

Universidade do Minho
Escola de Ciências

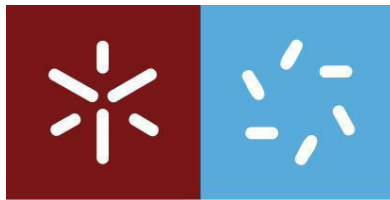
Marta Sofia Gonçalves Cunha

Análise de propriedades físicas de rochas metassedimentares silicatadas

Marta Cunha **Análise de propriedades físicas de rochas metassedimentares silicatadas**

UMinho | 2018

Janeiro de 2018



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Marta Sofia Gonçalves Cunha

**Análise de propriedades físicas de rochas
metassedimentares silicatadas**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Geociências – Valorização de Recursos
Geológicos

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor Carlos Alberto Simões Alves

e do:

Professor Doutor José Luís Ferreira da Silva Ramos

Janeiro de 2018

DECLARAÇÃO

Nome: Marta Sofia Gonçalves Cunha

Número de aluno: PG30898

Endereço eletrónico: marta.sg.cunha@gmail.com **Telefone:** 913888297

Cartão do Cidadão: 14145427

Título da dissertação: Análise de propriedades físicas de rochas metassedimentares silicatadas

Orientador:

Professor Doutor Carlos Alberto Simões Alves

Coorientador:

Professor Doutor José Luís Ferreira da Silva Ramos

Mestrado em Geociências – Valorização de Recursos Geológicos

Ano de conclusão: 2018

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível devido à colaboração de inúmeras pessoas e entidades, a quem dirijo desde já a minha mais sincera gratidão:

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito de atividades financiadas por Fundos Europeus de Investimento pelo FEDER/COMPETE/POCI Programa de Competitividade e Internacionalização, e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia por via do financiamento concedido às unidades Lab2PT (Laboratório de Paisagens, Património e Território, projeto POCI-01-0145-FEDER-007528 e referência UID/AUR/04509/2013) e ISISE (Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural, projeto POCI-01-0145-FEDER-007633 e referência UID/ECI/04029/2013).

Gostaria de agradecer ao professor Carlos Alberto Simões Alves por toda a paciência que teve comigo ao longo destes anos que trabalhamos juntos. Queria também agradecer por toda a ajuda que me deu neste e noutros trabalhos que realizei. Mas acima de tudo gostaria de agradecer por tudo o que me ensinou durante estes anos e espero que continue a ser uma das minhas bases de apoio nesta nova etapa da minha vida que está para vir.

Ao professor José Luís Ferreira da Silva Ramos gostaria de agradecer por todo o apoio que me deu nas partes do trabalho em que não estava tanto à vontade e por me acalmar quando o trabalho assustava dizendo sempre a palavra certa na hora certa.

À Geologia Geotecnia Consultores gostaria de agradecer por me terem cedido o material que foi necessário para a realização deste trabalho e por todo o apoio dado pelo Doutor José Carvalho que sempre se mostrou disponível para me ajudar em tudo o que fosse necessário.

Queria também agradecer ao LEST (Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho) por todo o apoio técnico que me deu, por toda a disponibilidade para me

ajudar a realizar os ensaios e tirar as minhas dúvidas sempre que necessário. Destaco os técnicos que sempre estiveram disponíveis para o fazer, Marco Jorge, José Gonçalves, César Gonçalves, António Matos, Carlos Jesus e Hélder.

Agradeço também ao DCT (Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho) porque sempre que requerido foi-me dado todo o apoio necessário. Destaco o Sr. Saúl Sendas que sempre me ajudou em tudo o que lhe pedi.

Para terminar, mas não sendo menos importantes, quero agradecer muito às minhas amigas destas aventuras dramáticas da nossa vida, a Ana Cláudia Almeida Pinto e Paula Sofia Gonçalves Pereira, porque sempre, mas sempre estiveram lá nos bons e nos maus momentos, porque nunca me deixaram desistir e porque sempre me deram o melhor delas. Obrigada por termos vivido isto juntas, sem vocês não teria conseguido.

Queria também agradecer em especial aos meus grandes amigos que sempre estiveram comigo e sem os quais a minha vida nestes últimos anos seria uma chatice, Pedro José Lopes Gomes, Ricardo Nuno Sá Baptista e Isabel Filipa da Silva Lameira. Obrigado por me acompanharem nestes anos, espero que seja sempre assim.

Aos meus pais o maior e melhor obrigada, por me terem criado como sou, por terem estado sempre presentes e atentos e por me terem dado a oportunidade de poder cumprir o meu sonho de entrar na universidade. Obrigada por nunca me deixarem ir a baixo e nunca me deixarem desistir. Obrigada por tudo o que me deixaram ser e viver.

A todos os professores e colegas com quem me cruzei nestes 6 anos de vida académica, seja dentro ou fora dos limites da universidade, quero agradecer por me terem ensinado algo de novo ou por alguma palavra ou gesto que fez com que a minha vida fosse o que é agora.

Análise de propriedades físicas de rochas metassedimentares silicatadas

RESUMO

Este estudo incidiu na caracterização de propriedades físicas de rochas e nas relações entre essas propriedades. Nessa perspectiva, foram estudados provetes obtidos em três sondagens mecânicas na Formação de Bateiras do Complexo Xisto-Grauváquico do Grupo do Douro. Os ensaios realizados incluíram porosidade aberta, massa volúmica aparente, absorção de água à pressão atmosférica, velocidade de propagação dos ultrassons, ensaios de carga pontual, módulo de elasticidade estático e resistência à compressão uniaxial. Os resultados obtidos são analisados por comparação com resultados de outros autores, em termos de parâmetros estatísticos univariados, relações entre propriedades físicas e por comparação entre provetes das diferentes sondagens (incluindo análise multivariada de “clusters”). Da análise dos resultados obtidos na dissertação destaca-se a porosidade (entre 0,12 e 0,79%) e os valores de resistência à compressão uniaxial que atingem valores semelhantes aos valores mais elevados encontrados nos estudos anteriores aqui compilados. Refira-se também, que o módulo de elasticidade mostrou-se sempre inferior no estado saturado em relação ao estado seco (chegando a ser quase metade), resultado que pode ser particularmente interessante no contexto das escavações subterrâneas nos maciços rochosos pela potencial influência da posição do nível freático. Destaca-se ainda os resultados dos ensaios de carga pontual, nomeadamente a comparação entre axial e diametral (que mostrou a influência da microestrutura destas rochas) e a relação destes ensaios com os resultados da compressão uniaxial que sugerem que o fator 25 indicado na classificação *RMR* poderá não ser no sentido da segurança. Por último, refere-se que a análise multivariada por “clusters” distingue os provetes de uma das sondagens em relação aos provetes das outras duas, não sendo claro todavia se essa distinção resulta da maior profundidade dos provetes desta sondagem ou de variações mineralógicas e texturais. Admite-se que um estudo microscópico mais detalhado, com lâminas orientadas e quantificação de aspetos mineralógicos e texturais poderá contribuir para esclarecer as relações entre as propriedades físicas destes provetes, mas deve ter-se em consideração que algumas propriedades (nomeadamente a resistência à compressão uniaxial e os ensaios de carga pontual) são afetadas por características com uma dimensão difícil de avaliar em lâmina delgada.

Analysis of physical properties of metasedimentary silicate rocks

ABSTRACT

The present study concerned the characterization of physical properties of rocks and the relationships between these properties. In this perspective, specimens obtained from three boreholes made in the Bateiras formation of the Xisto-Grauváquico Complex of the Douro Group were studied. The tests performed on the specimens included open porosity, bulk density, water absorption at atmospheric pressure, ultrasonic propagation velocity, point load tests, static modulus of elasticity and uniaxial compressive strength. Results are analysed by comparison with previous results, in terms of univariate statistical parameters, of relationships between physical properties and by comparison of test specimens from different boreholes (including multivariate cluster analysis). From the analysis of the results obtained in this dissertation one can highlight porosity values (between 0.12% and 0.79%) and uniaxial compressive strength results that reach values similar to the highest values found in other studies compiled here. It should also be noted that the modulus of elasticity was always lower in the water saturated state than in the dry state (reaching a reduction to almost 50%), a result that could be particularly interesting in the context of underground excavations in these rock masses due to the potential influence of groundwater. It is also worth noting the results of the point load tests, namely the comparison between axial and diametral tests (showing the influence of the microstructure of these rocks) and the relation of these tests with the uniaxial compression results that suggest that the factor 25 indicated in the *RMR* classification may not be very favourable to safety. Finally, it can be noted that clusters analysis distinguishes the specimens of one of the boreholes from those of the other two. However, it is not clear whether this distinction results from the higher depth of specimens in that borehole or from textural and mineralogical variations. It is admitted that a more detailed microscopic study with oriented thin sections and the quantification of mineralogical and textural aspects may contribute to clarify the relationships among the physical properties of these specimens, but it should also be considered that some properties (namely uniaxial compressive strength and point load tests) are affected by features with a dimension difficult to assess on thin sections.

Índice Geral

1.	Introdução	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Enquadramento do local de estudo.....	2
1.2.1	Geomorfologia.....	4
1.2.2	Paleogeografia e Tectónica	5
1.2.3	Metamorfismo.....	6
1.2.4	Tipos petrográficos.....	8
1.2.4.1	Metagrauvaques, conglomerados e microconglomerados da base (Sarzedinho - Pézinho)	8
1.2.4.2	Metagrauvaques (Membro Inferior e Superior)	8
1.2.4.3	Filitos negros grafitosos.....	9
1.2.4.4	Filitos cinzentos	9
1.2.4.5	Mármorees.....	10
2.	Materiais e métodos.....	11
2.1	Origem dos provetes estudados.....	11
2.2	Ensaio realizados.....	13
2.2.1	Determinação da densidade aparente e porosidade aberta - EN 1936:2006.....	14
2.2.2	Determinação da absorção de água sob pressão atmosférica - NP EN 13755:2008	15
2.2.3	Determinação da velocidade de propagação do som - NP EN 14579:2007	15
2.2.4	Determinação da resistência à compressão uniaxial - NP EN 1926:2008	16
2.2.5	Determinação do índice de força de carga pontual - D5731-05	17
2.2.6	Determinação do módulo de elasticidade estático - NP EN 14580:2007	19
2.3	Tratamento estatístico de dados	21
2.3.1	Estatística descritiva.....	21

2.3.2 Testes estatísticos	23
2.3.3 Análise de "clusters"	26
3. Estudos anteriores.....	29
3.1 Classificações baseadas em propriedades físicas.....	29
3.2 Tratamento de dados de estudos anteriores.....	34
4. Resultados	41
4.1 Análise univariada	41
4.2 Relações entre variáveis	47
4.3 Comparação dos conjuntos de provetes (sondagens)	59
5. Conclusões	67
Bibliografia	71
A. Anexos.....	75

