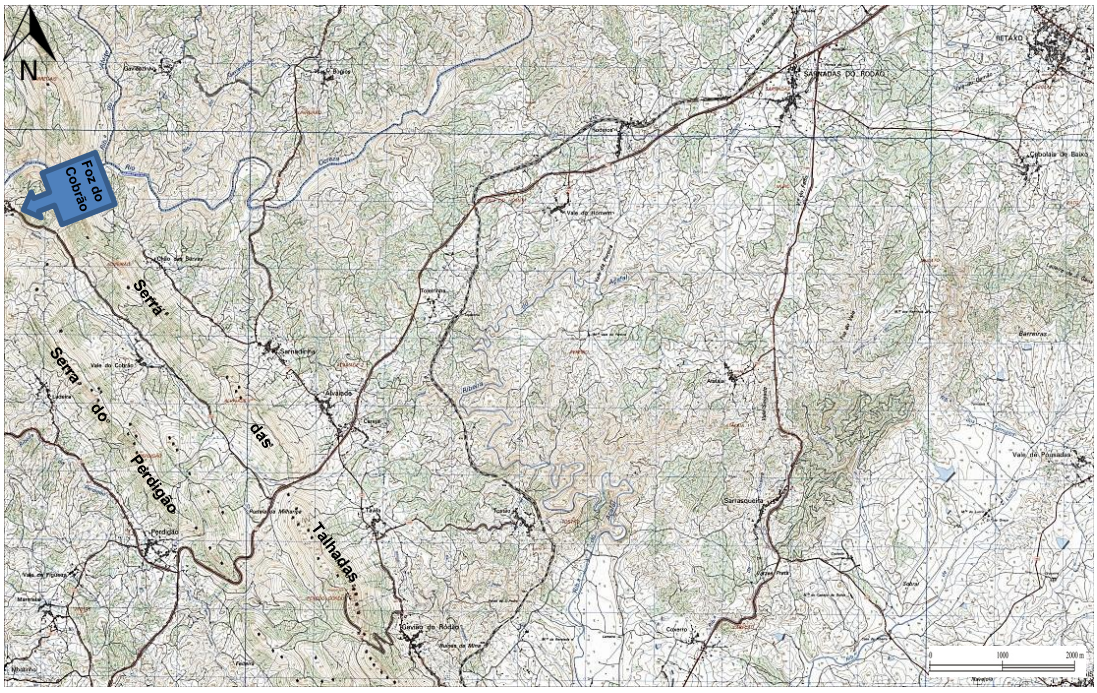


Fig. 1.1 Carta topográfica 303 – Sarnadas do Ródão (Vila Velha de Rodão) à escala 1:25.000 (seg. Instituto Geográfico do Exército, 1993).

1.2. Enquadramento geológico

A área estudada está localizada no sinclinal de Vila Velha de Rodão. Esta estrutura complexa situa-se no bordo Sul da Zona Centro-Ibérica (ZCI) e é ladeada por outras duas estruturas sinclinais principais que fazem parte do mesmo ciclo orogénico, o ciclo Varisco. A SE encontra-se o sinclinal da Serra de São Mamede, e a SW pode encontrar-se o sinforma de Amêndoa-Carvoeiro, estrutura esta que está atribuída à terceira fase de deformação Varisca (D3) (Romão, 2000).

O Sinclinal definido pelas faixas quartzíticas ordovícicas de Rodão tem orientação geral NNW-SSE. Segundo Ribeiro *et* al., 1967, o fecho dos dois flancos quartzíticos do sinclinal ocorre junto a Foz do Cobrão.

A litologia circundante às cristas quartzíticas ordovícicas é caracterizada por xistos e grauvaques do CXG ante-Ordovícico (Ribeiro *et al*., 1965), afetados por metamorfismo de baixo grau.

No próprio sinclinal, é possível encontrar, além de bancadas quartzíticas resultantes de dobramento secundário, faixas de xistos argilosos, xistos finos, negros, cinzentos, alguns com graptólitos (Ribeiro *et al*., 1967).

Em termos estruturais, é importante referir também que o sinclinal complexo de Vila Velha de Rodão é afetado transversalmente por intensa fracturação frágil tardi-varisca, dominando os desligamentos NE-SW, esquerdos (Ribeiro, 1943; Dias & Cabral, 1989). (Figs. 1.2, 1.3 e 1.4).

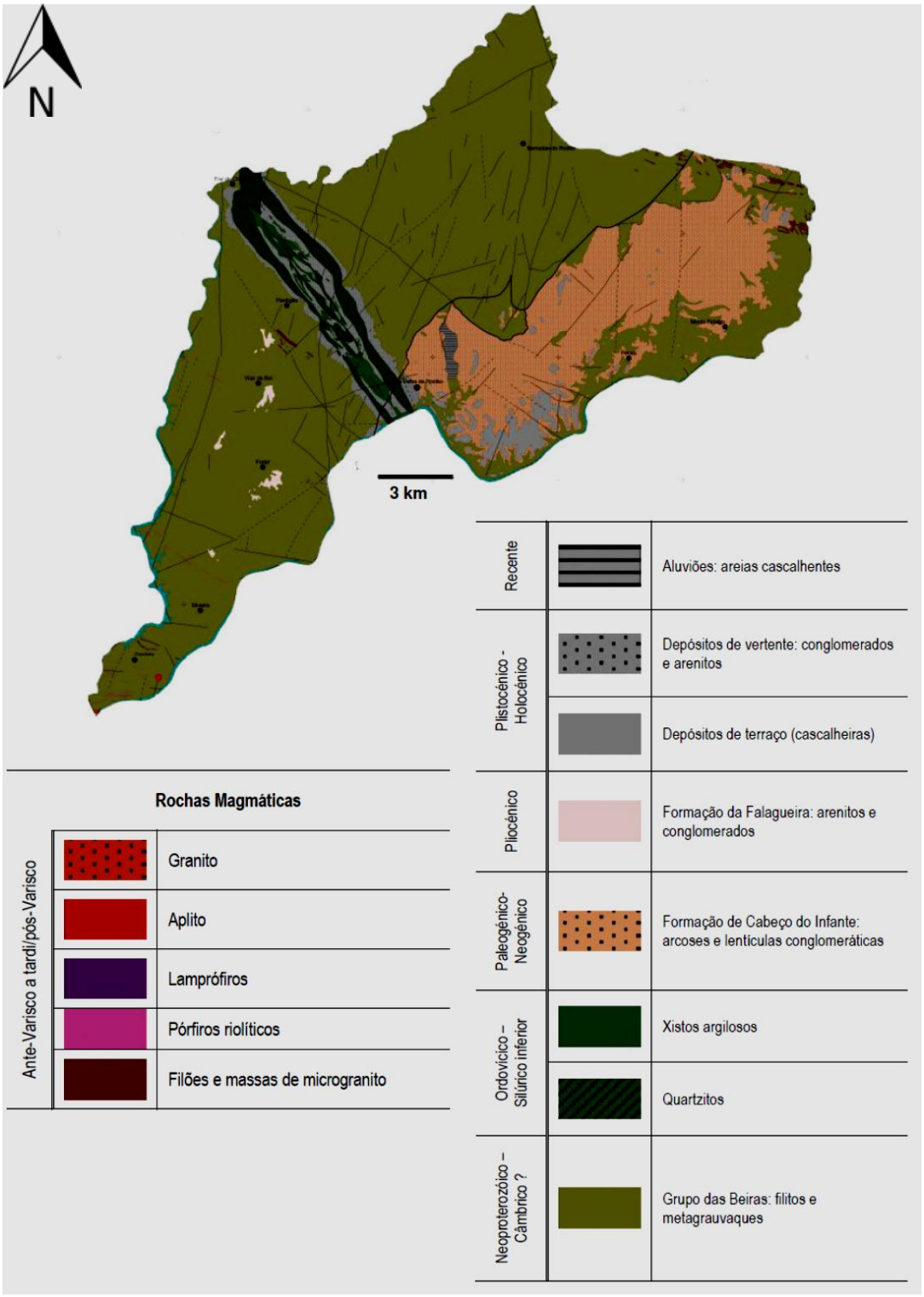


Fig. 1.2 Cartografia Geológica da área onde se situa o Sinclinal de Vila velha de Rodão (seg. Carvalho *et al*., 2009 a qual se baseia em Ribeiro *et al*., 1965).

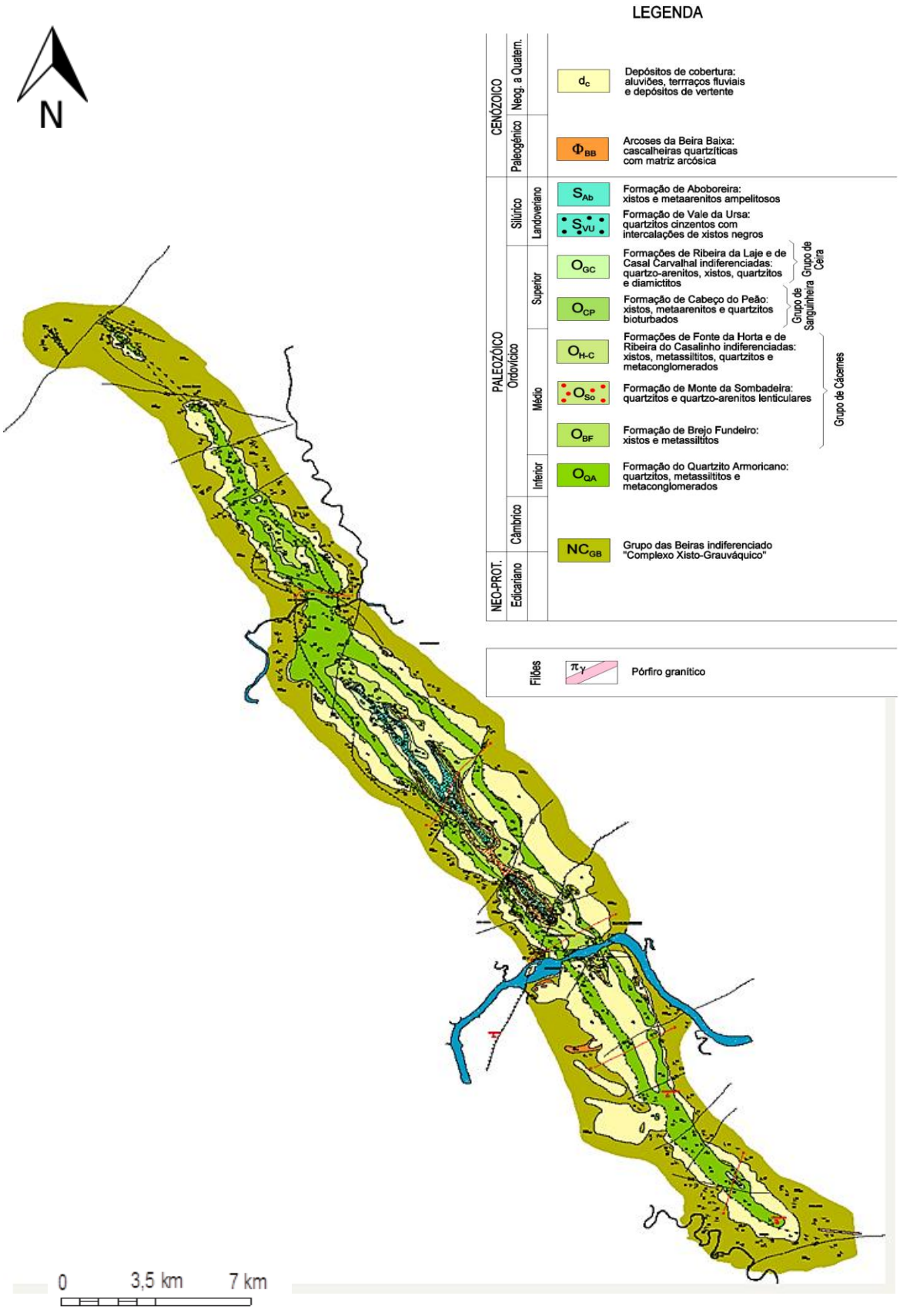


Fig. 1.3 Cartografia Geológica do Sinclinal de Vila Velha de Rodão (seg. Metodiev & Romão, 2008)

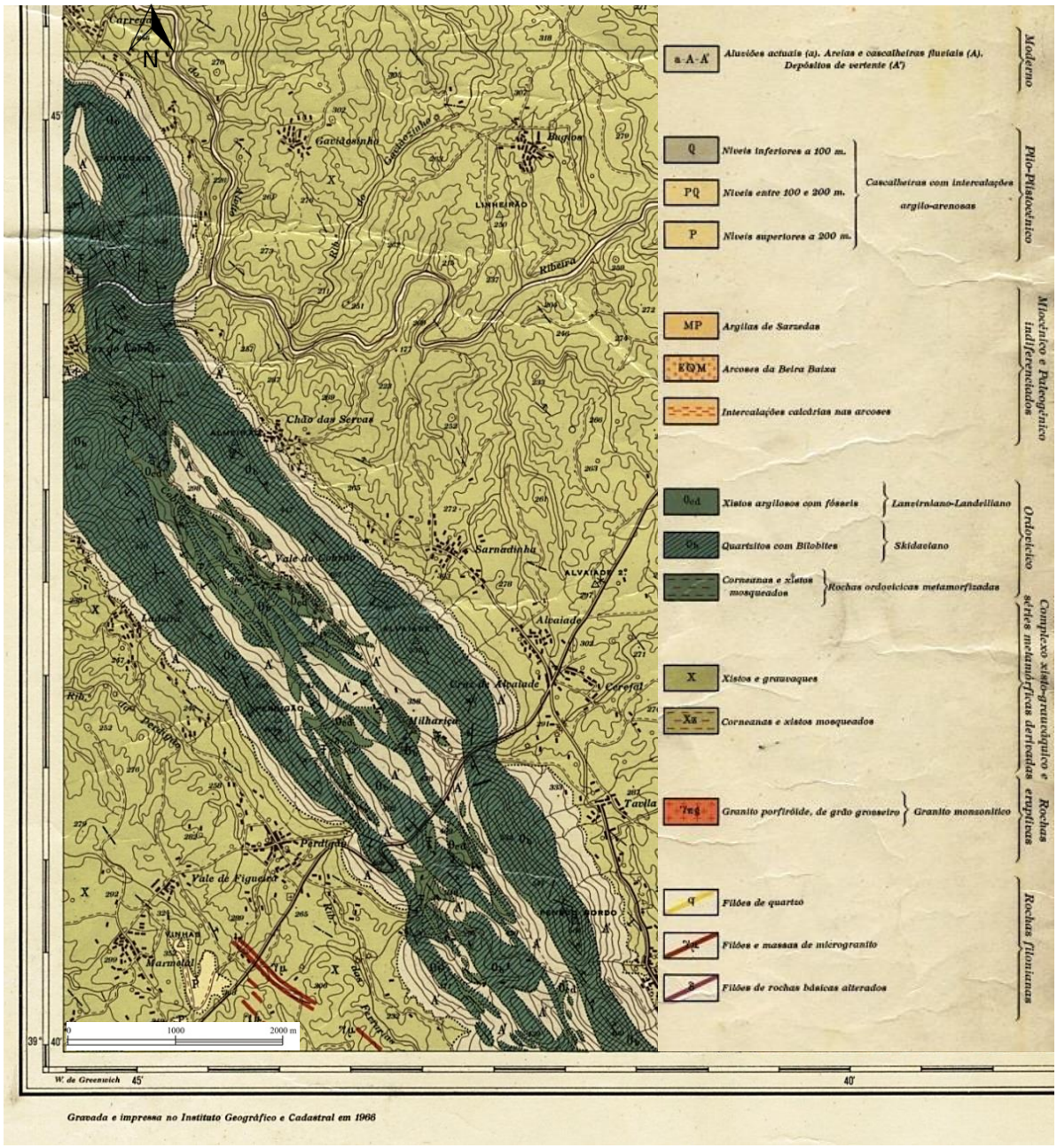


Fig. 1.4 Extrato da Carta Geológica 24 D (seg. Ribeiro *et al*., 1967).

1.2.1 Litostratigrafia

A litostratigrafia da área em estudo é caracterizada por uma sucessão de idade Ordovícico-Silúrica semelhante a outras observadas no sinforma de Amêndoa-Carvoeiro (Romão, 2000; 2001; 2006). A série tem o seu início no andar Floiano (Ordovícico Inferior), apresentando uma superfície erosiva na base, e tem o seu término no limite entre as épocas do Llandovery e o Wenlock.

No envolvente desta estrutura, a litologia predominante é caracterizada por terrenos xistosos e grauváquicos pertencentes ao Complexo Xisto-Grauváquico (CXG)

de idade ante-Ordovícica (Ribeiro *et al*., 1965) (Fig. 1.5). Entre as suas características, pode referir-se o metamorfismo de muito baixo a baixo grau que afeta grandes áreas, sendo observada uma foliação bem marcada, com uma abundante presença de filões de quartzo (Ribeiro *et al*., 1967). O CXG ocupa grandes regiões da ZCI, em particular no vale do Douro e nas Beiras. Para ocidente, prolonga-se sob os terrenos mesocenozóicos da plataforma continental (Teixeira & Gonçalves, 1980).

Esta formação é constituída na sua maioria por litologias de fácies marinha, terrígenas, formando uma sucessão monótona de xistos e grauvaques em sequência do tipo "flysch". Ocorrem também conglomerados e quartzitos, bem como alguns leitos de calcário. No seu todo o CXG apresenta uma espessura de aproximadamente 2000 m (Teixeira & Gonçalves, 1980).

No início da sucessão Ordovícico-Silúrica, observa-se em alguns locais a presença da Série Intercalar (SI), que é caracterizada por uma sequência detrítica, depositada sobre uma discordância angular de idade posterior aos xistos e grauvaques do CXG, sendo por outro lado anterior aos quartzitos do Ordovícico. Acima desta ocorre outra discordância, e o início de outro ciclo de sedimentação. De notar no entanto que a ocorrência desta formação nem sempre é evidente, não sendo possível a sua observação de forma clara em alguns locais, como por exemplo a SW do sinclinal de Amêndoa-Carvoeiro (Atkins/EDP, 2009).

De uma forma mais geral, a base da sequência Paleozóica é definida por uma sequência quartzítica com cerca de 80 m de espessura, correspondendo à Formação do Quartzito-Armoricano (FQA). Estas litologias constituem os flancos do sinclinal. A nordeste, contribuem para o aspeto morfológico da Serra de Talhadas, ao passo que a sudoeste têm o mesmo efeito sobre a Serra do Perdigão (Ribeiro *et al*., 1967). É de registar também que, na base desta sequência, é possível observar em certos locais, bancadas de conglomerados quartzosos definindo figuras de canal, com clastos dispersos numa matriz quartzo-arenosa e que têm como características uma granularidade média a fina e composição essencialmente quartzítica, podendo algumas vezes ter feldspatos (Metodiev *et al*., 2009).

Situadas imediatamente sobre estas bancadas, encontram-se as bancadas de quartzitos maciços que se intercalam com quartzitos gresosos de espessura métrica. Superiormente ocorrem barras finas silto-areníticas e siltíticas de espessura centimétrica que se encontram muitas das vezes laminadas e com marcas de bioturbação (Metodiev *et al*., 2009).

Sobre a FQA é possível observar cerca de 120 m de pelitos escuros laminados, com um elevado teor em sílica e uma deformação também elevada, constituindo uma sequência designada pela Formação do Brejo Fundeiro (FBF). O conteúdo fossilífero

destas litologias é característico do Lanvirniano-Landeiliano (Ribeiro *et* al., 1965; Teixeira, 1981).

Próximo do topo desta unidade, encontra-se um horizonte de ferro oolítico, previamente cartografado no sinforma Amêndoa-Carvoeiro (Romão, 2000). Este horizonte apresenta um elevado grau de alteração e uma espessura centimétrica.

Sucessivamente segue-se a Formação de Monte de Sombadeira (FMS), que é caracterizada por uma sequência regressiva de bancadas de quartzitos impuros e meta-arenitos com características intempestíticas, estando estes por sua vez, intercalados por silto-arenitos com componente micácea relativamente alta. A FMS encontra-se em descontinuidade erosiva com as litologias inferiores, sendo este facto evidenciado pela presença de um horizonte microconglomerático de matriz arenosa e espessura centimétrica (Metodiev *et al*., 2009).

Sobre a FMS, encontra-se um conjunto de bancadas pelíticas laminadas que apresentam 10 a 15 m de espessura, fazendo parte da Formação de Fonte da Horta (FFH). Acima desta, sucede a Formação de Ribeiro Casalinho (FRC), que é constituída por aproximadamente 10 m de barras quartzíticas maciças com espessura decimétrica. Estas encontram-se intercaladas, em patamares mais superiores, por estratos centimétricos de pelitos com algumas ocorrências de pirite (Metodiev *et al*., 2009).

A observação das cotas superiores à FRC mostra uma descontinuidade erosiva bastante acentuada que separa esta unidade da Formação de Cabeço do Peão (FCP) (Romão 2001,2006), que se caracteriza por bancadas de arenitos maciços fortemente bioturbados, ao longo de 80 a 100 m. Ocorre também aqui intercalação, podendo ser observados estratos de siltitos micáceos de espessura métrica (Metodiev *et al*., 2009).

Seguindo a sucessão, a formação que se segue será a Formação de Ribeira da Laje (FRL). Esta apresenta uma espessura de 25 a 30 m e é constituída por bancadas de arenitos arcósicos micáceos intercalados com arenitos e quartzitos impuros, com alguns sinais de bioturbação, e por bancadas finas de pelitos (Metodiev *et al*., 2009).

Sobre a FRL assenta a Formação de Casal Carvalhal (FCC), com uma espessura de cerca de 55 a 65 m. As suas litologias predominantes são bancadas maciças de silto-pelitos com fragmentos de arenito disseminados, algum ferro oolítico e quartzo de dimensões reduzidas (diamictitos). Nestas litologias, ocorrem intercalações de sequências quartzíticas do tipo *coarsening upwards*, de espessura entre 5 e 10 m (Metodiev *et al*., 2009).

Sobrepondo-se aos diamictitos, encontra-se uma sucessão regressiva de bancadas de quartzitos cinzentos com algumas evidências da presença de pirite. Estas bancadas estão por sua vez intercaladas na sua base por bancadas areno-

siltíticas muito micáceas e de estratos pelíticos de cor negra, que constituem no seu total, a Formação de Vale da Ursa (FVU) (Metodiev *et al*., 2009).

Por fim, acima da FVU ocorre uma sucessão de cerca de 10 m de pelitos negros grafitosos, que se designa por Formação da Aboboreira (FA) (Romão, 2000), que apresenta como principal característica uma carácter regressivo, que é indicado pelo forte conteúdo fossilífero encontrado (Romão, 2000; 2001) (Fig. 1.5).

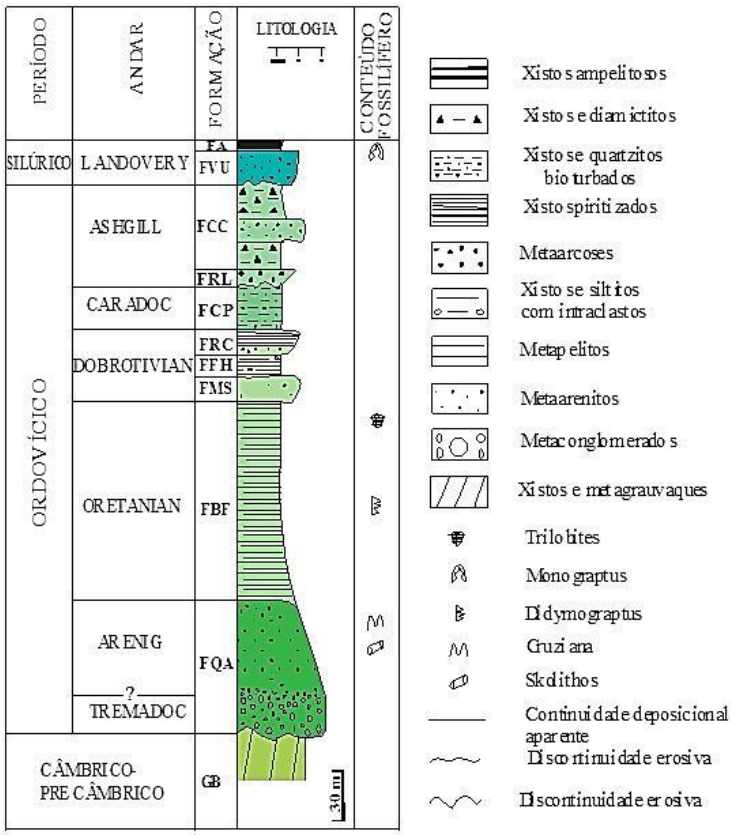


Fig. 1.5 Sequência litoestratigráfica do Sinclinal de Vila Velha de Rodão (seg. Metodiev & Romão, 2008).

1.2.2 Estrutura

O sinclinal de Vila Velha de Rodão enquadra-se numa das grandes zonas em que está dividido o território português, mais propriamente na Zona Centro Ibérica. As litologias desta zona caracterizam-se por ter sofrido efeitos bastante acentuados da deformação Hercínica ou Varisca (Metodiev *et al*., 2009).

O sinclinal resulta da interferência de dobramentos e cavalgamentos que ocorreram durante a principal fase de deformação Varisca (D1), que foram mais tardiamente reativados durante o período tardi-Varisco (Metodiev *et al*., 2009).

De referir que em alguns locais desta região são também observáveis efeitos da fase Sarda, pré-Varisca (Metodiev *et al*., 2009), marcada pela discordância angular entre a sequência do Ordovícico e o CXG subjacente.

A sobreposição de fases Variscas está ilustrada na Fig. 1.6, sendo que mais adiante é descrito com mais pormenor o que se observa nesta estrutura.

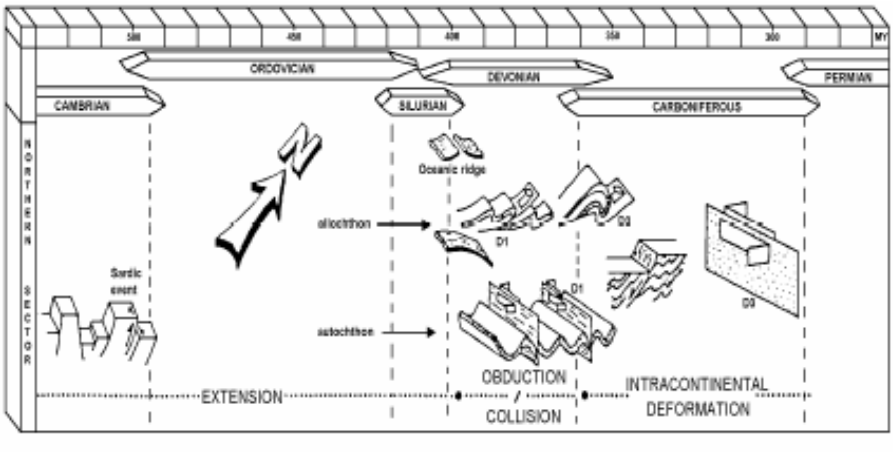


Fig. 1.6 Evolução estrutural da ZCI durante o ciclo Varisco (seg. Dias & Ribeiro, 1994).

1.2.2.1 Deformação Sarda

Como em vários locais ao longo de toda a ZCI, a fase Sarda provocou uma discordância entre o Complexo Xisto-Grauváquico (ante-Ordovícico) e os terrenos do Ordovícico (Pereira, 1988 apud. Martins, 2009). Segundo Diez Balda *et al*. 1990, esta fase de deformação produziu *dobramentos suaves, sem foliação nem metamorfismo associados* (Fig.1.7).

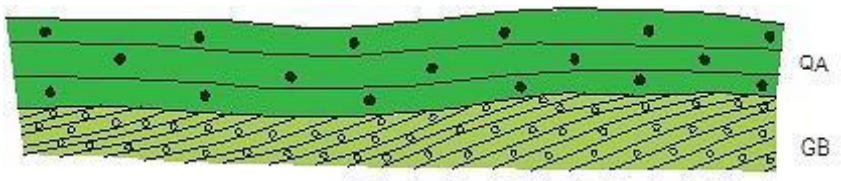


Fig. 1.7 Fase Pré-Varisca (Sarda) – discordância angular (seg. Diez Balda *et al.* 1990). QA – Quartzito Armoricano; GB – Grupo das Beiras (CXG).

1.2.2.2 Deformação Varisca

Tal como na maioria das estruturas pertencentes à ZCI, a 1ª fase de deformação Varisca foi a principal responsável pela formação destas, uma vez que foi o episódio de deformação mais intenso (Diez Balda *et al.*, 1990).

Afetando diretamente o CXG, a D1 teve influência sobre toda a sequência pré-carbonífera, gerando o sinclinal da área em estudo.

Referindo em particular a região em estudo, o sinclinal apresenta uma variação longitudinal que é caracterizada por alguns aspetos de interesse.

O flanco SW apresenta uma deformação forte, causada por uma sucessão de cavalgamentos imbricados, que podem levar a que em alguns locais a estrutura seja considerada um sinclinório. Outro aspeto particular prende-se com as terminações longitudinais da macroestrutura, correspondendo a um monoclinal a SSE (Campos & Pereira, 1991) com pendor para SW, que foram provocadas pelo cavalgamento para NE de Vinagra – Foz do Cobrão. Este foi também responsável pela laminação do flanco SW do sinclinal de Vila Velha de Ródão. (Metodiev *et al*., 2009) (Fig. 1.8).

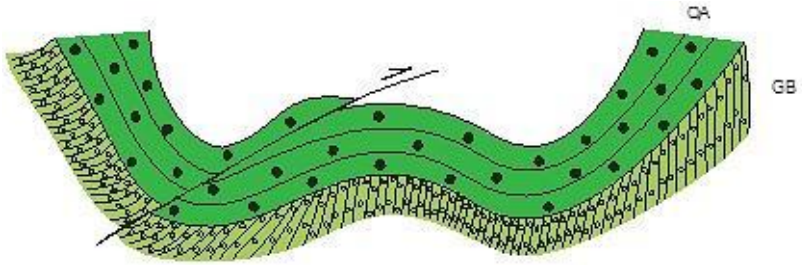


Fig. 1.8 Fase Varisca D1 – Dobramento principal e cavalgamentos com vergência para NE (seg. Metodiev & Romão, 2008).

Analisando as estruturas a nível mesoscópico, verifica-se que as dobras D1 possuem uma geometria distinta das restantes. A orientação dos planos axiais é em geral NW-SE a NNW-SSE, com uma inclinação de aproximadamente 65° a 75° com vergência para NE. É possível no entanto encontrar dobras de pendores elevados (70° a 75°) correspondentes a situações mais tardias, sendo no entanto ainda consideradas D1 (Metodiev *et al*., 2009).

Associada a estas dobras, é possível encontrar uma clivagem (S1) de plano axial, penetrativa, com exceção das bancadas quartzíticas e quarzto-areníticas da sucessão ordovícico-silúrica (Metodiev *et al*., 2009).

A lineação de intersecção entre S0 e S1, denominada de L1, corresponde à estrutura linear mais frequentemente observada. Uma vez que nos encontramos na presença de clivagem de plano axial, as orientações de L1 são maioritariamente N35° a N40°. O seu mergulho é variável, afetado também pelo comportamento das dobras já referido (Romão *et al*., 2009).

Outro aspeto que se prende com a deformação Varisca engloba a ocorrência de cavalgamentos. Nesta área, além do sinclinal, estas estruturas desempenham também um papel de grande importância na estruturação regional sendo que a NW da zona

triangular de Foz do Cobrão, o sinclinal encontra-se limitado a SW por um cavalgamento e a NE por um cavalgamento (Metodiev *et al*., 2009).

O flanco SW encontra-se imbricado pelo cavalgamento Vinagra - Foz do Cobrão, sendo responsável pelo deslocamento das litologias xisto-grauváquicas (GB) sobre os quartzitos da FQA (Fig. 1.9).

No lado oposto, ou seja a NE, a estrutura triangular está confinada pelo cavalgamento de Chão das Servas-Carregais transportando os metassedimentos do GB sobre a sucessão Ordovícico-Silúrica (Metodiev *et al*., 2009) (Fig. 1.9).

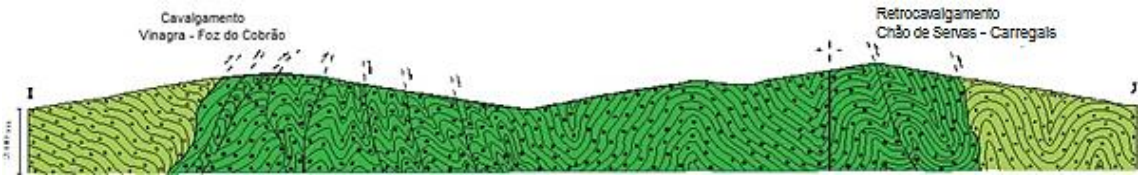


Fig. 1.9 Esquema estrutural dos cavalgamentos Vinagra-Foz do Cobrão e Chão das Servas-Carregais (seg. Metodiev *et al*., 2009).

Há cavalgamentos precoces retomados na fase D1 da deformação Varisca, sendo de seguida precedidos de cavalgamentos de orientação NNW-SSE com grande extensão longitudinal e geometrias em duplex. É possível encontrar estes fenómenos deformacionais nas zonas de Vinagra-Foz do Cobrão e Portas de Rodão-Perdigão (Metodiev *et al*., 2009) (Figs. 1.10 e 1.11).

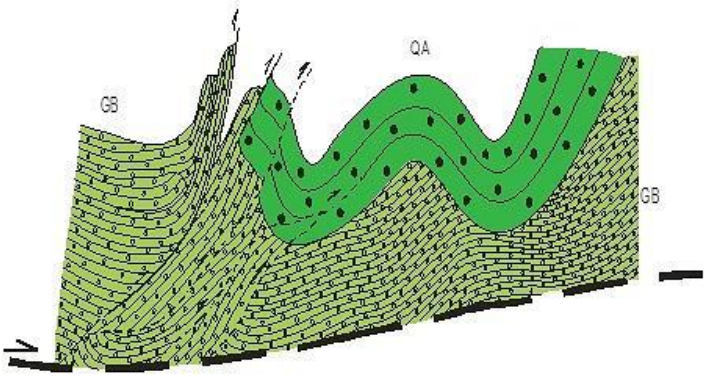


Fig. 1.10 Fase Varisca D2 – evolução dos acidentes da fase D1 com geometrias em *duplex* e criação dos cavalgamentos Vinagra-Foz do Cobrão, Portas do Rodão-Perdigão e Vale do Cobrão; todos com direção NW-SE e vergência para NE (seg. Metodiev & Romão, 2008).

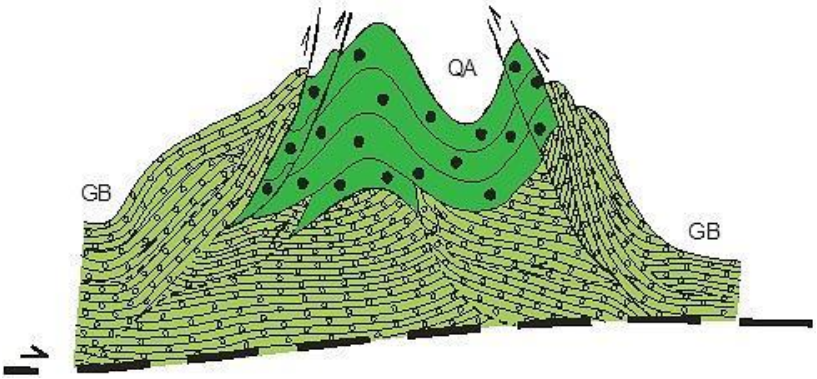


Fig. 1.11 Fase Varisca D2 – dobras (Sobral Fernando) e cavalgamentos (Chão das Servas-Carregais) com vergência oposta (para SW). Descolamento do tipo *thin-skinned* e constituição de zona Triangular (Delta) - Foz do Cobrão (seg. Metodiev & Romão, 2008).

Uma vez que a área de estudo se localiza próximo da aldeia de Vale do Cobrão, interessa entrar um pouco mais em detalhe sobre os cavalgamentos de Vinagra-Foz do Cobrão e Vale do Cobrão. A sua preponderância na sobreposição das litologias do CXG do GB sobre os quartzo-arenitos da FQA é evidente.

Quanto ao primeiro, possui orientação geral NNW-SSE, com pendor para NE e inclinação entre 45 a 80°. Uma particularidade desta estrutura é a presença de estrias constituídas por fibras de quartzo que permitem inferir que o movimento do cavalgamento teve também uma componente direita (Metodiev *et al*., 2009).

O segundo situa-se no núcleo da macroestrutura de Vila Velha de Rodão, próximo da aldeia de Vale do Cobrão. O seu traçado é subparalelo mas bastante mais ondulado, apresentando uma orientação N25°W, inclinando 70° para SW. É este cavalgamento que provoca a inversão da sucessão do Ordovício Médio a Superior do flanco SW do sinclinal de Vila Velha de Rodão. A ondulação observada pode ser resultado de cisalhamentos direitos, contemporâneos com estas movimentações ou de idade tardi-Varisca. O que se supõe é que D1 gerou dobras de charneiras apertadas e cavalgamentos, em ambos os casos com vergências para SSW (Metodiev *et al*., 2009).

1.2.2.3.Deformação Tardi-Varisca

Várias estruturas que datam dos estágios finais da Orogenia Varisca, possuem também expressão sobre as litologias do Sinclinal de Vila Velha de Rodão. Entre as principais podem referir-se fraturas frágeis que atuam a nível transversal e também desligamentos direitos e esquerdos de direção NE-SW (Metodiev *et al*., 2009).

Outra estrutura com impacte a nível de toda a cadeia Varisca e que tem uma expressão importante nesta área é caracterizada por uma família de desligamentos

com atitude E-W e movimentação direita. Encontram-se também desligamentos NE-SW a NNE-SSW (Metodiev *et al*., 2009).

A deformação tardi-Varisca de comportamento frágil observada à escala regional é resultado de um campo de tensões com direção de encurtamento máximo E-W, acompanhada de um encurtamento de menor expressão N-S que provoca uma constrição (Ribeiro *et al*., 2007).

1.2.2.4 Deformação Alpina

As estruturas de idade coincidente com a orogenia Alpina presentes nesta zona são na maioria desligamentos de orientação NE-SW a NNE-SSW, esquerdos, com rejeito de algumas dezenas de metros. Falhas que se encontravam inativas reiniciaram a sua atividade durante esta orogenia, sendo o exemplo da falha do Pônsul (Ribeiro, 1943; Dias & Cabral, 1989) o mais concreto. Esta reativação provocou um cavalgamento a partir do Miocénio Superior provocando sobreposição do substrato Varisco aos depósitos continentais do Terciário (Metodiev *et al*., 2009).

Capítulo 2
Mecânica das Rochas: conceitos gerais

A mecânica das rochas estuda, de uma maneira generalizada, as propriedades e o comportamento dos maciços rochosos submetidos a tensões ou variações das suas condições iniciais (Vallejo *et al.*, 2002).

No entanto, a análise de resultados não pode ser baseada apenas numa área de estudos, pois a geologia envolve um conjunto de fatores externos que é preciso ter em conta.

Para que se tenha uma perceção da forma como o maciço rochoso pode responder quando sujeito a intervenções antrópicas que alteram as suas condições iniciais, é necessário fazer-se um estudo das suas propriedades globais recorrendo a métodos comuns à geologia e à geotecnia.

Desta forma a metodologia adotada compreende um trabalho inicial no campo que é fundamental no que à evolução das condições mecânicas das rochas diz respeito (Vallejo *et al.*, 2002).

De forma a obter-se uma caracterização geológica do local, os aspetos mais importantes a abordar no campo englobam:

- Elaboração de cartografia geológica
- Estudo a nível estrutural
- Ensaios *in situ.*

Com este tipo de ensaios e observações, é possível avaliar as propriedades dos maciços rochosos em condições naturais e numa escala representativa (Vallejo *et al.*, 2002).

A resposta mecânica dos materiais pode ser observada a diferentes escalas dimensionais. É por isso que, de forma a complementar o estudo feito no campo, se deve realizar também uma análise petrográfica.

Segundo Rzhevsky & Novik (1971 *apud.,* Navarro, 2002) *"a interação entre a composição, texturas e estruturas que as rochas podem apresentar, é o fator que define a resistência aos agentes químicos, físicos e mecânicos de toda rocha, ou seja é o resultado da combinação das características petrofísicas do material"*.

A uma escala microscópica, as partículas minerais podem sofrer rearranjos e gerar planos de fratura como resposta ao novo estado de tensões. Isto reflete-se numa dimensão maior com a ocorrência de planos de descontinuidade no maciço (Vallejo *et al.*, 2002).

De forma a compreender as propriedades físicas da rocha, o estudo petrográfico recorre a uma análise de componentes tais como a composição mineralógica, a textura da rocha, verificando a existência ou não de anisotropia, e a existência de fracturação e porosidade ao nível microscópico (Montoto, 1983).

De forma a completar o estudo, é necessário recorrer a equipamentos que simulem em laboratório o comportamento das rochas quando sujeitas a tensões. Torna-se então possível quantificar as propriedades físicas e mecânicas da matriz rochosa (Vallejo *et al.*, 2002). Esta porção do trabalho é usada como forma de complementar todos os dados recolhidos até então, sendo que nunca deve ser usada como única forma de realizar este estudo (Hoek, 2007).

Uma vez que o estudo laboratorial é feito sobre carotes obtidas através de furos de sondagens é importante que estas sejam representativas do maciço em estudo. No entanto, os resultados obtidos serão sempre influenciados pelo facto de, ao retirar as carotes dos furos de sondagem, estar a ser alterado o estado de tensão que se verificava em profundidade. .Os ensaios são realizados em laboratório e compreendem numa primeira fase, o uso de equipamentos que permitam um estudo da amostra sem a sua destruição, e numa fase posterior, são utilizados outros que apliquem tensões direcionadas com valores que provoquem a rotura da amostra. É assim possível determinar qual a resistência à compressão simples, e qual o módulo de deformabilidade do material.

Em suma, num estudo que tenha como objetivo conhecer as propriedades básicas das rochas e as suas propriedades mecânicas, de forma a atribuir-se uma classificação geotécnica geral do maciço, alguns dos métodos utilizados são esquematizados abaixo (Vallejo *et al.*, 2002):

1) Propriedades base (classificação)
    - Estudo da composição mineralógica e textural – análise macroscópica e microscópica (campo/laboratório)

2) Propriedades mecânicas
    - Estudo da velocidade das ondas sónicas – método dos ultrassons (laboratório)
    - Estudo da resistência à compressão simples – ensaio de compressão uniaxial e carga pontual (laboratório); martelo de Schmidt (campo)
    - Estudo da deformabilidade – ensaio de compressão uniaxial e método dos ultrassons (laboratório).

Capítulo 3
Metodologias

3.1. Amostragem (Sondagens)

As sondagens são um método semidirecto de prospeção com dois objetivos distintos, sendo que cada um recorre a diferentes metodologias. Estas podem ser usadas como método de perfuração, em que o principal objetivo é realizar o furo da forma mais rápida possível (Camberfort, 1975), ocorrendo a destruição do material, ou como forma de recolher material geológico que pode ser futuramente estudado.

Sob esta designação incluem-se os furos abertos com trado, as sondagens de penetração e as sondagens de furação.

As sondagens de furação permitem a extração de material do terreno e podem ser (Loureiro, 2008):

- Sondagem de percussão: uma sondagem destrutiva;

- Sondagem de rotação: a ferramenta de furação avança por rotação, podendo ser destrutiva ou com recuperação contínua de amostra.

Quando o objetivo é estudar a litologia em profundidade, as sondagens à rotação com recolha de amostra são as mais indicadas, sendo que neste trabalho foram estas as realizadas (Vallejo *et al*., 2002).

Este tipo de furação aplica-se a vários tipos de rocha e mesmo a solos, sendo que a inclinação a utilizar é variável, dependo dos objetivos do trabalho (Vallejo *et al*., 2002).

Uma grande vantagem deste tipo de operação prende-se com o facto de a extração de testemunho ser efetuada de uma forma constante, o que permite percentagens de recuperação bastante elevadas.

Em termos de desvantagens, materiais muito pouco consolidados são uma séria limitação a esta metodologia (Vallejo *et al*., 2002).

3.1.1. Perfuração

No decurso da operação de perfuração, é necessário que a lubrificação e arrefecimento do equipamento sejam constantes, pelo que estes sistemas recorrem frequentemente à circulação de água, ar ou ar húmido. No entanto os avanços tecnológicos têm permitido o uso de lamas especiais com aditivos ou mesmo espumas (Telford, 1993).

Trabalhando em contacto com a geologia, existe sempre uma quantidade bastante considerável de fatores que podem contribuir para que a sondagem não seja bem-sucedida. Como exemplos, pode considerar-se o facto de o maciço estar

fraturado, de as pressões em profundidade variarem ou o facto de o trabalho estar a ser realizado em rochas permeáveis.

Para mitigar este problema e manter as condições ideais de funcionamento do equipamento, as lamas e o furo devem respeitar algumas condições (Azar & Samuel, 2007):

- A lama tem que ter uma densidade adequada às litologias a perfurar
- O furo de sondagem deve ser verificado para o caso de fragmentos o bloquearem, pelo que neste caso deve ser limpo de imediato
- É necessário uma atualização constante em termos litológicos, de forma a poder ser usada a lama correta

Em termos de equipamento, este tipo de sondagens recorre ao uso de uma coroa diamantada ou de tungsténio como coroa de perfuração, avançando por ação da abrasão. Estas podem ter diferentes diâmetros (Maranhão, 1972).

A coroa encontra-se inserida num sistema duplo ou triplo de tubagem, que no interior possui um sistema *inner linner*, ou seja, é oco de forma a poder albergar o testemunho.

Como já referido, a recuperação neste tipo de sondagens é bastante elevada, sendo que é requerido que ronde 100% (Azar & Samuel, 2007).

Alguns dos exemplos de equipamentos usados no processo de sondagens à rotação com recolha de carote são apresentados abaixo (Fig. 3.1)

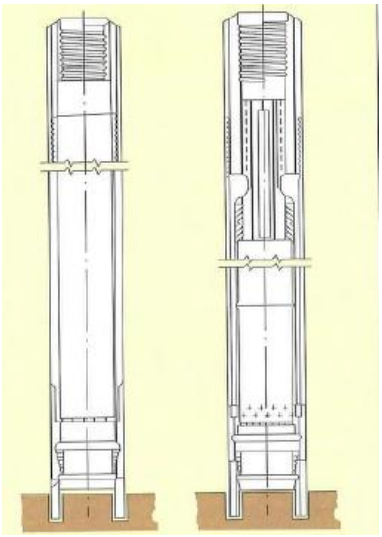


Fig. 3.1 Exemplos de tubos de sondagem duplos e triplos (seg. Vallejo *et al*, 2002).

3.1.3. Sondagens à rotação com carotagem

As sondagens à rotação permitem obter várias informações como:

- Percentagem de recuperação
- RQD – Rock Quality Designation
- Litologia (simbologia e descrição)
- Grau de alteração
- Textura
- Cor
- Ângulo da xistosidade e das fraturas com o eixo da carote
- Diâmetro das sondagens e comprimento dos provetes
- Realização de ensaios *in situ*

A percentagem de recuperação permite saber a percentagem de amostra que é obtida num determinado furo de sondagem. Sabendo o comprimento do furo entre manobras, é medido o comprimento da amostra respetiva. Isto permite avaliar as condições litológicas e estruturais do local (falhas, fracturação), dependendo também da perícia do operador (Deere, 1988).

O RQD ou Rock Quality Designation relaciona a soma de todas as amostras da manobra com mais de 100 mm com o comprimento total da manobra (Maranhão, 1972), e foi proposta por Deere em 1963.

$$\text{RQD} = \frac{\sum i}{L}$$

Em que:

i = comprimento de cada de trecho com mais de 100 mm
L = comprimento da manobra

Com este índice é possível classificar a qualidade da rocha

Como nota de bastante importância, há que analisar a fracturação. É necessário ter em conta que as fraturas podem ser causadas pela manobra de sondagem ou pertencerem ao próprio maciço. A forma de identificar cada uma destas prende-se com a rugosidade da superfície fraturada. As fraturas naturais apresentam uma

superfície mais suave, por vezes com película de óxidos, ao passo que as fraturas induzidas são mais rugosas e apresentam um aspeto mais fresco e menos alterado (Deere, 1988).

A análise das carotes de sondagem permite obter uma classificação do tipo de rocha que se está a perfurar. Esta deve ser precisa e uniforme, obedecendo a um critério definido. Depois de uma análise macroscópica, é essencial recorrer futuramente a uma análise petrográfica para corroborar as conclusões retiradas (Maranhão, 1972).

A alteração das rochas é outro dos aspetos importantes a ter em conta. Este fenómeno resulta de um conjunto de modificações, tanto a nível físico como químico, que são causadas por agentes naturais quando as condições em que esta se encontra são diferentes daquelas que se verificavam aquando da sua formação (Maranhão, 1972).

No que à caracterização geotécnica diz respeito, segundo Maranhão (1972) a alteração deve ser analisada em várias fases:

- Alteração, consoante a profundidade
- Agrupamento dos diferentes graus de alteração
- Estudo de alteração ao nível mineralógico
- Estudo dos diversos fenómenos de alteração a que a amostra possa ter sido sujeita

De forma a estudar os graus de alteração de maciços rochosos, recorrer-se à tabela seguinte (Tabela. 3.1).

Tabela 3.1 Graus de alteração (adaptado de Williamson *et al*, 1988).

Símbolo		Designação		Descrição
W_1	W_{1-2}	São	São a pouco alterado	Sem quaisquer sinais de alteração
W_2		Pouco alterado		Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W_3	W_3	Medianamente alterado	Medianamente alterado	Alteração visível em todo o maciço mas a rocha não é friável
W_4	W_{4-5}	Alterado	Alterado a muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e rocha parcialmente friável
W_5		Muito alterado		Maciço completamente friável

A estrutura engloba vários aspetos, entre os quais lineações, xistosidades, diaclasamentos ou planos de estratificação. É necessário que seja conhecida a exata posição da sondagem para que os estudos efetuados estejam concordantes com o que é observado *in situ* (Maranhão, 1972).

Relativamente a aspetos tectónicos, como a fracturação e diaclases, deve fazer-se um estudo sobre o espaçamento e características das mesmas, avaliar a sua rugosidade e a presença ou não de preenchimento (Maranhão, 1972).

A cor é um dos parâmetros que também é possível estudar. No entanto é necessário que este seja analisado com bastante cuidado pois o conceito de cor pode ser subjetivo. No entanto, com base na carta de Cores da Geological Society of America (Maranhão, 1972), é possível estabelecer um padrão.

É preciso ter em conta também que a cor deve ser analisada tendo por base um conhecimento dos fenómenos de alteração a que a rocha possa ter sido sujeita, uma vez que a presença de colorações castanhas pode não resultar da natureza litológica mas sim de fenómenos de alteração causados pela exposição aos fatores ambientais (Maranhão, 1972).

Relativamente ao ângulo de xistosidade com o eixo da sondagem, para que seja feita uma melhor interpretação dos resultados obtidos nalguns dos ensaios, é necessário conhecer a anisotropia da rocha e os ângulos que a xistosidade apresenta

com o eixo da carote. A resistência à rotura que o material apresenta quando sujeito a forças compressivas varia bastante consoante a direção aplicada em relação a este ângulo (Vallejo *et al*., 2002).

Nas rochas metamórficas, a anisotropia é causada por processos de compressão que geram uma deformação plástica, originando grãos minerais de forma alongada (Rocha, 1981).

Os planos de xistosidade implicam que existe uma menor coerência entre os grãos da rocha, pelo que se tornam planos de fraqueza. Sendo assim, quando são aplicadas forças sobre a amostra é segundo este plano que a probabilidade de rotura é mais elevada.

As forças que sejam aplicadas de forma paralela ou até a um ângulo de 45° destes planos, provocam certamente a rotura mais rápida da amostra, pois como já referido, a resistência é muito inferior. No entanto, se a força for aplicada de forma perpendicular à xistosidade, o comportamento da rocha será o inverso, pois a compressão irá compactar os vários planos, sendo esta a direção em que a rocha apresentará um maior valor de resistência (Vallejo *et al*., 2002) (Fig. 3.2).

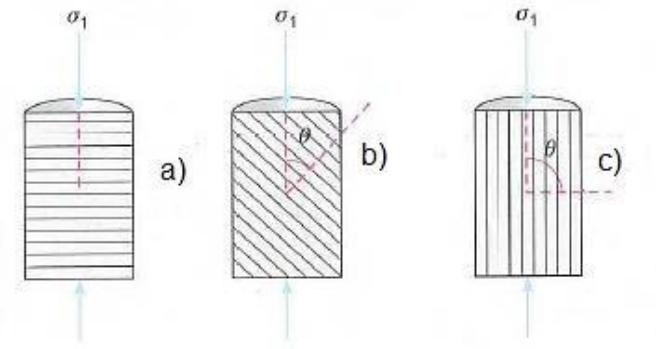


Fig. 3.2 Ângulo entre a anisotropia e a tensão aplicada. a) tensão aplicada perpendicularmente b) tensão aplicada a 45° c) tensão aplicada paralelamente (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002).

É necessário ter em conta o diâmetro da sondagem para estabelecer uma dimensão para os provetes a serem usados nos ensaios laboratoriais. Para tal, é necessário que as dimensões destes se encontrem dentro de certos parâmetros, de forma a possibilitar a análise dos resultados e compará-la com outros já existentes ou com a bibliografia.

Desta forma é necessário seguir as normas da ISRM (1979), que dizem que a relação L/D nos ensaios de compressão uniaxial deve ser de 2.5 a 3.

3.2. Petrografia

Para que seja possível compreender a razão da amostra apresentar determinados valores relativos aos ensaios mecânicos efetuados, é importante possuir uma descrição a nível mineralógico das amostras, pois entre os fatores mais importantes que afetam as características mecânicas das rochas encontra-se a composição mineralógica.

É importante referir que esta análise deve ser efetuada com o maior nível de precisão possível. *A nomenclatura usada para designar o tipo de rocha obtido deve seguir um critério definido e uniforme*, como refere Maranhão (1972).

Um estudo incidente sobre rochas metamórficas necessita de focar-se em primeiro lugar no protólito da rocha e de seguida, nos processos e condições de metamorfismo a que esta foi sujeita. No final, a classificação obtida engloba a origem da rocha, o tipo e grau de metamorfismo e os aspetos texturais apresentados (Gonçalves, 2010).

3.2.1. Análise macroscópica

O primeiro passo na análise petrográfica de uma rocha é fazer a sua descrição macroscópica. A classificação pode não ser a mais precisa, pois existem muitas outras variantes a estudar, no entanto, é possível atribuir uma designação à rocha.

Entre os parâmetros a analisar encontram-se o aspeto, a cor, a textura e mineralogia (Crandell, 2006).

3.2.2. Análise microscópica

A utilização do microscópio petrográfico é essencial na análise das rochas, pois permite observar aspetos que não são visíveis a olho nu, complementando a análise feita anteriormente.

A análise microscópica permite não só a caracterização geológica do material mas também das suas propriedades físicas e mecânicas. Este tipo de técnica permite um estudo do material em termos mineralógicos sem que ocorra destruição da amostra. A resolução espacial obtida por este aparelho é bastante elevada (Raith *et al.*, 2011).

O desenvolvimento do microscópio petrográfico ocorreu por volta do século XIX, e desde aí este tem sido uma ferramenta fundamental no estudo das rochas. Este

aparelho recorre à luz polarizada para caraterizar as propriedades ópticas da estrutura cristalina dos minerais (McHone, 2013).

A luz polarizada utilizada no microscópio petrográfico, propaga-se no eixo do microscópio vibrando apenas num plano. Ao atravessar a lâmina delgada a luz polarizada interage com a estrutura interna dos minerais presentes nessa secção. Ao sair da amostra, o plano de vibração da luz é alterado, uma vez que cada mineral tem uma estrutura cristalina própria e interage com a luz de maneira diferente. É com base na interpretação destas propriedades óticas que o petrógrafo consegue fazer a identificação dos minerais (Powell, 2001).

Em termos mecânicos, é possível relacionar as microfraturações observadas ao microscópio com as fraturas presentes ao nível macroscópico. Nas rochas anisotrópicas, o alinhamento dos minerais micáceos produz planos de xistosidade que apresentam menor coerência entre os grãos, pelo que a resistência às forças de cisalhamento serão menores. Por outro lado em locais em que a composição mineralógica é mais rica em sílica, como por exemplo em zonas com quartzo, a resistência à compressão será mais elevada (Da, 2011).

3.3. Materiais e Métodos

3.3.1. Listagem das carotes

Para a realização de ensaios de laboratório foram utilizados trechos de várias carotes obtidas por sondagem. Abaixo encontra-se a listagem das amostras (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 Listagem das sondagens.

Carote	CH11	CH3	CH10	CH13	CH15	SA17

Com o objetivo de selecionar amostras que apresentassem as características de diâmetro e comprimento, adequadas aos ensaios, foram selecionados os trechos que se indicam na tabela 3.3, com referência às respetivas profundidades de furação.

Tabela 3.3 Tabela de amostras, com indicação da profundidade de cada trecho de sondagem.

Amostra	Sondagem	Profundidade (m)	Amostra	Sondagem	Profundidade (m)
AM1	CH10	22,20 a 22,65	**AM31**	CH3	183,95 a 184,96
AM2	CH10	29,55 a 30,00	**AM32**	CH3	168,70 a 169,60
AM3	CH10	30,90 a 31,20	**AM33**	CH3	165,30 a 165,92
AM4	CH10	31,90 a 32,55	**AM34**	CH3	141,48 a 142,05
AM5	CH10	56,84 a 57,70	**AM35**	CH3	150,70 a 151,12
AM6	CH10	56,15 a 56,75	**AM36**	CH3	120,35 a 120,75
AM7	CH10	33,70 a 34,25	**AM37**	CH3	108,00 a 108,56
AM8	CH10	34,25 a 34,55	**AM38**	CH5	59,00 a 59,17
AM9	CH10	36,65 a 37,20	**AM39**	CH6	58,75 a 59,00
AM10	CH10	37,20 a 37,60	**AM40**	CH11	105,10 a 105,65
AM11	CH10	52,40 a 53,25	**AM41**	CH11	106,00 a 106,42
AM12	CH10	38,74 a 39,30	**AM42**	CH11	103,60 a 103,87
AM13	CH10	41,80 a 42,12	**AM43**	CH11	85,90 a 86,58
AM14	CH10	47,90 a 48,55	**AM44**	CH11	87,45 a 87,82
AM15	CH10	49,40 a 49,70	**AM45**	CH11	5,90 a 6,15
AM16	CH10	74,30 a 74,70	**AM46**	CH11	99,62 a 100,20
AM17	CH10	73,70 a 74,10	**AM47**	CH11	154,80 a 155,10
AM18	CH10	72,90 a 73,55	**AM48**	CH11	96,90 a 97,20
AM19	CH10	46,40 a 47,55	**AM49**	CH13	155,45 a 155,80
AM20	CH3	193,20 a 193,50	**AM50**	CH15	62,80 a 63,20
AM21	CH3	192,90 a 193,20	**AM51**	CH15	58,00 a 63,20
AM22	CH3	292,60 a 230,00	**AM52**	CH15	55,40 a 56,30
AM23	CH3	174.70 a 175,00	**AM53**	CH15	59,47 a 59,82
AM24	CH3	175,00 a 175,35	**AM54**	SA17	13,50 a 13,80
AM25	CH3	175,35 a 175,80	**AM55**	SA17	10,40 a 10,70
AM26	CH3	175,80 a 176,74	**L1**	CH3	70,1
AM27	CH3	178,53 a 179,10	**L2**	CH11	43,4
AM28	CH3	179,15 a 180,00	**L3**	CH3	156
AM29	CH3	182,30 a 182,75	**L4**	CH5	200
AM30	CH3	183,40 a 183,95	**L5**	CH5	200

A designação AM corresponde a amostras de carotes a ser usadas nos ensaios mecânicos; L aos trechos usados para produção de lâminas delgadas para estudo petrográfico.

Dos trechos listados na tabela 3.2, foram utilizados neste trabalho os correspondentes à fração filitosa.

3.3.2. Equipamento usado e procedimento seguido no trabalho laboratorial

3.3.2.1 Análise macroscópica e microscópica

Como já referido, a caracterização petrográfica de amostras contribui para compreender o comportamento mecânico das rochas em estudo.

Neste trabalho recorreu-se aos dois tipos de observação, quer macroscópica, quer microscópica.

Na observação macroscópica recorreu-se à análise das carotes à escala da amostra de mão. Fatores como a cor, alteração, textura e fracturação foram analisados.

Para a análise microscópica de lâminas delgadas, recorreu-se a dois equipamentos:

- Lupa binocular modelo LEICA M205 C, existente no Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (DGAOT-FCUP) (Foto 3.1).

- Microscópio ótico de polarização, com luz transmitida e refletida, modelo Nikon Eclipse E 400 POL, com diversas objetivas, de ampliação 5x, 10x, 20x e 50x, existente no DGAOT-FCUP (Foto 3.2);

-Lâminas delgadas de espessura 0.3 mm.



Foto 3.1 Lupa binocular usada na observação microscópica.

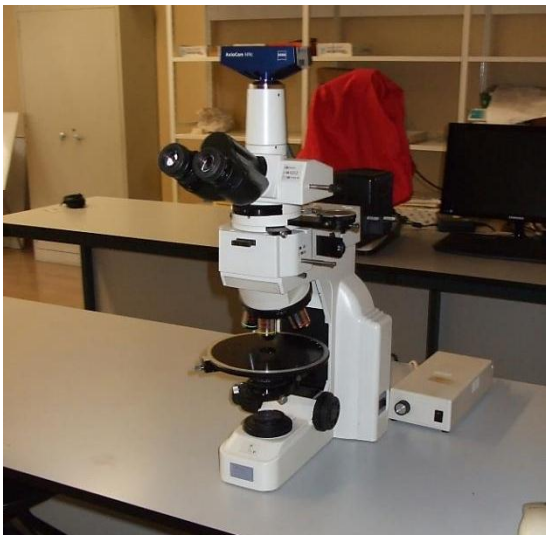


Foto 3.2 Microscópio ótico de polarização.

3.3.2.2. Martelo de Schmidt/ Esclerómetro

Entre os ensaios que é possível realizar no campo, o martelo de Schmidt foi o adotado, permitindo fazer uma primeira avaliação das características mecânicas do material. Com este método puderam retirar-se conclusões acerca da dureza do material e qual a sua resistência à compressão uniaxial. O equipamento é da marca CONTROLS, modelo 45-D0561 (Fig. 3.3).



Fig. 3.3 Exemplo de um martelo de Schmidt ou Esclerómetro (retirada de Humboldt Construction Materials Testing Equipment).

Foi tida em atenção a maneira como as medições foram feitas, para que a orientação face à superfície fosse o mais perpendicular possível (Foto 3.3).

O resultado obtido pelo equipamento é então registado.



Foto 3.3 Exemplo de medição em campo com recurso ao martelo de Schmidt.

3.3.2.3. Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial tem como objetivo estudar o comportamento mecânico de um provete quando sujeito e tensões orientadas segundo o seu eixo.

Para a realização deste ensaio foi usado o procedimento sugerido pela ISRM (1979).

O equipamento usado pertence à marca INSTRON, sendo o modelo 1343, correspondendo a uma prensa de controlo hidráulico com capacidade máxima de 250 kN, um controlador digital e um painel de controlo (Foto 3.4).

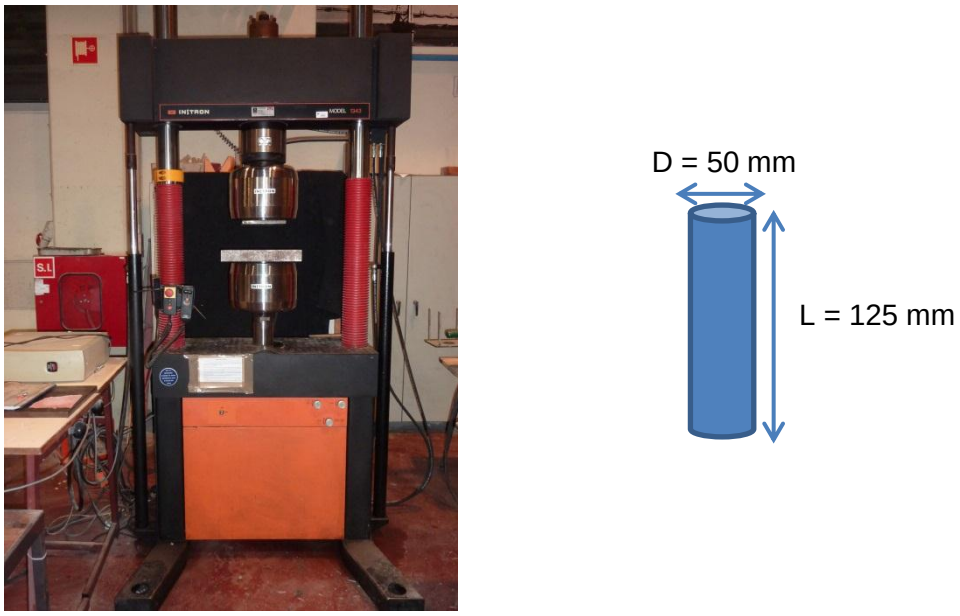


Foto 3.4 Equipamento para ensaio de compressão uniaxial e dimensão das amostras.

Em primeiro lugar calculou-se a área do topo dos provetes.

De seguida, definiu-se a velocidade de aplicação da carga, tendo sido aplicado uma tensão de 0,5 kN/mm^2/s, uma vez que era esperado que estas rochas apresentassem uma resistência bastante baixa e por conseguinte, requeriam velocidades de aplicação reduzidas.

O procedimento seguido no equipamento foi o seguinte:

1. Colocação do provete no centro dos pratos do equipamento
2. Início do funcionamento do equipamento
3. Ao ocorrer a rotura, o valor de tensão máxima aplicada fica registado no ecrã do equipamento

Com base nestes resultados é possível depois passar ao cálculo das propriedades mecânicas das amostras, nomeadamente o módulo de Young.

3.3.2.4. Ensaio de carga pontual

O ensaio de carga pontual sujeita a amostra de rocha a uma compressão entre duas ponteiras cónicas de metal duro, que provocam a rotura por desenvolvimento de fissuras de tração paralelas ao eixo da carga, sendo registado o valor da carga (P) que provoca a rotura.

O ensaio seguiu o procedimento sugerido pela ISRM (1985) e recorreu ao equipamento da marca CONTROLS, modelo 45-D0550/D (Foto 3.5).



Foto 3.5 Equipamento usado no ensaio de carga pontual.

Num primeiro momento o provete é marcado para que encaixe perpendicularmente às prensas do equipamento.

De seguida, procede-se da seguinte forma:

1. “Zera-se” o equipamento
2. Usa-se a função “Peak” do equipamento, para que o valor máximo de tensão suportada seja registado
3. Coloca-se o provete entre as prensas e efetua-se a bombagem do macaco hidráulico para que estas se encontrem em contacto com a amostra
4. O manómetro regista uma pequena carga, proveniente do facto do provete estar preso. A partir daí o ensaio decorre até que ocorra a sua rotura
5. Ocorrendo a rotura, o valor de tensão máxima aplicada ficar registado no ecrã do equipamento.

De seguida, podem ser feitos os cálculos das propriedades mecânicas do material.

3.3.2.5. Ultrassons

No decorrer deste trabalho foram seguidas as normas referidas pela ISRM (1978). Para tal o equipamento usado foi o modelo 58-E0048 da marca CONTROLS (Foto 3.6), que utiliza um impulso elétrico de baixa frequência ultrassónica.



Foto 3.6 Equipamento usado na medição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas em a) e b).

Uma vez que os transdutores têm que estar em total contacto com a amostra para os resultados serem fiáveis, é necessário adotar o método de transmissão direto. A escolha foi feita com base em dois fatores preponderantes. O principal prende-se com a geometria das amostras, uma vez que estas são cilíndricas, apresentando apenas os topos planos (ISRM, 1978).

O impulso referido é emitido através do transmissor, percorrendo todo o corpo do provete, e é depois capturado pelo recetor, que o transforma num impulso elétrico e retorna assim à unidade central. Esse valor é registado e usado depois na determinação da velocidade de propagação das ondas elásticas.

Na tabela seguinte são apresentados os valores de velocidade de propagação de ultrassons publicados para diferentes tipos de rochas (Tabela. 3.4).

Tabela 3. 4 Algumas velocidades observadas para diferentes tipos de rocha (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002).

Rocha Sã	Velocidade de propagação das ondas Vp (m/s)
Arenito	1400-4200
Basalto	4500-6500
Calcário	2500-6000
Conglomerado	2500-5000
Quartzito	5000-6500
Diabase	5500-7000
Dolerito	4500-6500
Dolomito	5000-6000
Gabro	4500-6500
Gneisse	3100-5500
Granito são	4500-6000
Lutito	1400-3000
Marga	1800-3200
Mármore	3500-5000
Piçarra	3500-6000
Sal-gema	4500-6000
Gesso	3000-4000

3.4. Ensaios

3.4.1 *In Situ*

A preparação de amostras para estudos laboratoriais é um processo bastante dispendioso, pelo que a criação de métodos que permitam a redução dos custos e que sejam facilmente realizados no campo se tornou essencial. Estes métodos requerem precisão e fiabilidade (Torabi *et al*., 2010).

3.4.1.1. Martelo de Schmidt ou esclerómetro portátil

O martelo de Schimdt responde às necessidades referidas. Criado para testes em betão, este equipamento passou posteriormente a ser usado no estudo de maciços rochosos (Cargill & Shakoor, 1990). Este ensaio permite avaliar de forma aproximada a resistência à compressão uniaxial (Vallejo *et al*., 2002).

O procedimento experimental desta técnica é bastante simples.

Em primeiro lugar é preciso verificar que a superfície de aplicação se encontra livre de fissuras ou fracturação e também que não se realize em zonas de alteração (Vallejo *et al*., 2002).

O aparelho deve ser então encostado à superfície do maciço da forma mais perpendicular possível ao plano em estudo (ASTM D, 5873). O resultado do ressalto da ponteira é registado no aparelho.

O número de ensaios aconselhados situa-se entre 10 e 12 em cada área (Vallejo *et al*, 2002).

Dos 12 valores medidos de dureza de Schmidt, faz-se uma média com os 6 valores mais elevados.

Essa média é então usada no ábaco de Miller (Fig. 3.4), e tendo em conta a inclinação usada no martelo e o peso volúmico da rocha, obtém-se o resultado relativo à compressão uniaxial.

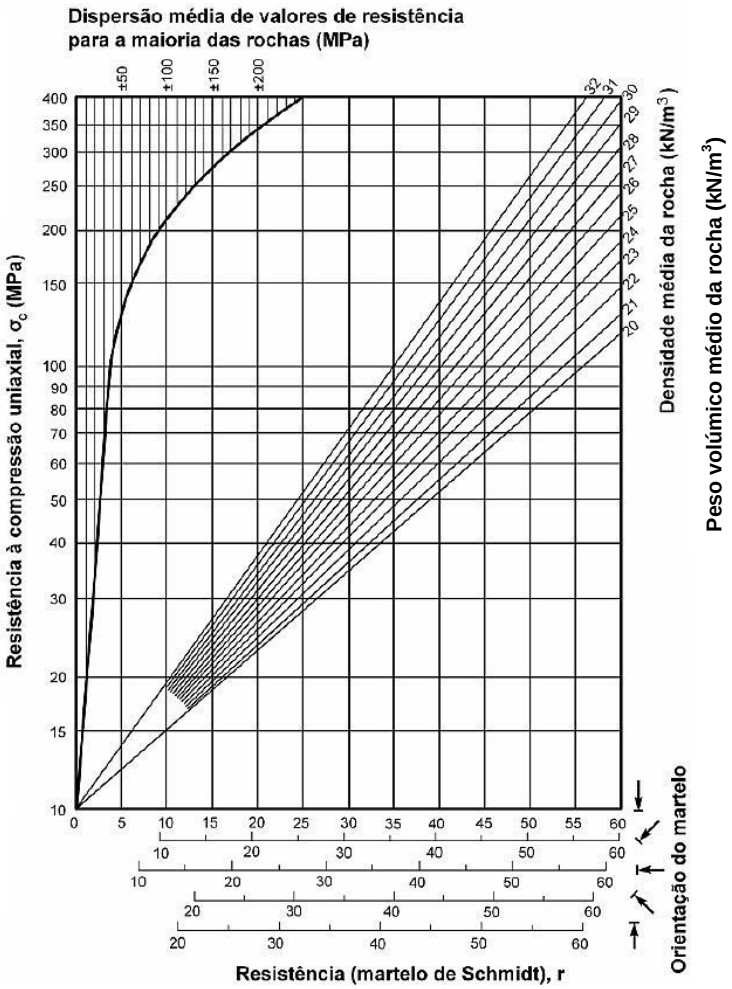


Fig. 3.4 Ábaco de Miller para o cálculo da dureza a partir do *martelo Schmidt* (adaptado de Vallejo *et al*., 2002).

3.4.2. Ensaios laboratoriais

3.4.2.1. Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial é realizado quando se pretende avaliar resistência de uma rocha quando submetida a uma tensão uniaxial, ou seja, sem confinamento. A realidade é que no seu estado natural, as rochas encontram-se sujeitas a estados de tensão triaxiais. No entanto, tem interesse a realização de ensaios de tensão com apenas uma orientação, pois estes possibilitam evidenciar de forma mais clara o comportamento mecânico do material rocha (Rocha, 1981).