Índice de figuras

Figura 1.1 Enquadramento geográfico da zona de estudo (Portugal – Distrito de Viseu – Concelho de Armamar). Elaborado com o QGIS 2.18.	2
Figura 2.1 Exemplos de caixas com os tarolos de sondagens estudadas.	11
Figura 2.2 Ensaio da densidade aparente e porosidade aberta: a) antes de inserir a água; b) depois de introduzir água.	15
Figura 2.3 Ensaio da velocidade de propagação do som.	16
Figura 2.4 Resistência à compressão uniaxial: a) antes da rotura; b) depois da rotura.	17
Figura 2.5 Ensaio de carga pontual.	18
Figura 2.6 Roturas válidas para os ensaios de carga pontual: a) axial; b) diametral.	19
Figura 2.7 Rotura não válida para o ensaio de carga pontual axial.	19
Figura 2.8 Ensaio de módulo de elasticidade estático.	20
Figura 2.9 Exemplo de gráfico obtido após o ensaio do módulo de elasticidade (provete 22.1.4 saturado).	21
Figura 3.1 Gráficos de dispersão de resultados de estudos anteriores apresentados na Tabela 3.4 em propriedades não destrutivas: a) absorção de água à pressão atmosférica contra porosidade aberta; b) massa volúmica aparente contra porosidade aberta; c) velocidade de propagação de ondas contra massa volúmica aparente; d) velocidade de propagação de ondas contra porosidade aberta.	36
Figura 3.2 Gráficos de dispersão dos resultados apresentados na Tabela 3.4 do $I_s(50)$ obtido no ensaio de carga pontual contra resultados de testes não destrutivos: a) massa volúmica aparente; b) porosidade aberta; c) velocidade de propagação de ondas.	38
Figura 3.3 Gráficos de dispersão dos resultados apresentados na Tabela 3.4 de resistência à compressão em xistos e as outras propriedades consideradas: a) massa volúmica aparente; b) porosidade aberta; c) velocidade de propagação de ondas; d) $I_s(50)$ obtido no ensaio de carga pontual (neste último gráfico a reta representada corresponde a $R = 25 I_s(50)$).	39
Figura 3.4 Histograma dos valores $R / I_s(50)$ nos resultados compilados em estudos anteriores referidos na Tabela 3.4.	40
Figura 4.1 Comparação por caixa-de-bigodes de índice de carga pontual em ensaios axiais (A) e diametrais (D).	45

Figura 4.2 Amostra (22.1.1) com fraturas de cisalhamento desenvolvidas durante o ensaio de compressão uniaxial.	46
Figura 4.3 Projeção de valores de absorção de água à pressão atmosférica (A_b) contra porosidade aberta (p_a).	48
Figura 4.4 Projeção de valores de massa volúmica aparente (ρ_a) contra porosidade aberta (p_a).	48
Figura 4.5 Projeções dos valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados (v_{sat}) contra essa mesma velocidade nos provetes secos (v_{sec}).	49
Figura 4.6 Avaliação da relação entre a velocidade de propagação de ultrassons e a porosidade aberta: a) projeção dos valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes secos (v_{sec}) contra a porosidade aberta (p_a); b) projeção dos valores do logaritmo do quociente da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados e secos ($\log(v_{sat}/v_{sec})$) contra o logaritmo da porosidade aberta ($\log(p_a)$).	50
Figura 4.7 Projeção dos valores de velocidade de propagação de ultrassons nos provetes secos (v_{sec}) contra: a) massa volúmica do sólido (ρ_s); b) massa volúmica aparente (ρ_a).	50
Figura 4.8 Projeção dos valores dos resultados dos ensaios de carga pontual axiais ($I_s(50)_a$) contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica do sólido (ρ_s); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}).	51
Figura 4.9 Projeção dos resultados do ensaio de carga pontual diametral ($I_s(50)_D$) contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica do sólido (ρ_s); c) massa volúmica aparente (ρ_a); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}).	52
Figura 4.10 Investigação da relação entre resultados de módulo de elasticidade para provetes no estado seco e saturado: a) projeção dos valores dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade nos provetes saturados (E_{sat}) contra os secos (E_{sec}); b) projeção da relação entre o logaritmo do quociente entre módulo de elasticidade saturado sobre o seco ($\log(E_{sat}/E_{sec})$) contra o logaritmo da porosidade aberta ($\log(p_a)$); c) projeção da relação entre o logaritmo do quociente entre módulo de elasticidade saturado sobre o seco ($\log(E_{sat}/E_{sec})$) contra o logaritmo do quociente da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados sobre os secos ($\log(v_{sat}/v_{sec})$).	53
Figura 4.11 Projeção dos valores de absorção de água à pressão atmosférica antes (A_b) e depois do ensaio do módulo de elasticidade ($A_{b,E}$).	54
Figura 4.12 Projeção dos valores do módulo de elasticidade no estado seco (E_{sec}) contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica do sólido (ρ_s).	55

Figura 4.13 a) Projeção dos valores de módulo de elasticidade nos provetes secos (E_{sec}) contra os valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes secos (v_{sec}). b) Projeção dos valores de módulo de elasticidade nos provetes saturados (E_{sat}) contra os valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados (v_{sat}). c) Projeção do logaritmo do quociente entre os módulos de elasticidade nos provetes secos e saturados ($\log(E_{sat}/E_{sec})$) e o logaritmo do quociente entre as velocidades de propagação dos ultrassons nos provetes secos e saturados ($\log(v_{sat}/v_{sec})$).	56
Figura 4.14 Projeção dos valores da resistência à compressão uniaxial (R) contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica sólida (ρ_s); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}); e) velocidade de propagação dos ultrassons no estado saturado (v_{sat}).	57
Figura 4.15 Projeção dos valores de carga pontual em ensaios axiais ($I_s(50)_A$) contra os valores de resistência à compressão uniaxial (R).	58
Figura 4.16 Projeção dos valores de resistência à compressão uniaxial (R) contra os valores do módulo de elasticidade (E).	58
Figura 4.17 Projeção da profundidade dos provetes contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica sólida (ρ_s); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}); e) velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados (v_{sat}).	60
Figura 4.18 Avaliação gráfica do ajuste à distribuição normal para: a) porosidade aberta (%); b) massa volúmica aparente (kg/m^3); c) massa volúmica do sólido (kg/m^3); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (m/s); e) velocidade de propagação dos ultrassons no estado saturado (m/s).	61
Figura 4.19 Dendrograma (método de Ward) obtido a partir dos valores normalizados de porosidade, massa volúmica aparente e velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco.	62
Figura 4.20 Projeção contra profundidade dos provetes para valores de: a) carga pontual em ensaios axiais ($I_s(50)_A$); b) módulo de elasticidade no estado seco (E_{sec}); c) módulo de elasticidade no estado saturado (E_{sat}); d) logaritmo do quociente do módulo de elasticidade no estado seco e saturado ($\log(E_{sec}/E_{sat})$); e) resistência à compressão uniaxial (R). S15 ANT.: provetes da sondagem 15 ensaiados anteriormente a esta dissertação. S21 ANT.: provetes da sondagem 21 ensaiados anteriormente a esta dissertação.	63

Figura 4.21 Comparação do valor mais elevado da resistência à compressão uniaxial com os outros valores obtidos para este parâmetro (nos provetes desta dissertação e nos provetes ensaiados anteriormente, excluindo os provetes das zonas mais superficiais e mais meteorizados): a) caixa de bigodes; b) gráfico de ajuste à distribuição normal. 64

Figura 4.22 Exemplos das características mineralógicas presentes nas lâminas estudadas: a) clorite; b) biotites; c) cloritização da biotite. Observação com o microscópio petrográfico, em nicóis paralelos, objetiva 4X. 66

Índice de tabelas

Tabela 1.1 Associações paragenéticas das fácies de metamorfismo presentes nos metassedimentos identificados por Sousa & Sequeira (1989).....	7
Tabela 1.2 Associações mineralógicas referidas por Sousa & Sequeira (1989) para os tipos petrográficos da formação de Bateiras.	10
Tabela 2.1 Informações das porções de sondagens estudadas.	12
Tabela 2.2 Tabela dos ensaios realizados nos provetes das várias sondagens.....	13
Tabela 3.1 Categorização das propriedades ρ_{sec} : massa volúmica/densidade seco e p : porosidade das rochas. ⁽¹⁾ Documento da Commission of Engineering Geological Mapping de 1979 (citado em Bell 2007), ^{(2), (3)} Kobranova (1989)*.....	30
Tabela 3.2 Classificação de pedras naturais com base na velocidade da onda P. Documento da Commission of Engineering Geological Mapping de 1979 (citado em Yagiz, 2010).....	31
Tabela 3.3 Categorização das propriedades carga pontual, $I_s(50)$, e compressão uniaxial, R , das rochas. ⁽¹⁾ Hoek, 2007; ⁽²⁾ Documento da IAEG de 1979 (citado em Bell, 2007); ⁽³⁾ Documento da Geological Society de 1979 (citado em Bell, 2007); ⁽⁴⁾ Documento de Franklin & Broch de 1972 (citado em Bell, 2007); ⁽⁵⁾ Carmichael, 1989 e ⁽⁶⁾ Documento da ISRM de 1979 (citado em Bell, 2007).....	33
Tabela 3.4 Resultados de estudos de propriedades físicas em rochas metassedimentares silicatadas. ρ_a : massa volúmica/densidade aparente; p_a : porosidade aberta; p_s : porosidade aparente; A_b : absorção de água à pressão atmosférica; v : velocidade de propagação dos ultrassons; $I_s(50)$: carga pontual; R : compressão uniaxial; E : módulo de elasticidade.....	35
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios não destrutivos dos provetes obtidos a partir dos tarolos da sondagem 15. p_a : porosidade aberta; ρ_a : massa volúmica aparente; ρ_s : massa volúmica do sólido; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à pressão atmosférica. N : número de provetes; Mín : mínimo; Máx : máximo; Méd : média; Med : mediana; MG : média geométrica; DP : desvio-padrão; CV : coeficiente de variação; P25 : percentil 25; P75 : percentil 75; Assim : assimetria; Curt : curtose.....	42
Tabela 4.2 Resultados dos ensaios não destrutivos dos provetes obtidos a partir dos tarolos da sondagem 21. p_a : porosidade aberta; ρ_a : massa volúmica aparente; ρ_s : massa volúmica do	

sólido; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à pressão atmosférica. As etiquetas da primeira coluna tem o mesmo significado que na Tabela 4.1	42
Tabela 4.3 Resultados de ensaios mecânicos e associados do conjunto de provetes das sondagens 15 e 21. E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R: compressão uniaxial; $I_s(50)_A$: índice de carga pontual (ensaio axial); $I_s(50)_D$: índice de carga pontual (ensaio diametral); $A_{b,E}$: absorção depois do módulo de elasticidade. As etiquetas da primeira coluna tem o mesmo significado que na Tabela 4.1	43
Tabela 4.4 Resultados dos ensaios da sondagem 22. p_a : porosidade aberta; ρ_a : massa volúmica aparente; ρ_s : massa volúmica do sólido; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R: compressão uniaxial; $I_s(50)_A$: índice de carga pontual (ensaio axial). As etiquetas da primeira coluna tem o mesmo significado que na Tabela 4.1	43
Tabela A.1 Informações dos provetes obtidos a partir da sondagem 15.	75
Tabela A.2 Informações dos provetes obtidos a partir da sondagem 21.	76
Tabela A.3 Informações dos provetes obtidos a partir da sondagem 22.	77
Tabela A.4 Resultados dos ensaios da sondagem 15. p_a : porosidade aberta; ρ_s : massa volúmica do sólido; ρ_a : massa volúmica aparente; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à p pressão atmosférica; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R: compressão uniaxial; $I_s(50)$: carga pontual axial; $I_s(50)$: carga pontual diametral; $A_{b,E}$: absorção depois do módulo de elasticidade.	78
Tabela A.5 Resultados dos ensaios da sondagem 21. p_a : porosidade aberta; ρ_s : massa volúmica do sólido; ρ_a : massa volúmica aparente; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à pressão atmosférica; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R: compressão uniaxial; $I_s(50)$: carga pontual axial; $I_s(50)$: carga pontual diametral; $A_{b,E}$: absorção depois do módulo de elasticidade.	79
Tabela A.6 Resultados dos ensaios da sondagem 22. p_a : porosidade aberta; ρ_s : massa volúmica do sólido; ρ_a : massa volúmica aparente; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo	

de elasticidade saturado; R: compressão uniaxial; $I_s(50)$: carga pontual axial; $A_{B,E}$: absorção depois do módulo de elasticidade. 80

1. Introdução

Os estudos de rocha intacta têm relevância para os trabalhos de Engenharia Civil nomeadamente do ponto de vista da utilização destes objetos geológicos como materiais de construção (como agregados ou como pedra natural em construções históricas e recentes) mas também do ponto de vista da caracterização das propriedades dos maciços rochosos. Nesta última vertente, os ensaios dos provetes de rocha intacta podem ser considerados em índices e classificações geotécnicas de maciços rochosos, como o clássico *RMR* de Bieniawski (1989) e em modelos do comportamento mecânico, como o critério de rotura de Hoek-Brown para maciços rochosos (Hoek *et al.*, 2002).

As principais questões tidas em conta para a realização desta dissertação foram as comparações da relação com o tipo de rocha e com as suas propriedades.

Assim sendo, esta dissertação ficará organizada da seguinte forma:

Neste primeiro capítulo (Introdução) são apresentados os conceitos gerais, os objetivos que se pretende atingir e são explicados os principais conceitos geológicos relacionados com este estudo.

No segundo capítulo (Materiais e métodos) são indicadas algumas informações específicas das sondagens que foram estudadas e dos tarolos que foram ensaiados, bem como alguns esclarecimentos sobre os ensaios que foram realizados e o tipo de tratamentos estatísticos utilizados no tratamento dos dados.

No terceiro capítulo (Estudos anteriores) são citados alguns trabalhos relacionados com este, que foram realizados anteriormente por diversos autores e são analisados os resultados obtidos por eles.

No quarto capítulo (Resultados) são apresentados, tratados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios e trabalhos realizados ao longo desta dissertação.

No quinto capítulo (Conclusões) são resumidas as considerações finais, bem como o que foi conhecido com o resultado deste trabalho.

1.1 Objetivos

A presente dissertação incidirá essencialmente em duas grandes vertentes:

- Correlações entre propriedades índices e propriedades mecânicas (considerando as condições de ensaio e as normas propostas);
- Análise multivariada (considerando as propriedades índice e as propriedades mecânicas) para comparação com propostas de tipologias baseadas em características petrográficas.

1.2 Enquadramento do local de estudo

Os provetes estudados foram obtidos a partir de sondagens mecânicas realizadas na margem esquerda do rio Douro, no concelho de Armamar, em locais onde vão ser feitas escavações subterrâneas. Isto permitiu obter um número significativo de provetes correspondentes a rochas em profundidade (Figura 1.1).

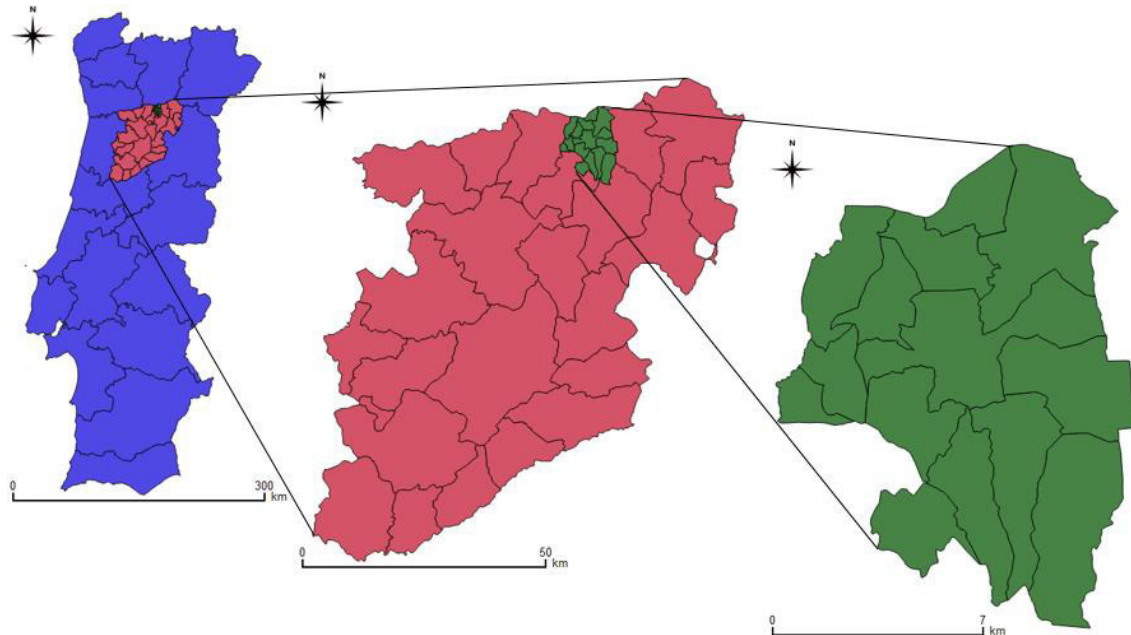


Figura 1.1 Enquadramento geográfico da zona de estudo (Portugal – Distrito de Viseu – Concelho de Armamar). Elaborado com o QGIS 2.18.

Segundo Sousa & Sequeira (1989) a região em estudo situa-se na Zona Centro-Ibérica, mais precisamente entre o bordo Sul da chamada antiforma granítica Vila Real-Carviçais e o bordo Norte da extensão granítica Lamego-Escalhão, situado a norte do Sulco Dúrico-Beirão (Sousa & Sequeira, 1989).

Distinguem-se na folha 10-D (Alijó) da carta geológica de Portugal na escala 1:50000 (Sousa *et al.*, 1987) duas grandes unidades litológicas: rochas ígneas granitoides e metassedimentos do Super Grupo Dúrico-Beirão (Complexo Xisto-Grauváquico) – Grupo do Douro.

A organização da coluna estratigráfica que acompanha esta folha 10-D mostra a presença, nos metassedimentos do Grupo do Douro, de dois conjuntos distintos: autóctone e alóctone. As sondagens estudadas intersectaram a formação de Bateiras que faz parte do autóctone e seguidamente será apresentada uma síntese das informações apresentadas em Sousa & Sequeira (1989) sobre esta formação.

A formação de Bateiras (Câmbrico) constitui a unidade estratigráfica mais antiga do Grupo e a sua ocorrência manifesta-se no núcleo de três estruturas anticlinais de primeira fase Varisca, com uma orientação geral de N60W: anticlinal de Aباças - Bateiras, anticlinal de Adorigo e anticlinal de Santo Adrião - Santa Leocádia.

De modo geral a formação de Bateiras pode ser dividida em dois membros: um Membro Inferior, individualizado pela presença de xistos negros em intercalações com metagrauvaques e filitos; um Membro Superior, identificado pela ocorrência de níveis carbonatados a que se sobrepõem espessos metagrauvaques com intercalações filitosas.

O fecho do anticlinal é visível no sector de Aباças, onde o eixo é mergulhante para NW. Nesta zona mantem-se sensivelmente o mesmo aspeto da unidade. Contudo, os metassedimentos com matriz carbonatada apresentam aqui menor expressão e os metagrauvaques do topo da unidade são aqui mais espessos e mais grosseiros contendo mesmo microconglomerados a conglomerados. Por outro lado, apenas afloram dois dos níveis de xistos negros. Os metassedimentos carbonatados, na proximidade de grandes fraturas apresentam-se chertificados (silicificados), como acontece no afloramento da estrada da Galafura - Vila Real.

Sousa & Sequeira (1989) afirmam que no anticlinal de Adorigo, a erosão não atuou tão profundamente e apenas se expressa em afloramento numa pequena parte do Membro Inferior, até ao primeiro nível dos xistos negros. Não verificaram o aparecimento dos espessos metagrauvaques referidos para o topo da Formação. O Membro Superior torna-se menos

espesso e fica predominantemente pelítico para o topo, com características de filito escuro, listrado.

O anticlinal inclinado de Santo Adrião, que se apresenta intersectado no flanco Sul, mostra grande parte das rochas calcossilicatadas e dos metagrauvaques carbonatados associados transformados em “skarns”, atribuído à ação do metassomatismo de contacto. O topo da Formação é aqui também xistento.

Seguidamente apresentam-se mais algumas informações sobre a Geologia da região, focadas nas características da formação de Bateiras com relevância para o estudo desenvolvido nesta dissertação.

1.2.1 Geomorfologia

Seguidamente serão apresentadas as principais feições da geomorfologia da região com base nas informações de Sousa & Sequeira (1989).

Um dos aspetos que a observação da folha 10-D (Sousa *et al.*, 1987) mostra de imediato é o jogo de litologias contrastantes expressas numa larga mancha de rochas “xistentas”, que constituem o “Grupo do Douro”, rodeada a Norte e a Sul por uma franja de rochas “graníticas” que testemunham a proximidade das antiformas Vila Real - Carviçais e Lamego - Escalhão, respetivamente.