Este tipo de estudo é importante quando as litologias em causa são usadas a nível estrutural, como no caso de fundações ou para pilares e colunas em escavações subterrâneas (Rocha, 1981).

Os ensaios são realizados em laboratório. Por norma são usados cinco provetes para cada local a ser estudado, seguindo as normas da ISRM (1979). Os resultados obtidos correspondem à resistência à compressão simples, σ_c. *Os* resultados são expressos em MPa. De referir também que a relação entre as forças aplicadas pressupõe que $\sigma1 \neq 0$ e $\sigma2 = \sigma3 = 0$ (Vallejo *et al.*, 2002).

O procedimento deste trabalho laboratorial implica então a aplicação de uma força gradual, no sentido axial do provete cilíndrico (Fig.3.5). Esta tensão normal (σ) aplicada nas bases é igual à razão da força normal N, pela área da base do provete.

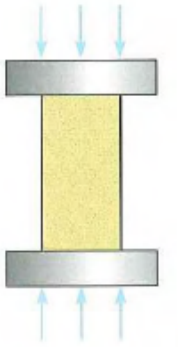


Fig. 3.5 Esquema da aplicação de forças numa carote (seg. Vallejo *et al.*, 2002).

Esta tensão vai sendo aumentada até que ocorra a rotura. Ao longo do ensaio é possível medir qual a deformação em função da força aplicada.

Segundo a ISRM (1979), existem algumas recomendações no que à forma dos provetes diz respeito.

- A relação L/D (comprimento/diâmetro) deverá ser de 2,5 a 3,0, sendo que D> 54 mm. Também D terá que ser pelo menos 10 vezes maior que o tamanho do grão da rocha (Fig.3.6);

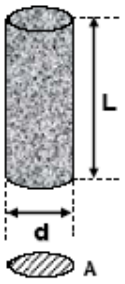


Fig. 3.6 Relação L/D (seg. ISRM 1979).

- As bases dos provetes cilíndricos devem ser planas e encontrar-se perpendiculares ao eixo deste;

- Não é permitido o uso de substâncias de revestimento e tratamento na base dos provetes;
- As paredes laterais da amostra deverão ser lisas, não possuindo irregularidades acentuadas, sendo que no caso de existirem, é aconselhável que estas não excedam em mais de 0,3 mm o diâmetro da carote;
- As dimensões devem ser medidas com uma exatidão de 0,1 mm no caso do diâmetro e 1,0 mm para a altura;
- O tempo de armazenamento das amostras não deve ser muito elevado, para que as condições em que o teste é feito se assemelhem às originais;
- A velocidade de aplicação da carga, recomendada em ISRM (1979) será tal que os aumentos nas tensões aplicadas sejam na ordem dos 0,5 a 1 MPa/s até que seja alcançado o pico de resistência. O uso de intervalos demasiado grandes pode provocar roturas violentas na amostra e inflacionar os valores de resistência do material.

Como já referido, para que a caracterização do maciço seja fiável, é necessário que sejam realizados pelo menos cinco ensaios (Vallejo *et al*., 2002).

Em geral, o comportamento apresentado pelos provetes, quando sujeitos a este ensaio, pode ser descrito por 3 etapas a nível gráfico. É iniciado por um troço ascendente, até que ocorra o pico de resistência, σ_c, ocorrendo nessa altura a rotura do provete. Segue-se depois um tramo descendente correspondente à perda de resistência da amostra (Rocha, 1981).

O valor da força máxima que o provete suporta, dividido pela área sobre a qual esta força é aplicada, corresponde à resistência à compressão uniaxial simples (Vallejo *et al*., 2002).

A classificação do material rocha pode ser também efetuada segundo a tabela 3.5, recorrendo a um dos autores referidos.

Tabela 3.5 Tabela de classificação das rochas com base no ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Vallejo *et al.,* 2002).

Resistência à compressão simples (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Exemplos
<1	Solos			
1 – 1.5	Muito branda	Branda> 1.25	Muito baixa	Sal-gema, margas, carvão
5 – 12.5	Branda	Moderadamente branda		
12.5 - 25		Moderadamente dura		
25 - 50	Moderadamente dura		Baixa	Xistos, xistos argilosos
50 - 100	Dura	Dura	Média	Rochas metamórficas xistosas, mármores, granitos, gneisses
100 - 200	Muito Dura	Muito Dura	Alta	Rochas ígneas e metamórficas duras, arenitos fortemente cimentados, dolomites
>200		Extremamente dura	Muito alta	Quartzito, gabro, basalto
> 250	Extremamente dura			

Outra representação que é possível fazer, recorre a um gráfico em que é possível analisar a evolução do módulo de elasticidade, deformabilidade ou de Young, E = $\frac{d\sigma}{d\varepsilon l}$, o coeficiente de Poisson, υ = $\frac{-\varepsilon t}{\varepsilon l}$, e a extensão volumétrica, correspondente à variação de volume da unidade de volume, $\frac{\Delta v}{v}$ = (1-2υ)εl (Fig. 3.7).

De notar que para os dois primeiros parâmetros, consideram-se valores positivos à direita do eixo de σ e valores negativos à esquerda, ao passo que para a variação do volume, deve proceder-se de forma inversa (Rocha, 1981).

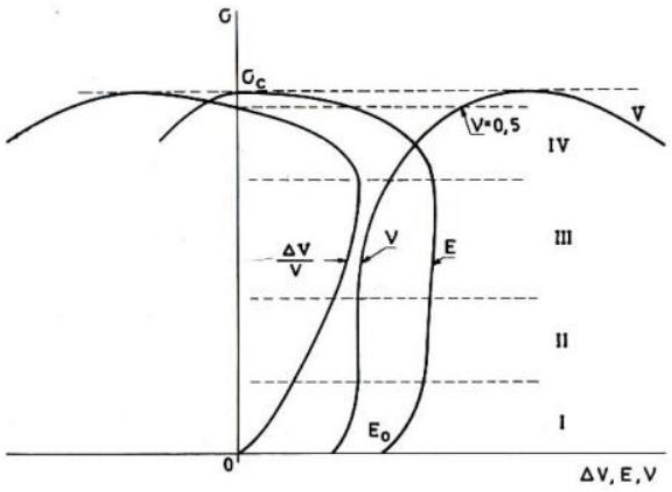


Fig. 3.7 Evolução do módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e variação do volume da unidade de volume ($\Delta \mathbf{V}/\mathbf{V}$) (seg. Rocha, 1981).

As características físicas de cada amostra influenciam a aparência do gráfico de deformação. O gráfico da figura abaixo (Fig.3.8) representa a evolução genérica do comportamento típico de uma rocha quando sujeita a compressão.

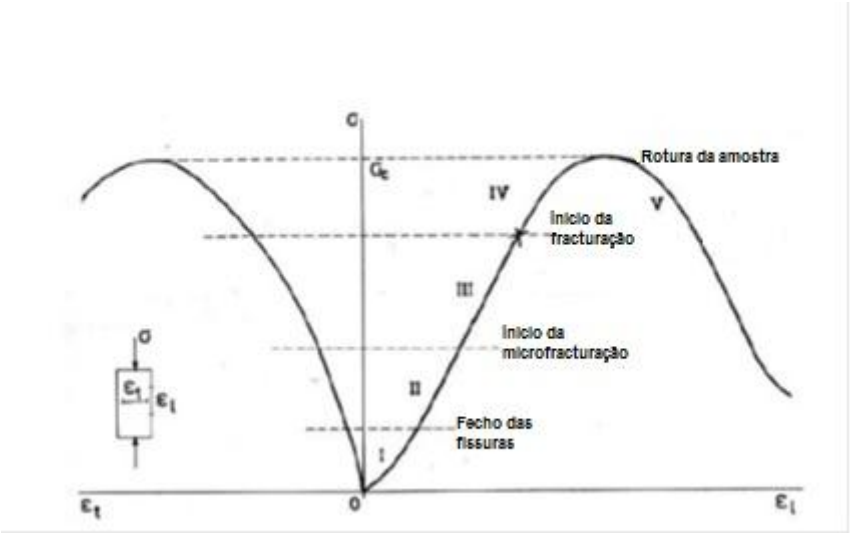


Fig. 3.8 Comportamento típico de uma rocha quando sujeita a compressão (seg. Rocha, 1981).

Relativamente ao gráfico da figura 3.8, num primeiro momento, o trecho inicial (trecho I) apresenta frequentemente uma curvatura dirigida no sentido dos σ crescentes, que resulta do fecho das fissuras. Aumenta o módulo de elasticidade e a compacidade da rocha, pelo que a variação de volume da amostra reduz também. Relativamente a este trecho, a curva de variação da extensão transversal (εt) com a tensão apresenta uma curvatura ligeira, sendo que o coeficiente de Poisson sofre um ligeiro incremento, provocado pelo fecho das fissuras (Rocha, 1981).

De notar que os trechos iniciais curvos nestes gráficos são bastante comuns em mecânica das rochas. Consoante o aumento da força aplicada, a fracturação também aumenta, podendo ocorrer desde a escala do cristal à escala do afloramento (Rocha, 1981).

O trecho seguinte (trecho II), ainda no mesmo gráfico, é em geral retilíneo, correspondendo a módulo de elasticidade constante. A extensão transversal (εt) apresenta também um traçado retilíneo, pelo que o coeficiente de Poisson é constante (Rocha, 1981).

Por ação da microfraturação, no traçado seguinte deste gráfico (trecho III) as deformações transversais sofrem algum incremento, apesar de o trecho continuar retilíneo. A diminuição de volume que antes se verificava sofre um revés, pelo que se torna num primeiro instante estacionário e em momentos mais avançados começa a aumentar. Em função também das microfraturas, a permeabilidade da amostra torna-se maior (Rocha, 1981).

No ponto de fluência (trecho IV), a amostra apresenta cada vez maior fracturação, tanto transversal como longitudinal. O volume é também incrementado de forma constante (Rocha, 1981).

A partir do ponto em que o coeficiente de Poisson (v) é igual a 0,5 no gráfico 3.7, o volume da amostra torna-se superior àquele que esta apresentava em repouso. Este fenómeno designa-se como dilatância e resulta de *in situ* a rocha se encontrar sujeita a tensões triaxiais (Rocha, 1981).

Quando a fracturação ocorre ao nível do provete, atinge-se o valor máximo da tensão σ1, sendo que este pode também ser designado por σc, ou seja, a tensão máxima que a peça suporta. A partir deste ponto qualquer incremento resultará na fracturação completa (Rocha, 1981).

O último trecho do gráfico (trecho V) caracteriza-se por um constante decréscimo de σ1, apesar do equipamento continuar a sujeitar o provete a um encurtamento. Como Rocha (1981) afirma, "*o andamento deste último trecho é muito influenciado pela rigidez da máquina de ensaio e pelo ritmo com que esta impõe o encurtamento da peça*".

Alguns dos valores apresentados por distintos tipos de litologias são resumidos na tabela 3.6.

Tabela 3.6 Valores esperados de E, ν e σc para diferentes tipos de rochas (adaptado de Rocha, 1981).

Tipo de Rocha	E (GPa)	ν	σc (MPa)
Granito são	75	0,21	116
Granito alterado	20	0,1	34
Granito muito alterado	12	0,09	14
Granodiorito	65	0,23	194
Basalto	98	0,27	211
Pórfiro	94	0,26	90
Gnaisse	91	0,22	157
Gnaisse alterado	49	0,09	113
Xisto *	132	0,2	92
Xisto *	62	0,21	74
Xisto **	38	0,14	112
Micaxisto **	75	0,23	49
Ardósia	76	0,14	171
Quartzito	74	0,26	294
Calcário	81	0,23	111
Gesso	9	0,19	13
Cré	4	0,22	3
Grés	53	0,25	80
Conglomerado	104	0,2	239

* Paralelo à xistosidade

** Normal à xistosidade

Uma nota que importa referir tem a ver com o facto de que, apesar de se assumir que a fracturação do provete, em resultado da compressão, ocorre quando se atinge o pico de resistência, na verdade está provado experimentalmente que todo este processo se inicia antes ainda do pico ser atingido, com a criação de microfissuras na amostra, no tramo entre os 50% e os 95% de σ_c (Brady & Brown, 1985).

Outro aspeto a referir prende-se com o facto de no trecho inicial, os valores apresentados para E poderem ter dois comportamentos. No caso de rochas dúcteis, em que mesmo sujeitas a compressão são capazes de retornar à sua forma inicial, o módulo irá ser constante, como se pode observar em ambos os gráficos da Fig.3.9. Para rochas com um comportamento frágil, os valores apresentados são variáveis, pois as rochas não voltam à sua forma inicial depois da aplicação das forças, ficando definitivamente deformadas (Vallejo *et al.*, 2002).

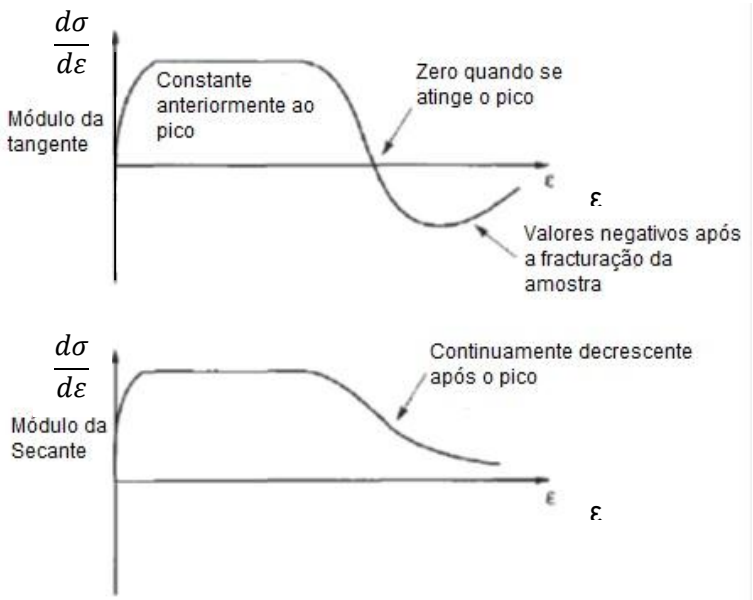


Fig. 3.9 Variação do módulo de Young com a deformação (seg. Hudson & Harrison, 2007).

Como já referido, é possível recorrer a uma série de fórmulas que permitem uma caracterização a nível do comportamento apresentado pelas amostras em estudo.

O cálculo do deslocamento da amostra é um dos parâmetros a definir quando se pretende determinar as características mecânicas do material. Este é obtido com base na seguinte equação (ISRM, 1979):

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d0}$$

Em que:

- $d0$ é o diâmetro original da amostra
- $\Delta\ d$ corresponde à variação do diâmetro com a realização do ensaio.

De notar que estes cálculos são efetuados para os ensaios em causa, sendo estes realizados axialmente à amostra.

Um dos cálculos mais importantes a realizar prende-se com o módulo de deformabilidade ou módulo de Young. Com este resultado, podem expressar-se de forma numérica os resultados da deformabilidade da amostra. Para isso é necessário recorrer aos gráficos obtidos durante o ensaio, de onde serão retirados os valores para as fórmulas (ISRM, 1979) (Fig.3.10).

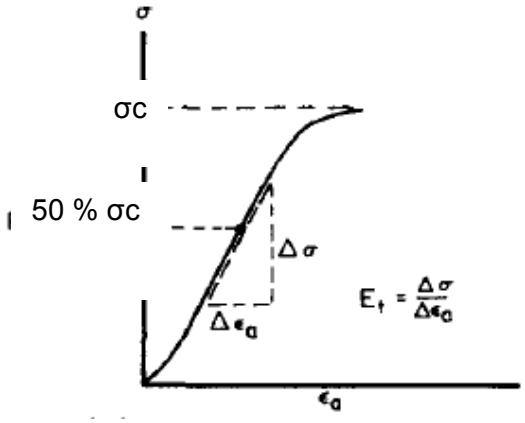


Fig. 3.10 Módulo tangente (seg. ISRM 1979).

O módulo de Young tangente (Et) é calculado considerando o declive de um segmento a uma percentagem que corresponde a 50% do valor crítico de tensão suportado pela amostra (σc) (Fig. 3.11).

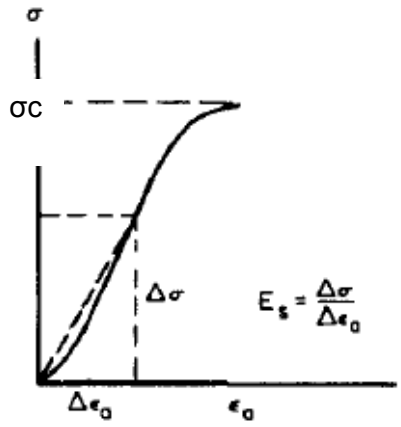


Fig. 3.11 Módulo da secante (seg. ISRM 1979).

O módulo de Young secante (Es) é calculado na generalidade das vezes considerando o declive de um troço que se situa entre o valor nulo de tensão aplicada, ou seja, a amostra não está sujeita a esforços, e o valor correspondente a metade o crítico (σc).

A velocidade de propagação das ondas é outra das propriedades que permite pôr em evidência a modificação da estrutura. O comportamento para material seco e para material saturado difere, como se pode observar pelo gráfico (Fig. 3.12)

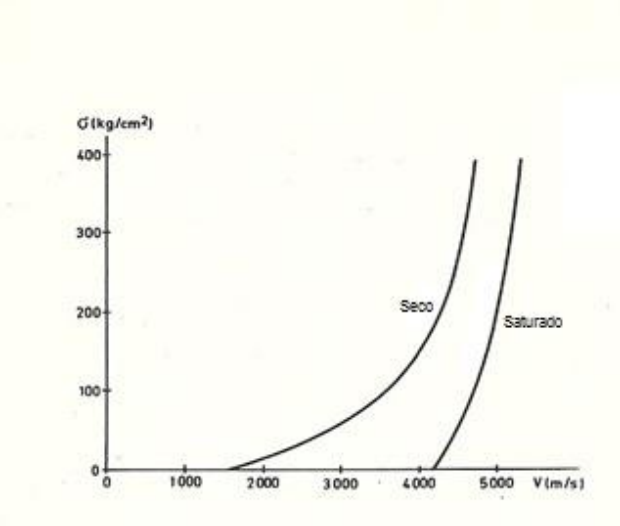


Fig. 3.12 Evolução da velocidade de propagação das ondas longitudinais numa peça sujeita a compressão (Rocha, 1981).

No material seco, a evolução da propagação é menos acentuada do que no saturado, uma vez que no primeiro o caminho a percorrer pelas ondas é superior, dado que estas não se propagam no ar. Se as fraturas estiverem preenchidas por água, esta facilita a transmissão (Rocha, 1981).

A realização destes ensaios, e mais propriamente os resultados obtidos, têm que ser analisados tendo em conta uma série de fatores que podem ter influência sobre os mesmos. Isto abrange tanto as características referentes à rocha que constitui o provete como o ensaio propriamente dito.

Podem começar por referir-se as características físicas do provete. Dependendo da geometria deste, a distribuição das tensões ao longo da mesma pode ser variável. O volume também pode afetar os resultados pois, quanto maior este parâmetro, menores serão os valores de resistência apresentados.

Por fim como já referido, a velocidade de aplicação da carga também é decisiva (Vallejo *et al*, 2002).

3.4.2.2. Ensaio de carga pontual

O ensaio de carga pontual, também conhecido como ensaio de Franklin, pretende analisar o comportamento mecânico, mais propriamente a resistência à compressão simples, em fragmentos de rocha ou em testemunhos de sondagem, sendo que estes últimos são aqueles que apresentam os resultados mais fiáveis.

O ensaio consiste na rotura de uma amostra entre duas pontas metálicas cónicas que se fecham sobre si, ao bombear uma alavanca ligada a um circuito hidráulico. As amostras correspondem em geral a carotes de sondagens com diâmetros entre 25 e 100 mm (Fig. 3.13)

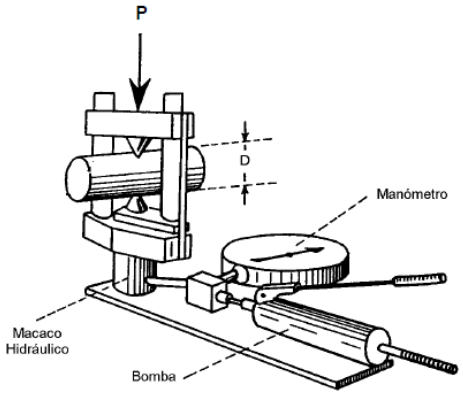


Fig. 3.13 Esquema de um aparelho para ensaio de carga pontual (seg. Vallejo *et al.*, 2002).

Existem algumas considerações e parâmetros a ter em conta quando se pretende realizar este tipo de ensaio, sendo que estes estão referenciados pela ISRM (1985).

Relativamente ao sistema de aplicação de carga do equipamento:

- A distância entre as prensas quando abertas, deve ser a suficiente para comportar carotes com diferentes diâmetros. Por norma, este alcance encontra-se entre 15 e 100 mm;
- A capacidade de carga deve ser tal que mesmo as amostras mais resistentes possam ser quebradas;
- O equipamento deve ser resistente para que, mesmo sujeitas às pressões mais elevadas, as prensas não sofram distorções que causem o seu desvio aquando do teste seguinte. O ideal é que estes se mantenham coaxiais, admitindo no máximo um desvio de 0,2 mm relativamente ao eixo;
- A forma das prensas do equipamento deverá ser equivalente à imagem seguinte (Fig. 3.14).

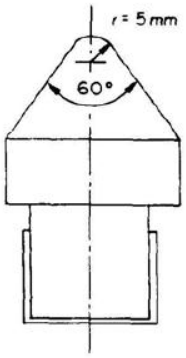


Fig. 3.14 Esquema de uma prensa no ensaio de carga pontual (seg., ISRM 1985).

Sobre o sistema de medição da carga aplicada, a medição efetuada é a de *P* que representa o valor de força à qual ocorre a rotura da amostra. Segundo a ISRM (1985), espera-se que:

- O valor de *P* tenha uma precisão de ± 5%*P* independentemente da amostra estudada;
- O sistema deve ser resistente a choques hidráulicos e vibrações, para que a precisão da leitura dos valores não seja afetada de forma muito significativa;
- Como a rotura é em geral súbita, é necessário que o equipamento registe qual o valor máximo de pressão a que a amostra estava sujeita no momento da rotura.

O sistema de medição da distância entre as prensas (d) prevê (ISRM, 1985):

- A existência de uma escala de leitura direta que permita a leitura de d;
- Que a precisão de leitura de d deva ser de aproximadamente 98%;
- Que a tensão induzida no aparelho não deva afetar de forma significativa os valores lidos;
- A necessidade de “zerar” o equipamento, para que os valores registados sejam os reais.

Para que este teste seja válido, deve ser utilizado um número mínimo de amostras que correspondam às especificações dos carotes.

Para o teste ao longo do diâmetro (ISRM, 1985):

- A relação comprimento/diâmetro deve ser maior que 1,0;

- O número de testes a ser efetuado deverá ser de 10 sendo que, no caso de as rochas serem anisotrópicas, o número deverá ser superior;
- O aumento da carga deve ser constante, para que a rotura da carote ocorra num espaço de tempo entre 10 a 60 segundos;
- O teste deve ser considerado inválido quando a superfície de fracturação se encontra apenas no lado de uma das prensas (Fig. 3.15).

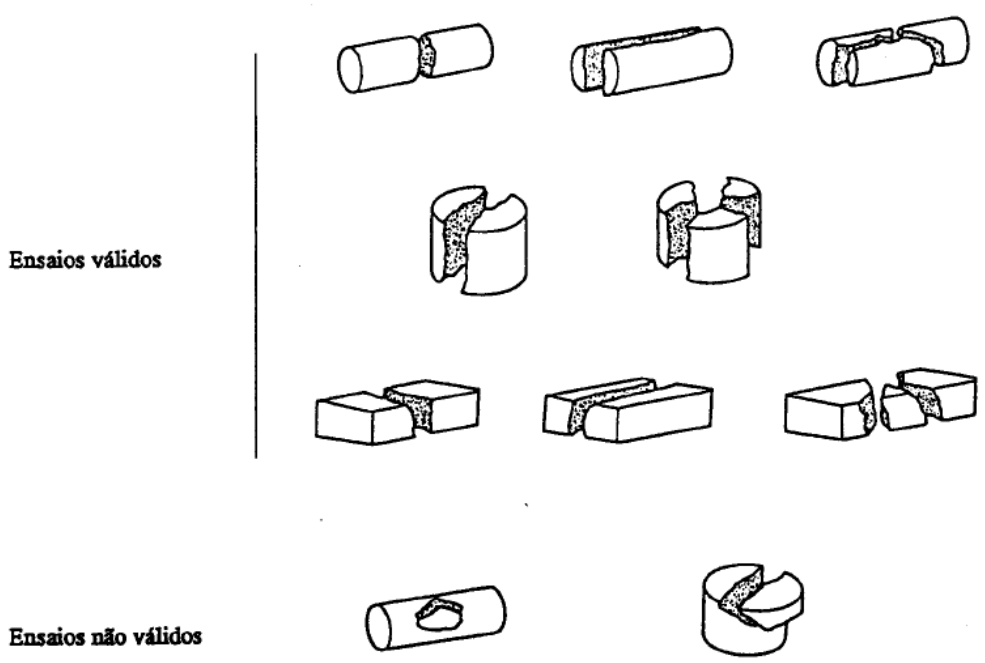


Fig. 3.15 Validade dos ensaios (seg. ISRM, 1985).

Quando se estudam rochas que apresentam claramente orientações dos minerais, texturas anisotrópicas ou mesmo xistosidades, é necessário que se efetuem ensaios segundo as direções que apresentem os valores maiores e menores de resistência (ISRM, 1985).

É espectável que os planos perpendiculares à aplicação da carga sejam os que demonstrem maior resistência e os paralelos os que apresentam menor (ISRM, 1985).

Quando a sondagem é paralela aos planos de xistosidade, a execução de ensaios segundo o diâmetro deverá ser a primeira tarefa, seguida depois de ensaios de compressão axial (ISRM, 1985).

Quando o que se verifica é uma perpendicularidade entre o eixo da sondagem e os planos de xistosidade, os resultados obtidos são em geral os melhores. Por isso

quando se efetuam operações de perfurações, é aconselhável que o ângulo entre o eixo da sondagem e a normal ao plano de xistosidade não exceda os 30° (ISRM, 1985).

Uma vez que o cálculo do índice de carga pontual é feito seguindo a norma, para provetes cilíndricos de rocha com diâmetro 50 mm, é usada a seguinte expressão (ISRM, 1985):

$$I_{S(50)} = {}^{P}/_{D^2}$$

Em que:

- P: carga de rotura
- D: diâmetro do provete

Notar que:

- $D=D^2$ para ensaios ao longo do diâmetro
- $D= 4D/\pi$ para ensaios axiais

Para o caso de os provetes possuírem um diâmetro diferente, é necessário multiplicar o índice obtido anteriormente por um fator F.

$$I_{S(50)} = F.\ I_S$$

F representa o fator de correção do tamanho, variando consoante o diâmetro da amostra (Neto, 2007).

É possível obter este fator de duas maneiras, uma gráfica e outra com base em cálculos. Para cálculos, usa-se a fórmula:

$$F= (D_e/50)^{0,45}$$

Sendo De o diâmetro equivalente da amostra.

Recorrendo ao gráfico, pode consultar-se o seguinte (Fig. 3.16):

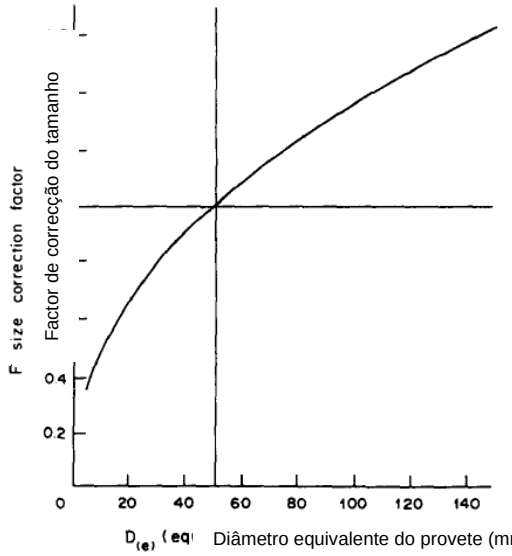


Fig. 3.16 Gráfico dos valores de F em função do diâmetro equivalente (seg. ISRM 1985).

Por fim também é possível calcular-se o ***Ia***, que corresponde ao *Streangth Anisotropy Index*, que consiste num rácio dos valores da média, medidos paralela e perpendicularmente aos planos de fraqueza. Este cálculo é efetuado quando se estudam rochas que apresentam anisotropia, pelo que são feitas medições paralelas e perpendiculares à foliação (ISRM, 1985).

A fórmula a usar será:

- $Ia(50) = Is(50)\perp / Is(50)\ //$

De notar que para o cálculo do valor médio, no caso da realização de 10 ensaios, é necessário que sejam retirados os 2 valores mais altos e os 2 mais baixos, usando-se assim os 6 intermédios para obter um valor mais representativo.

Os resultados obtidos podem então ser comparados com intervalos de valores propostos por Bieniawski (1989) ou Deere (1966), permitindo uma classificação mais generalista e de fácil compreensão (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 Classificação da resistência em função do índice de resistência à carga pontual (seg. Nilsen & Palmstrøm, 2000).

Termo	Bieniawski (1989)	Deere (1966)
Resistência muito elevada	I_s > 8 MPa	I_s > 10 MPa
Resistência elevada	I_s = 4 – 8 MPa	I_s = 5 – 10 MPa
Resistência moderada	I_s = 2 – 4 MPa	I_s = 2.5 – 5 MPa
Resistência baixa	I_s = 1 – 2 MPa	I_s = 1.25 – 2.5 MPa
Resistência muito baixa	I_s < 1 MPa	I_s = < 1.25 MPa

No fim da realização dos ensaios, é necessário cumprir algumas regras para a apresentação dos resultados. Sobre o equipamento, é necessário especificar qual a calibração feita. Já sobre as amostras, alguns dos seguintes parâmetros são essenciais (ISRM, 1985).

- Número da amostra, localização e tipo de rocha. Orientações *in situ* de planos de anisotropia ou de fraqueza, caso estes estejam evidentes;
- Informação sobre a saturação da amostra na altura do ensaio;
- Informação sobre a orientação da compressão aplicada em relação aos planos de anisotropia;
- Tabela com valores de P, D, I_S e $I_{S(50)}$ para cada amostra. I_a e $I_{a(50)}$ são também valores que convém incluir.

3.4.2.3. Ultrassons

Com este ensaio é possível a medição da velocidade das ondas elásticas que atravessam o provete, de uma forma direta. O procedimento pode ser efetuado tanto em amostras secas como saturadas (Vallejo *et al*., 2002).

Como é de esperar, as características mecânicas do material, a deformabilidade e resistência afetam diretamente a velocidade com que as ondas percorrem o material. A elasticidade dos minerais e a morfologia das descontinuidades, nomeadamente fissuras e fraturas, são algumas das características com papel mais preponderante aquando da realização deste ensaio (Vallejo *et al*., 2002).

O ensaio consiste na propagação de ondas longitudinais mediante a compressão ultrassónica, medindo-se o tempo que essas demoram a atravessar o provete. É também possível a realização destes ensaios transversalmente ao provete, sendo que o processo de medição é o mesmo (Vallejo *et al*., 2002)

Com base no tempo de propagação das ondas é possível efetuar o cálculo da velocidade com base na fórmula seguinte (Manual ultrassons modelo 58-E0048 CONTROLS, 2000):

$$V = L/T$$

Em que:

- V corresponde à velocidade das ondas (m/s)
- L é o comprimento da amostra que se está a testar (mm)
- T representa o tempo que o pulso demora a percorrer a amostra (μs)

Em teoria, é de esperar que as características elásticas do material e o seu peso volúmico sejam os únicos fatores que afetam estas velocidades. No entanto, na prática verifica-se que a rede de fissuras contribui para a diminuição destes valores.

Quanto à colocação do transmissor e do recetor dos impulsos, é possível posicionar estes em locais distintos do provete, mais precisamente de três formas diferentes (Fig.3.17).

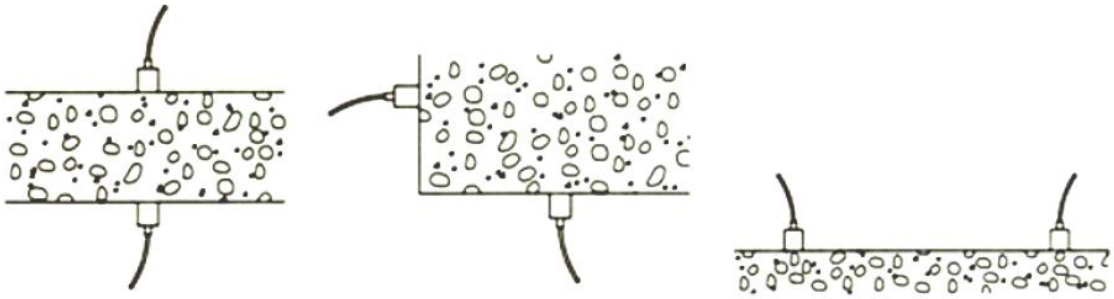


Fig. 3.17 Posições possíveis dos transdutores. a) transmissão direta, b) transmissão semidirecta e c) transmissão indireta (Retirado de Controls Instruction Manual).

É recomendado pela ISRM (1981) que para os ensaios realizados serem válidos, o comprimento do provete tem que ser no mínimo 10 vezes superior ao comprimento de onda transmitido pelo aparelho.

Os resultados obtidos, como já se sabe, vão diferir bastante entre rochas.

Nestes ensaios é de referir, relativamente ao módulo de Young, que este parâmetro apresenta valores superiores aos obtidos aquando da realização de ensaios de compressão uniaxial. Sobre o valor de Vp, o mesmo possui uma relação linear com a deformabilidade da rocha, estando relacionado com a porosidade ou a resistência à compressão simples (Vallejo *et al*., 2002).

Capítulo 4

Trabalho de Campo e amostragem

Na sequência do enquadramento geológico feito no Capítulo 1, foi realizado trabalho de campo com o propósito de observar *in situ* a geologia da zona e fazer cartografia, a maior escala numa área mais limitada.

Os principais parâmetros abordados na análise da cartografia geológica do local consistiram na identificação das litologias presentes assim como o levantamento das estruturas como falhas e filões, diaclasamento e xistosidade.

A forma encontrada para realizar este trabalho consistiu em definir um percurso entre duas localidades, que atravessasse todo o sinclinal. Com base nesse percurso, foi feito o esboço do perfil geológico (Fig.4.1).

No local de estudo, a metodologia usada consistiu em realizar estações de observação de forma a serem levantados todos os dados sobre a geologia em cada local (Fig.4.2).

O reconhecimento iniciou-se pela aldeia de Perdigão, situada no flanco SW do sinclinal.

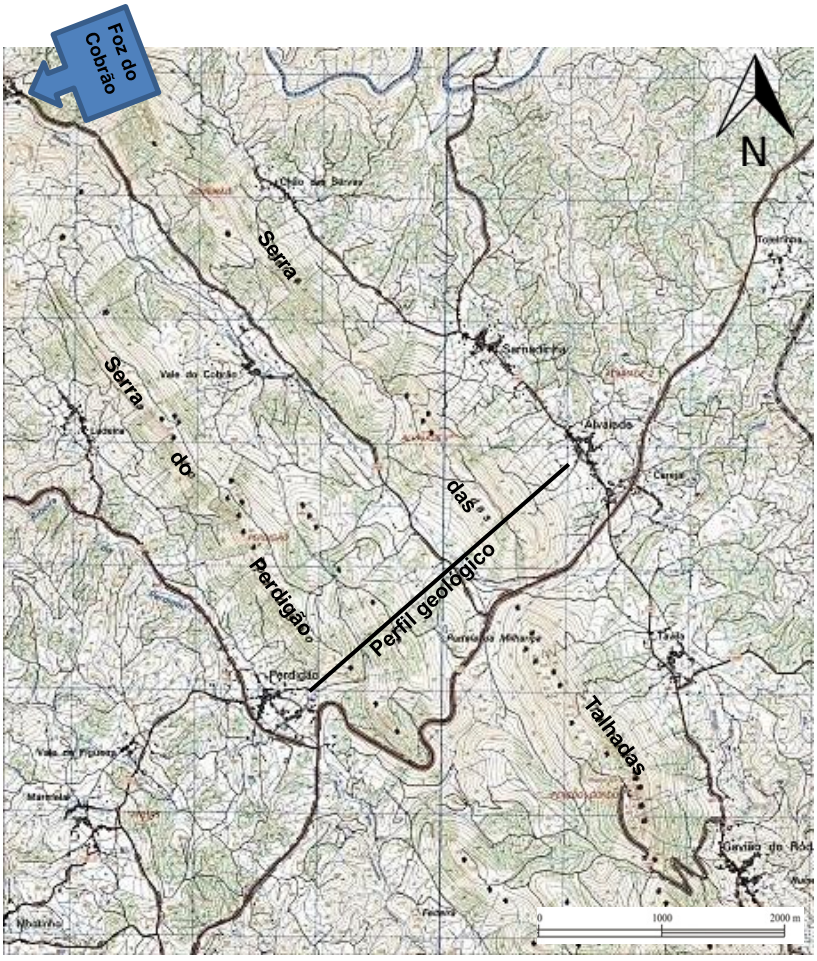


Fig. 4.1 Localização do perfil geológico num excerto da carta topográfica 303 – Sarnadas do Ródão (Vila Velha de Rodão).