Na mancha “xistenta” desenha-se uma superfície mais ou menos aplanada fossilizada por pequenos plainos e que se situa entre as cotas de 600 m - 650 m. Nesta superfície faz-se a incisão profunda de vales apertados que se salientam as principais linhas de água - Douro, Tua, Pinhão, Távora, Tedo, Ribeira de Tanha, Ribeira de Ceira. Estes entalhamentos dos cursos de água revela-se na escassez de aluviões presentes na área, explicada pela erosão remontante.

Acima desta superfície desenha-se na área envolvente um outro planalto. As cotas de 900 m - 950 m correspondem aos afloramentos de rochas graníticas.

Estão representados na região dois dos três níveis de aplanamento, os restos da “Superfície Fundamental” expressos nas bordaduras graníticas e os “níveis inferiores do Douro” que são representados pelos planos xistentos residuais.

A transição entre as duas superfícies faz-se de maneira brusca e nítida como se verifica na bordadura sul (Tabuaço - Armamar), onde o declive é forte com um abrupto da ordem de 300 m.

O intervalo de cotas de superfície dos locais das sondagens estudadas estão entre 229,12 m e 377,97 m.

1.2.2 Paleogeografia e Tectónica

De acordo com Sousa & Sequeira (1989) as litologias definidas no Grupo do Douro e as estruturas sedimentares ali encontradas são características que sugerem para aquele Grupo um ambiente deposicional de “fácies turbidíticas”. Igualmente, as sequências encontradas e as associações de fácies presentes permitem extrapolar a atribuição a ambientes deposicionais equivalentes a um leque submarino para a bacia do Douro. O achado de trilobites na região de Moncorvo veio confirmar a idade câmbrica, pelo menos para parte do Grupo do Douro, pelo que se mantém aceitável o modelo de Sousa (1982) de considerar as fácies do Grupo do Douro como equivalentes turbidíticas das fácies de plataforma câmbricas da Península Ibérica (Sousa & Sequeira, 1989).

Segundo Sousa & Sequeira (1989) a região do estudo abrange a atuação de duas fases de deformação Varisca (F_1 e F_3), que se sobrepõem a uma fase anterior. A primeira fase Varisca (F_1) é a melhor expressa neste setor e caracteriza-se por dobras megascópicas e mesoscópicas de orientação geral N60W, de plano axial subvertical (com menores pendores à medida que nos aproximamos das bordaduras graníticas), a que se associa uma clivagem S_1 de plano axial. As principais estruturas anticlinais e sinclinais são geradas nesta fase. O estiramento dos clastos e minerais apresenta uma direção preferencial relacionada com S_1 e verifica-se segundo o eixo b das dobras F_1 .

A terceira fase (F_3) Varisca traduz-se por dobras mesoscópicas, flexurais, assimétricas, homoaxiais com F_1 e a que se associa uma clivagem de crenulação S_3 (raramente de fluxo) que, contudo, nem sempre se observa. Esta clivagem apresenta orientação NW-SE, inclinando quase sempre para Sul, com valores geralmente próximos de 15° a 30° . Há uma tendência para estes valores serem um pouco mais elevados quando nos aproximamos das bordaduras graníticas.

Além destas duas fases de deformação Varisca, assinala-se ainda a presença de estruturas mesoscópicas sob a forma de “kinks”, predominantemente com orientação NE-SW (10° - 25°), direitos, subverticais.

1.2.3 Metamorfismo

Segundo Sousa & Sequeira (1989), em termos de fácies de metamorfismo, as associações paragenéticas presentes nos metassedimentos enquadram-se na subfácies albite-clorite-biotite da fácies dos xistos verdes. A síntese seguidamente apresentada baseia-se nas informações destes autores (Sousa & Sequeira, 1989). Na Tabela 1.1 são apresentadas as associações paragenéticas das diferentes zonas de metamorfismo referidas por estes autores.

Na zonografia metamórfica estabelecida distinguem-se a zona da biotite (predominante) e a zona da clorite. É segundo S_3 que a biotite regional apresenta o seu melhor desenvolvimento. Isto sugere que o metamorfismo regional se terá iniciado em F_1 e atinge o seu máximo em F_3 . Salienta-se ainda que a biotite segundo S_3 mostra melhor desenvolvimento quando sob influência de ação de metamorfismo de contacto, gerando-se aqui biotite “cross” em grandes cristais. Isto sugere-nos que a granitização e metamorfismo de contacto terão atuado em parte em F_3 , atingindo o seu maior desenvolvimento num estágio mais tardio de F_3 (plutonometamorfismo).

Na bordadura norte o metamorfismo de contacto expressa-se geralmente por uma zona interna de corneanas no contacto com o granito, constituindo a zona da andaluzite-silimanite-cordierite, e uma zona externa de micaxistos de aspeto mosqueado, correspondente à zona da biotite (Sousa & Sequeira, 1989).

A andaluzite ocorre em profiroblastos poecilíticos de dimensões até 0,5 cm, muitas vezes sericitizados. A silimanite é pouco abundante e geralmente relaciona-se com a biotite. A cordierite parece escassa e ocorre em pequenos cristais, muitas vezes límpidos. A biotite pode ocorrer em duas gerações: uma biotite I em porfiroblastos de cor castanha-tijolo intensa, poecilítica, em placas até 2 mm; uma biotite II, em cristais quase idiomórficos, sobrepostos aos restantes. Para a zona mais externa das corneanas, esta biotite aparece frequentemente pseudomorfizada por um mineral de cor verde, pleocroico, com maclas polissintéticas e ângulo máximo de extinção de 8° . Poderá tratar-se de um processo de cloritização da biotite.

Na bordadura sul as influências termais induzidas pelos granitos provocam a formação de uma zona mais interna com micaxistos biotíticos com granada e escassa andaluzite. A cloritização da biotite é frequente (Sousa & Sequeira, 1989).

Tabela 1.1 Associações paragenéticas das fácies de metamorfismo presentes nos metassedimentos identificados por Sousa & Sequeira (1989).

Zona metamórfica	Tipo de rocha	Associações paragenéticas
Zona da clorite	Rochas metapelíticas	Quartzo + clorite + moscovite + albite; Quartzo + clorite + moscovite ± magnetite + pirite + (albite).
	Rochas metagrauváquicas	Quartzo + clorite + moscovite + albite; Quartzo + clorite + moscovite ± calcite + albite.
Zona da biotite	Rochas metapelíticas	Quartzo + clorite + moscovite + biotite + albite.
	Rochas metagrauváquicas	Quartzo + plagioclase (albite a andesina) + clorite + moscovite + biotite.
	Rochas calcossilicatadas	Quartzo + moscovite + biotite + clinozoizite + actinolite + andesina.
	Rochas carbonatadas	Calcite + dolomite + biotite + quartzo + moscovite.
Zona andaluzite	*	Moscovite + quartzo + biotite ± andaluzite + plagioclase ± cordierite ± silimanite.
Zona da biotite	Rochas metapelíticas	Biotite + moscovite + quartzo + plagioclase ± magnetite.
	Rochas calcossilicatadas	Quartzo + grossulária + diópsido + clinozoizite + calcite.
Zona de filitos com biotite	*	Moscovite + biotite + quartzo ± granada almandina, s.l. + plagioclase ± andaluzite ± silimanite; Quartzo + grossulária + diópsido + idocrase + clinozoizite.
Zona da biotite	*	Biotite ± clorite + moscovite + quartzo + albite; Quartzo + moscovite + biotite + zoisite-clinozoizite + tremolite-actinolite + plagioclase.

*Não é referida informação em Sousa & Sequeira (1989).

1.2.4 Tipos petrográficos

Na formação de Bateiras, destacam-se os seguintes tipos petrográficos:

1.2.4.1 Metagrauvaques, conglomerados e microconglomerados da base (Sarzedinho - Pézinho)

De modo geral são rochas esbranquiçadas, quartzíticas (metaquartzarenitos). Ao microscópio revelam textura clástica com reorganização metamórfica. Os clastos, essencialmente de quartzo, apresentam-se elipsoidais, não ultrapassando os 2 mm nos metaquartzarenitos e atingem os 2,5 cm nos conglomerados. O cimento é constituído por um mosaico de quartzo (e por vezes calcite). Observam-se, também, alguns clastos de plagioclase (albite). São raros os grãos de filito escuro e rara a moscovite detrítica (Tabela 1.2).

1.2.4.2 Metagrauvaques (Membro Inferior e Superior)

Geralmente são rochas de coloração cinzenta - azulada, mais raramente de tons claros.

São metagrauvaques feldspáticos, com clastos de quartzo e plagioclase (esta não ultrapassa 20%) e rara moscovite. Por vezes são metaquartzovaques. Os clastos apresentam geralmente granulometria de 0,2 mm - 0,4 mm, sendo mais finos no Membro Inferior. Macroscopicamente observam-se “mud clasts”, sobretudo no Membro Inferior da Formação (Tabela 1.2).

Algumas destas rochas quando atuadas por metamorfismo regional mais elevado apresentam também clinzoizite, tremolite - actinolite e esfena, constituindo termos calcosilicatados quartzíticos e/ou metagrauvaques calcomagnesianos. É atribuída à ação de metassomatismo a transformação destes termos em “skarns”, como acontece em Santo Adrião e outros locais.

1.2.4.3 Filitos negros grafitosos

Em observação macroscópica são xistos de cor negra intensa que, não raro, sujam as mãos, mostram textura lepidoblástica, contendo, por vezes, pirite visível. Apresentam, também, intercalações de finos leitões milimétricos esbranquiçados que são essencialmente quartzosos, contendo também clorite, moscovite, raros opacos, turmalina e calcite (Tabela 1.2).

O metamorfismo de contacto induz nestes filitos, biotite e até granada.

1.2.4.4 Filitos cinzentos

Este termo abrange alternâncias filito a quartzo-filíticas cinzento-negras, os filitos cinzentos do Membro Inferior da Formação e ainda os filitos cinzentos e cinzentos-escuros, listrados, do Membro Superior.

Ao microscópio denotam textura lepidoblástica nas bandas filíticas e lepidonematoblástica nas bancadas quartzo - micáceas, apresentando um granulado relativamente fino (30 μm - 100 μm). Em algumas amostras observou-se quartzo detrítico, já estirado e recristalizado. Contudo, estes vestígios de elementos detríticos são raros, notando-se normalmente uma reorganização do quartzo, em mosaico, com as micas a ocuparem o espaço entre os cristais de quartzo (Tabela 1.2).

Algumas amostras contêm também rara grafite.

São frequentes aspetos de pseudo-estratificação induzidos pela 1ª fase de deformação Varisca, por diferenciação metamórfica (solução por pressão).

A ilmenite apresenta-se em cristais alongados, alinhados com S_1 , mostrando bordos e leucoxena - esfena, cujo hábito e abundância parece ser característico dos filitos escuros de Bateiras e ainda, dos filitos ardosíferos de Desejosa.

1.2.4.5 Mármore

Trata-se de autênticos mármore ainda que a designação de calcários seja frequentemente utilizada.

Macroscopicamente são rochas de cor cinzenta - escura, azulada, que se apresentam em bancadinhas de 2 cm - 5 cm, alternando com bandas filíticas milimétricas a centimétricas. Algumas bancadinhas mostram tons mais claros, de cor creme a castanho-clara, correspondendo a termos dolomíticos, mais frequentes para o topo dos mármore. Estas rochas apresentam uma "patine" negra bem característica. Quando alternados adquirem tonalidades claras e tornam-se friáveis.

Estas rochas contêm também frequentes pontuações de matéria orgânica e podem apresentar aspetos de silicificação nas proximidades de grandes acidentes tectónicos, onde, embora mantendo o estilo estratonómico, adquirem o aspeto de bancadinhas quartzíticas de granulado fino.

Na Tabela 1.2 são apresentadas as associações mineralógicas referidas por Sousa & Sequeira (1989) para os diferentes tipos petrográficos distinguidos na formação de Bateiras.

Tabela 1.2 Associações mineralógicas referidas por Sousa & Sequeira (1989) para os tipos petrográficos da formação de Bateiras.

Tipo petrográfico	Associações mineralógicas
Metagrauvaques, metaconglomerados e micro-metaconglomerados da base (Sarzedinho - Pézinho)	Quartzo + moscovite + clorite ± biotite + albite ± calcite + apatite + esfena + pirite
Metagrauvaques (Membro Inferior e Superior)	Quartzo + clorite + plagioclase (albite) ± biotite ± calcite Acessórios: Apatite ± zircão ± esfena ± ilmenite ± leucoxena ± pirite
Filitos negros grafitosos	Quartzo + grafite + clorite + moscovite (sericite) + albite (rara) Acessórios: Pirite + turmalina + ilmenite (rara)
Filitos cinzentos	Quartzo (predominante nas bandas quartzo - micáceas) + moscovite (predominante nas bandas filíticas) + clorite + biotite + albite (rara) Acessórios: Ilmenite (leucoxena - esfena) + pirite + turmalina + zircão + manchas de óxido de ferro

2. Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os provetes estudados e os diferentes ensaios realizados nos mesmos com indicação das normas utilizadas (assim como das diferenças em relação às mesmas que ocorreram na execução dos ensaios).

2.1 Origem dos provetes estudados

Para a realização deste trabalho a empresa Geologia e Geotecnia Consultores forneceu alguns trechos de tarolos pertencentes a três sondagens mecânicas (referenciadas com os n^os 15, 21 e 22) que, como foi referido anteriormente foram realizadas na margem esquerda do rio Douro, no concelho de Armamar, em locais onde vão ser feitas escavações subterrâneas. Os provetes estudados foram obtidos a partir dos tarolos dessas sondagens e isto permitiu obter um número significativo de amostras correspondentes a rochas de profundidade. Na Figura 2.1 apresenta-se uma imagem ilustrativa de uma caixa com tarolos de uma das sondagens referidas.

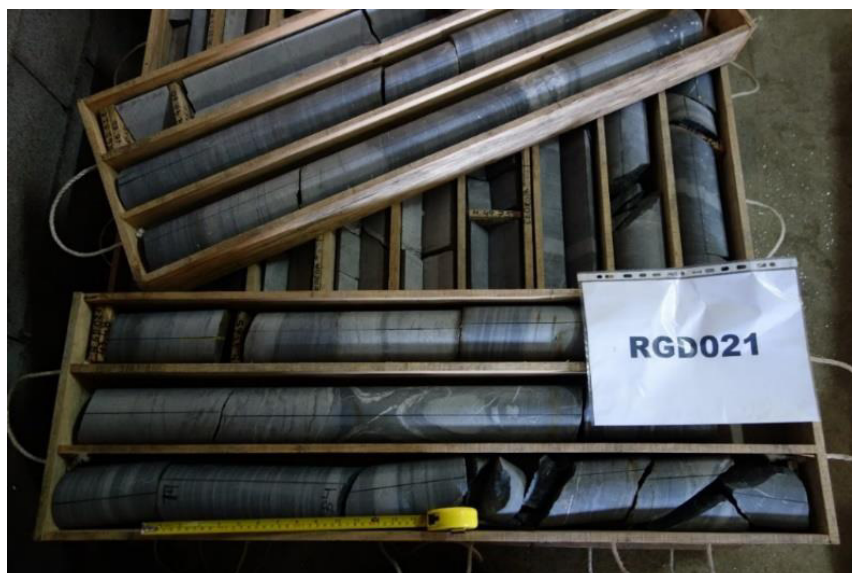


Figura 2.1 Exemplos de caixas com os tarolos de sondagens estudadas.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as cotas de superfície, as inclinações, os ângulos aproximados que as sondagens fazem com o S_0 (plano original de estratificação), os diâmetros nominais (isto é, o diâmetro expectável com o amostrador utilizado) e os intervalos de cotas estudados correspondentes a cada sondagem.

Tabela 2.1 Informações das porções de sondagens estudadas.

Sondagem	Cota de Superfície (m)	Inclinação	Ângulo aproximado com S_0	Diâmetro Nominal (mm)	Cota superior dos intervalos estudados (m)	Cota inferior dos intervalos estudados (m)
15	309,20	54°	90°	63	275,26	274,67
					275,87	275,26
					276,92	276,79
					282,50	281,79
21	229,12	60°	90°	85	189,73	189,50
					201,49	200,67
					201,80	201,55
					203,57	203,05
					203,83	203,66
22	377,97	80°	40° - 60°	63	298,22	297,26
					299,81	299,30
					301,15	300,86
					350,59	350,20

Em anexo, nas Tabela A.1 (Sondagem 15), Tabela A.2 (Sondagem 21) e Tabela A.3 (Sondagem 22), são apresentadas as dimensões exatas, a cota superior e a cota inferior de cada provete. Foram então preparados cerca de 7 m de sondagens dos quais se obtiveram um total de 69 amostras para o estudo. Com base na observação macroscópica e nas informações que são descritas na notícia explicativa pode-se concluir que as amostras estudadas se enquadram no tipo petrográfico dos filitos cinzentos, esta hipótese foi suportada pelas observações com microscópio petrográfico das lâminas polidas que serão apresentadas no Capítulo 4.

A altura dos provetes dependerá do ensaio que for realizado (em função da relação altura:diâmetro utilizada no mesmo), como será descrito no subcapítulo seguinte.

2.2 Ensaio realizados

Na Tabela 2.2 são indicados os ensaios realizados nos provetes e a relação altura:diâmetro dos provetes para cada ensaio e após a mesma são apresentadas algumas breves notas sobre os ensaios (incidindo especialmente sobre as diferenças entre os procedimentos seguidos e aqueles prescritos pelas normas referidas).

Tabela 2.2 Tabela dos ensaios realizados nos provetes das várias sondagens.

Ensaio realizado (norma)	Relação altura:diâmetro	Referências dos provetes estudados
Determinação da densidade aparente e porosidade aberta (EN 1936:2006)	1:1	Todos
Determinação da absorção de água sob pressão atmosférica (NP EN 13755:2008)	1:1	15.1.1; 15.1.2; 15.2.1; 15.2.2; 15.2.3; 15.3.1; 15.3.2; 15.3.3; 15.3.4; 15.4.1; 15.4.2; 15.5.1; 15.5.2; 15.5.3; 15.6.1; 15.6.2 21.0.1; 21.0.2; 21.1.1; 21.1.2; 21.2.1; 21.2.2; 21.2.3; 21.3.1; 21.3.2; 21.4.1; 21.4.2 22.1.4; 22.2.3; 22.2.4; 22.3.1; 22.3.6; 22.4.1
Determinação da velocidade de propagação do som (NP EN 14579:2007)	1:1	Todos
Determinação da resistência à compressão uniaxial (NP EN 1926:2008)	1:1	15.1.1; 15.2.2; 15.3.3; 15.4.1; 15.5.3; 15.6.2 21.1.1; 21.2.2; 21.3.2; 21.4.2 22.1.1; 22.1.3; 22.2.2; 22.2.5; 22.2.7; 22.2.9; 22.2.11; 22.3.2; 22.3.5; 22.4.2
Determinação do índice de força de carga pontual (ASTM D5731-05)	1:1	15.1.2; 15.2.1; 15.3.2; 15.4.2; 15.5.1; 15.5.2; 15.10.5; 15.10.9 21.0.1; 21.1.2; 21.10.1; 21.10.2; 21.10.3; 21.10.5; 21.10.7; 21.10.8; 21.10.9 22.2.1; 22.2.6; 22.2.8; 22.2.10; 22.4.3
Determinação do módulo de elasticidade estático (NP EN 14580:2007)	2:1	15.2.3; 15.3.1; 15.3.4; 15.6.1 21.0.2; 21.2.3; 21.3.1 22.1.4; 22.2.3; 22.2.4; 22.3.1; 22.3.6; 22.4.1

Além dos provetes referidos na Tabela 2.2, foram realizados mais cinco ensaios de carga pontual (todos axiais) que tiveram uma rotura não válida e portanto não serão considerados neste trabalho.

Os ensaios foram todos realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

A empresa Geologia e Geotecnia Consultores realizou 5 ensaios de compressão uniaxial em provetes da sondagem 21, entre os 7 m e os 21,20 m e 8 ensaios de carga pontual em provetes da sondagem 15, entre os 6,39 m e os 36,90 m.

De seguida, é feita uma breve apresentação dos ensaios realizados e informações relevantes sobre cada um deles. As condições laboratoriais de realização dos ensaios implicaram algumas variações em relação ao indicado nas normas. Uma dessas variações, comuns aos vários ensaios, esteve relacionada com a temperatura de secagem, uma vez que as normas europeias seguidas indicam uma temperatura de secagem igual a 70 °C, mas nos ensaios realizados foi utilizada uma temperatura de secagem igual a 80 °C (de acordo com a prática corrente do laboratório).

2.2.1 Determinação da densidade aparente e porosidade aberta - EN 1936:2006

A densidade aparente e a porosidade aberta são determinadas pela absorção de água realizada em vácuo e pela pesagem submersa das amostras (Figura 2.2). As condições de realização do ensaio implicaram algumas variações em relação ao indicado na norma referida para este ensaio.

A norma referida indica que a tensão de vácuo utilizada deveria ser 2 kPa, mas nas condições laboratoriais destes ensaios a mesma situou-se num intervalo entre 2 kPa e 5 kPa. Adicionalmente a balança usada para pesar as amostras dentro de água apenas tinha uma precisão de 0,1 g (ao contrário do 0,01 g indicado na norma).