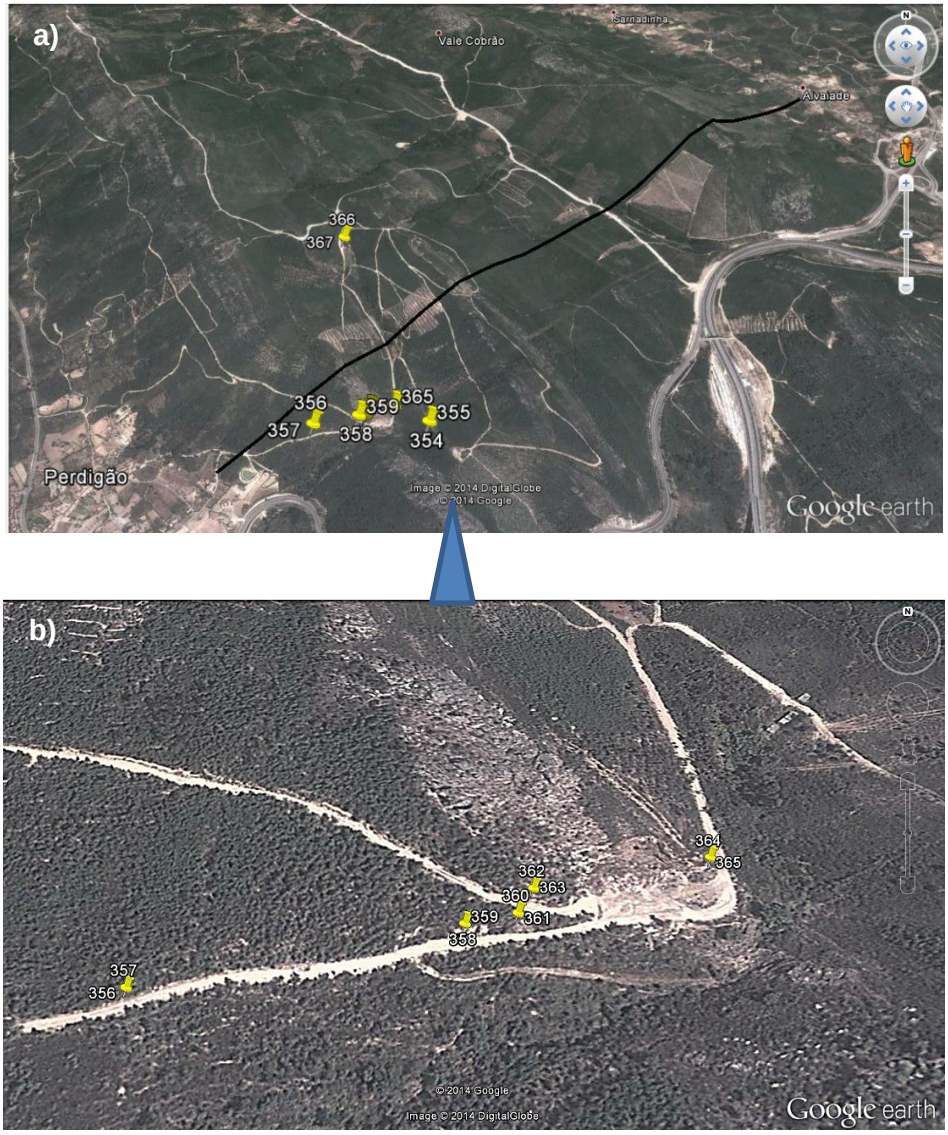


Fig. 4.2 Representação dos pontos GPS retirados ao longo do caminho, de modo a auxiliar a realização do perfil geológico. a) Vista geral da zona de estudo. b) Ampliação da zona contendo os pontos 356 a 364.

4.1. Descrição litológica e estrutural

Estação 1

Neste local a observação foi feita com base em taludes abertos aquando da abertura da estrada (caminho florestal). Nestes taludes o maciço rochoso encontra-se em geral muito alterado.

Em termos litológicos, observaram-se litologias pertencentes ao CXG, nomeadamente alternâncias de bancadas centimétricas a decimétricas de grauvaques e filitos.

Em termos estruturais, observa-se que a estratificação (S0) se encontra paralela à foliação (Sn), sendo que a atitude medida corresponde a N110°/40°NE.

Outra característica que pode referir-se prende-se com a presença de dobras secundárias associadas ao dobramento principal do sinclinal (Foto 4.1).

À medida que se caminha de SW para NE do sinclinal, observa-se um aumento do carácter mais argiloso das litologias, ocorrendo a passagem do CXG para a Série Intercalar (SI).

Sobre as litologias referidas, observam.se depósitos de vertente constituídos por clastos do CXG, SI e também de quartzitos negros. A passagem entre as rochas aflorantes e os depósitos é caraterizada por uma intensa argilização e também por fenómenos de oxidação.

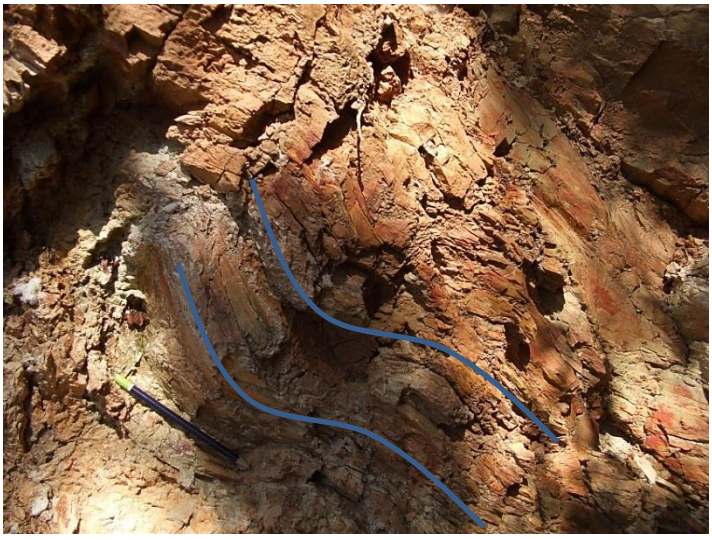


Foto 4.1 Litologias pertencentes ao CXG evidenciando alguns sinais de alteração (W3 a W4), como pode ser observado pela sua coloração. Estes filitos e grauvaques foram submetidos a processos de dobramento que afetou a região a uma escala global e que podem ser observados a uma escala menor dentro de cada uma das unidades estratigráficas.

Estação 2

O contacto entre o CXG e a Série Intercalar não é visível, observando-se apenas alternância entre ambas as litologias.

A diferença litológica entre as duas unidades, o CXG e a Série Intercalar é marcada pela presença de níveis gresosos microconglomeráticos com clastos negros de dimensões aproximadas de 1 mm, na SI. O CXG apresenta alternâncias de filitos e grauvaques, sendo que as duas litologias possuem um carácter muito silicioso.

A medição das estruturas permitiu confirmar que neste local não há discordância angular entre as duas unidades, uma vez que a estratificação tem atitude N110°/vertical a 80°, em ambas.

Em termos estruturais, é possível observar uma maior verticalização dos estratos na direção do núcleo do sinclinal, sendo que entre os aspetos de pormenor pode ser destacada a presença de uma lineação sub-horizontal resultante dos processos de deformação a que foram sujeitos. Geralmente este tipo de estruturas ocorre em litologias sujeitas a processos de baixo grau metamórfico, sendo esse o caso observado no local (Foto 4.2).



Foto 4.2 Verticalização da estratificação devido aos processos de deformação e metamorfismo na região. É possível observar que ao longo dos estratos a fracturação é bastante evidente, sendo que neste caso esta se encontra com preenchimento de quartzo.



Foto 4.3 Lineação sub-horizontal nas litologias do CXG provocada pelos processos de deformação.

Estação 3

Em termos litológicos observa-se novamente uma intercalação bem marcada por níveis com diferentes características (Foto 4.4 e 4.5), sendo a SI a formação com maior expressão nesta área. Esta litologia caracteriza-se por uma sequência de rochas metareníticas finas com clastos milimétricos de quartzo e quartzito negro, conferindo-lhe um aspeto microconglomerático.

Estruturalmente, a estratificação tem uma atitude N125°/70°SW ao passo que a foliação se apresenta N150°/50°SW.



Foto 4.4 Intercalação entre litologias mais gresosas e litologias mais filitosas. É possível observar uma foliação mais bem marcada nas litologias de carácter mais filitoso.



Foto 4.5 Intercalação dos diferentes níveis.

Tal como anteriormente, a lineação observada mantém-se neste local. Esta resulta da intersecção entre S0 e Sn e tem atitude sub-horizontal (Fig. 4.6).

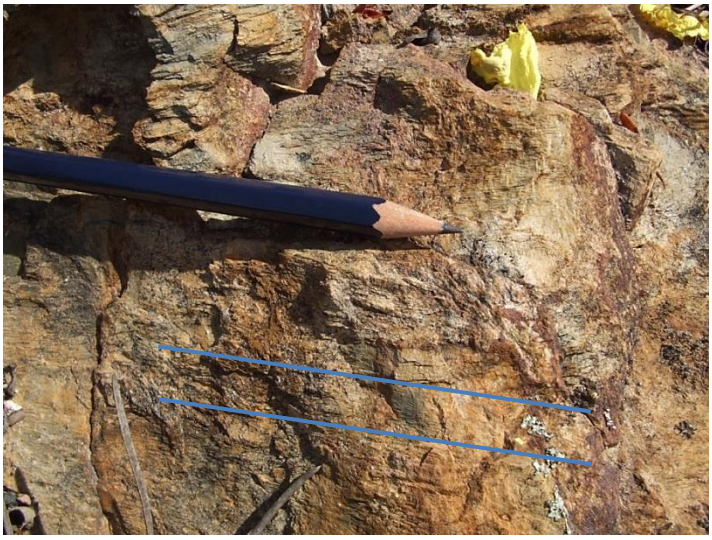


Foto 4.6 Lineação de intersecção de atitude concordante com a medida anteriormente.

Estação 4

Neste local observa-se uma atitude de estratificação contrária à geometria do sinclinal, o que poderá corresponder a uma dobra secundária (Foto 4.7)

A estratificação assume uma atitude bastante verticalizada e observa-se tectonização devido à proximidade de uma falha de atitude N125°/50°SW com aproximadamente 0,5 m de cataclase.



Foto 4.7 Estratificação no CXG, inclinando para SW, materializando uma dobra secundária da estrutura sinclinal.

Estação 5

Neste local observam-se quartzitos (Oq). Apresentam uma cor avermelhada nos planos de estratificação em que os sinais de oxidação são mais evidentes. A sua atitude corresponde a N10°, sendo que a sua inclinação é praticamente vertical.

Neste local as medições efetuadas relativamente à atitude da estratificação do quartzito podem ser um pouco discordantes dos valores obtidos para esta litologia no restante sinclinal. A presença de uma falha pode ser a justificação para o que é observado.

Estação 6

Neste local encontra-se o contacto entre a Série Intercalar e o Quartzito, apresentando uma atitude N120°/subvertical. Estas litologias encontram-se afetadas por uma falha de atitude N75°/subvertical, manifestando alguma cataclase associada (Foto 4.8).



Foto 4.8 Falha com cataclase em aproximadamente 0,7 m, atravessando o quartzito.

Estação 7 "Pedreira"

Em termos litológicos, aflora no local o quartzito.

Em termos estruturais é possível observar uma falha de dimensão bastante considerável, sendo visível no afloramento, que se estende desde a base até ao topo do mesmo numa extensão de cerca de 10 m. Esta estrutura, de atitude N120°/60°NE, tem um papel importante sobre as rochas aflorantes. Além de produzir cataclase, afeta também o comportamento de outras estruturas anteriormente instaladas, como é possível observar na fotografia seguinte (Foto 4.9).

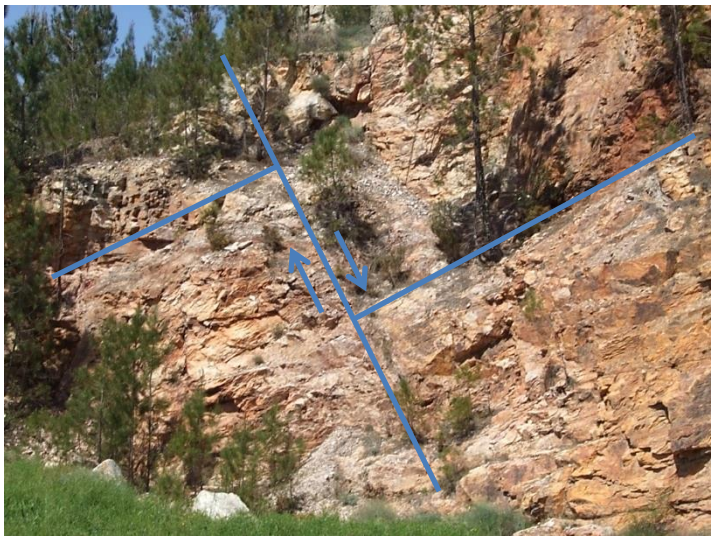


Foto 4.9 Falha de idade posterior rejeitando outra já existente segundo o movimento indicado pelas setas.

Estação 8

Litologicamente, neste local ocorre a passagem dos quartzitos aos xistos argilosos com micas detríticas (Ox), sendo que estes minerais apresentam uma orientação preferencial.

A passagem observada é brusca, sendo que o contacto entre os dois tipos de rocha ocorre através de uma falha (Foto 4.10). A atitude desta estrutura é N145°/subvertical, possuindo uma componente inversa uma vez que o bloco NW (superior) sobe relativamente ao bloco inferior. Este movimento pode ser confirmado nas estrias de movimento subverticais observadas no espelho de falha.



Foto 4.10 Espelho de falha apresentando estrias de movimento. A fracturação e a alteração são bastante evidentes.

Estação 9 (Ponto GPS 366 e 367)

Neste local é evidente uma zona de alternância de bancadas quartzíticas com xistos afetadas por um dobramento bastante evidente. O flanco longo do dobramento apresenta uma atitude N150°/55°NE, sendo que o eixo inclina 30° para N120°.

Estação 10

Este ponto situa-se na aldeia de Sarnadinha, no flanco NE do sinclinal, local em que aflora o CXG e onde predomina a fração filitosa. A foliação marcada nas litologias possui uma atitude N140°/vertical.

É também possível observar fracturação marcada ao longo de todo o afloramento, sendo que o talude observado possuía uma extensão de cerca de 10 m. Esta apresenta atitude N50°/vertical.

4.2. Relação de estratificação e foliação

Ao longo do trabalho de campo, foram recolhidos dados relativos às atitudes de estratificação e foliação das litologias. Com base no programa Stereonet, foi possível efetuar a sua projeção numa rede esterográfica, de forma a interpretar de que forma estes parâmetros estruturais se encontravam relacionados.

Abaixo é feita a representação estereográfica (Fig. 4.3 e 4.4).

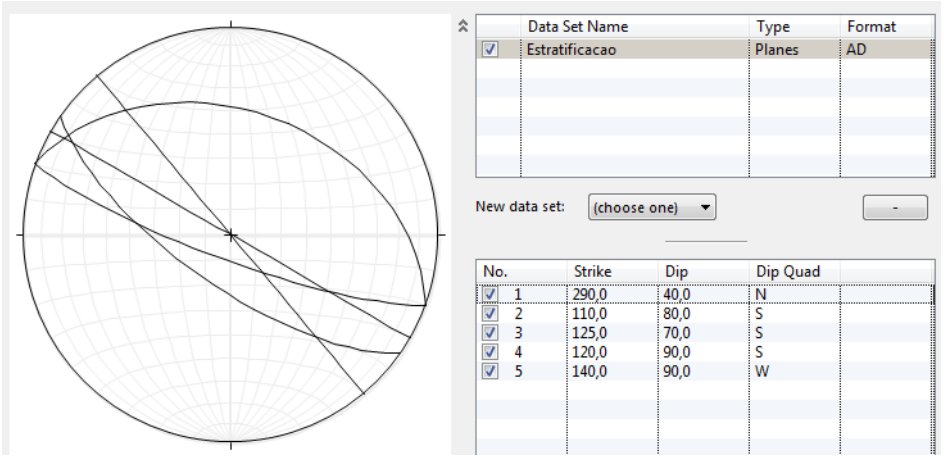


Fig. 4.3 Representação esterográfica da atitude da estratificação. A variação da direção da estratificação é mínima e sempre no quadrante NW-SE. Para as inclinações, registaram-se valores verticais/sub-verticais, podendo inclinar tanto para NE como para SW.

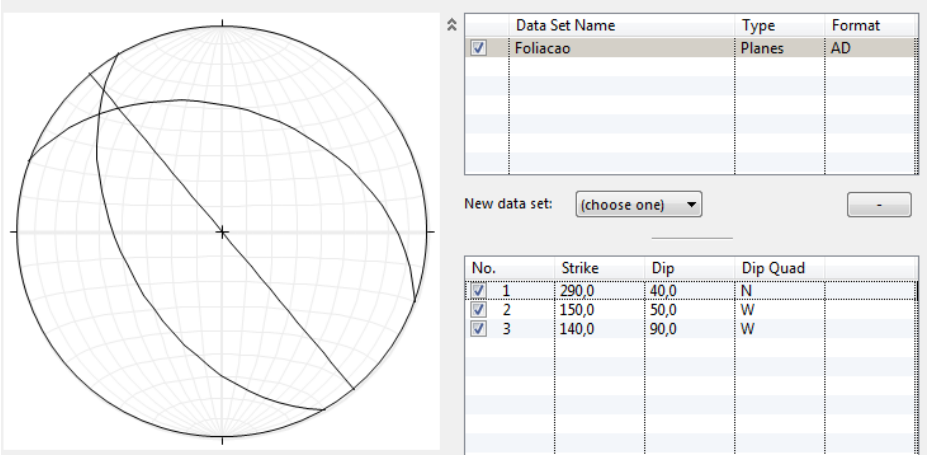


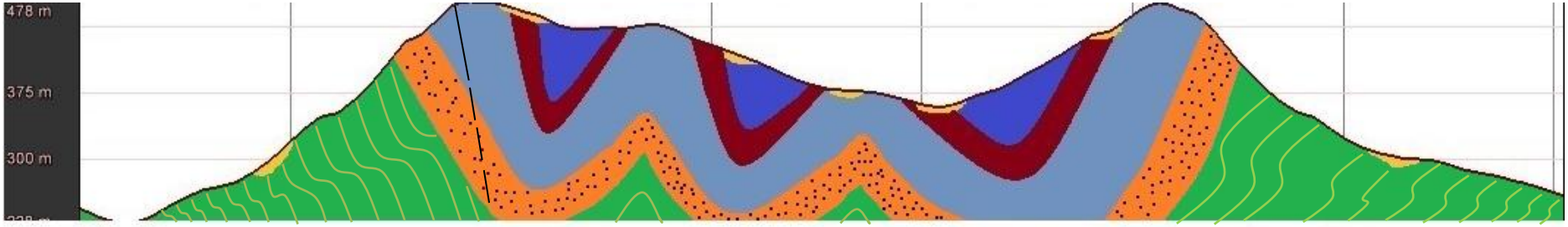
Fig. 4.4 Representação esterográfica da atitude de foliação. A orientação da foliação é semelhante à da estratificação, apresentando direção NW-SE e inclinação vertical/sub-vertical tanto para NE como para SW.

Pode verificar-se, da análise dos esterogramas dos valores de estratificação e foliação, que as duas estruturas possuem atitudes de orientação próxima, no quadrante NW-SE, embora com maior variação do valor do ângulo de inclinação. Esta concordância significa que a foliação deverá estar relacionada com a fase de dobramento principal responsável pela geração da estrutura sinclinal, de eixo sub-horizontal e plano axial sub-vertical.

4.3. Perfil geológico interpretativo

Por fim, foi possível realizar um corte geológico abrangente de toda a extensão do perfil estudado. Este perfil, em parte, foi realizado com base nos dados recolhidos no campo, para a secção mais a SW e mais a NE. Para o resto da realização do perfil, recorreu-se à interpretação da carta geológica do local e ao trabalho de Metodiev e Romão (2009).

SW (Perdigão) **NE (Sarnadinha)**



Escala 1:13786

Depósitos de Vertente

Xistos Argilosos

Intercalações entre bancadas quartzíticas e xistos argilosos

Quartzitos

Série Intercalar

Complexo Xisto-Grauváquico

Falha

Estratificação/Foliação

Capítulo 5

Resultados dos ensaios e interpretação

5.1. Análise das carotes

5.1.1. Ângulo da xistosidade com o eixo da carote

Como referido anteriormente, é necessário o conhecimento do ângulo de xistosidade com o eixo da amostra para que seja possível estudar a influência da anisotropia (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 Ângulos entre os planos de xistosidade e o eixo das carotes.

Carote	Ângulo da xistosidade com o eixo
CH11	1°
CH3	5°
CH10	3°
CH13	4°
CH15	2°
SA17	5°

5.1.2. Estado de alteração

A observação das carotes indica que alteração não é muito profunda, na maioria das amostras. No entanto existem alguns trechos em que características como a coloração ao longo e próximo das fraturas, bem como indícios de oxidação mostram ocorrência de alteração mais intensa (Foto 5.1).

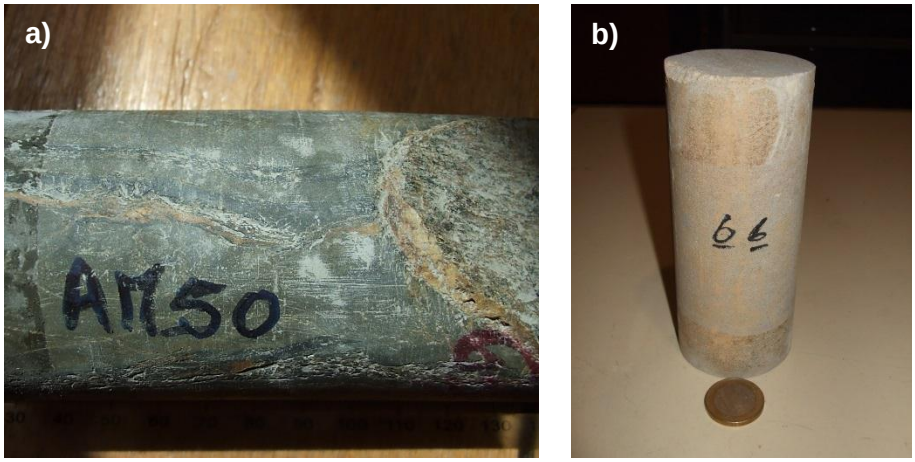


Foto 5.1 A Amostra da esquerda (a) apresenta uma coloração acinzentada apenas com indícios de oxidação nas zonas fraturadas (W2) enquanto a da direita (b) está alterada (W3).

No entanto, recorrendo ao uso da tabela 3.1 da ISRM (1978), a maioria das amostras poderá ser classificada como W1 a W2 (Foto 5.2), pois não existem sinais de alteração na rocha, com exceção das paredes das fraturas.



Foto 5.2 Aspeto são das amostras, como se pode confirmar pela coloração homogénea apresentada.

5.1.3. Comprimentos

As carotes possuem um diâmetro de 50 mm, pelo que foram cortados trechos com 125 mm de comprimento para realizar os ensaios.

Devido à forte anisotropia da rocha e ao baixo ângulo da foliação com os eixos das carotes, surgiram algumas dificuldades durante o corte das amostras, em especial devido à necessidade de obter bases lisas e paralelas entre si.

5.2. Caracterização macroscópica e microscópica

Os aspetos analisados neste capítulo foram a textura, fracturação e composição mineralógica.

O resultado final da análise permitiu classificar a rocha, saber um pouco sobre as condições de formação e metamorfismo, e entender o seu comportamento mecânico.

5.2.1. AM 15 – Sondagem CH10

Análise macroscópica

A amostra é constituída por um filito de cor cinzenta e foliação bem marcada, fazendo um ângulo de 3° com o eixo da sondagem.

Apresenta uma coloração homogénea escura, e no que se refere à alteração, esta não é evidente, pelo que amostra é classificada como W1 (Foto 5.3 e 5.4).



Foto 5.3 Amostra AM 15. A sua coloração é caracterizada por intercalações de níveis acinzentados, uns mais claros e outros mais escuros. Estes últimos refletem a presença de matéria orgânica.

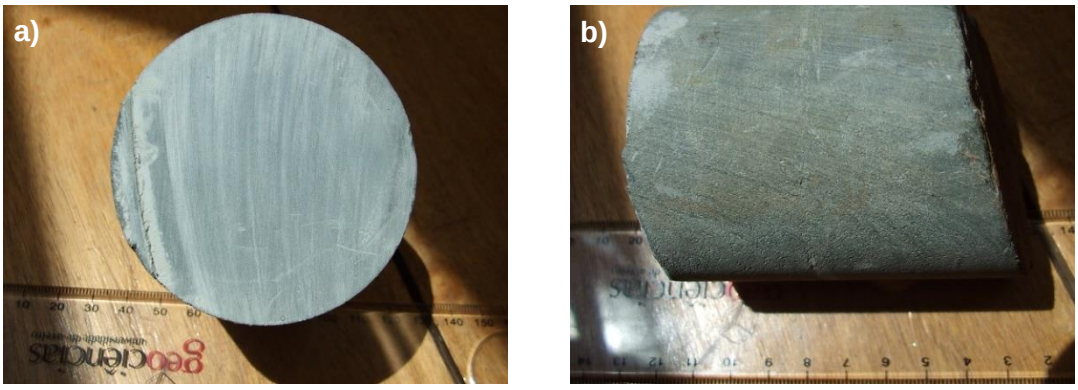


Foto 5.4 Aspeto da talisca em a) e foliação bem marcada em b). Não são visíveis indícios de alteração na amostra. Em termos estruturais, é possível identificar uma foliação bem marcada.

Análise microscópica

Esta amostra de filito apresenta uma composição mineralógica homogénea em grãos de dimensões bastante reduzidas. Em relação à sua estrutura, observa-se uma clivagem bem marcada (Foto 5.5).

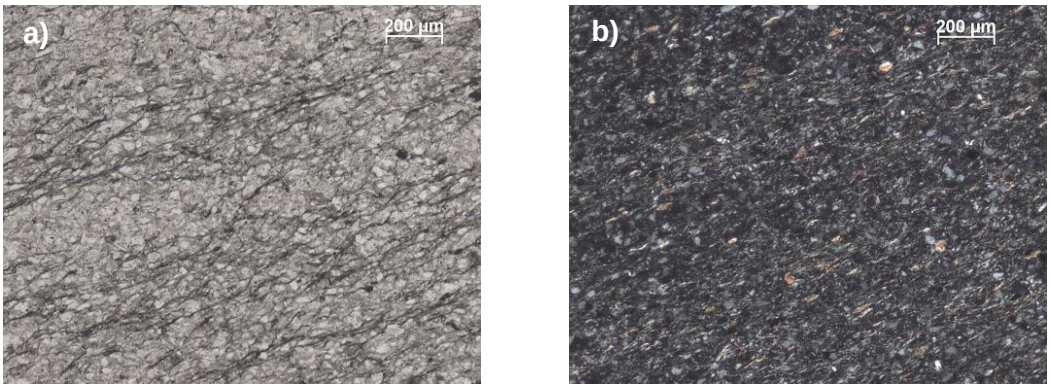


Foto 5.5 Aspeto geral da lâmina em N// a) e NX b). Observa-se uma mineralogia homogénea em grãos de dimensões bastante reduzidas.

O estudo microscópico revela uma estrutura com foliação anastomosada, uma vez que a associação de minerais micáceos e de matéria orgânica contorna os clastos de outros minerais, como por exemplo os de quartzo. De referir que a matéria orgânica é a fração mineralógica que tem maior expressão nas zonas onde esta foliação se encontra mais marcada. Como referido, a recristalização de filossilicatos não é muito marcada, sendo que a sua contribuição para a textura é de pouco relevo (Foto 5.6).

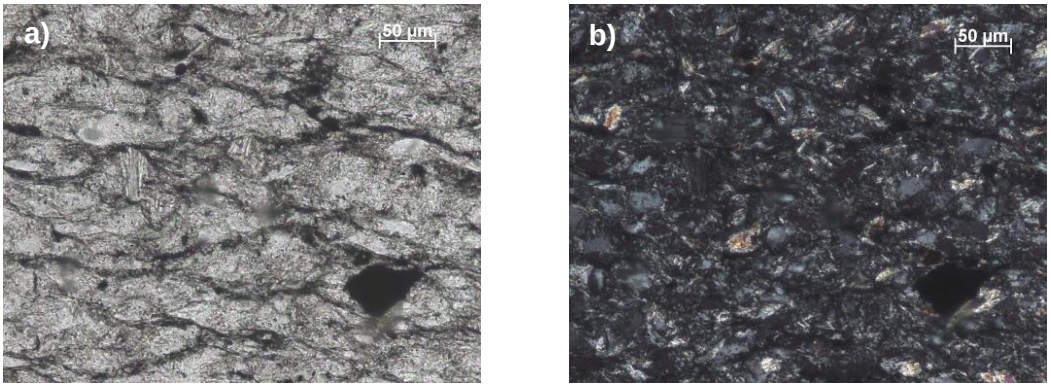


Foto 5.6 Aspeto anastomosado da foliação. N// em a) e NX em b).

A foliação observada é do tipo clivagem ardosífera, caracterizada pela presença de aspetos texturais como os “folia”, ou seja, intercrescimentos de mica branca e clorite de forma transversa à foliação. Este é um aspeto característico de rochas filitosas em condições de baixo grau metamórfico (Vernon, 2004).

Relativamente à composição mineralógica, foram observados quartzo, micas, plagioclase, turmalina, zircão e opacos.

O quartzo encontra-se na forma de clastos monocristalinos, constituindo os clastos de maiores dimensões observados na lâmina. Não são afetados significativamente pela foliação, uma vez que esta os contorna.

Os filossilicatos presentes são a moscovite, clorite e mica branca (sericite). A sua forma é geralmente lamelar, quando é possível a sua identificação na matriz mineralógica.

Em algumas zonas a moscovite e a clorite apresentam intercrescimentos, sendo os minerais que mais contribuem para a clivagem ardosífera, como já previamente referido (Foto 5.7).

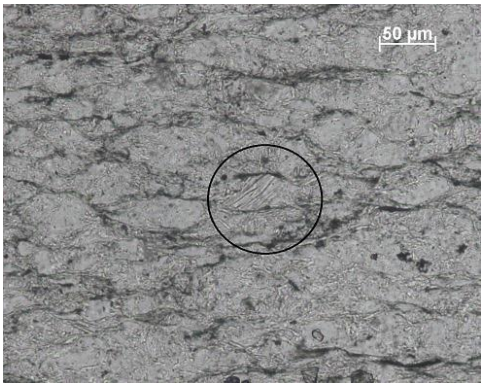


Foto 5.7 Intercrescimento de moscovite e clorite transversas à foliação (N//).

Também existem algumas lamelas de biotite de origem detrítica. A sua dimensão, forma lamelar e alteração mais evidente nos bordos permitem retirar estas conclusões (Foto 5.8).

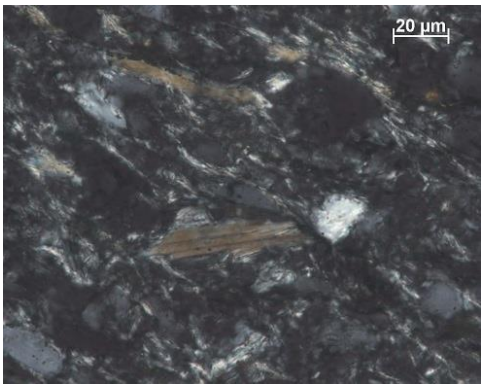


Foto 5.8 Biotite detrítica, indicando que não foram os processos metamórficos os responsáveis pela sua formação (NX).

Um mineral relativamente frequente é a turmalina. A identificação deste mineral foi possível devido à sua cor acastanhada, e à sua tendência para forma euédrica e zonamento (Foto 5.9).

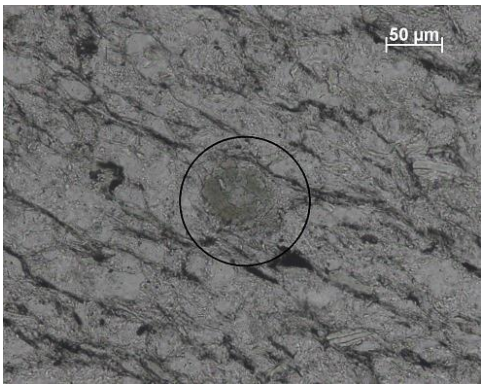


Foto 5.9 Turmalina apresentando indícios de zonamento (N//).

A plagioclase ocorre pontualmente na rocha, sendo identificada pelas suas cores de polarização de baixa ordem e essencialmente pelas suas maclas segundo a lei da Albite (Foto 5.10).

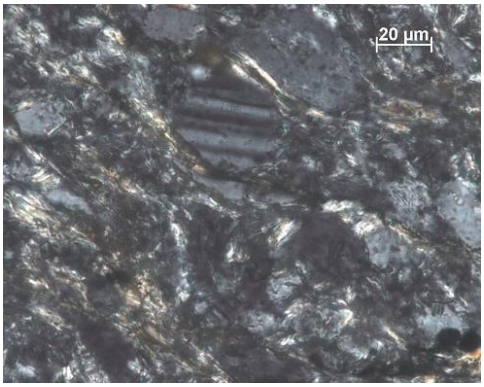


Foto 5.10 Plagioclase em NX, identificável pelas suas maclas características.

O zircão aparece de forma esporádica. A sua identificação é efetuada com base no seu relevo alto e cores de polarização também de ordens elevadas.

Por fim, opacos e matéria orgânica são os restantes elementos observados.

5.2.2. AM 16 – Sondagem CH3

Análise macroscópica

A amostra AM 16 corresponde a um filito. Apresenta uma cor escura, sendo este parâmetro derivado da presença de matéria orgânica (Foto 5.11).

A granularidade é bastante fina e observa-se claramente uma foliação paralela ao eixo do tarolo. Esta foliação tem carácter anastomosado, delimitando lentículas de cor mais clara, que corresponderão a níveis estratigráficos mais siliciosos (gresosos) (Foto 5.12).



Foto 5.11 Amostra AM 16. A sua cor acinzentada e a presença de uma foliação bastante marcada são evidentes. Este aspeto estrutural é observado de forma clara, dada a ocorrência de uma fratura ao longo do plano de foliação.

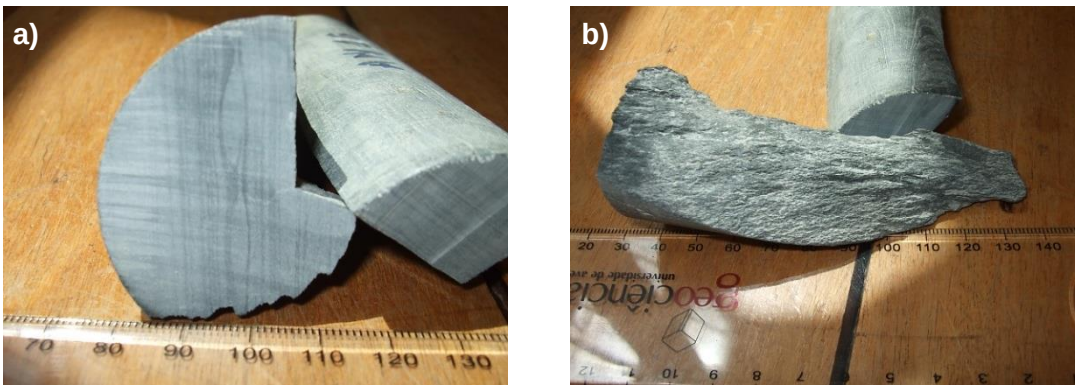


Foto 5.12 a) Níveis lenticulados. b) Aspeto da foliação. A amostra apresenta ligeira alteração. A intercalação com níveis mais escuros revela presença de matéria orgânica.

Análise microscópica

Esta amostra corresponde a uma rocha metamórfica com uma textura heterogranular bem marcada por uma clivagem ardosífera, uma vez que não ocorreu recristalização a uma escala suficiente para definir uma xistosidade. (Foto 5.13).