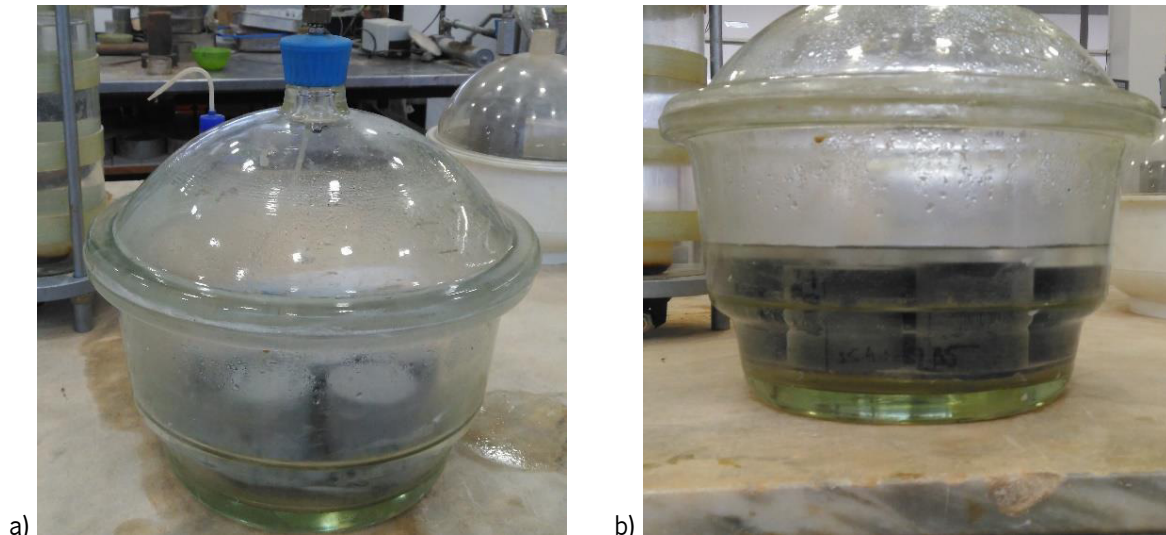


Figura 2.2 Ensaio da densidade aparente e porosidade aberta: a) antes de inserir a água; b) depois de introduzir água.

2.2.2 Determinação da absorção de água sob pressão atmosférica - NP EN 13755:2008

Após secagem até massa constante, cada provete é pesado e seguidamente imerso em água à pressão atmosférica durante um período de tempo especificado. A absorção de água é calculada utilizando a massa do provete saturado (após atingir massa constante) e a massa do provete seco.

2.2.3 Determinação da velocidade de propagação do som - NP EN 14579:2007

Um impulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor electro-acústico mantido em contacto com uma superfície de pedra a ensaiar. Após ter percorrido um trajeto de distância conhecida, o impulso das vibrações é convertido num sinal elétrico por um segundo transdutor e o tempo de percurso é medido por intermédio de circuitos eletrónicos de cronometragem (Figura 2.3).

Esta norma não admite provetes cilíndricos, no entanto a norma da ASTM (D 2845 – 05 Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock) admite provetes com esta forma geométrica.

Para este ensaio foi utilizado um aparelho da marca *Pundit Lab* da *Proceq*, os transdutores usados tinham uma frequência de 150 kHz e um diâmetro de 2,5 cm. Seguindo a prática

habitual nos estudos da rocha intacta, os resultados deste ensaio serão referidos como ultrassons.



Figura 2.3 Ensaio da velocidade de propagação do som.

2.2.4 Determinação da resistência à compressão uniaxial - NP EN 1926:2008

Os provetes são centrados sobre o prato de uma prensa de ensaio e é aplicada uma força uniformemente distribuída, cujo incremento é contínuo, até ocorrer a rotura (Figura 2.4).

Para este ensaio foi usada uma prensa universal (E8), controlada pelo software Dynatester, com uma capacidade de carga de até 3000 kN e um diâmetro dos pratos de 15 cm.



Figura 2.4 Resistência à compressão uniaxial: a) antes da rotura; b) depois da rotura.

2.2.5 Determinação do índice de força de carga pontual - D5731-05

Este ensaio é realizado submetendo um provete a uma carga cada vez mais elevada, aplicada através de cones, até que a rotura ocorra dividindo o provete (Figura 2.5). Para este ensaio foi usado um aparelho da marca Tecnotest.

A geometria dos provetes é fortemente condicionada pela sua origem (tarolos de sondagem), o que dificulta a realização de ensaios noutras direções, nomeadamente na direção perpendicular ao eixo do tarolo. Todavia, foi possível observar em ensaios expeditos manuais que em vários provetes a direção perpendicular ao eixo do tarolo apresentava uma resistência que parecia ser substancialmente inferior. Aproveitou-se a possibilidade dada pelo ensaio de carga pontual de realizar testes diametrais em provetes cilíndricos (isto é, aplicando a carga na direção paralela ao diâmetro do provete e portanto na direção perpendicular ao eixo do tarolo) para obter alguma avaliação quantitativa das observações referidas.

Neste ensaio existe um critério que o valida ou não, que está relacionado com a forma da rotura. Quando a rotura é de base a base do provete esta é considerada válida (Figura 2.6). Quando esta não ocorre ao longo de todo o provete e apenas uma parte sofre a rotura, o ensaio não é considerado válido (Figura 2.7).



Figura 2.5 Ensaio de carga pontual.

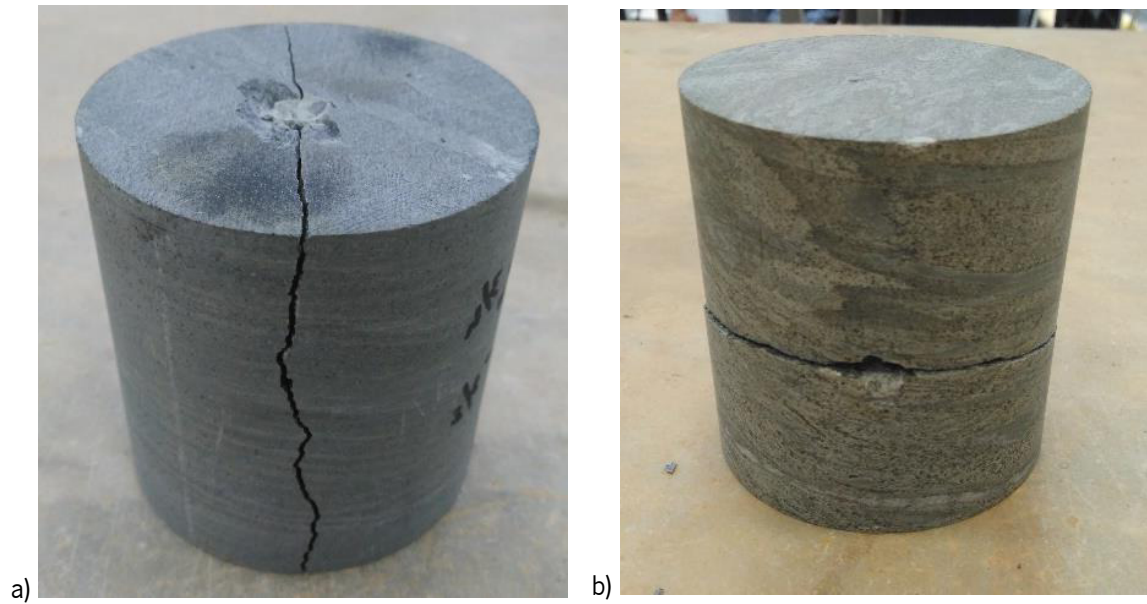


Figura 2.6 Roturas válidas para os ensaios de carga pontual: a) axial; b) diametral.



Figura 2.7 Rotura não válida para o ensaio de carga pontual axial.

2.2.6 Determinação do módulo de elasticidade estático - NP EN 14580:2007

O ensaio consiste na medição de deformações longitudinais de um provete submetido a tensões compressivas uniaxiais de base e superiores (Figura 2.8).

Para este ensaio utilizou-se uma prensa universal (E8), controlada pelo software Dynatester, com uma capacidade de carga até 3000 kN, um diâmetro dos pratos de 15 cm e correspondentes LVDT.



Figura 2.8 Ensaio de módulo de elasticidade estático.

Ao contrário do que é indicado na norma em que o módulo de elasticidade é calculado através da divisão entre a variação da tensão e a variação da deformação, o módulo de elasticidade foi estimado por regressão estatística a partir do valor obtido no tramo linear da fase de carga (média de valores em quatro ciclos de carga-descarga) (Figura 2.9).

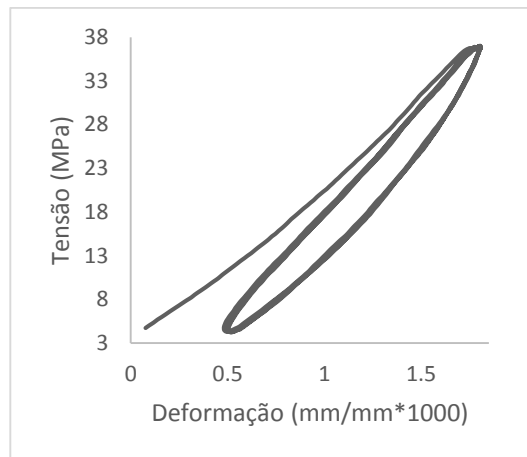


Figura 2.9 Exemplo de gráfico obtido após o ensaio do módulo de elasticidade (provete 22.1.4 saturado).

2.3 Tratamento estatístico de dados

Nos capítulos seguintes são apresentados vários parâmetros, diagramas e testes estatísticos que são aqui brevemente explicados.

Em estudos estatísticos, o termo "amostra" refere-se ao conjunto de resultados (que constituem uma amostra da população). Para evitar confusões com o significado mais comum em estudos de Geologia, será sempre utilizada a expressão "amostra estatística". Nesta dissertação são apresentadas várias medidas estatísticas univariáveis e foram realizados estudos de correlação entre variáveis, assim como de comparação entre conjuntos de valores. Os parâmetros, testes e alguns tipos de diagramas usados em estudos estatísticos (histograma, diagrama de caixa-de-bigodes e gráfico de ajuste à distribuição normal) foram obtidos com o programa PAST de Øyvind Hammer do Museu de História Natural da Universidade de Oslo (disponível gratuitamente em <https://folk.uio.no/ohammer/past/>) e cujos princípios estão descritos em Hammer *et al.* (2001). Os parâmetros e testes estão explicados no manual do PAST e informações estatísticas adicionais podem ser encontradas em textos de estatística (como por exemplo Maroco, 2010).

2.3.1 Estatística descritiva

Serão apresentados vários estimadores de localização: média aritmética (referida simplesmente como média), mediana e média geométrica (média dos logaritmos dos valores).

Para parâmetros em que todos os valores são positivos, a média aritmética apresentará valores sempre iguais ou superiores aos da média geométrica (Lin, 2015) enquanto que a relação entre a média e a mediana poderá ser mais variável uma vez que a média é mais sensível à existência de valores mais extremos enquanto que a mediana é um estimador mais robusto.