A foliação é mais marcada nas zonas mais ricas em matéria orgânica.

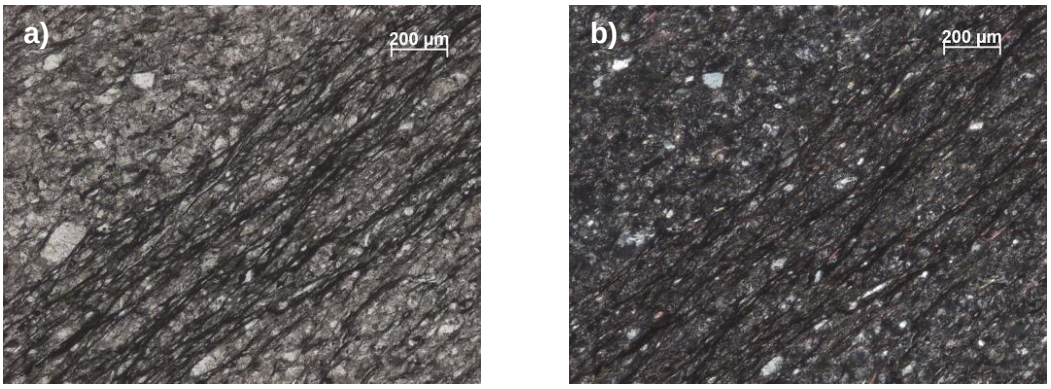


Foto 5.13 Aspeto geral da lâmina em N// a) e NX b). É evidente a presença de uma foliação bem marcada, sendo possível observar este aspeto em locais onde a acumulação de mateira orgânica é mais acentuada.

Em termos texturais, esta amostra apresenta uma textura clástica com uma matriz com carácter lepidoblástico ainda incipiente.

É possível observar uma laminação estratigráfica mais ou menos fina e também alguns níveis lenticulares. Esta laminação encontra-se disposta de forma paralela à foliação (Foto 5.14).

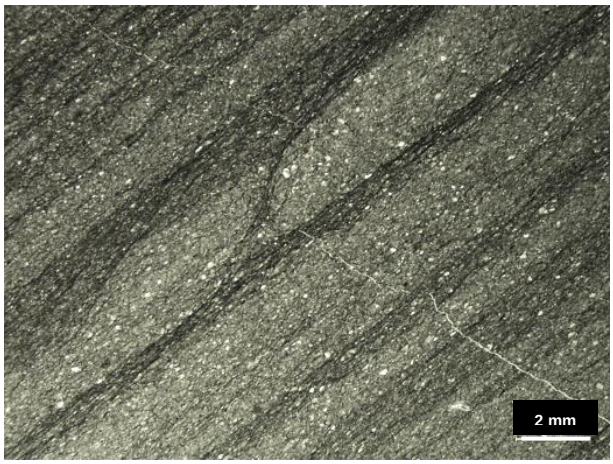


Foto 5.14 Aspeto lenticulado da foliação, visto à lupa. Níveis mais ricos em quartzo (claros) intercalados com níveis mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica (escuros). Presença também de algumas microfraturas com preenchimento de sílica.

Relativamente à foliação, esta tem tendência a contornar os clastos, o que permite que se possa classificar como anastomosada. Este facto encontra-se em concordância com outras amostras analisadas e provenientes da mesma sondagem (Foto 5.15).

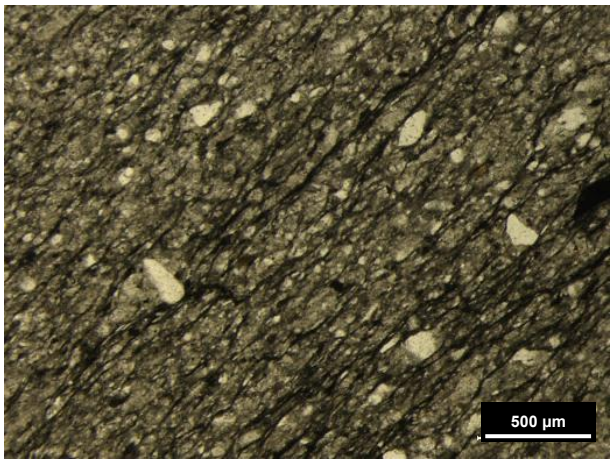


Foto 5.15 Foliação marcada em níveis mais ricos de matéria orgânica contornando os clastos (foliação anastomosada). Fotografia com recurso à lupa binocular.

A ocorrência de fracturação na rocha é observada ao nível microscópico através da presença de microfraturas com ou sem preenchimento em sílica. A alteração do estado *in situ* da rocha e consequente descompressão, pode ser explicação para este fator.

A mineralogia desta amostra é caracterizada pela ocorrência de quartzo, moscovite, biotite, clorite. Outros minerais existentes, mas de uma forma menos frequente, são a plagioclase e o zircão. A matéria orgânica é o outro constituinte, conferindo à amostra bandados de coloração escura.

O quartzo apresenta-se frequentemente sob a forma de grãos criptocristalinos. É identificável pelas suas baixas cores de polarização e extinção ondulante. É possível observar que por vezes, as micas apresentam um crescimento adjacente aos clastos, como se pode ver na Foto 5.16, onde ocorre um grão de biotite crescendo adjacentemente a um clasto de quartzo.

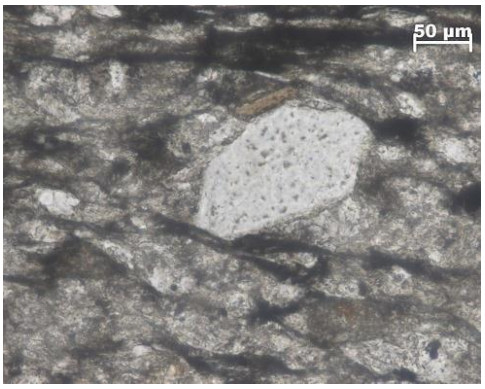


Foto 5.16 Clasto de quartzo com forma bastante euédrica. Observa-se clastos de biotite adjacentemente ao clasto de quartzo (N//).

Outra característica interessante relativamente ao quartzo tem a ver com o intercrescimento com outros minerais, como pode ser observado num clasto lítico de moscovite/quartzo (Foto 5.17).

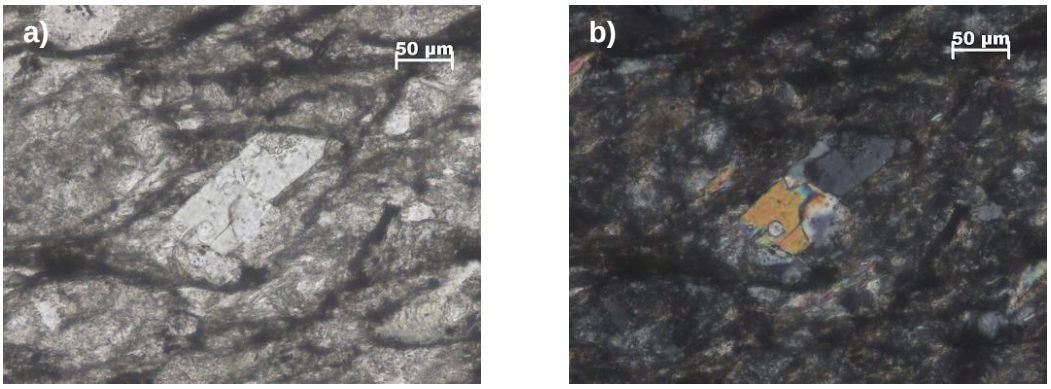


Foto 5.17 Clasto lítico de quartzo e moscovite. N// a) NX b).

A plagioclase é quase inexistente, sendo que se observam alguns grãos de forma dispersa na lâmina. A sua identificação é fácil devido às suas maclas, segundo a lei da Albite.

Ocorrem alguns grãos detríticos de zircão. A sua forma permite a sua identificação, bem como as elevadas cores de polarização (Foto 5.18).

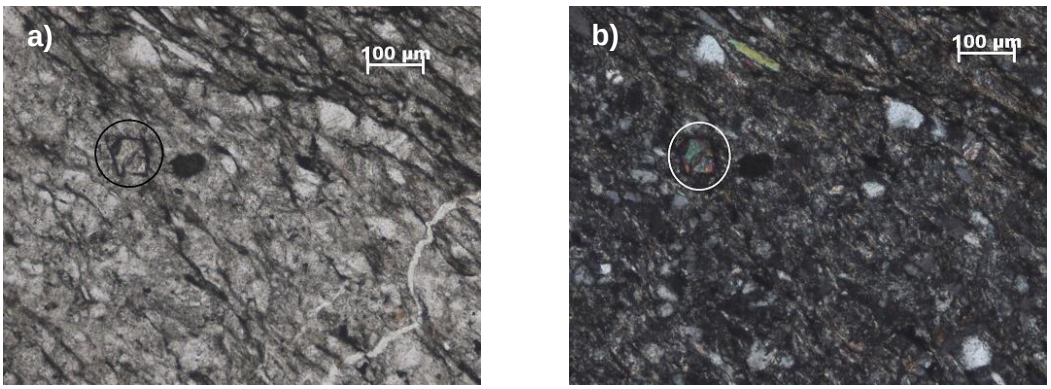


Foto 5.18 Zircão em N// a) e NX b).

Relativamente aos minerais micáceos, é possível observar-se biotite, moscovite e clorite. Estes minerais são facilmente identificáveis pelo seu aspeto lamelar. Outra particularidade prende-se com o facto de se tratar em numerosos casos, de minerais de proveniência detrítica, ou seja, são provenientes da rocha pré-existente (Foto 5.19).

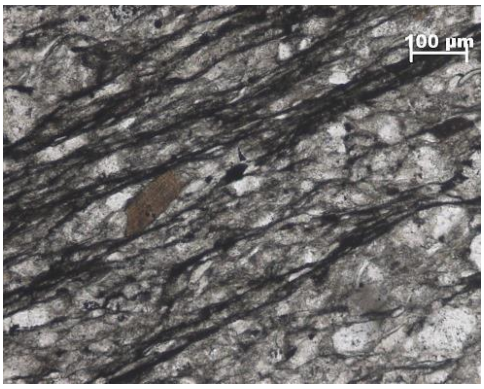


Foto 5.19 Biotite detrítica envolta em níveis com foliação bastante bem marcada e acumulação acentuada de matéria orgânica (NX).

Analisando alguns dos filossilicatos de forma mais particular, a biotite é um dos minerais a destacar. Esta ocorre em dois locais distintos. Por um lado aparece adjacente a grãos clásticos e por outro em zonas de foliação mais intensamente marcada.

A dissolução dos minerais devido a processos metamórficos é mais intensa nesta amostra. O quartzo, plagioclase e as micas apresentam sinais deste processo (Foto 5.20)

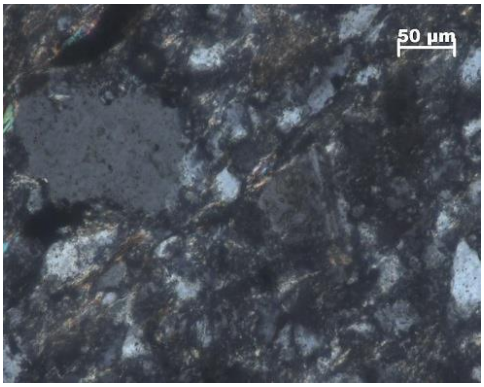


Foto 5.20 Clasto de quartzo com dissolução intensa nos seus bordos (NX).

A biotite encontrada na lâmina é de origem detrítica e apresenta-se cloritizada nos bordos, o que indica que é compatível com condições metamórficas da zona da clorite (Foto 5.21).

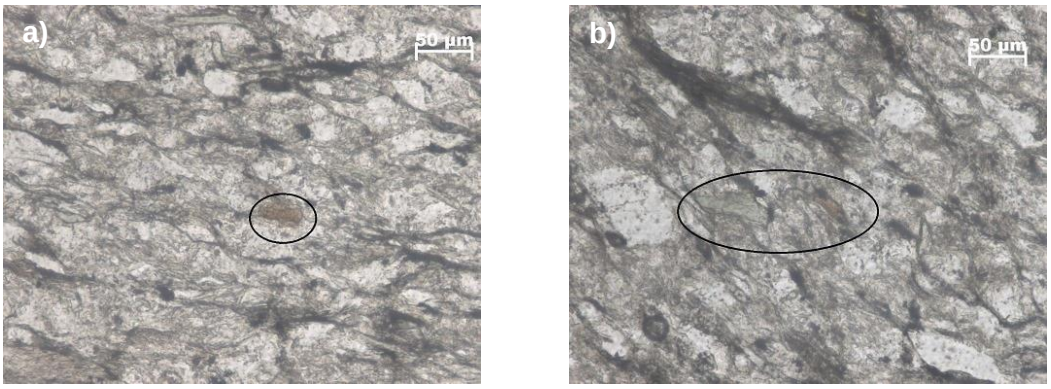


Foto 5.21 Grãos de biotite a passar a clorite, ambas em N//.

Por fim referir ainda que a matéria orgânica tem uma ocorrência bastante preponderante nesta amostra, localizando-se nas zonas mais intensamente foliadas e conferindo-lhe uma coloração escura (Foto 5.22).

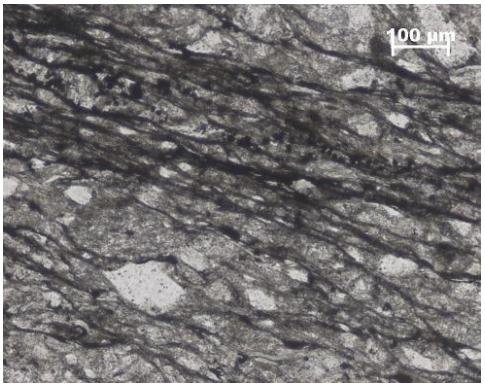


Foto 5.22 Matéria orgânica concentrada nas zonas de foliação mais marcada. Mais uma vez o aspeto anastomosado desta é bastante evidente (NX).

5.2.3. AM 18 – Sondagem CH 10

Análise macroscópica

Esta amostra corresponde a uma rocha filitosa.

De forma análoga às amostras já analisadas, a presença de matéria orgânica confere-lhe uma coloração escura. Em relação à alteração e fracturação, os sinais são pouco evidentes (Foto 5.23 e 5.24).



Foto 5.23 Amostra de mão AM 18. Mais uma vez a amostra é caracterizada por coloração acinzentada, com níveis mais escuros devido à presença de matéria orgânica.

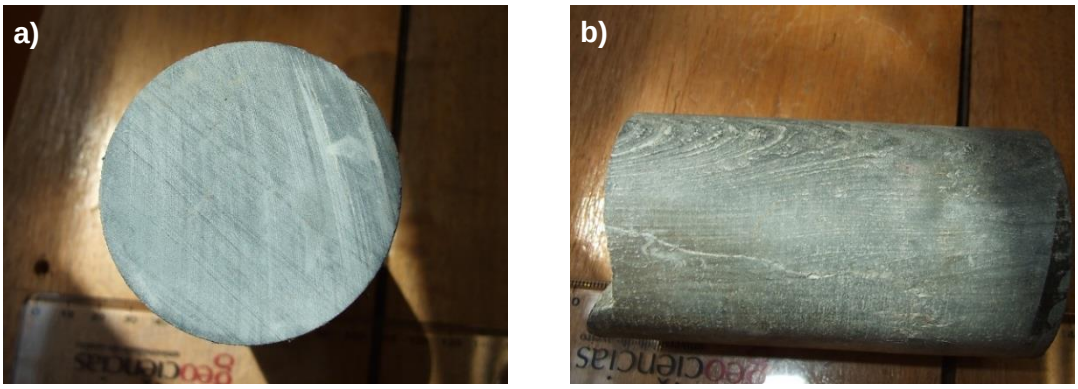


Foto 5.24 Aspeto da talisca em a) e da foliação em b). Amostra não alterada, como foliação sub-paralela ao eixo da sondagem.

Análise microscópica

Esta amostra apresenta foliação bem marcada, com bastante abundância de minerais micáceos e clastos (Foto 5.25).

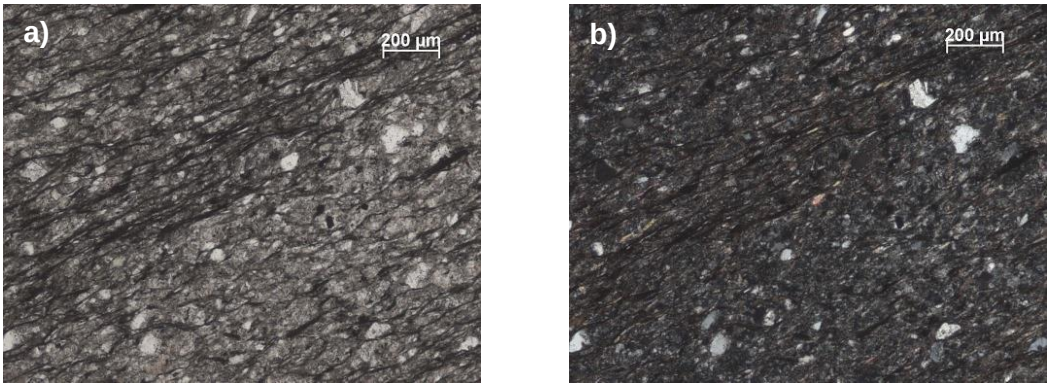


Foto 5.25 Aspeto geral da lâmina. N// a) e NX b). Observa-se uma maior acumulação de matéria orgânica nos locais onde a foliação é mais acentuada. É possível também observar clastos de quartzo de granularidade fina mas heterogénea.

A foliação tem carácter anastomosado, ou seja, contorna os clastos. Nas zonas em que esta é mais evidente, ocorre a acumulação de matéria orgânica (Foto 5.26).

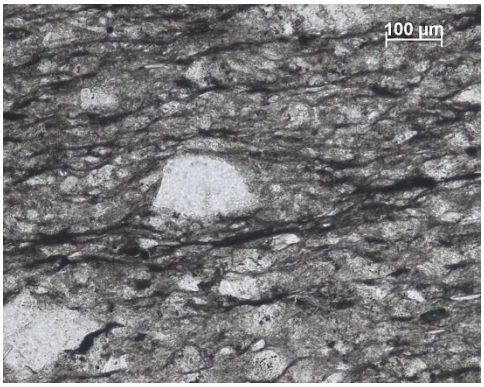


Foto 5.26 Foliação anastomosada marcada por grande acumulação de matéria orgânica, contornando um clasto de quartzo (NX).

Tal como em outras amostras, também é possível a observação de uma clivagem ardosífera, ocorrendo o intercrescimento de minerais de forma transversa à foliação.

Outro aspeto a salientar prende-se com o facto de se observar uma laminação estratigráfica caracterizada por níveis lenticulados, dispostos de forma paralela à foliação (Foto 5.27).

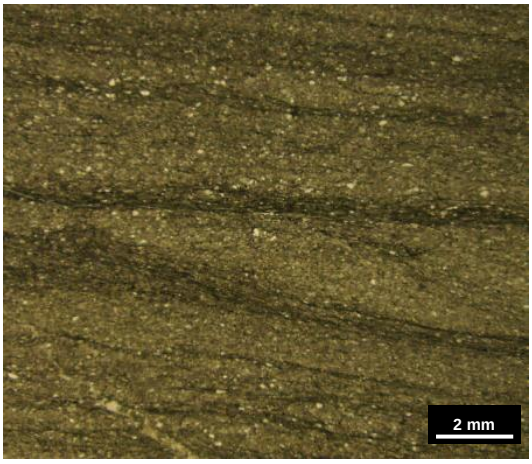


Foto 5.27 Aspeto lenticulado à lupa. Os domínios mais ricos em minerais siliciosos são contornados por domínios mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica.

Em termos mineralógicos, a rocha possui quartzo, moscovite, biotite, clorite, epídoto, calcite e plagioclase, tendo como minerais acessórios, os opacos.

O quartzo ocorre sob a forma de clastos ou em veios, preenchendo fraturas. Neste último caso encontra-se associado a calcite (Foto 5.28).

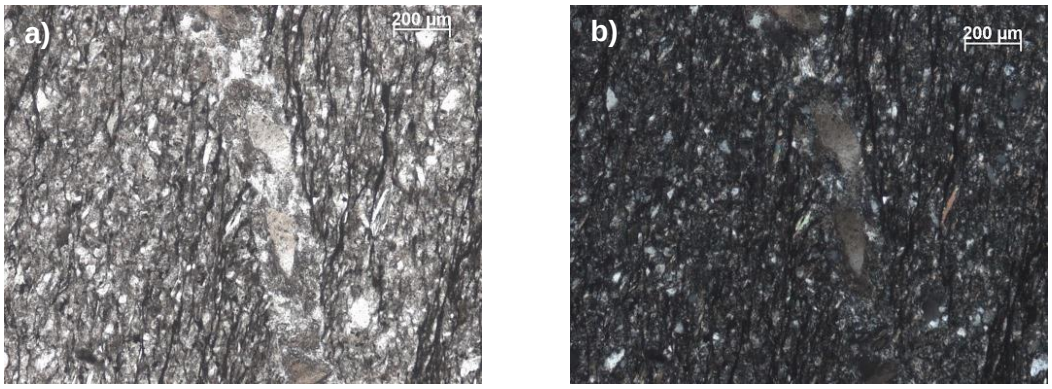


Foto 5.28 Veio de quartzo e calcite atravessando a foliação N// a) e NX b).

As micas, como a moscovite e a biotite são em alguns dos casos, de origem detrítica.

Em alguns casos, nos clastos observam-se fenómenos de intercrescimento entre minerais, como é o caso da moscovite e do quartzo (Foto 5.29).

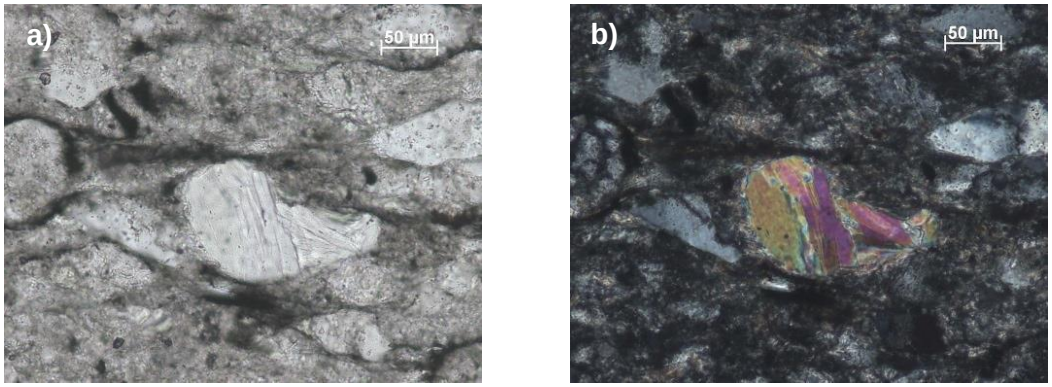


Foto 5.29 Intercrescimento entre quartzo e moscovite em N// a) e NX b).

A clorite pode ocorrer sob a forma detrítica ou resultar de processos metamórficos, nomeadamente substituindo biotite ou resultando da recristalização de minerais de argila. Isto pode indicar que em termos de classificação das condições de metamorfismo, esta rocha estaria em condições metamórficas correspondentes à zona da clorite (Foto 5.30).



Foto 5.30 Os processos de metamorfismo originaram blastese de clorite (N//).

Por fim além dos opacos, é possível observar alguns cristais de plagioclase de forma dispersa na lâmina.

5.2.4. AM 29 – Sondagem CH 15

Análise macroscópica

Esta amostra corresponde a uma rocha metamórfica de baixo grau, mais propriamente um filito.

Em termos mineralógicos, observa-se um grão de tamanho muito fino, que no entanto define uma orientação.

A sua cor é escura, devido essencialmente à grande quantidade de matéria orgânica acumulada. É também evidente que algumas zonas de coloração mais clara resultam da presença de clastos de quartzo.

Em termos de alteração, esta não é muito intensa (W1), mais uma vez porque esta amostra foi recolhida a alguma profundidade (Foto 5.31 e 5.32).



Foto 5.31 Amostra AM 29. A sua coloração é acinzentada e não apresenta alteração.

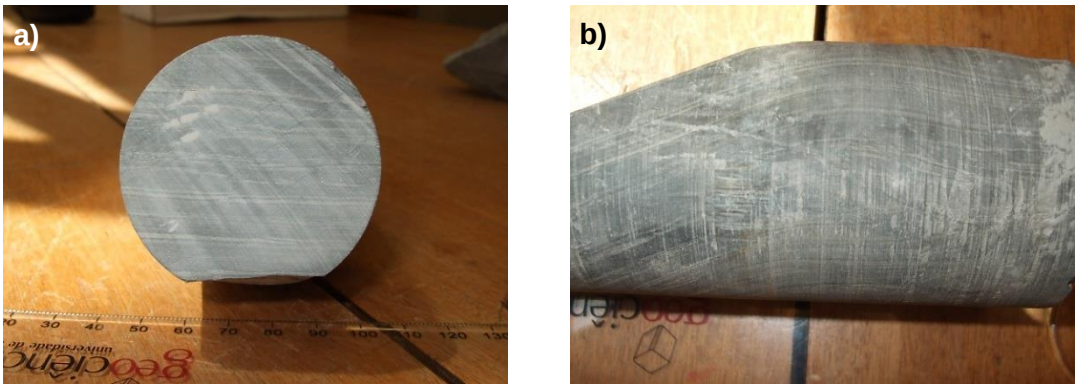


Foto 5.32 Aspeto da talisca em a). A estratificação encontra-se paralela à foliação b).

Análise microscópica

Esta amostra é caracterizada por uma estratificação marcada pela alternância de níveis mais ricos em minerais micáceos, com níveis mais ricos em clastos de quartzo. Esta é afetada por uma clivagem de fratura (Foto 5.33).

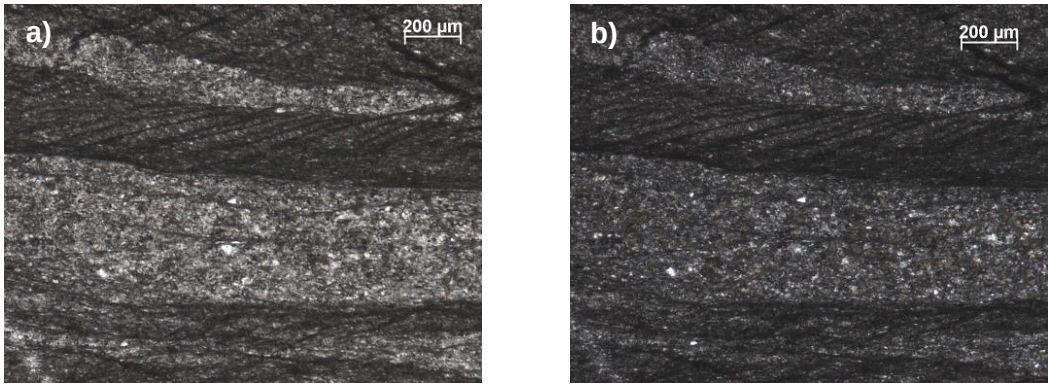


Foto 5.33 Aspeto geral da lâmina em N// a) e NX b). São observáveis níveis estratigráficos mais ricos em quartzo (mais claros), e níveis mais ricos em matéria orgânica e filossilicatos (mais escuros). Os mais ricos em matéria orgânica e filossilicatos apresentam clivagem bem marcada.

Em termos estruturais, é possível observar níveis de estratificação paralelos a uma clivagem diagenética. Aqui são os minerais mais argilosos e as micas que definem esta estrutura. Estes níveis estratigráficos são afetados por uma clivagem tectónica transversa aos primeiros (Foto 5.34 e 5.35).

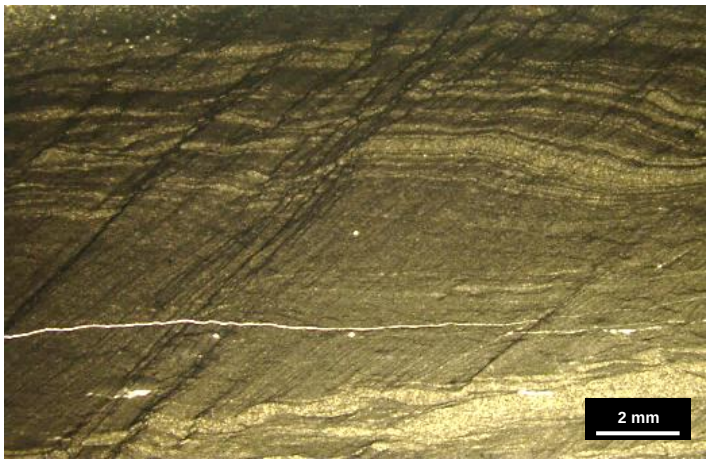


Foto 5.34 Intercalação dos diferentes níveis estratigráficos, afetados por uma clivagem tectónica.

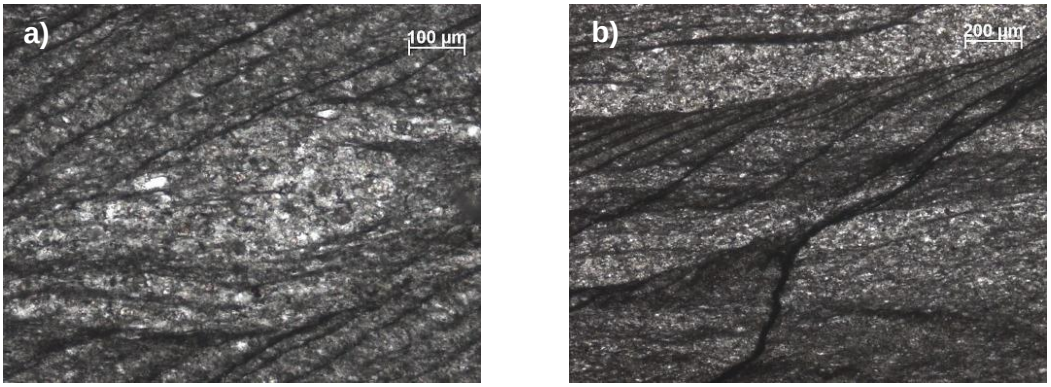


Foto 5.35 a) Relação entre a clivagem e a estratificação (NX). b) Movimento da estratificação provocada por clivagem tectónica (NX).

Nas zonas onde a estratificação está afetada por clivagem de fratura, o comportamento mais plástico dos minerais permite observar uma crenulação mais marcada. Não é no entanto suficiente para provocar uma nova reorientação dos minerais (Foto 5.36).

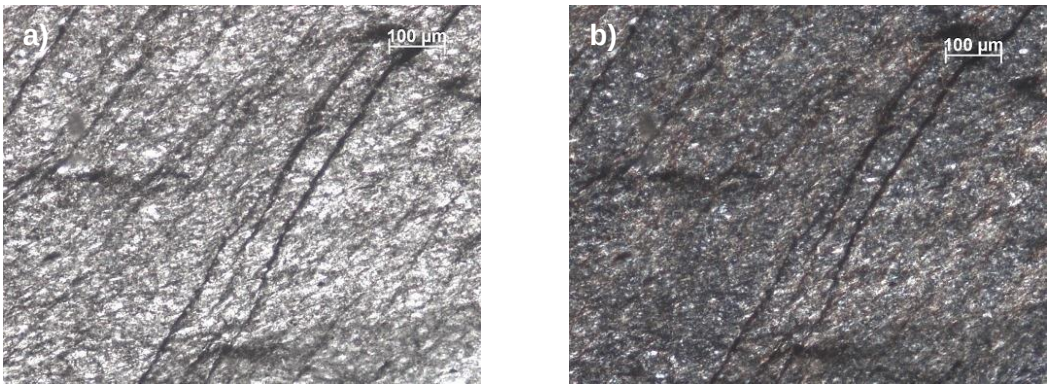


Foto 5.36 Clivagem de fratura sem reorientação dos minerais. a) N// e b) NX.

O epídoto e o quartzo não se apresentam orientados, ocorrendo de forma adjacente a zonas ricas em filossilicatos e matéria orgânica (Foto 5.37).

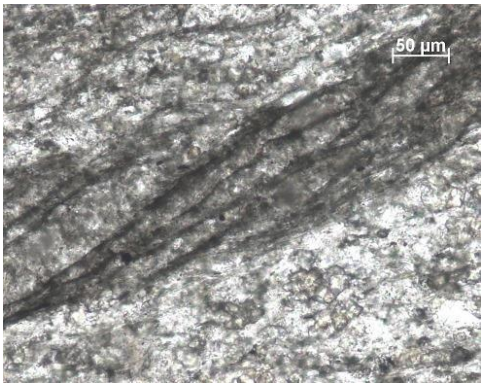


Foto 5.37 Orientação das micas e matéria orgânica nos níveis afetados por clivagem de fratura. Agregados de quartzo e epídoto adjacentes à mesma (N//).

Em termos mineralógicos, foram identificados quartzo, micas, epídoto, clorite e matéria orgânica.

O epídoto apresenta uma relação intrínseca com o quartzo e níveis mais ricos em sílica. A identificação deste é feita com base nas suas cores de polarização fortes, e no seu relevo elevado. Aparece com forma anédrica e em agregados granulares associados ao quartzo (Foto 5.38).

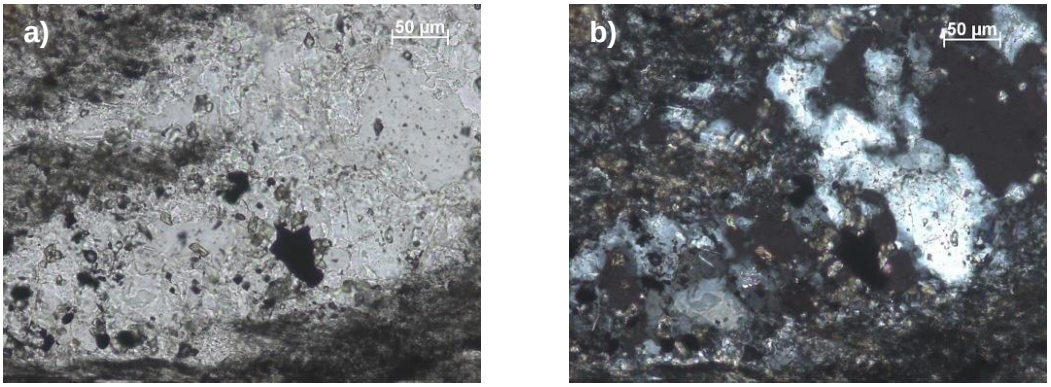


Foto 5.38 Lentícula de quartzo associada a aglomerados de epídoto, ambos em contacto com opacos. N// a) e NX b).

É também observada alguma clorite, mas a sua ocorrência na lâmina é mais reduzida que em casos anteriores. A clorite aparece preferencialmente associada ao epídoto (Foto 5.39).

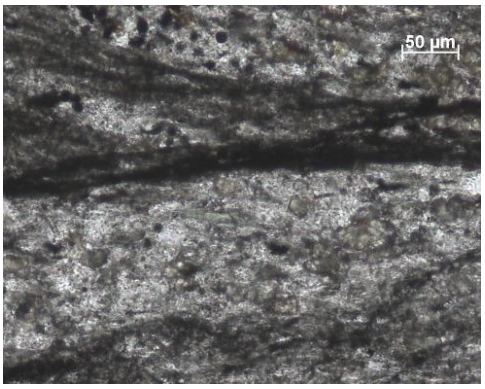


Foto 5.39 Epídoto e clorite ocorrendo intercalados entre domínios ricos em filossilicatos e matéria orgânica (N//).

Por fim, é possível encontrar zonas mais ricas em matéria orgânica nos domínios mais ricos em sílica. Esta tende a formar agregados de forma circular que se classificam como esferólitos (Foto 5.40).

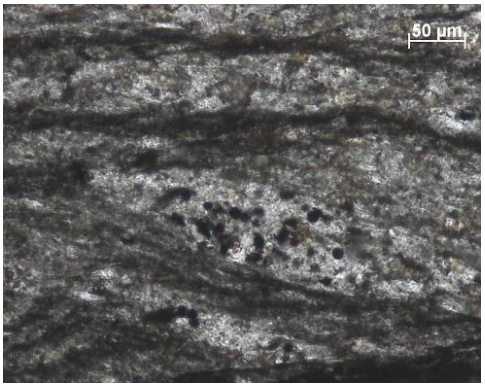


Foto 5.40 Matéria orgânica assumindo a forma de esferólitos. Este fenómeno é observado nos locais onde se encontram aglomerados de clorite e epídoto (NX).

5.2.5. AM 42 – Sondagem CH11

Análise macroscópica

Esta rocha apresenta, em analogia com outras já observadas, uma granulometria bastante fina. Deverá corresponder a um filito.

A sua coloração é bastante escura, sendo observadas bandas de cores mais claras intercaladas com outras onde a composição em matéria orgânica deverá contribuir para o escurecimento da amostra.