Em termos de avaliação da dispersão é apresentado o desvio-padrão e o coeficiente de dispersão (desvio-padrão/média). Os valores dos quartis (1º quartil, Q1, percentil 25, e terceiro quartil, Q3, percentil 75) são medidas que permitem também uma avaliação da dispersão.

A medida de assimetria permite avaliar se o conjunto de valores tem uma distribuição simétrica em torno da média (assimetria igual a zero), se tem uma cauda pesada para os valores mais baixos (assimetria negativa) ou se tem uma cauda pesada para os valores mais elevados (assimetria positiva).

A curtose avalia a forma da distribuição dos valores, nomeadamente a importância das caudas e portanto a possível presença de valores anómalos ("outliers"), sendo que existem testes de deteção destes valores anómalos baseados nos resultados da curtose mesmo para amostras estatísticas pequenas (Livesey, 2007). Existem duas fórmulas principais para calcular a curtose. Os valores calculados pelo PAST correspondem à curtose "em excesso", existindo particular interesse nos valores elevados de curtose, uma vez que podem indicar a presença de valores anómalos.

O tratamento diagramático univariável incluiu gráficos de tipo histograma, diagrama de caixa-de-bigodes e gráfico de probabilidade de ajuste à distribuição normal. A elaboração de histogramas é bastante comum (e pouco relevante no contexto do presente estudo) mas em relação aos outros diagramas poderá ser conveniente acrescentar alguns comentários.

Os gráficos de caixa-de-bigodes podem ter uma dupla funcionalidade. Permitem a comparação visual de vários conjuntos de resultados. Adicionalmente, podem ser utilizados para a deteção de potenciais valores anómalos ("outliers"), ainda que não constituam um teste estatístico para deteção dos mesmos uma vez que não atribuem um nível de significância aos resultados assinalados como potenciais valores anómalos (por isso mesmo poderão ser incluídos na estatística descritiva).

O gráfico de caixa-de-bigodes utilizado nesta dissertação segue o formato clássico para deteção de potenciais "outliers", com uma caixa cujos limites correspondem ao primeiro e terceiro quartil (Q1, percentil 25, e Q3, percentil 75) e uma linha dentro da caixa que assinala a mediana. A diferença entre o primeiro e terceiro quartil (Q3-Q1) será utilizada para definir os

potenciais "outliers". Serão considerados "outliers" moderados os valores que se afastam dos limites da caixa (primeiro e terceiro quartil) mais do que $1,5 \times (Q3 - Q1)$, e os que se afastem mais do que $3 \times (Q3 - Q1)$ serão considerados "outliers" severos. Este gráfico inclui ainda linhas (os chamados "bigodes" ou "whiskers" no original) a partir do primeiro e terceiro quartil que vão até aos valores mais próximos dos quartis que não são considerados "outliers" (isto é que não excedem os limites acima referidos).

A distribuição normal é a distribuição estatística mais comumente considerada e muitos testes estatísticos admitem que os dados avaliados seguem uma distribuição normal. O ajuste dos elementos da amostra estatística à distribuição normal pode ser avaliado por testes estatísticos, existindo diversas propostas para esse fim. Mas também é possível avaliar o ajuste dos vários valores à distribuição normal através de gráficos de probabilidade em que os valores obtidos são projetados com os valores das coordenadas que seriam obtidas para uma distribuição normal. Um conjunto de valores que segue uma distribuição normal tende a projetar-se numa linha reta neste tipo de gráfico. Este procedimento tem a vantagem de permitir avaliar o desvio de valores em relação à distribuição normal (por, por exemplo, serem valores anómalos ou por a amostra estatística conter elementos de populações com parâmetros estatísticos diferentes). Poderá ser discutível incluir este tipo de diagrama na estatística descritiva mas estes diagramas serão aqui avaliados visualmente, sem realização de testes estatísticos.

2.3.2 Testes estatísticos

O valor p ("p-value" em Inglês), referido por vezes como nível de significância estatística, é um conceito amplamente utilizado mas sujeito a uma extensa polémica. Por isso, seguirei aqui as noções apresentadas num documento formal da ASA - "American Statistical Association" (Wasserstein & Lazar, 2016) sobre o assunto. Assim, o valor p corresponde à probabilidade de uma determinada medida estatística de um conjunto de dados apresentar o valor observado ou um valor mais extremo no contexto de um modelo estatístico. O mais comum é admitir uma "hipótese nula" que postula a ausência de um efeito nos dados observados (pelo que valores baixos deste valor p podem colocar em causa a hipótese nula). Frequentemente tem sido utilizado um critério para rejeição da hipótese nula baseado num limite de p previamente definido (isto é, definido antes da realização do ensaio), sendo o valor de 0,05 (5% ou 1 em 20) o mais comum, valor este que é utilizado como indicador de significância estatística (no caso

indicado quando $p < 0,05$). Todavia, esta opção é fortemente criticada pelo documento da ASA (Wasserstein & Lazar, 2016) que referem mesmo que esta prática "leads to considerable distortion of the scientific process" e estes autores recomendam a apresentação dos resultados nos resultados do valor p , opção que foi seguida nos estudos estatísticos realizados nesta dissertação. De referir, entre muitos dos problemas associados com a utilização de $p < 0,05$ como teste de significância, que a utilização de repetidos testes estatísticos com um determinado conjunto de dados aumenta a probabilidade de ocorrência desta condição. Num teste simples (elaborado totalmente com freeware), criaram-se 10 conjuntos de 20 valores aleatórios com a função ALEATÓRIOENTRE(0;100) do LibreOffice. O cálculo dos coeficientes de correlação (que irão ser apresentados mais abaixo) de Pearson ou de Spearman entre esses conjuntos aleatórios produziu resultados com $p < 0,05$, isto é, correlação estatisticamente significativa a partir de dados aleatórios, para dois valores do coeficiente de Pearson e para um valor do coeficiente de Spearman (é preciso salientar que este resultado não constitui por si uma evidência a favor do coeficiente de Spearman em relação ao de Pearson uma vez que outras simulações com outros conjuntos de dados aleatórios podem produzir relações diferentes). Adicionalmente, este problema (obtenção de $p < 0,05$) aumenta com o aumento do número de dados (uma vez que o resultado necessário para obter $p < 0,05$ diminui). Por exemplo, para uma simulação com 10 conjuntos de 100 valores aleatórios foram obtidos 5 resultados de coeficiente de Pearson com $p < 0,05$ (para este conjunto de dados estatísticos não foi obtido nenhum resultado com $p < 0,05$ para o coeficiente de Spearman mas será importante salientar novamente que este tipo de exercício pretende ilustrar os problemas com utilizar um limite para o valor p e não fazer uma avaliação comparativa destes coeficientes de correlação).

Quando um determinado teste estatístico é repetido em conjuntos de valores do mesmo estudo (por exemplo, quando são feitas comparações entre vários pares de amostras estatísticas), aumenta portanto o risco do erro de tipo I (rejeitar a hipótese nula quando a mesma é correta). Nesta situação (realização de vários testes estatísticos no mesmo conjunto de dados), a desigualdade de Bonferroni indica que o valor de p de cada teste será menor ou igual que o valor determinado dividido pelo número de testes realizados. Desta forma, a correção de Bonferroni consiste em multiplicar os valores de p obtidos pelo número de testes, fornecendo uma perspetiva mais conservadora (no sentido de evitar o efeito designado como "inflação do erro de tipo I").

Os testes estatísticos podem ser considerados paramétricos (isto é baseados num modelo de uma determinada distribuição estatística e que utilizam os parâmetros dessa distribuição, sendo o caso mais comum a distribuição normal) ou não paramétricos (isto é que não assumem uma determinada distribuição). Nesta dissertação serão utilizados o teste paramétrico de Student (para comparação de amostras) e o coeficiente de correlação paramétrico de Pearson (relação linear entre duas variáveis), assim como os testes não paramétricos univariáveis de Wilcoxon, de Mann-Whitney e de Kolmogorov-Smirnov e o coeficiente de correlação de Spearman para avaliar a relação entre duas variáveis.

Nesta dissertação foram feitas comparações de um conjunto de resultados (amostra estatística) com uma determinada distribuição teórica. Foram também feitos testes de comparação de duas amostras estatísticas que podem enquadrar-se num dos seguintes casos: amostras independentes (não há uma relação direta entre os membros de cada amostra estatística) e amostras emparelhadas, que corresponde a situações como, por exemplo, são realizados diferentes medições nos mesmos objetos (no caso da presente dissertação, corresponderá a diferentes ensaios nos mesmos provetes). As relações de variância são diferentes e conseqüentemente os testes estatísticos a utilizar são diferentes.

Seguidamente, são apresentadas algumas informações sobre os testes estatísticos realizados.

O teste t de Student foi aplicado nesta dissertação em três situações: comparação da média de uma amostra estatística com um determinado valor, comparação das médias de duas amostras estatísticas independentes e comparação das médias de duas amostras estatísticas emparelhadas. Este teste assume uma distribuição normal dos valores de uma variável aleatória e baseia-se na média, desvio-padrão e tamanho (número de elementos, "n") da amostra estatística, por comparação da média da mesma com um valor de referência para a média utilizando a chamada lei de Student com um número de graus de liberdade igual a "n - 1". As comparações de duas amostras estatísticas baseiam-se em adaptações destes princípios para a diferença entre as médias: se as amostras forem da mesma população (hipótese nula) a diferença entre as amostras deverá ser igual a zero e avalia-se a hipótese do desvio em relação a esse valor.

O teste de Wilcoxon foi utilizado para a comparação dos resultados de uma amostra estatística em relação a um valor hipotético de referência e para a comparação de duas amostras estatísticas emparelhadas tendo como hipótese nula que as diferenças serão iguais a

zero. Baseia-se na ordenação dos valores das diferenças em relação ao valor hipotético no caso de uma amostra estatística ou entre as duas medições no mesmo elemento no caso da comparação de amostras estatísticas emparelhadas.

Os testes não paramétricos de Mann-Whitney e de Kolmogorov-Smirnov permitem comparar duas amostras estatísticas independentes, avaliando a hipótese de as duas amostras estatísticas serem provenientes da mesma população (hipótese nula), sendo baseados ambos na ordenação dos valores considerados.