É possível observar alguma fracturação ténue, com sinais de oxidação (Fotos 5.41 e 5.42).



Foto 5.41 Amostra AM42. Apresenta pouca alteração, sendo que a coloração da amostra apresenta uma tonalidade acinzentada.

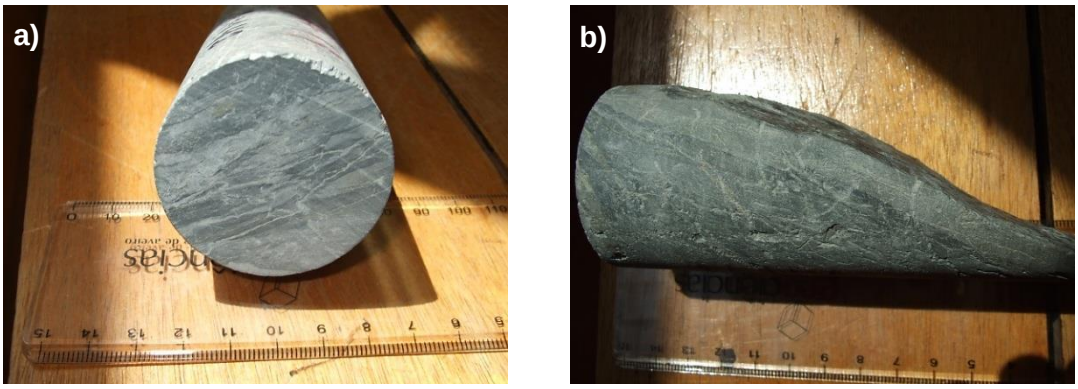


Foto 5.42 Aspeto da talisca em a) e da estratificação em b). Em concordância com outras amostras, a foliação dispõe-se de forma paralela à estratificação.

Análise microscópica

À semelhança de amostras anteriores, esta apresenta estrutura e textura ainda condicionada pela estrutura sedimentar.

Existe uma alternância de níveis mais ricos em sílica, caracterizados por clastos de quartzo monocristalino, com níveis mais ricos em micas com clivagem mais marcada (Foto 5.43), que corresponde à estratificação.

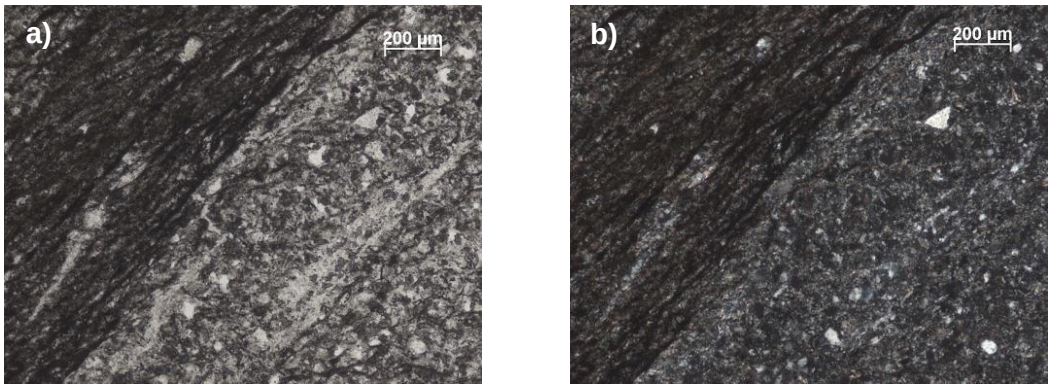


Foto 5.43 Aspeto geral em N// a) e NX b). Bastante visíveis os níveis mais claros ricos em quartzo, e os níveis mais escuros afetados mais intensamente por clivagem e ricos em filossilicatos e matéria orgânica.

É possível observar uma clivagem anastomosada contornando os clastos de quartzo monocristalino. Esta é mais evidente nas zonas de matriz mais lepidoblástica, onde os clastos de quartzo se encontram dispersos de uma forma aleatória.

Em termos mineralógicos, o que se pode observar em lâmina delgada é quartzo, micas, epídoto e opacos, bem como frequente presença de matéria orgânica.

O quartzo ocorre sob a forma de grãos monocristalinos ou em cristais mais desenvolvidos preenchendo fraturas. Em ambos os casos é fácil de identificar recorrendo às suas propriedades óticas (Foto 5.44 e 6.45).

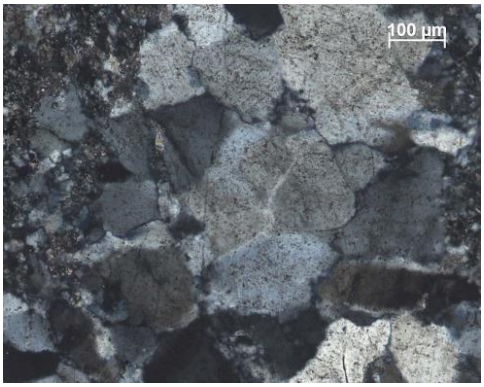


Foto 5.44 Cristais de quartzo preenchendo uma microfratura (NX).

O epídoto forma aglomerados nas zonas onde as concentrações em sílica são mais elevadas (Foto 5.45 e 5.46).

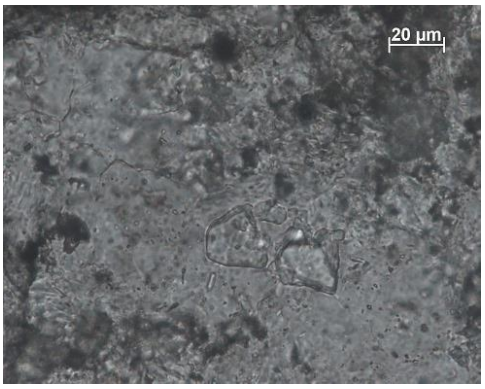


Foto 5.45 Cristais de epídoto em N//. Estes ocorrem nos domínios mais claros e ricos em sílica.

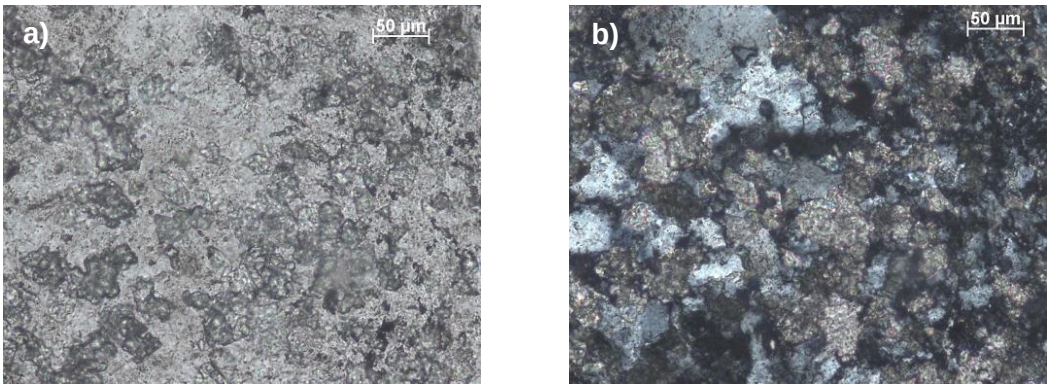


Foto 5.46 Aglomerados de cristais de epídoto em N// a) e NX b).

As micas são de dimensões bastante reduzidas, encontrando-se com mais frequência nos domínios mais ricos em matéria orgânica, definindo as zonas em que a clivagem é mais evidenciada.

É possível referir que existem indícios de oxidação, sendo identificados pela coloração avermelhada de certas zonas da rocha (Foto 5.47).



Foto 5.47 Indícios de oxidação identificada pela tonalidade avermelhada (N//).

5.2.6. AM 49 – Sondagem CH13

Análise Macroscópica

Tal como se observa em outras amostras, a dimensão dos grãos minerais é bastante reduzida. A cor desta amostra é escura, o que pode indicar mais uma vez a presença de matéria orgânica como fator preponderante para esta coloração. A textura, apesar de possuir grãos muito pequenos, é caracterizada por uma orientação preferencial dos minerais, marcando uma clivagem (Foto 5.48 e 5.49).

A rocha é classificada como filito.

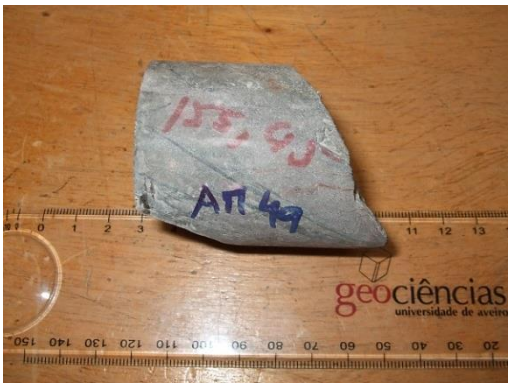


Foto 5.48 Amostra AM 49: rocha de tonalidade cinzenta caracterizada por uma foliação, sendo que localmente se observa uma coloração mais escura devido à presença de matéria orgânica.

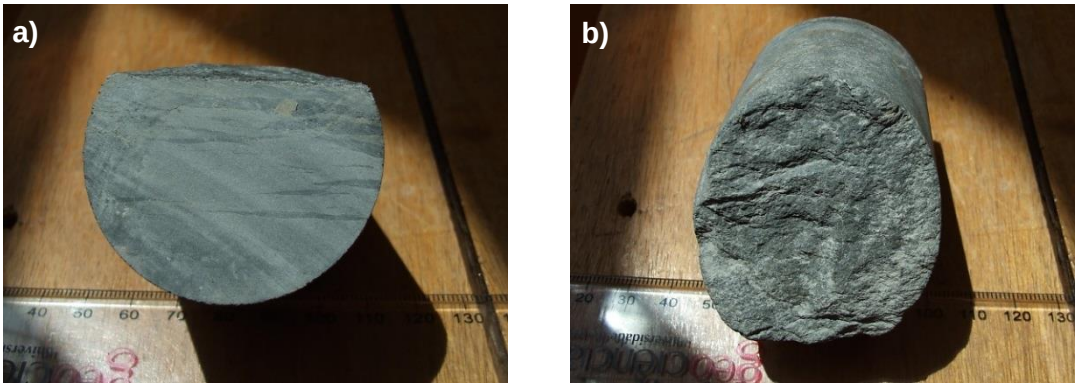


Foto 5.49 Aspeto da talisca em a) e da foliação em b). Não se observam indícios de alteração (rocha sã).

Análise microscópica

A amostra é caracterizada por uma mineralogia muito fina, sendo possível observar, níveis com diferente textura e mineralogia que marca a estratificação (Foto 5.50).

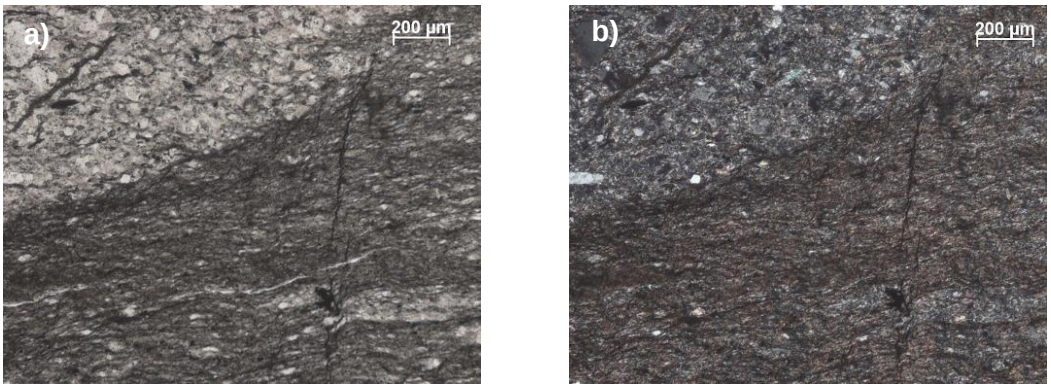


Foto 5.50 Aspeto geral da lâmina, com domínios mais ricos em quartzo (mais claros) e outros em que predominam os filossilicatos e a matéria orgânica, marcando a estratificação (S0). N// em a) e NX em b).

Existem níveis mais ricos em minerais micáceos e argilosos, sendo que estes se encontram intercalados com outros onde existe uma maior abundância de quartzo. Estes níveis correspondem à estratificação da rocha. Apenas os níveis mais micáceos estão afetados por uma clivagem transversa. Esta é uma clivagem de fratura caracterizada por afetar a estratificação de forma ténue, não tendo intensidade suficiente para provocar uma reorientação mineralógica como se pode observar (Foto 5.51 e 5.52).

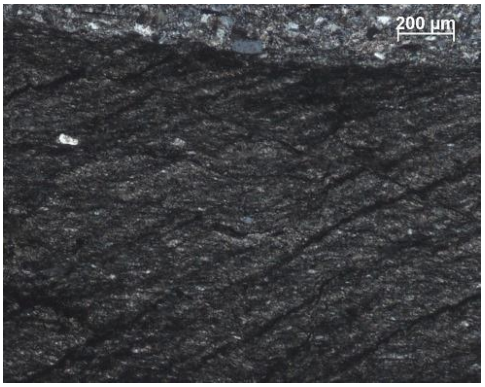


Foto 5.51 Clivagem de fratura, aparecendo de forma bastante marcada nos níveis de filossilicatos e matéria orgânica (NX).

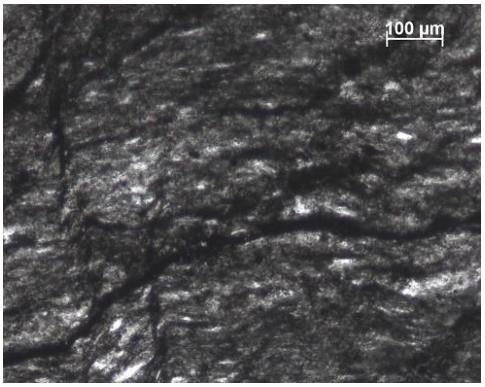


Foto 5.52 Comportamento dúctil dos materiais, observando-se crenulação incipiente (NX).

Em termos mineralógicos, é possível observar quartzo, micas, epídoto e opacos.

O quartzo encontra-se nas zonas mais siliciosas. Ocorre sob a forma de clastos ou em filonetes, cortando a mineralogia existente (Foto 5.53).

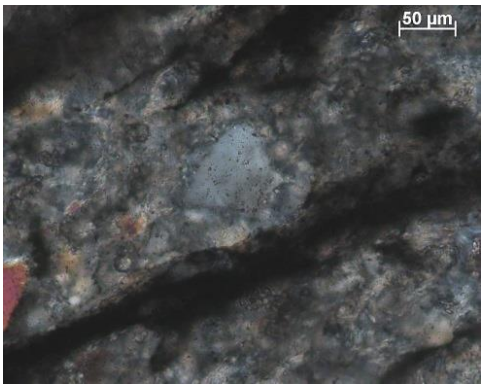


Foto 5.53 Clasto de quartzo (NX).

As micas concentram-se nas zonas onde a estratificação é mais marcada. A sua aparência indica que podem ser resultado tanto de processos metamórficos como de origem detrítica, sendo neste caso provenientes da rocha mãe (Foto 5.54).

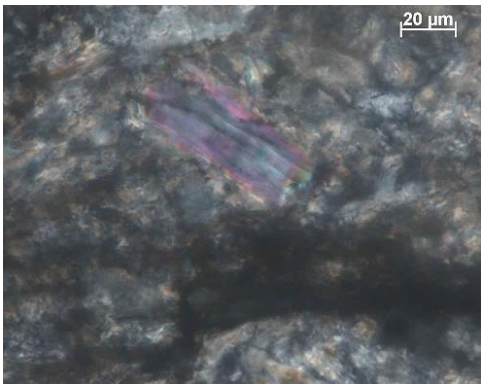


Foto 5.54 Clasto de moscovite (NX).

O epídoto ocorre tal como em outras amostras, associado a zonas mais siliciosas, formando agregados (Foto 5.55).

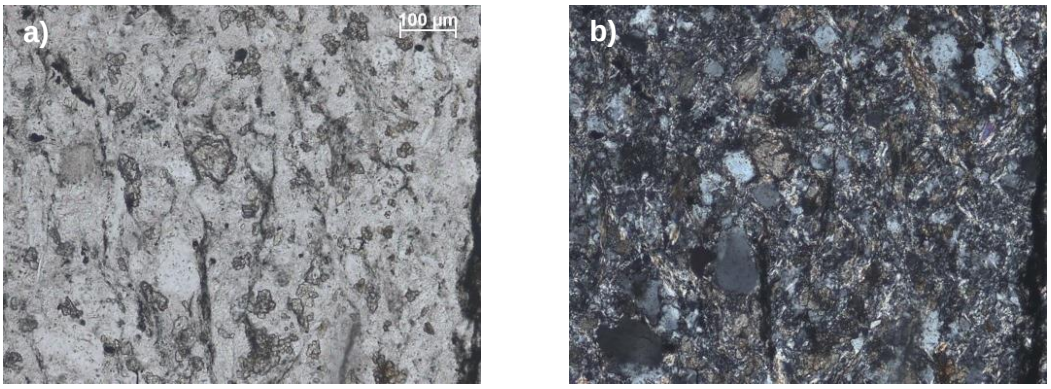


Foto 5.55 Aglomerados de pequenos cristais de epídoto, coincidentes com domínios ricos em quartzo. a) N// e b) NX.

Por fim, ocorre também acumulação de matéria orgânica e opacos.

5.2.7. AM 50 – Sondagem CH15

Análise macroscópica

Esta amostra corresponde a um filito. No entanto ao contrário de outras amostras, a presença de minerais leucocratas é bastante inferior, exceto alguns filonetes de quartzo.

Relativamente aos aspetos estruturais observados à escala macroscópica, a estratificação é paralela ao eixo da sondagem e corresponde mais uma vez a níveis mais ricos em matéria orgânica. (Foto 5.56 e 5.57).



Foto 5.56 Amostra AM 50 limitada por um veio preenchido por quartzo, oblíquo ao eixo da sondagem.

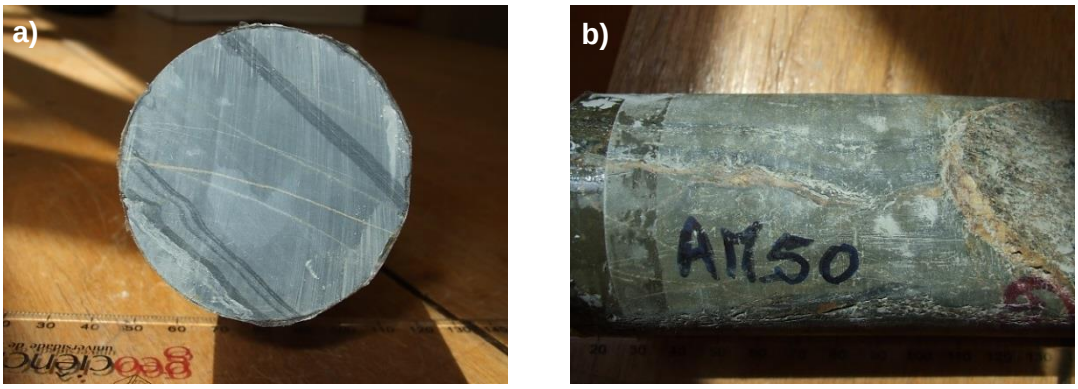


Foto 5.57 a) Aspeto da talisca. b) Alteração: Os planos são subparalelos ao eixo da sondagem e revelam indícios de alteração, com coloração amarelada.

Análise microscópica

A textura desta amostra é essencialmente definida por uma matriz lepidoblástica uma vez que a orientação de minerais micáceos é bastante evidente ao microscópio (Foto 5.58). A estratificação está bem preservada.

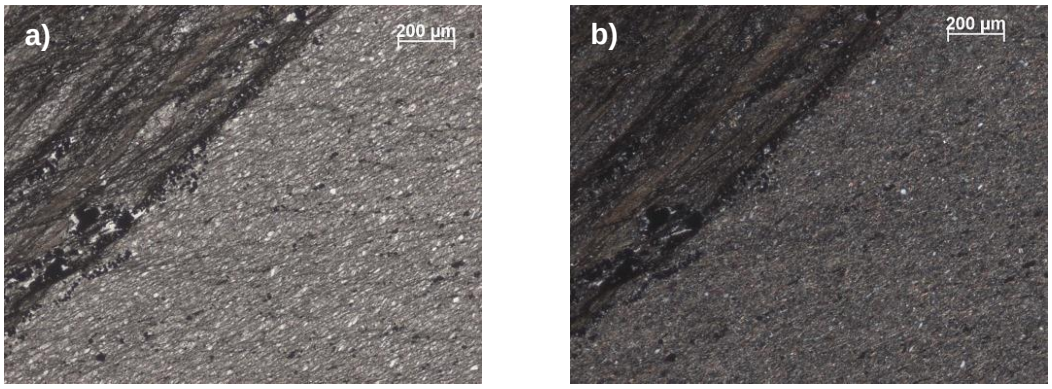


Foto 5.58 Aspeto geral. N// em a) e NX em b).Os domínios de coloração mais clara apresentam abundância em cristais de quartzo, ao passo que nos mais escuros há uma predominância de filossilicatos e matéria orgânica.

Relativamente a parâmetros estruturais, há alguns aspetos a realçar nesta amostra.

É possível observar uma estratificação bem marcada, sendo que em alguns casos essa mesma estrutura é afetada por crenulação, o que indica que esta estratificação foi sujeita a processos metamórficos que originaram foliação (Foto 5.59).

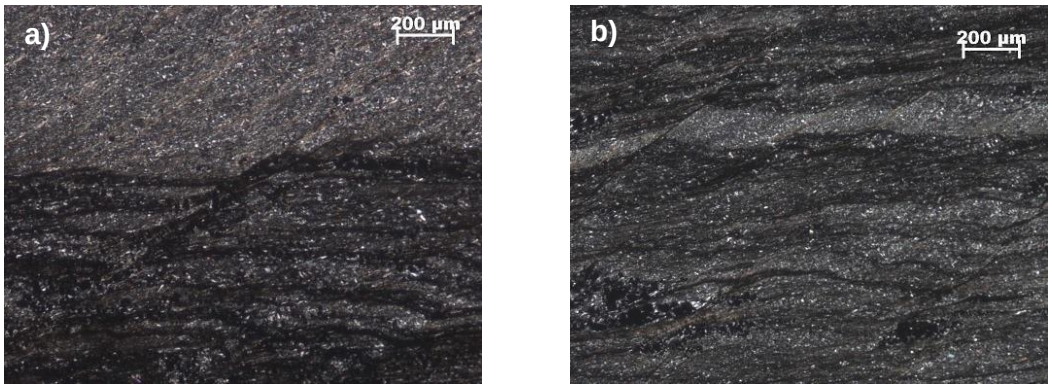


Foto 5.59 Crenulação em NX a) e b). Pode observar-se nos níveis mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica (mais escuros), uma clivagem que atua de forma transversal à estratificação. Devido ao comportamento mais plástico dos minerais, observam-se dobramentos à escala microscópica (crenulação).

A clivagem ardosífera consiste em bandados de filossilicatos muito finos e matéria orgânica que se apresentam anastomosados ao redor de fragmentos detríticos, como por exemplo quartzo. Ocorrem intercrescimentos de moscovite e clorite definindo blastos ("folia"), de orientação perpendicular à foliação. (Foto 5.60).

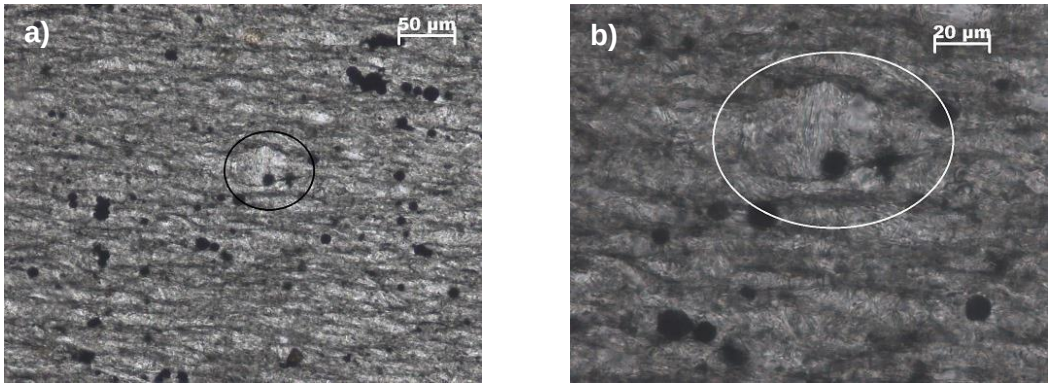


Foto 5.60 Clorite com crescimento perpendicular à xistosidade (folia) em N// a) e NX b).

Em termos mineralógicos, os principais minerais que constituem rocha são quartzo, clorite, mica branca (sericite), moscovite e alguma biotite. Também se observam opacos.

A clorite ocorre essencialmente em cristais com orientação perpendicular à foliação.

São visíveis indícios de blastese preferencial de clorite e de moscovite em contacto com os opacos (Foto 5.61).

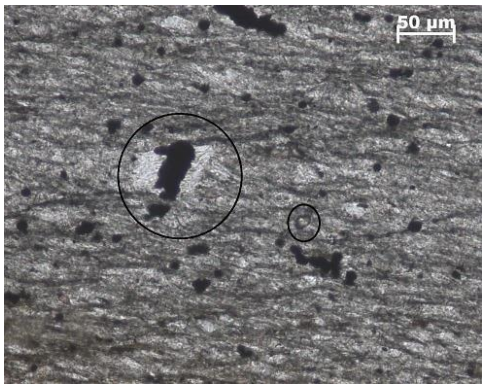


Foto 5.61 Blastese de clorite e moscovite adjacente a opacos. Observa-se um grão de zircão (N//).

O quartzo apresenta-se sob a forma de filonetes ou como preenchimento de fraturas. Os cristais de epídoto ocorrem essencialmente associados ao quartzo (Foto 5.62).

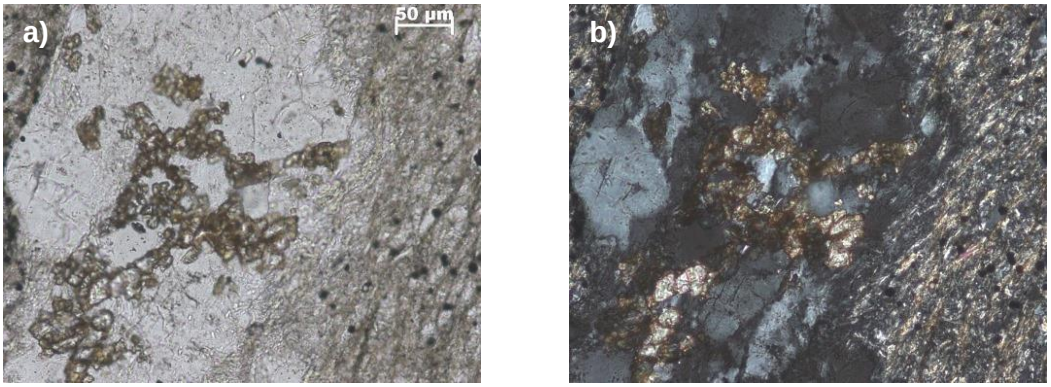


Foto 5.62 Agregados de epídoto associados a quartzo filoniano. a) N//; b) NX.

Por fim pode falar-se da fracturação observada. É possível encontrar fraturas preenchidas por quartzo. (Foto 5.63).

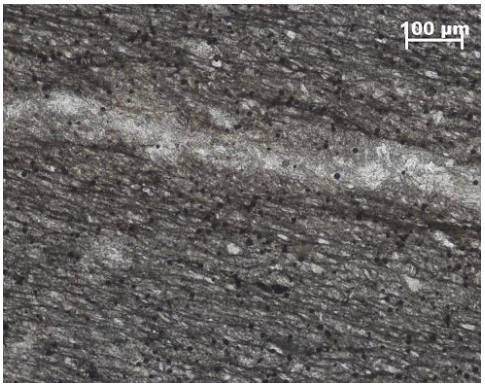


Foto 5.63 Fratura preenchida por quartzo dispondo-se de forma paralela à clivagem (N//).

5.2.8. L2 – Sondagem CH11

Análise macroscópica

Esta amostra corresponde a um tectonito pois apresenta zonas muito quartzosas e muito deformadas. A foliação é bem marcada, uma vez que as micas definem uma orientação. Esta amostra apresenta foliação mais penetrativa e constante do que as amostras anteriores (Foto 5.64 e 5.65).



Foto 5.64 Amostra L2. A sua coloração é acinzentada, sendo que os níveis mais claros correspondem a grãos de quartzo.

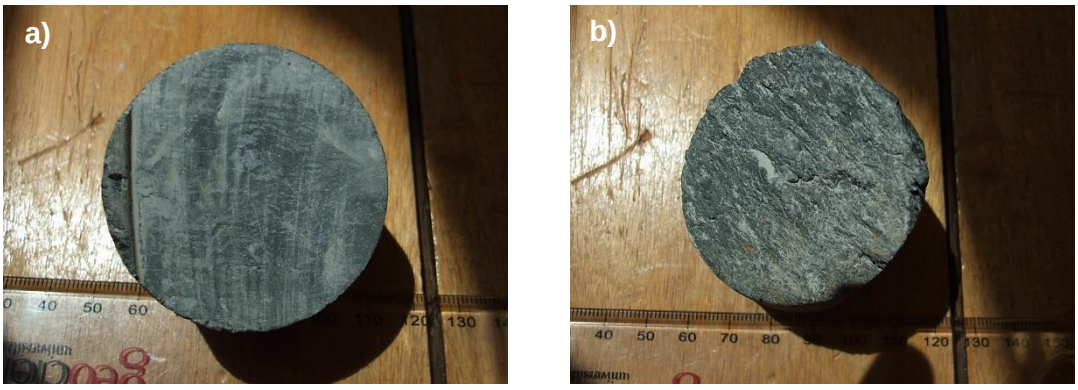


Foto 5.65 Aspeto da talisca a) e foliação b). Observa-se pouca alteração, derivada também do facto de o quartzo ser um mineral bastante abundante na amostra. A foliação contorna estes domínios mais ricos em sílica.

Análise microscópica

A rocha é caracterizada por uma textura claramente metamórfica, com minerais micáceos definindo uma foliação que contorna zonas de clastos de quartzo (Foto 5.66).

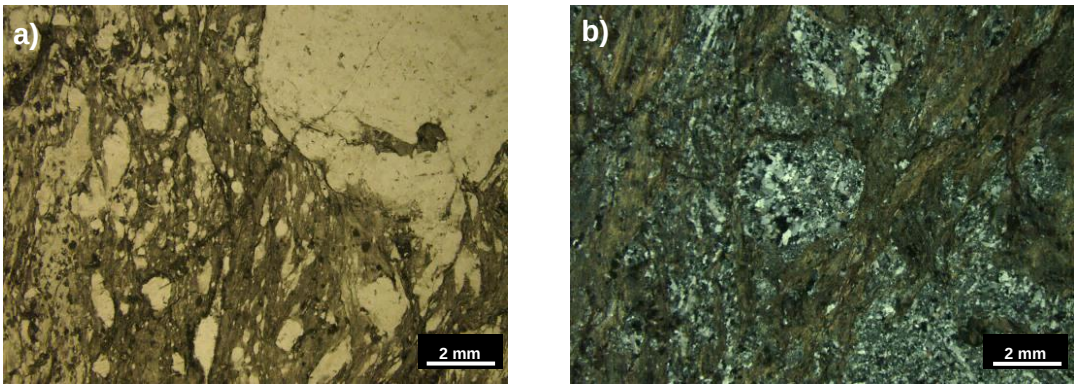


Foto 5.66 Aspeto geral visto à lupa. a) N//; b) NX. Domínios de quartzo afetados por deformação, contornados por uma foliação marcada por níveis mais ricos em filossilicatos e matéria orgânica.

A foliação observada apresenta um carácter anastomosado contornando clastos de quartzo. Estes clastos são mono ou policristalinos, apresentando muitos deles subgranulação intensa. Daí a designação da amostra como tectonito.

Observam.se dois aspetos estruturais muito diferentes, havendo níveis mais ricos em micas e com foliação bastante bem marcada e níveis ricos em quartzo muito subgranulado (Foto 5.67).

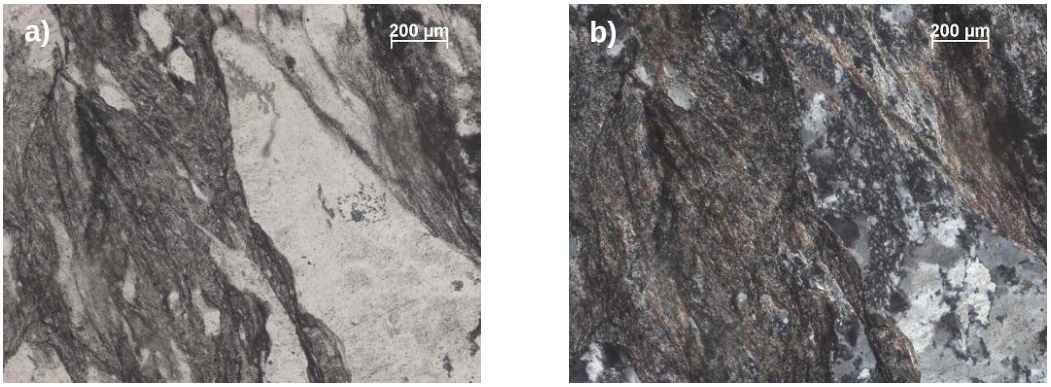


Foto 5.67 Níveis de quartzo e micas. N// a) e NX b). Quartzo intensamente deformado e mostrando bordos saturados e subgranulados**.**

A mineralogia desta rocha é caracterizada por quartzo, micas, epídoto e opacos

As micas existentes são mica branca e biotite. Esta última ocorre muito alterada, nas zonas de foliação mais intensa.

O quartzo ocorre sob a forma microcristalina, podendo estar estirado por ação de processos metamórficos sob a forma de “ribbon” (Passchier *et al.*, 2005) (Foto 5.68 e 5.69).

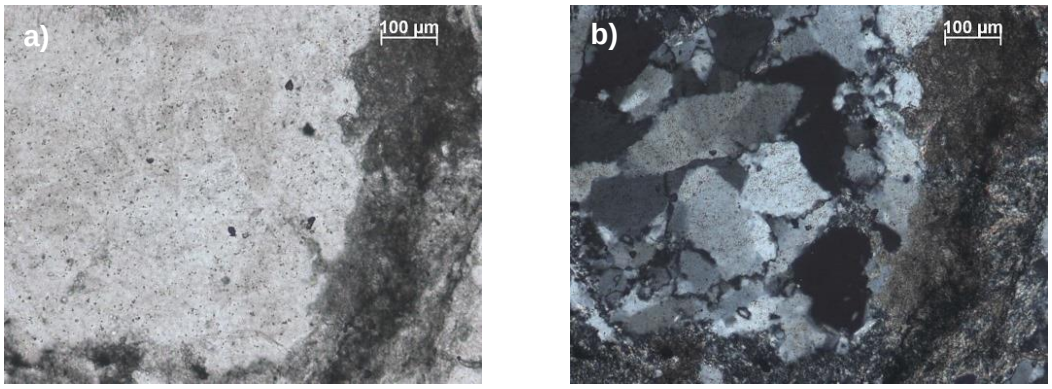


Foto 5.68 Cristal de quartzo com deformação evidente e suturação dos bordos. N// a) e NX b).

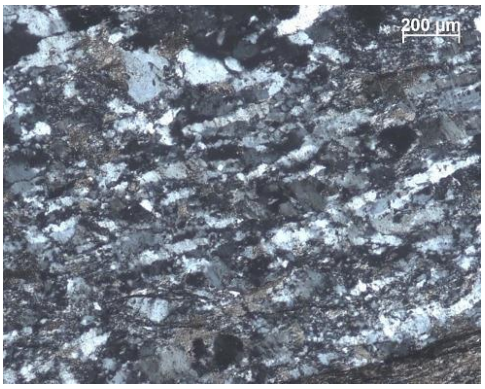


Foto 5.69 Quartzo estirado em forma de "ribbon" (NX).

A deformação nesta rocha, afetou os clastos de quartzo, que apresentam bordos bastante saturados (Foto 5.70).

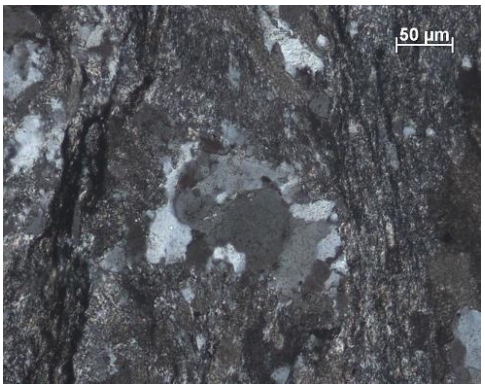


Foto 5. 70 Quartzo com deformação nos seus bordos, ocorrendo de forma intercalada entre os níveis mais ricos em matéria orgânica e filossilicatos (NX).

O epídoto ocorre tal como nas outras lâminas, em agregados associados aos domínios mais siliciosos (Foto 5.71).

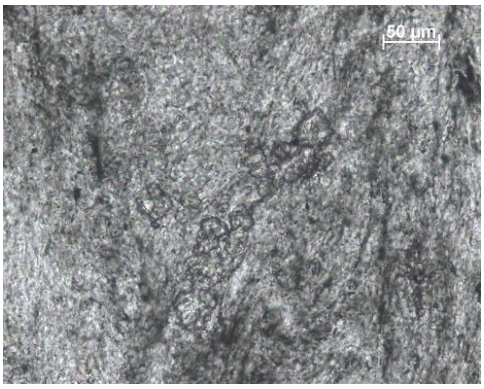


Foto 5.71 Aglomerados de cristais de epídoto nos domínios mais ricos em quartzo (N//).

A matéria orgânica está presente tal como em muitas das amostras estudadas, conferindo uma coloração escura à rocha.

Em suma, esta rocha é calcossilicatada com um nível de cataclase bastante elevado, podendo ser classificada como um tectonito.

5.3. Ensaios mecânicos

5.3.1. Ensaios com martelo de Schmidt

A resistência à compressão uniaxial do material rocha pode ser avaliada de forma aproximada *in situ* através da utilização do Martelo de Schmidt ou Esclerómetro portátil.

Os resultados da dureza de schmidt são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 Resultados medidos usando o martelo de Schmidt.

Local 1		Local 2		Local 3		Local 4		Local 5	
Medição	**Valor**	**Medição**	**Valor**	**Medição**	**Valor**	**Medição**	**Valor**	**Medição**	**Valor**
1	12	1	14	1	14	1	38	1	22
2	16	2	18	2	18	2	36	2	27
3	22	3	14	3	16	3	39	3	15
4	10	4	10	4	12	4	35	4	28
5	12	5	12	5	11	5	34	5	16
6	16	6	10	6	14	6	30	6	20
7	16	7	18	7	11	7	24	7	26
8	10	8	20	8	15	8	32	8	32
9	14	9	10	9	10	9	26	9	20
10	14	10	10	10	18	10	34	10	48
11	14	11	17	11	10	11	26	11	26
12	10	12	13	12	11	12	28	12	40

Interpretação

Após os resultados deste ensaio, é possível realizar os cálculos necessários para a aplicação do ábaco de Miller. Para tal, escolheram-se os seis valores mais altos em cada local, e fez-se a média destes (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 Média com os 6 valores mais altos medidos em cada local.

Local	1	2	3	4	5
Média	16	17	16	36	31

De seguida, é necessária a informação relativa ao peso volúmico das rochas em estudo. Segundo Knodel *et al.,* 2007, rochas de natureza filítica possuem um peso volúmico médio de 27 kN/m^3. Sabendo a orientação do martelo relativamente à superfície do talude, é feita a projeção no ábaco (Fig. 5.1).

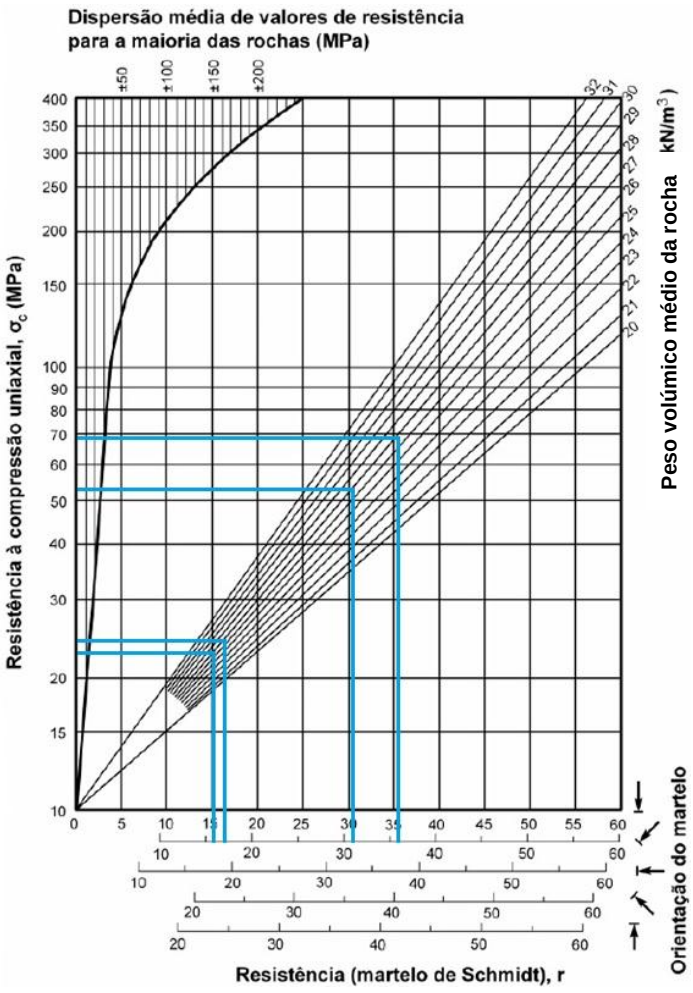


Fig. 5.1 Ábaco de Miller com projeção dos resultados da resistência de filitos à compressão uniaxial.

Os valores de resistência à compressão uniaxial mais baixos são, cerca de 23 a 25 MPa. Os valores mais elevados apresentam resistências na ordem dos 53 MPa, chegando mesmo a registar-se valores que rondam os 70 MPa.

Como se pode observar, as rochas apresentam resistências variadas à compressão uniaxial. O facto de se encontrarem à superfície, em taludes apenas acessíveis devido à abertura de estradas, pode influenciar os resultados obtidos. Este fator foi uma condicionante durante a obtenção dos dados, verificando-se uma forte alteração do maciço, causando dificuldades na obtenção dos valores de dureza.

Discussão

Em termos comparativos, o trabalho revelou que os valores obtidos se enquadram no esperado, sendo concordantes com estudos feitos por outros autores. Filitos pertencentes ao CXG da ZCI, apresentando diferentes graus de alteração, foram estudados por Andrade & Saraiva (2010), e forneceram resultados entre os 20 e 40 MPa para as litologias mais sãs. Verifica-se um decréscimo destes valores quando os níveis de alteração são mais acentuados, tendo os resultados obtidos rondado os 14 a 20 MPa (Tabela 5.4). No entanto, é de assinalar que as condições de obtenção dos resultados são diferentes das realizadas por estes autores, cujo estudo se desenvolveu em laboratório sobre carotes de rocha.

Tabela 5.4 Valores (em MPa) obtidos em filitos do CXG da CZI (seg. Andrade & Saraiva, 2010).

Filitos W1-W2	25,2–38,9[a] 22,6–36,0[b]
Filitos W3	18,2–35,0[a] 17,1–32,0[b]
Filitos W4	14,9–30,0[a] 14,2–28,0[b]

W – grau de alteração

a – medida em provetes cilíndricos de forma perpendicular á foliação

b – medida em provetes cilíndricos de forma paralela á foliação

5.3.2. Ultrassons

Recorrendo à metodologia referida anteriormente, o método de transmissão direto foi aplicado no estudo dos provetes cilíndricos. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 5.5.

Tabela 5.5 Resultados relativos ao ensaio de ultrassons.

Comprimento (m)	Tempo (µseg.)	Tempo (seg.)	Velocidade (m/s)
0,125	9,4	0,000094	1330
0,125	7,7	0,000077	1623
0,125	18,2	0,000182	687
0,125	7,2	0,000072	1736
0,125	15,8	0,000158	791
0,125	8,5	0,000085	1471
0,125	7,7	0,000077	1623
0,125	10,2	0,000102	1226
0,125	17,3	0,000173	723
0,125	8,7	0,000087	1437
0,125	10,7	0,000107	1168
0,125	8	0,00008	1563
0,125	7,5	0,000075	1667
0,125	2,8	0,000028	4464
0,125	2,5	0,000025	5000
0,125	9	0,00009	1389
0,125	8,4	0,000084	1488
0,125	8,7	0,000087	1437
0,125	3,4	0,000034	3677
0,125	9,8	0,000098	1276
0,125	9	0,00009	1389
0,125	18	0,00018	694
0,125	11	0,00011	1136
0,125	11,2	0,000112	1116
0,125	6,4	0,000064	1953
0,125	19,8	0,000198	631
0,125	24	0,00024	521
0,125	17,8	0,000178	702
0,125	8,7	0,000087	1437
0,125	11,2	0,000112	1116
0,125	9,3	0,000093	1344
0,125	7,7	0,000077	1623
0,125	11,6	0,000116	1078
0,125	5,2	0,000052	2404
0,125	9,1	0,000091	1374
0,125	8,7	0,000087	1437
0,125	6,6	0,000066	1894

Interpretação

O estudo das litologias com recurso ao método de ultrassons implicou o uso de carotes de sondagem. Estas foram cortadas segundo dimensões padronizadas de forma a obter resultados fidedignos e possíveis de comparar.

Os registos obtidos situam-se entre os 600 m/s e os 5000 m/s, aproximadamente, sendo que a média se situa entre os 1000 m/s e os 2000 m/s.

Para análise dos resultados obtidos, é necessário ter em atenção dois fatores: o armazenamento dos tarolos de sondagens não foi o mais adequado. Além disso, não são oriundos de sondagens recentes, pelo que sofreram exposição prolongada aos fatores atmosféricos da região. Como tal, a interpretação dos resultados deve ser feita de forma cautelosa, sendo que os valores obtidos podem não ser totalmente representativos para estas litologias.

Em alguns casos, observaram-se valores bastante elevados de velocidade neste trabalho, como por exemplo na ordem dos 3000 m/s. Estes podem ser resultado da composição mineralógica distinta entre alguns dos provetes

Discussão

Fazendo a comparação destes valores, é possível verificar que os resultados obtidos se inserem dentro do campo também já obtido por outros autores. Para tal, foram utilizados valores correspondentes a filitos de duas proveniências diferentes: filitos pertencentes a outras unidades litológicas, e filitos pertencentes ao CXG aflorante na ZCI.

Tanto Sharma & Singh (2008), como Andrade & Saraiva (2010) obtiverem valores semelhantes relativamente ao ensaio de ultrassons (Tabela 5.6 e 5.7).

Tabela 5.6 Velocidades Vp (m/s) para filitos (seg. Sharma & Singh, 2008).

Filitos esverdeado	2007,3
Filitos esverdeado	1845,0
Filitos esverdeado	1903,1
Filitos esverdeado	1925,4
Filito acastanhado	2010,9
Filito acastanhado	2025,3
Filito acastanhado	2035,5
Filito acastanhado	1947,0

Como já referido, o ângulo entre a foliação e o eixo da sondagem é um fator que influencia os valores de velocidade obtidos. Como se pode observar na tabela 5.7, Andrade & Saraiva (2010) registaram este tipo de valores para as suas medidas ao longo da foliação, tal como este trabalho também revelou. Por outro lado, a composição mineralógica das amostras é um pouco variável, existindo trechos mais gresosos e outros mais filitosos. Esta composição terá também influenciado os resultados obtidos.

Tabela 5. 7 Velocidades Vp (m/s) para filitos do CXG da ZCI (seg. Andrade & Saraiva, 2010).

Filitos W1-W2	1810 – 3288[a] 3533 – 5323[b]
Filitos W3	1530 – 2250[a] 2760 – 3208[b]
Filitos W4	1178 – 1800[a] 1918 – 2330[b]

W – grau de alteração

a – medida em provetes cilíndricos de forma perpendicular à foliação

b – medida em provetes cilíndricos de forma paralela à foliação

5.3.3. Carga pontual

Os tarolos de sondagem selecionados foram cortados em trechos adequados à realização de ensaios de carga pontual.

Na tabela 5.8, são apresentados os resultados válidos.

Tabela 5.8 Resultados relativos ao ensaio de carga pontual.

Sondagem	Amostra/Número	Carga	Di (mm)	Df (mm)	P (kN)	Is (MPa)
CH 13	AM 49	//	48	47	1,19	0,476
		//	48	47	2,05	0,82
		⊥	48	47	2,51	1,004
		⊥	48	46	3,05	1,22
	L3	//	48	45	1,37	0,548
		⊥	48	44	2,46	0,984
CH 10	79	//	51	49	8,77	3,508
	1	//	51	49	7,42	2,968
	19	//	51	48	9,8	3,92
	71	//	51	48	10,17	4,068
	AM 18	//	52	49	2,33	0,932
	AM 11	//	51	48	11,55	4,62
CH 11	AM 46	//	48	45	5,81	2,324
	AM 43	//	48	46	3,1	1,24
	AM 56	⊥	49	45	4,25	1,7
		//	49	46	0,59	0,236
	78	//	51	57	8,19	3,276
	92	//	48	38	16,54	6,616
		//	48	40	18,54	7,416
	21	//	48	46	8,8	3,52
		⊥	48	46	3,63	1,452
	34	//	48	46	1,54	0,616
	25	//	51	48	9,01	3,604
		//	51	48	7,23	2,892

CH 3	AM 37	//	51	48	3,01	1,204
		//	51	49	1,92	0,768
		⊥	51	48	2,06	0,824
	AM 39	//	51	48	4,4	1,76
		⊥	51	48	3,55	1,42
		//	51	48	2,99	1,196
	22	//	51	49	1,83	0,732
		⊥	51	46	2,66	1,064
	AM 50	//	51	50	1,48	0,592
	61	⊥	51	50	1,07	0,428
		⊥	51	50	0,97	0,388
	27	//	51	46	2,39	0,956
	23	//	51	46	2,39	0,956

Legenda:

// - Ensaio realizado de forma paralela à foliação

⊥ - Ensaio realizado de forma perpendicular à foliação

Di – Diâmetro inicial da amostra

Df – Diâmetro da amostra aquando do momento de rotura

P – Carga de rotura

Is – Índice de carga pontual

Interpretação

Um aspeto importante a ser referido prende-se com o facto de uma parte dos ensaios realizados de forma perpendicular à foliação terem sido considerados inválidos, pois não respeitavam a forma de rotura dos provetes exigida pelas tabelas da ISRM (1985) (Foto 5.72).



Foto 5.72 Exemplo de um ensaio de carga pontual com um resultado inválido. Como se observa, não ocorreu a rotura do provete no seu total, mas sim apenas em um dos topos.

Tal levou a que o número de resultados obtidos paralelamente à foliação fosse muito superior aos perpendiculares. Perante isto, o que se pode concluir, foi o facto de os planos de foliação constituírem as zonas de maior fraqueza do material, como se pode observar na fotografia abaixo (Foto 5.73). Estes planos possuíam uma atitude praticamente paralela ao eixo dos provetes.

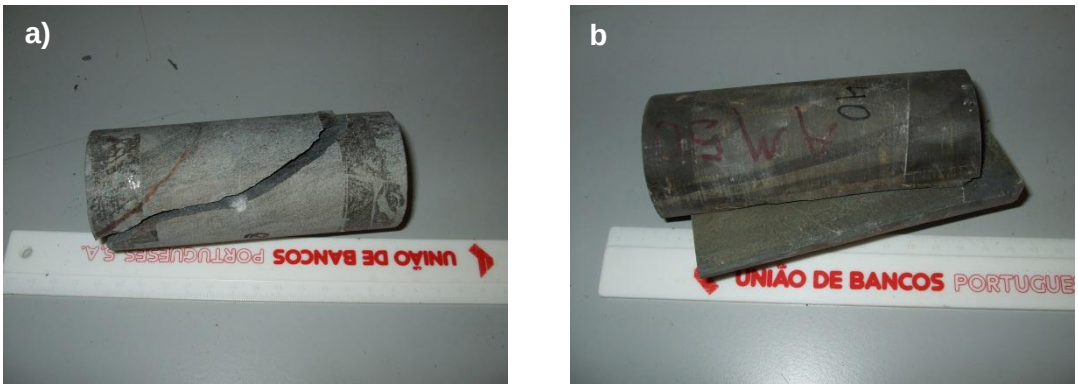


Foto 5.73 Os planos de foliação encontram-se dispostos de forma quase perpendicular ao eixo do provete, pelo que devido á sua maior fragilidade corresponderam ao local onde ocorreu a rotura da amostra. Amostra mais gresosa em a) e mais filitosa em b).

Uma vez obtidos os resultados, não foi necessária a aplicação da correção de diâmetro, uma vez que os provetes onde o ensaio foi realizado se enquadravam nas dimensões aconselhadas, sendo que as variações encontradas não ultrapassavam o diâmetro do provete em mais que alguns milímetros.

Sendo o ensaio realizado em rochas com anisotropia bem marcada, calculou-se o *Ia*, ou seja o *Streangth Anisotropy Index*. Para isso, efetuou-se o quociente entre a média de valores obtidos aquando da aplicação da carga na direção paralela e perpendicular. Os resultados obtidos podem observar-se na tabela abaixo (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 Tabela com a média de valores para cada uma das direções de aplicação da carga e *Ia*(50).

	Média //	**Média ⊥**	**Ia(50)**
CH13	0,615	1,069	1,740
CH10	3,336	-	-
CH11	3,174	1,576	0,497
CH3	1,021	0,706	0,692

Como referido anteriormente, a ocorrência de um grande número de ensaios inválidos dever-se-á à atitude dos planos de foliação, podendo esta influenciar os resultados obtidos. Neste ensaio, o esperado seria a obtenção de valores para o

índice de carga pontual, inferiores nos ensaios onde a carga é aplicada de forma paralela. No entanto foi observado o contrário em algumas das situações.

Um outro fator a ter em conta, é a atitude real da foliação e a sua influência sobre os resultados obtidos. O procedimento correto seria a aplicação da força de uma forma mais paralelamente ou perpendicularmente possível à foliação. No entanto as limitações referidas levaram a que o procedimento não pudesse ser realizado desta forma, pelo que os registos devem ser interpretados com alguma cautela.

Por fim, tal como para o ensaios dos ultrassons, é importante referir novamente que os tarolos usados neste trabalho estiverem durante bastante tempo sujeitos às condições climatéricas do local onde estiveram armazenados, o que pode ser uma condicionante sobre resultados obtidos, correndo o risco de estes não representarem de forma fidedigna o comportamento mecânico destas rochas.

Discussão

Efetuando a análise dos resultados, é possível caracterizar o maciço recorrendo a classificações propostas por autores como Bieniawski (1989) ou Deere (1966). Os resultados obtidos têm como valor mínimo os 0,5 MPa e como valor máximo os 3,5 MPa, aproximadamente. O que se pode verificar é que a resistência destas rochas é de natureza bastante baixa a muito baixa, sendo apenas num dos casos considerado de resistência moderada, como é possível observar na tabela 5.10.

Tabela 5.10 Classificação da resistência em função do índice de resistência à carga pontual (seg. Nilsen & Palmstrøm, 2000).

Termo	Bieniawski (1989)	Deere (1966)
Resistência muito elevada	I_s > 8 MPa	I_s > 10 MPa
Resistência elevada	I_s = 4 – 8 MPa	I_s = 5 – 10 MPa
Resistência moderada	I_s = 2 – 4 MPa	I_s = 2.5 – 5 MPa
Resistência baixa	I_s = 1 – 2 MPa	I_s = 1.25 – 2.5 MPa
Resistência muito baixa	I_s < 1 MPa	I_s = < 1.25 MPa

Fazendo a comparação com resultados obtidos por parte de outros autores, pode verificar-se que o trabalho realizado permite efetuar uma caracterização correta do maciço rochoso, uma vez que os valores são semelhantes.

Tomando por exemplo estudos realizados por Singh *et al*. (2012), visando o estabelecimento de correlações entre ensaios de carga pontual e ensaios de compressão uniaxial, os valores obtidos por estes autores assemelham-se aos conseguidos neste trabalho, como se pode observar na tabela 5.11.

Tabela 5.11 Tabela com valor médio de *Is* para diferentes tipos de rochas (adaptado de Singh *et al*. 2012).

Tipo de Rocha	Valor médio de Is (MPa)
Quartzito	2,4
Arenito	1,6
Salgema	1,7
Xisto	0,9
Gabro	3,1
Amfibolito	1,4
Epidiorito	3,1
Calcário	5,1

É possível estabelecer também uma comparação com o trabalho realizado por Andrade & Saraiva (2010). Verifica-se mais uma vez a concordância de valores (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 Is(50) (MPa) para filitos do CXG da ZCI (seg. Andrade & Saraiva, 2010).

Filitos W1-W2	1,4–3,8[a] 1,2–2,3[b]
Filitos W3	0,6–3,9[a] 0,4–1,4[b]
Filitos W4	0,4–3,0[a] 0,3–1,0[b]

W – grau de alteração

a – medida em provetes cilíndricos de forma perpendicular á foliação

b – medida em provetes cilíndricos de forma paralela á foliação

Conforme referido por Ho & Li (2001), amostras de filitos obtidas de taludes intervencionados que posteriormente foram testados em laboratório, revelaram valores de índice de carga pontual concordantes com os obtidos neste trabalho. Os resultados publicados pelo referido autor podem ser consultados na tabela seguinte (Tabela 5.13).

Tabela 5.13 Valores de resistência à compressão uniaxial (MPa), em filitos (seg. Ho & Li, 2001).

Filito são	0,50
Filito são	0,15
Filito cisalhado	0,05
Filito cisalhado	0,10
Filito cisalhado	0.10-0.20
Filito cisalhado	0.15

5.3.4. Compressão uniaxial

O estudo da resistência à compressão uniaxial em provetes de filitos do CXG de Vila Velha de Rodão foi um dos tópicos mais importantes deste trabalho.

Abaixo são apresentados os resultados obtidos (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 Valores referentes ao valor máximo de tensão (σc), deslocamento (ε), módulo de deformabilidade tangente (Et) e módulo de deformabilidade secante (Es).

Sondagem	Número do provete	F (kN)	σc (MPa)	ε (mm)	Et (GPa)	Es (Gpa)
CH3	11	54	27	1,2	30,0	29,7
	38	80	41	0,2	38,0	37,9
	66	52	27	0,4	18,3	18,1
	10	8	4	1,1	0,9	0,9
	86	80	41	0,3	33,9	33,9
CH10	57	71	36	0,3	33,4	33,2
	69	95	48	0,4	34,2	34,2
	51	64	33	0,2	45,4	44,8
	30	120	61	1,4	53,6	53,6
	54	90	46	0,4	30,8	33,1
CH11	96	73	37	0,9	8,7	9,2
	91	75	38	0,2	52,8	52,6
	100	151	77	0,6	47,4	47,4
	76	52	27	0,3	21,8	21,7
	88	79	40	1,1	10,2	10,3
CH15	43	68	35	0,2	39,3	38,5
	2	55	28	0,2	32,7	32,5
	80	61	31	0,2	51,2	53,6
	3	101	51	0,3	56,9	73,1
	65	96	49	1,3	10,8	10,8

Interpretação

A realização deste ensaio possibilitou a observação de vários aspetos que contribuíram para os valores apresentados na tabela 5.14. Em primeiro lugar, a uma escala macroscópica, foi possível observar que, apesar de provenientes de uma zona pertencente à mesma unidade litológica (CXG), os provetes apresentaram granularidades e texturas diferentes, apresentando uns, constituição mais gresosa e outros mais filitosa (Foto 5.74).

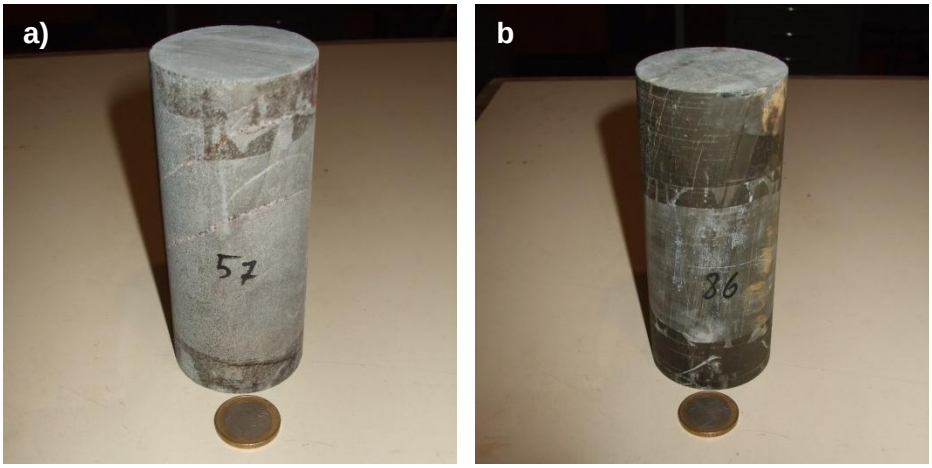


Foto 5.74 Aspeto dos provetes. a) Amostra com constituição mais gresosa b) Amostra com constituição mais filitosa.

Observa-se que os provetes mais gresosos apresentaram uma maior resistência à compressão uniaxial, relativamente aos mais filitosos, uma vez que a mineralogia dos primeiros é bastante mais grosseira e rica em quartzo, havendo uma maior dificuldade em formar planos de foliação bem definidos que consequentemente constituem um superfícies de maior fraqueza do material.

Como dito anteriormente, os planos de foliação apresentavam uma relação quase paralela relativamente ao eixo das sondagens, e consequentemente, ao eixo dos provetes. Como tal, foi essa a principal figura de rotura registada. No entanto, nas amostras mais gresosas, este comportamento não se revelou tão linear, mas nas mais filitosas é possível observar a verticalização da superfície de rotura, paralela ao eixo do provete (Fotos 5.75 e 5.76).

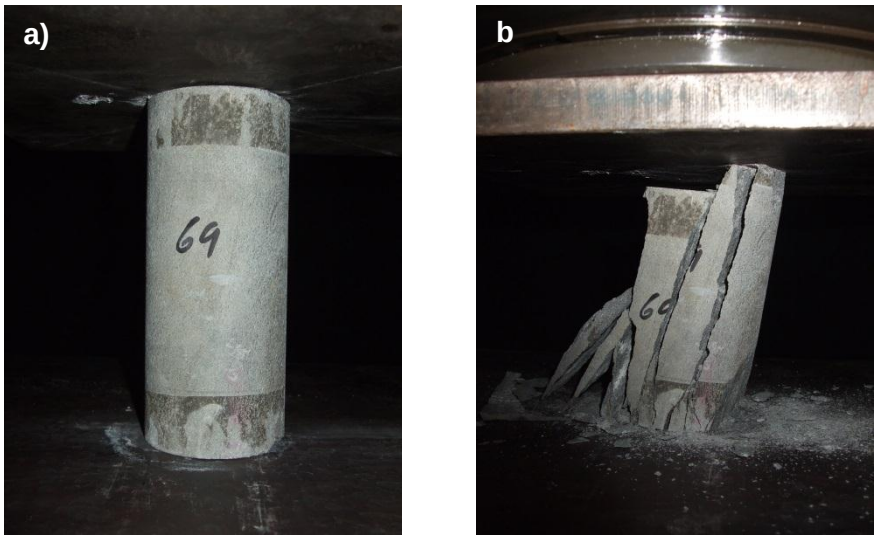


Foto 5.75 Provete de constituição mais gresosa sujeito ao ensaio de compressão uniaxial. a) Antes da rotura. b) Depois da rotura. Observa-se que a rotura ocorre de forma quase paralela ao eixo, ao longo dos planos de foliação que foram superfícies por vezes irregulares.



Foto 5.76 Provete de constituição mais filitosa sujeito ao ensaio de compressão uniaxial. a) Antes da rotura. b) Depois da rotura. Observa-se a rotura de forma bem evidente ao longo dos planos de foliação dispostos de forma quase paralela ao eixo do provete e segundo superfícies lisas.

É importante referir que o comportamento acima descrito não foi observado para todos os provetes testados, havendo outros fatores que influenciaram os registos alcançados.

A ocorrência de filonetes e fraturas preenchidas por quartzo é um desses fatores. Uma vez que o quartzo é um mineral com maior dureza e consequentemente, uma resistência elevada, as amostras apresentaram alguns desvios nos planos de rotura nos locais onde estas estruturas intersetavam os planos de foliação (Foto 5.77).

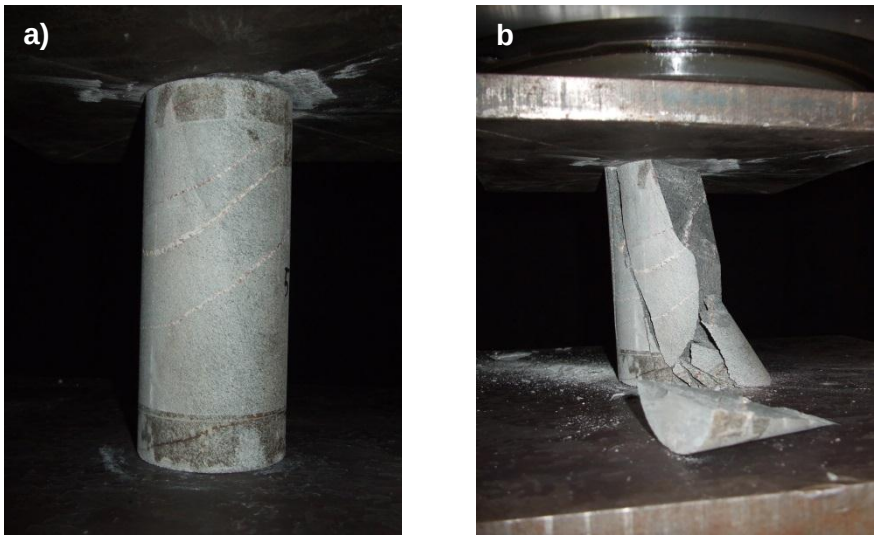


Foto 5.77 Amostra sujeita a ensaio de compressão uniaxial. Antes em a) e depois da rotura b). Observa-se uma maior dificuldade na ocorrência dessa mesma rotura nos locais onde o quartzo é mais abundante.

Por fim, é de referir também a forma dos provetes. Nas normas de realização dos ensaios, aconselha-se que as bases destes se encontrem o mais paralelas e lisas possível. No entanto, a fissilidade do material tornou o corte dos tarolos de sondagem um processo algo difícil. Devido à sua baixa resistência, durante o processo o material apresentava facilidade em fragmentar, pelo que foi necessário o seu acondicionamento com fita adesiva de forma a minorar este problema. Como tal, deve ter-se alguma cautela na análise dos resultados obtidos.

Discussão

Pode observar-se, com base na tabela, que os valores de tensão máxima suportada pelos filitos, quando sujeitos ao ensaio de compressão uniaxial, rondam em média os 39 MPa. Na tabela abaixo são apresentados os valores da média da tensão máxima suportada (σc) (Tabela 5.15).

Tabela 5.15 Valores médios da tensão máxima suportada (σc).

CH3	28 MPa
CH10	45 MPa
CH11	44 MPa
CH15	39 MPa

Usando a tabela 5.16, é possível estabelecer uma classificação para as rochas estudadas. Observa-se que, apesar da variação dos valores, todas as amostras estudadas correspondem a rochas classificadas como moderadamente duras, segundo a ISRM (1981) e a Geological Society of London (1970 apud Vallejo, 2002), e

rochas de competência baixa, segundo Bieniawski (1973). De facto, os exemplos de rocha apresentados na tabela são correspondentes aos estudados neste trabalho.

Tabela 5.16 Tabela de classificação das rochas com base no ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002).

Resistência à compressão simples (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Exemplos
<1	Solos			
1 – 1.5	Muito branda	Branda> 1.25	Muito baixa	Sal-gema, margas, carvão
5 – 12.5	Branda	Moderadamente branda		
12.5 - 25		Moderadamente dura		
25 - 50	Moderadamente dura		Baixa	Xistos, xistos argilosos
50 - 100	Dura	Dura	Média	Rochas metamórficas xistosas, mármores, granitos, gneisses
100 - 200	Muito Dura	Muito Dura	Alta	Rochas ígneas e metamórficas duras, arenitos fortemente cimentados, dolomites
>200		Extremamente dura	Muito alta	Quartzito, gabro, basalto
> 250	Extremamente dura			

Durante a realização do ensaio, é possível obter gráficos representativos do comportamento mecânico do material. Este tipo de gráfico analisa o deslocamento da amostra em função da força aplicada. A partir destes, é possível obter informações tais como o módulo de deformabilidade ou de Young, embora idealmente seja necessário colocar transdutores de deslocamento.

Os gráficos das figuras 5.2 e 5.3 correspondentes aos provetes número 2 e 43, representam um traçado típico de um gráfico força/deslocamento para este tipo de rocha. O que se observa é uma relação de proporcionalidade entre duas grandezas. A força aplicada aumenta de forma gradual até que ocorra rotura, que corresponde à tensão crítica (σc), seguindo-se um decréscimo da força aplicada.

O deslocamento longitudinal do provete apresenta também uma evolução linear, aumentando com o incremento da força aplicada. O deslocamento aumenta após a rotura, mesmo com decréscimo da força.

Relativamente aos valores de tensão máxima registada (σc), encontram-se valores diferentes para as quatro carotes. Com base na observação das carotes, podem associar-se os valores mais baixos de tensão de rotura de CH3 e CH15 ao seu carácter mais filitoso, enquanto as amostras CH10 e CH11 eram maioritariamente mais gresosas. O esperado é que as segundas apresentem um valor de resistência à compressão uniaxial mais elevado, ao passo que nas primeiras esse valor tenda a ser mais baixo. Por outro lado, existe alguma variabilidade dos valores do ângulo entre os planos de foliação e o eixo dos provetes.

O comportamento mecânico pode ser também observado nas fotos 5.78 e 5.79.

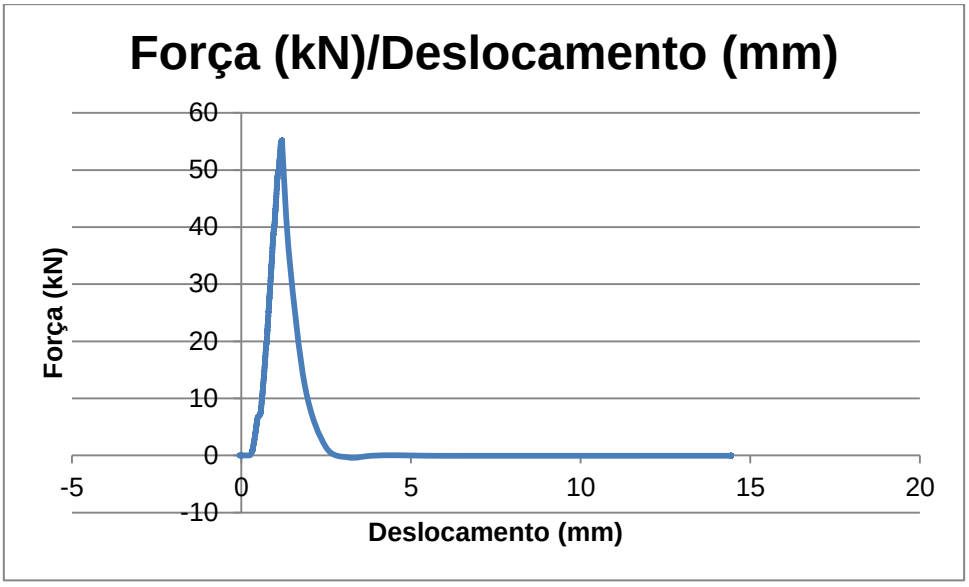


Fig.5.2 Gráfico força/deslocamento correspondente ao provete 2.

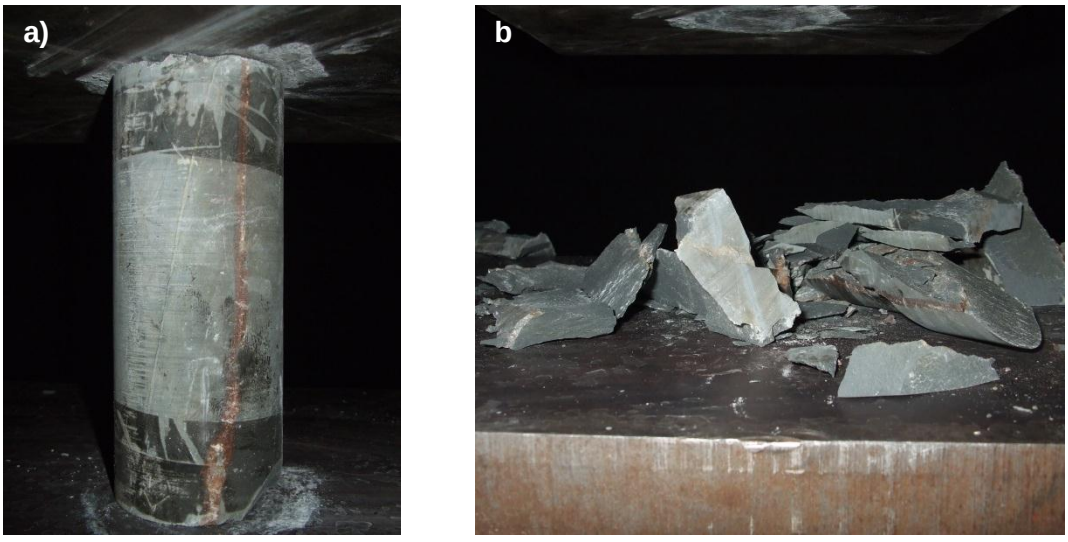


Foto 5. 78 Amostra de características mais filitosas sujeita ao ensaio de compressão axial. a) Antes do ensaio. b) depois do ensaio. É possível observar que as superfícies de rotura são bastante lisas.

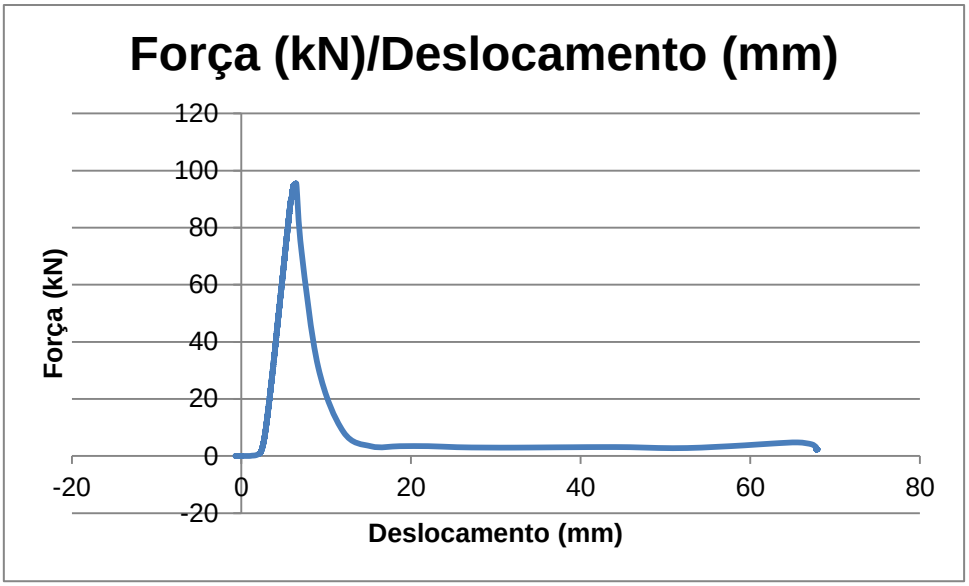


Fig.5.3 Gráfico referente ao provete 65. O valor da força a que ocorre a rotura é mais elevado do que o anterior, pois a rocha é de natureza mais gresosa, sendo que a os planos de foliação menos nítidos.

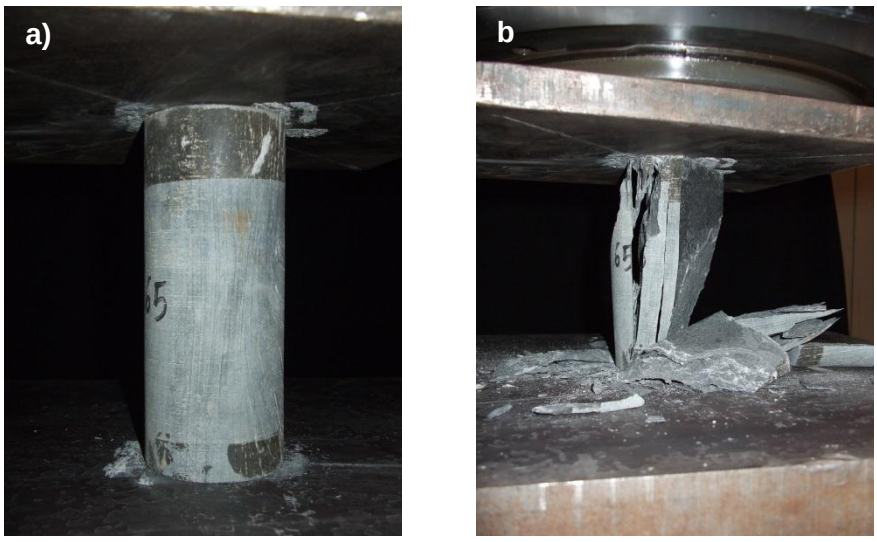


Foto 5.79 Amostra de características mais gresosas sujeita ao ensaio de compressão axial. a) Antes do ensaio. b) Depois do ensaio. Observa-se a rotura mais irregular ao longo dos planos de foliação: Apesar destes não estarem tão bem marcados, depois do momento da rotura é possível visualizar a sua atitude quase paralela ao eixo do provete.

Além do comportamento típico descrito anteriormente, é possível observar outros fenómenos a nível gráfico que podem ser explicados através da visualização do provete. No gráfico representado abaixo (Fig. 5.4), correspondente ao provete 10 (CH 13) (Foto 5.80), pode observar-se qua curva força/deslocamento não possui um comportamento linear ao longo do tempo. De facto, observa-se um patamar inicial em que o deslocamento aumenta para força constante, indicando que os topos do provete não eram rigorosamente lisos e, em consequência, existe um esmagamento inicial destas irregularidades. Os ressaltos verificados na força aplicada podem,

eventualmente, ser devidos ao fecho de fissuras da amostra, embora não visíveis em análise macroscópica.

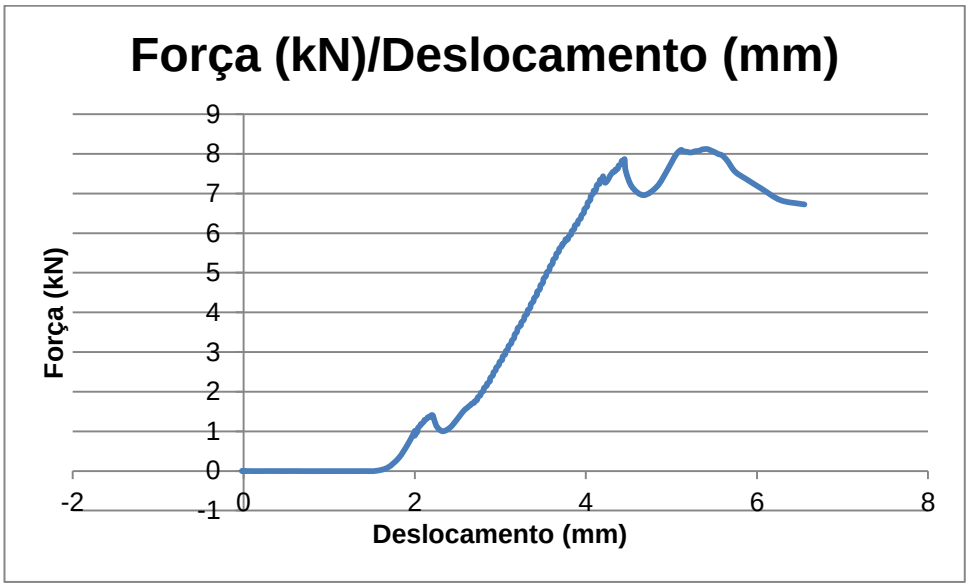


Fig.5.4 Gráfico referente ao provete número 10. Observa-se a existência de vários picos seguidos de trechos descendentes, que podem corresponder ao fecho de fraturas presentes na amostra.



Foto 5.80 Amostra sujeita ao ensaio de compressão uniaxial. a) Antes do ensaio. b) Depois do ensaio. Observa-se a rotura através dos planos de foliação fazendo um pequeno ângulo relativamente ao eixo do provete.

Por fim, é possível fazer a comparação com resultados obtidos por outros autores. Para tal, os parâmetros a comparar compreendem a resistência à compressão uniaxial (σ_c) e o módulo de deformabilidade (E). Os resultados a comparar encontram-se na tabela 5.17, no que a σ_c e E diz respeito.

Tabela 5.17 Valores médios medidos da tensão máxima suportada (σc).

	σ_c	E
CH3	28 MPa	24,2 GPa
CH10	45 MPa	39,6 GPa
CH11	44 MPa	28,2 GPa
CH15	39 MPa	40,0 GPa

Tendo em conta os resultados publicados por Rocha (1981), pode verificar-se que relativamente ao módulo de deformabilidade, os resultados das sondagens analisadas rondam em média valores entre 30 e 40 GPa, são um pouco mais baixos do que os valores obtidos por este autor, especialmente os resultados obtidos pela realização do ensaio de forma paralela à foliação.

Relativamente aos resultados da resistência à compressão uniaxial, é também possível observar que os valores são um pouco mais baixos, como se pode observar na tabela abaixo (Tabela 5.18). No entanto, as rochas ensaiadas são rochas de baixo grau de metamorfismo, eventualmente diferentes das ensaiadas por Rocha (1981).

Tabela 5.18 Valores esperados de E, e σ_c para xistos (adaptado de Rocha, 1981).

Tipo de Rocha	E (GPa)	σ_c (MPa)
Xisto *	132	92
Xisto *	62	74
Xisto **	38	112

* Paralelo à foliação

** Normal à foliação

Os autores Tan *et al.* (2013) usaram também este tipo de ensaios para estudar litologias da mesma natureza. Os valores obtidos revelam maior concordância com os deste trabalho, no que diz respeito ao módulo de Young (Tabela 5.19).

Segundo Andrade & Saraiva (2010), os valores obtidos para a resistência à compressão uniaxial de filitos pertencentes ao CXG da Zona Centro Ibérica apresentam concordância com os revelados. É possível observar que os valores destes autores se situam entre os 15 MPa e os 50 MPa, aproximadamente, tendo em conta os diferentes estados de alteração registados (Tabela 5.20).

Tabela 5.19 Valores relativos a E e σ_c para rochas filitosas (adaptado de Feng *et al*.,2013).

Número de provetes	E (GPa)	σ_c (MPa)
2-16	41.62	165.0
2-3-1	50.47	225.0
2-6	54.00	227.4
2-10	18.76	77.6
2-1	32.27	70.0
2-2-1	21.57	54.8

Tabela 5.20. Valores médios de resistência à compressão uniaxial (MPa) para filitos do CXG da ZCI (seg. Andrade & Saraiva, 2010).

Filitos W1-W2	45.2–52.2[a] 40.3–45.6[b]
Filitos W3	25.8–35.2[a] 24.0–33.1[b]
Filitos W4	16.6–23.9[a] 17.0–21.0[b]

W – grau de alteração

a – medida em provetes cilíndricos de forma perpendicular à foliação

b – medida em provetes cilíndricos de forma paralela à foliação

Por fim, os valores apresentados por Singh *et al*. 2012 são relativamente inferiores aos obtidos (Tabela 5.21). O estado de alteração e grau de metamorfismo das amostras podem ser fatores preponderantes para esta diferença de resultados.

Tabela 5.21 Tabela com valor médio de resistência à compressão uniaxial (σ_c) para diferentes tipos de rochas (adaptado de Singh *et al*., 2012).

Tipo de Rocha	Valor médio de σ_c (MPa)
Quartzito	54.7
Arenito	35.0
Salgema	27.6
Xisto	14.0
Gabro	71.6
Amfibolito	33.3
Epidiorito	61.1
Calcário	112.6

6.5. Estudo da correlação entre ensaios

De forma a correlacionar os ensaios realizados, é possível efetuar uma representação gráfica dos resultados obtidos. Isto permite, numa fase posterior, obter linhas de tendência dos gráficos que permitem saber quais os resultados esperados a partir da realização de apenas um dos ensaios.

Sendo o recurso a ultrassons a primeira abordagem feita neste tipo de estudo mecânico, é de maior interesse que a correlação seja feita a partir destes resultados.

Abaixo são apresentados os gráficos relativos às correlações obtidas e os resultados esperados, tendo por base os trabalhos realizados por Singh *et al.* (2011) e Sheraz *et al., 2011*).

Analisando a correlação entre os resultados de ultrassons e os valores obtidos para o ensaio de carga pontual (Is), o gráfico obtido foi o seguinte (Fig. 5.5).

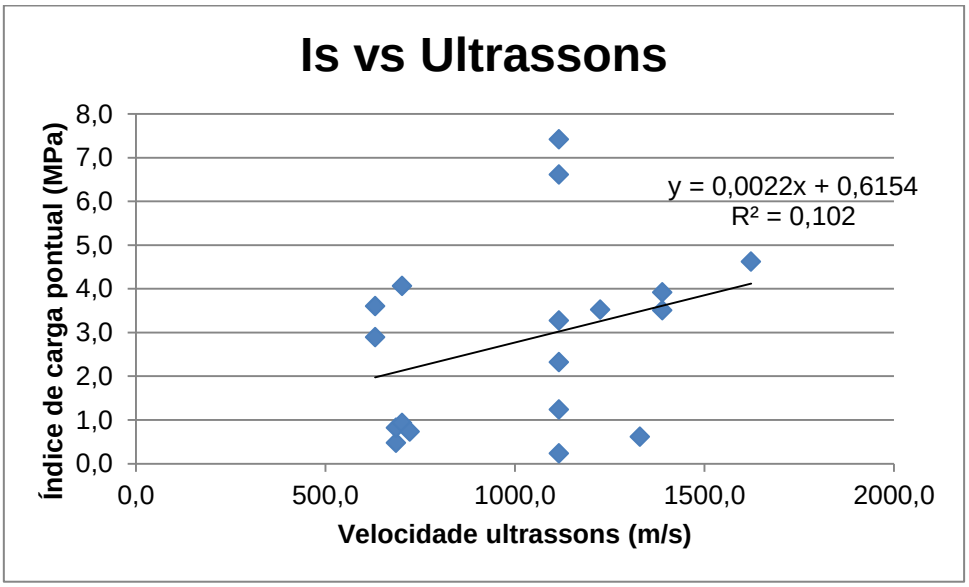


Fig.5.5 Gráfico relativo à correlação entre o índice de carga pontual (Is) e os valores de ultrassons. A correlação observada não é muito significativa.

O que se observa é que a correlação entre os valores é caracterizada por uma dispersão de resultados muito elevada. De facto, uma vez que se a direção de propagação das ondas ultrassónicas é diferente da orientação de aplicação da carga no ensaio de carga pontual, seria de esperar que a correlação obtida fosse bastante fraca.

Admitindo que a reta possa hipoteticamente ser utilizada, é possível calcular os valores de *Is* esperados com base nas velocidades dos ultrassons. Na tabela abaixo são apresentados os valores obtidos e os esperados para este ensaio (Tabela 5.22).

Tabela 5.22 Tabela com a representação dos valores de índice de carga pontual medidos face ao que seria de esperar usando o cálculo com base no gráfico.

Sondagem	Amostra/Número do provete	Valor de Is medido	Valor de Is esperado
CH13	AM 49	0,5	2,1
		0,8	2,1
CH10	79	3,5	3,7
		3,9	3,7
	71	4,1	2,2
		0,9	2,2
	AM 11	4,6	4,2
CH11	AM 46	2,3	3,1
		1,2	3,1
		0,2	3,1
	78	3,3	3,1
		6,6	3,1
		7,4	3,1
	21	3,5	3,3
	34	0,6	3,5
	25	3,6	2,0
		2,9	2,0
	22	0,7	2,2

A diferença entre os valores dos resultados obtidos e aquilo que era esperado não é muito significativa em alguns dos casos, mas em outros varia de forma um pouco mais acentuada. De facto, a correlação apresentada entre os dois tipos de ensaios não é elevada, pelo que a reta de correlação não deve ser considerada válida.

Como referido, apesar de este trabalho incidir sobre um tipo de litologia, foram frequentemente encontradas duas frações da mesma, uma com características mais gresosas, e outra de características mais filitosas. Ao contrária da correlação anterior, a orientação de aplicação da carga e das ondas ultrassónicas é a mesmo. Como tal, a composição mineralógica será o fator mais influente na obtenção dos gráficos. Assim, a análise da correlação entre os valores obtidos para os ultrassons e o ensaio de compressão uniaxial (σ_c) permitiu obter os gráfico das figuras 5.6 (fração gresosa) e 5.7 (fração filitosa), sendo que foram eliminados os valores extremos, de forma a ser obtida uma correlação mais representativa.

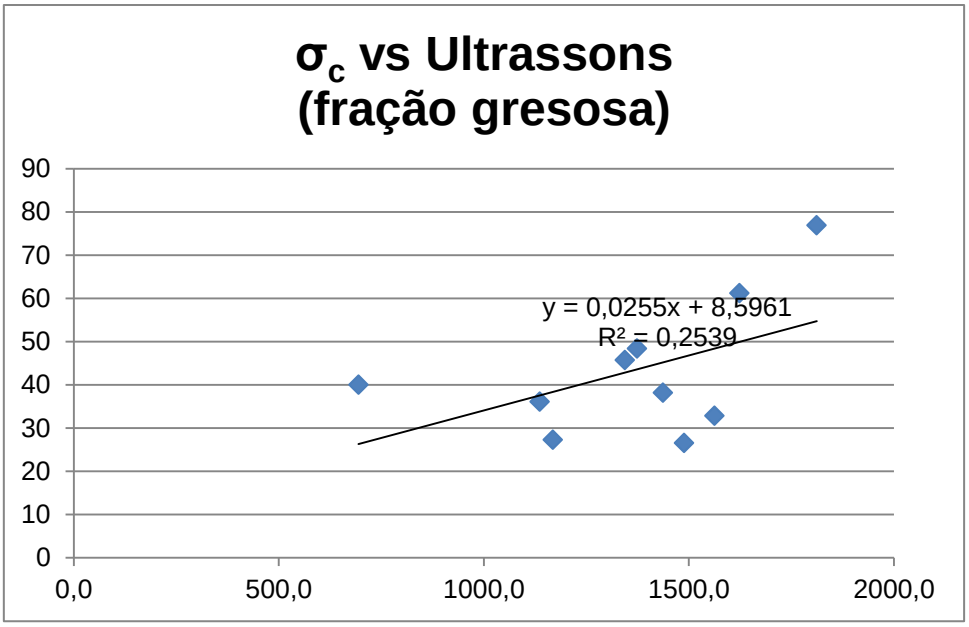


Fig.5.6 Gráfico relativo, à correlação entre a resistência à compressão uniaxial e os valores de ultrassons, para a fração de características gresosas. A correlação apresentada é um pouco mais significativa que no gráfico anterior.

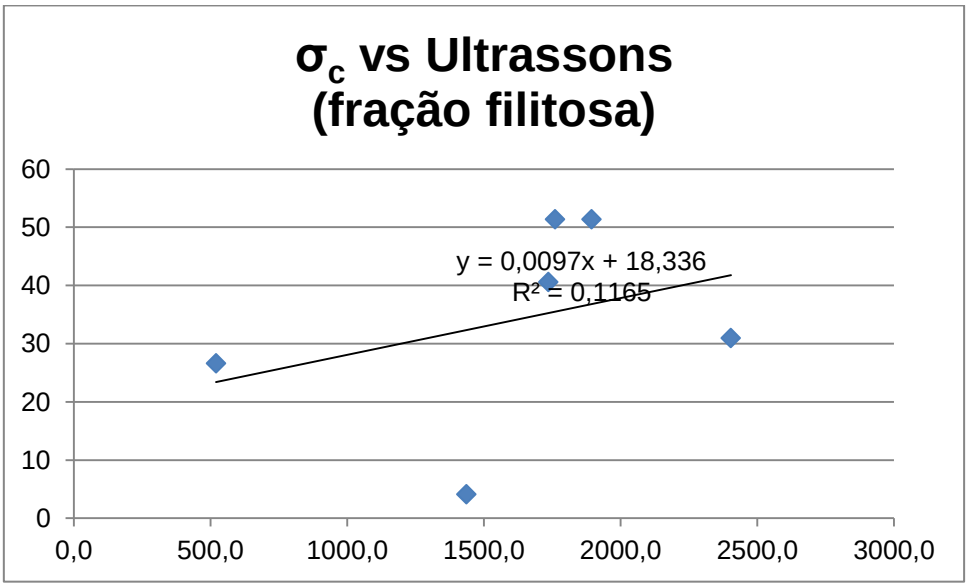


Fig.5.7 Gráfico relativo, à correlação entre a resistência à compressão uniaxial e os valores de ultrassons, para a fração de características filitosas.

Verifica-se, também neste caso, que para ambos os gráficos existe uma elevada dispersão de resultados, pelo que as reta de correlação não podem ser admitidas como válidas.

O cálculo dos valores esperados com base na fórmula da reta é apresentado abaixo (Tabela 5.23). Para a fração gresosa foi usada a fórmula referente á correlação do gráfico da figura 5.6, e para a fração filitosa, o mesmo procedimento foi tomado, mas com a fórmula de correlação da figura 5.7.

Tabela 5.23 Tabela com a representação dos valores de compressão medidos face ao que seria de esperar usando o cálculo com base no gráfico.

Sondagem	Amostra/Número	Valores de σc medidos (MPa)	Valores de σc esperados (MPa)	Fração
CH3	11	27	38	gresosa
	38	41	35	filitosa
	66	27	34	filitosa
	86	41	38	filitosa
	10	4	36	filitosa
CH10	57	36	38	gresosa
	69	48	44	gresosa
	51	33	48	gresosa
	30	61	50	gresosa
	54	46	43	gresosa
CH11	96	37	86	gresosa
	91	38	45	gresosa
	100	77	55	gresosa
	76	27	47	gresosa
	88	40	26	gresosa
CH15	2	28	42	filitosa
	43	35	119	filitosa
	80	31	37	filitosa
	3	51	95	gresosa
	65	49	35	filitosa

Efetuando a análise da tabela, pode observar-se uma diferença em alguns casos muito significativa entre os valores obtidos ao longo deste trabalho e aqueles que poderiam ser calculados com base na realização do ensaio de ultrassons.

Apesar do valor de correlação não ser muito elevado, pode concluir-se que através da aplicação deste cálculo em alguns dos provetes, seria possível fazer uma estimativa algo realista dos resultados a obter.

Capítulo 6
Considerações Finais

O presente trabalho teve como principal objetivo, estudar as características petrográficas e mecânicas da fração filitosa do CXG do Sinclinal de Vila Velha de Rodão.

Inicialmente, foi realizado trabalho de campo com o objetivo de conhecer o enquadramento geológico da área em estudo e proceder, numa área restrita previamente selecionada, ao esboço do perfil geológico respetivo, transversal ao alinhamento do sinclinal. Este foi comparado e completado com dados já publicados anteriormente por outros autores. O reconhecimento de campo permitiu identificar as litologias que compõem o local, as falhas e determinar as orientações da estratificação e foliação. De referir qua a caracterização litológica feita neste trabalho não menciona todas as formações registadas por outros autores, de forma a tornar mais simples o estudo das litologias. A observação dos raros afloramentos e cortes de estradas florestais levou à caracterização do estado de alteração do maciço rochoso, que se encontra alterado (W3) a muito alterado (W4).

Foi utilizado no campo o martelo de Schmidt ou Esclerómetro portátil para uma primeira avaliação da resistência à compressão uniaxial das rochas, recorrendo à projeção dos valores de dureza no gráfico de Miller. Em comparação com valores obtidos por diferentes autores, para este tipo de litologias, os resultados enquadraram-se no que seria esperado. A ocorrência de alguns valores anómalos deveu-se ao facto de a alteração do maciço ser bastante elevada.

É aconselhada a monitorização e aplicação de medidas de prevenção, em especial nos locais em que a xistosidade apresenta uma atitude paralela à superfície do talude, onde se podem observar fragmentos dispersos ao longo da base destes.

Foram selecionadas amostras de tarolos de sondagens realizadas para prospeção geológica-geotécnica com vista à realização de ensaios de laboratório para determinação das características mecânicas das rochas. Os trechos selecionados correspondiam maioritariamente a rocha colhida em profundidade, encontrando-se sã (W1) a ligeiramente alterada (W2). Alguns trechos eram constituídos por frações mais gresosas, com foliação menos evidente, e outros por frações mais filitosas, com foliação fina e bem marcada, do CXG.

Os tarolos de sondagem foram serrados de forma a produzir lâminas delgadas e obter provetes com as dimensões exigidas por cada norma para os ensaios respetivos.

Numa fase posterior, o trabalho laboratorial incluiu a análise macroscópica das amostras. Seguidamente passou-se ao exame petrográfico que permitiu a caracterização mineralógica e a observação da microestrutura destas rochas.

Recorrendo a três tipos de ensaios, foi possível estudar as características mecânicas das amostras. O ensaio com recurso aos ultrassons permitiu avaliar a influência do estado de alteração e da composição mineralógica dos provetes na velocidade de propagação das ondas elásticas. Com este ensaio foi possível concluir que os resultados são comparáveis com outros obtidos previamente por outros autores, sendo que o grau de alteração dos provetes não era muito elevado.

Os ensaios de carga pontual e de compressão uniaxial permitiram o estudo das propriedades mecânicas dos mesmos provetes, mais propriamente a sua resistência à compressão uniaxial.

Os resultados dos ensaios de carga pontual permitiram concluir que a principal direção de rotura dos provetes ocorre ao longo dos planos de foliação, que se encontram quase paralelos ao eixo dos mesmos. Os valores obtidos no que ao índice de carga pontual diz respeito foram projetados numa tabela, de forma a efetuar uma classificação da resistência do material. Concluiu-se que os filitos estudados apresentaram uma resistência muito baixa a baixa. Tal como no ensaio com recurso ao martelo de Schmidt, o maciço pode ser classificado como tendo uma fraca competência a nível mecânico.

Por fim o ensaio de resistência à compressão uniaxial permitiu um estudo mais aprofundado da litologia, confirmando também os resultados que já vinham sendo obtidos nos ensaios anteriores. Foi possível, relativamente ao pico máximo de tensão (σc), analisar os valores e compará-los com a tabela classificativa para este parâmetro. Concluiu-se que os valores apresentados levam a classificar estas rochas como moderadamente duras, seguindo a ISRM (1981) e a Geological Society of London (1970), ou de competência baixa, se for usada a classificação de Bieniawski (1973).

A observação das figuras de rotura dos provetes revelou que os planos de anisotropia formam os principais planos de fraqueza das amostras, ocorrendo a rotura ao longo destas zonas. Em conjunto com a análise de gráficos de força/deslocamento, foi possível observar que a presença de fraturas e filonetes de quartzo afeta o comportamento acima descrito, conferindo uma competência mecânica diferente ao provete. Foi ainda possível observar a ocorrência de pequenas variações no perfil do gráfico, verificando-se patamares da força aplicada aquando do fecho de fraturas, com aumento marcado do deslocamento, ou ressaltos nas curvas força/deslocamento, por exemplo nos provetes mais ricos em filonetes de quartzo ou devidos à presença de fissuras. No entanto, o comportamento mais frequente mostrava uma relação linear entre a força e o deslocamento.

Para os três ensaios realizados a nível laboratorial, verificou-se que os valores obtidos são concordantes com outros publicados por autores com trabalhos da mesma área, usando litologias semelhantes, o que revela que os ensaios foram realizados dentro dos parâmetros aconselhados e que as amostras se encontravam em condições semelhantes às utilizadas pelos restantes autores.

A obtenção de resultados com base neste tipo de ensaios permitiu, numa fase final, tentar estabelecer uma correlação entre estes, procurando inferir quais os valores espetáveis a partir da realização de apenas um ensaio. Uma vez que o ensaio de propagação de ultrassons não é destrutivo, foi o primeiro a ser realizado. Pôde verificar-se que os resultados destes ensaios não apresentam uma correlação credível com os ensaios de carga pontual e de resistência à compressão axial. O uso das fórmulas relativas à correlação linear revelou resultados teóricos em alguns casos muito diferentes dos obtidos nos ensaios mecânicos. No entanto, em alguns casos, a aproximação foi realista, pelo que com alguma prudência e consulta de outros dados publicados, a utilização deste parâmetro poderá constituir uma ferramenta útil.

Em suma, este trabalho revelou que o comportamento mecânico da fração filitosa do CXG de Vila Velha de Rodão é bastante moderado a baixo. Conclui-se daí a necessidade de uma intervenção e de um estudo mais pormenorizado a nível geotécnico, tendo em conta a possibilidade de construções futuras neste local.

Referências Bibliográficas

Atkins/EDP, 2009, “Estudo de Impacte Ambiental do Aproveitamento Hidroeléctrico (AH) do Alvito”, Aditamento, pp. 14-18.

Andrade P., Saraiva A., 2010, “Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal” – Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol 69: pp. 207–214.

ASTM, D 5873, 2004, “Standard test method for determination of rock hardness by Rebound Hammer Method”, 4p.

Azar, J., Samuel, G., 2007, “Drilling Engineering”, PennWell Books, pp. 356-370.

Bieniawski, Z.T., 1973, “Engineering classification of jointed rock masses”. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, Vol. 15, Nº 12, pp. 344-355.

Bieniawski, Z.T., 1989, “Engineering rock mass classifications”. Wiley, New York. pp. 51-72.

Brady, B.H.G., Brown, E.T., 1985, “Rock mechanics for underground mining.” London: Allen and Unwin, 628p.

Camberfort, H., 1975, “Geotecnia del ingeniero”, Editores tecnicos asociados, S.A., Barcelona, pp.12-30.

Campos, A., Pereira, G., 1991, “Aspectos da estrutura do Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico e do Ordovícico da Serra de São Miguel-Nisa (Alto Alentejo)”, Mem. Not. Publ. Mus. Lab. Min. Geol., pp. 81-97.

Cargill, J.S., Shakoor, A., 1990, “Evaluation of empirical methods of measuring the uniaxial compressive strength of rocks” Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 27, pp. 495-503.

Carvalho, C., Rodrigues, J., Metodiev, D., 2009, “Inventário do património geológico do concelho de Vila Velha de Rodão: contributo para a caracterização do geoparque NATURTEJO da meseta meridional.”, pp. 6-12.

Crandell, O.N., 2006, “Macroscopic and microscopic analysis of chert. A proposal for sandardisation of the methodology and terminology” Buletinul Cercurilor Stiintifice Studentesti, Arheologie - Istorie - Muzeologie, 12, pp. 7-30.

Da, Z., 2011, “Study on rock micro-rupture mechanism and macroscopic fracture characteristic of phyllite”, 4p.

Deere. D.U., R.P. Miller, 1966, “Engineering classification and index proprieties for intact rock”, Research and Technology Division, Air Force Weapons Laboratory, New Mexico, 327p.

Deere. D.U., Deere D.W., 1988, “The Rock Quality Designation (RQD) index in practice”, Rock Classification Systems for Engineering purposes, ASTM STP 984, American Society for testing and Materials, Philadelphia, pp. 91-101.

Dias, R. & Cabral, J., 1989, “Neogene and Quaternary reactivation of the Ponsul fault in Portugal”, Com. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, pp. 3-28.

Feng, X.T., Hudson, J.A., Tan, J., 2013, “Rock characterization, modelling and engineering design methods”, Taylor and Francis Group, London, pp. 256-259.

Gonçalves, L., 2010, “Sistema inteligente de classificação de imagens de rochas macroscópicas para indústria de petróleo e gás”, 309p.

Hoek, E., 2007, “Pratical Rock Engineering”, 2007 ed., 237p.

Ho K.K.S., Li K.S., 2001, “Geotechnical Engineering - Meeting Society's Needs”, Proceedings of the 14th, Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, 1121p.

Instituto Geográfico do Exército, 1993, “Carta topográfica 303 – Sarnadas do Ródão (Vila Velha de Rodão) à escala 1:25.000”.

ISRM, 1978, “Suggested methods for determining sound velocity”, 6p.

ISRM, 1979, “Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials”, 4p.

ISRM, 1981, “Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods”. Ed. Brown, E.T. Pergamon, Oxford. 211p.

ISRM, 1985, “Suggested method to determining point load strength”, 10p.

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

Loureiro, T.H.A., 2008, “Aspectos geotécnicos na construção de túneis em áreas urbanas”, dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica, Departamento de Ciências da Terra – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, 193p.

Diez Balda, M.A., García Casquero, J.L., Monteserín López, V., Nozal Martín, F., Pardo Alonso, M.V., Robles Casas, R., 1990, “ Cizallamientos subverticalles posteriores a la segunda fase de deformación hercínica al sur de Salamanca (zona centro ibérica)”, Rev. Soc. Geol. España, 3: 9p.

Manual ultrassons modelo 58-E0048 CONTROLS, 2000, 14p.

Maranhão, N.,1972, “Análise e interpretação de sondagens mecânicas em Engenharia Civil, Geotecnia”, Lisboa, Vol. 1, Nº 3, pp. 30-58.

Martins, B., 2009, “A depressão de Régua-Chaves-Vernin, contributo para a análise do risco de ravinamento”, Tese de Doutoramento em Letras (Geografia), Fac. de Letras da Univ. de Coimbra, pp.33-34.

Metodiev, D., Romão, J., Dias, R., Ribeiro A., 2009, “Sinclinal de Vila Velha de Ródão (Zona Centro-Ibérica, Portugal): litostratigrafia, estrutura e modelo de evolução da tectónica Varisca”, Comunicações Geológicas, pp. 5-18.

Metodiev, D., Romão, J., Dias, R., 2009, “Vila Velha de Ródão Variscan complex syncline: stratigraphy and structure (Central-Iberian Zone, Portugal)”, 3p

Metodiev, D., Romão, J., 2008, “Novos dados sobre a estrutura em sinclinal complexo de Vila Velha de Ródão (bordo SW da Zona Centro-Ibérica)”, 5p.

Montoto, M., 1983, “Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks”, 5th ISRM Congress, 6p.

Navarro, F., Artur, A., 2002, “Caracterização petrográfica como ferramenta para previsão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais: uma discussão”, 8p.

Neto, E., 2007, “Estudo geológico e geomecânico em antigas explorações mineiras: o caso da mina das Aveleiras”, pp. 81-83.

Nilsen, B., Palmstrøm, A., 2000, “Engineering Geology and Rock Engineering”, Handbook No 2. Oslo: Norwegian Group for Rock Mechanics (NBG), 249 p.

Passchier, C., Rudolph, A., Trouw J., 2005, “Microtectonics”, Springer Science & Business Media, 2nd ed., pp. 390-399.

Raith, M., Raase, P., Reinhardt, J., 2011, “Guide to thin Section microscopy”, pp. 1-22.

Ribeiro, O., 1943, “Evolução da falha de Pônsul”, Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, pp. 109-123.

Ribeiro, O., Teixeira, C., Carvalho, H., Peres, A., Fernandes, H.P., 1965, “Carta Geológica de Portugal, escala 1:50 000. Notícia explicativa da folha 28-B (Nisa)”, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 29 p.

Ribeiro, O., Teixeira, C., Ferreira, C.R., 1967, “Noticia Explicativa da Folha 24-D, Castelo Branco”, Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, 24 p.

Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P., Araújo, A., Oliveira, T., Romão, J., Chaminé, H., Coke, C., Pedro, J., 2007. “Geodynamic evolution of SW Europe Variscides Tectonics”, pp. 1-24.

Rocha, M., 1981, “Mecânica das Rochas”, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 149-161.

Romão, J., 2000, “Estudo tectono-estratigráfico de um segmento do bordo SW da Zona Centro-Ibérica, e as suas relações com a Zona Ossa Morena”, Dissertação de Doutoramento em Geologia, Fac. Ciências, Univ. Lisboa, 322p.

Romão, J., 2001, “O Paleozóico no bordo SW da Zona Centro Ibérica”, Geonovas, pp. 33-43.

Romão, J., 2006, “Notícia explicativa da folha 28-A Mação”, Carta Geol. de Portugal 1:50 000, Inst. Geol. Min., Lisboa, pp. 10-48.

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 and the Environment, pp. 17–22.

Singh, T.N., Kainthola, A., Venkatesh, A., 2012, “Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different dock types” Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 45, Issue 2, pp. 259-264.

Sheraz A.M., Emad M.Z., Shahzad M., Arshad S.M., 2014, “Relation between uniaxial compressive strength, point load and sonic wave velocity for dolerite” Pakistan Journal of Science, Vol. 66, 7p.

Teixeira, C., 1980, “Introdução à Geologia de Portugal”. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Científica, IV, 475p.

Teixeira, C., 1981, “Geologia de Portugal”, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, pp. 33-333.

Telford, T., 1993, “Specification for ground investigation”, Selwood Printing, pp. 9-11.

Torabi, S.R., Ataei, M., Javanshir, M., 2010, “Application of Schmidt rebound number for estimating rock strength under specific geological conditions”, Journal of Mining & Environment, Vol.1, No.2, p.1-8.

Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002, “Ingeniería geológica”, Madrid: Prentice Hall, pp. 118-235.

Vernon, R., 2004, “A practical guide to rock microstructure”, Cambridge University Press, pp. 390-399.

Williamson D., Kuhn, 1988, “Methods to quantify the parameters applied in the RMi”, From Palmström A.: RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes, PhD thesis, Oslo University, Norway, 1995, pp. 400.

Pesquisa da Internet

http://earth2geologists.net/Microscopes/index.htm

http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/powell/core_asbestos/analyze/about_plm/PLM_parts.htm