A correlação linear entre duas variáveis é comumente avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson (o coeficiente fornecido pelos programas de tipo folha de cálculo como o Excel ou o LibreOffice), que pressupõe a distribuição normal de cada uma das variáveis e que permite avaliar o ajuste em relação à correlação linear (sendo a hipótese nula que não há correlação). Todavia, em algumas situações a relação entre as variáveis pode definir uma tendência para uma associação positiva ou negativa sem que corresponda a uma relação linear ou sequer a uma relação que possa ser descrita por uma função bem definida (e os critérios de distribuição normal podem não ser verificados). O coeficiente de correlação ordinal (não paramétrico) de Spearman avalia a correlação entre as posições relativas dos valores de cada variável no seu conjunto de dados e, tal como o de Pearson, apresenta valores entre -1 e 1. Por exemplo, para dois conjuntos de valores X e Y , será obtido um coeficiente de correlação de Spearman igual a 1 para um conjunto de valores em que o valor mais elevado de Y está associado com o valor mais elevado de X , o segundo valor mais elevado de Y está associado com o segundo valor mais elevado de X e assim sucessivamente (independentemente dos valores em concreto, podendo ser utilizado para variáveis expressas numa escala ordinal).

2.3.3 Análise de "clusters"

A análise de grupos ou de "clusters", também referida como análise de classificação ou taxonomia numérica, é um procedimento multivariável que visa agrupar objetos em "clusters" com base em informações de diversas propriedades dos mesmos de forma a obter uma elevada homogeneidade entre membros de um determinado "cluster" e uma elevada separação entre os diferentes "clusters". Existem várias opções possíveis, e nesta dissertação utilizou-se um procedimento hierárquico, que tenta construir uma estrutura tipo árvore (dendrograma), opção que evita a fixação de um número a-priori de "clusters". Assim, para 'n' objetos considerados, os

procedimentos hierárquicos definem 'n - 1' "clusters" em diferentes níveis de classificação. A distribuição dos objetos pelos clusters baseia-se numa medida de distância, que é vista como indicações de semelhança ou dissemelhança. A separação dos diferentes "clusters" é observada no dendrograma pelos valores de distância (quanto maior a distância maior a separação entre os "clusters").

Para evitar que a análise seja enviesada por efeitos de escala ou de diferentes variâncias, os resultados das diferentes variáveis consideradas foram normalizados subtraindo a cada valor a média da variável e dividindo o resultado desta subtração pelo desvio-padrão. Desta forma obtém-se para cada variável um conjunto de resultados com média igual a zero e desvio-padrão igual a 1. De entre os vários procedimentos (algoritmos) de classificação disponíveis no PAST, foi utilizado o de Ward, que minimiza o aumento da variância dentro de cada "cluster". Para este método, o PAST utiliza como medida de semelhança a distância euclidiana (raiz quadrada do somatório dos quadrados das diferenças em cada variável).

3. Estudos anteriores

As rochas são um material complexo, variando amplamente as suas propriedades. Segundo Nasser *et al.* (2002) das três categorias genéricas de rochas, as rochas metamórficas apresentam o maior grau de anisotropia.

A maioria das pesquisas concentra-se no efeito de um único fator em vez de um conjunto de múltiplos fatores, como a pressão, a água e a xistosidade (Xiaomeng *et al.*, 2016).

Marini & Bellopede (2010) afirmam que a presença de água, ligada às propriedades intrínsecas da pedra (composição mineralógica, estrutura, textura, *etc.*) e às condições de uso (sistemas de ancoragem, parâmetros climáticos, *etc.*) são a principal causa da decadência da pedra. No entanto, a presença de água sozinha na pedra pode causar uma diminuição da resistência mecânica. Os métodos destrutivos dão valores de resistência mais baixos para espécimes saturados do que para os secos, confirmando assim a fraqueza da pedra devido à água interna. No caso da velocidade de propagação de ultrassons em condições húmidas, estas têm um desvio padrão maior e uma tendência diferente do que em condições secas, provavelmente devido ao aumento da porosidade (mesmo que muito limitado) e como consequência da presença de maior quantidade de água.

3.1 Classificações baseadas em propriedades físicas

Na Tabela 3.1 serão apresentadas classificações de acordo com as propriedades não destrutivas escalares (porosidade e massa volúmica).

Tabela 3.1 Categorização das propriedades ρ_{sec} : massa volúmica/densidade seco e p : porosidade das rochas. ⁽¹⁾ Documento da Commission of Engineering Geological Mapping de 1979 (citado em Bell 2007), ^{(2), (3)} Kobranova (1989)*.

Termo	ρ_{sec} (Mg/m ³)	³ p(%)
Extremamente baixo	-	[0 - 2] ⁽³⁾
Muito baixo	< 1,8 ⁽¹⁾	< 1 ⁽¹⁾ < 5 ⁽²⁾ [2 - 5] ⁽³⁾
Baixo	[1,8 - 2,2] ⁽¹⁾	[1 - 5] ⁽¹⁾ [5 - 10] ^(2,3)
Mais baixo	-	[10 - 15] ⁽³⁾
Intermédio	[2,2 - 2,55] ⁽¹⁾	[5 - 15] ⁽¹⁾ [10 - 15] ⁽²⁾ [15 - 20] ⁽³⁾
	-	[20 - 30] ⁽³⁾
Mais alto	-	[30 - 40] ⁽³⁾
Alto	[2,55 - 2,75] ⁽¹⁾	[15 - 30] ⁽¹⁾
		[10 - 15] ⁽²⁾
		[40 - 60] ⁽³⁾
Muito alto	> 2,75 ⁽¹⁾	> 30 ⁽¹⁾ > 20 ⁽²⁾ [60 - 80] ⁽³⁾
Extremamente alto	-	[80 - 100] ⁽³⁾

*Este autor apresenta duas tabelas de classificação.

Investigações laboratoriais mostram que a velocidade de propagação das vibrações elásticas, o módulo de elasticidade e outras características são os mais afetados pela porosidade das rochas (Kobranova, 1989). Os efeitos de saturação de fluido na velocidade da onda são muito maiores em rochas de baixa porosidade do que de alta porosidade (Kahraman, 2007).

Kahraman (2007) verificou que, enquanto a variação da velocidade das ondas é grande para as rochas com um valor de porosidade inferior a 1%, este apresenta-se pequeno para as rochas com um valor de porosidade superior a 1%.

Segundo Kobranova (1989) dado a definição de índice de vazios, quanto maior a densidade do componente sólido da rocha, maior é o módulo de elasticidade.

Segundo González de Vallejo (2004) o valor típico de porosidade para xistos é de 3%.

Há uma série de fatores que influenciam a velocidade de propagação do som nas rochas. Os fatores importantes são o tipo de rocha, textura, densidade, tamanho e forma do grão, porosidade, anisotropia, teor de água, stresse e temperatura. Além desses fatores, as propriedades das rochas também influenciam a velocidade de propagação do som. As zonas de meteorização e alteração, os planos de xistosidade e as propriedades das articulações (rugosidade, material de preenchimento, água, direção e inclinação, etc.) têm influência importante na velocidade do som (Kahraman, 2007). Na Tabela 3.2 serão apresentadas classificações da velocidade das ondas.

Tabela 3.2 Classificação de pedras naturais com base na velocidade da onda P. Documento da Commission of Engineering Geological Mapping de 1979 (citado em Yagiz, 2010).

v (km/s)	Descrição
< 2,5	Muito baixo
[2,5 – 3,5]	Baixo
[3,5 – 4,0]	Moderado
[4,0 – 5,0]	Alto
> 5,0	Muito alto

Segundo Kobranova (1989) a uma temperatura de 20 °C e pressão 0,1 MPa a velocidade das ondas na água é 1500 m/s e a velocidade das ondas no ar é 330 m/s. O que poderá ser o motivo do teor de água poder originar valores de velocidade de ultrassons ainda maiores que os obtidos em condições secas, e às vezes até superiores a 50% (Marini & Bellopede, 2010).

Segundo estudos realizados por Kahraman (2007) existe uma diminuição acentuada na velocidade das ondas à medida que a saturação é reduzida de 100% para aproximadamente 70%. Entre 70% e 10% a velocidade das ondas é quase constante e abaixo de 10% a velocidade é inconstante. A velocidade nas rochas saturadas é dependente da relação entre a velocidade da onda da rocha e no fluido presente nos poros. Isto indica que, em geral, o peso e a velocidade aumentam com o aumento do tempo de saturação.

Segundo Bell (2007) a velocidade das ondas nos xistos encontra-se no intervalo entre 3,5 a 5,7 km/s. Mas segundo Mishra & Basu (2013) a velocidade de propagação das ondas poderá não ser um índice competente em xistos ao contrário de outros índices, como a força da carga pontual, que irá ser falada mais a frente, que se revela uma melhor opção.

Em termos de módulo de elasticidade as propostas de classificação das rochas são menos comuns. Existe uma proposta de Carmichael (1989) que divide as rochas em três classes de acordo com a compressibilidade e com o valor do módulo tangente, sendo a categoria correspondente aos valores de compressibilidade média situada entre 41 GPa e 83 GPa. Ainda em relação a este assunto, Deere & Miller (1966), propõe uma divisão das rochas de acordo com a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial, definindo-se três grupos conforme os valores desse quociente: elevado [> 500], médio [$200 - 500$] e baixo [< 200].

Segundo Kobranova (1989) os valores de velocidade de propagação das ondas elásticas, para as rochas metamórficas é $V = 1.45 - 7.6$ km/s e do módulo de Young é $E = (0.05 \times 1.91) \times 10^{11}$ Pa.

Segundo Xiaomeng *et al.* (2016) a força de pico e o módulo de elasticidade em estado saturado é inferior ao do estado natural. E Bell (2007) afirma que o módulo de elasticidade aumenta com a profundidade.

Segundo estudos realizados por Xiaomeng *et al.* (2016) a água enfraquece o índice mecânico do xisto, mas aumenta a anisotropia. Com o aumento do teor de água, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das amostras mostram uma tendência de redução significativa. O módulo elástico diminui entre 16% - 76% sob diferentes ângulos de xistosidade. A força de compressão diminui entre 20% - 70% em diferentes ângulos de xistosidade. Além disso, o efeito decrescente da deformação e da resistência à compressão são mais significativos quando a xistosidade foi $\alpha = 45^\circ$, seguida de $\alpha = 90^\circ$. Concluiu ainda que tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão são máximos quando a xistosidade é $\alpha = 0^\circ$ e o mínimo quando a xistosidade é $\alpha = 45^\circ$.

O uso de relações padrão entre o índice de carga pontual, força de compressão uniaxial e valores de módulo elástico é comum ser usado na comunidade de engenharia geotécnica (Look & Griffiths, 2001).

Os resultados relacionados com a resistência mecânica são aqueles que apresentam um maior número de propostas de classificação das rochas (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 Categorização das propriedades carga pontual, $I_p(50)$, e compressão uniaxial, R , das rochas. ⁽¹⁾ Hoek, 2007; ⁽²⁾ Documento da IAEG de 1979 (citado em Bell, 2007); ⁽³⁾ Documento da Geological Society de 1979 (citado em Bell, 2007); ⁽⁴⁾ Documento de Franklin & Broch de 1972 (citado em Bell, 2007); ⁽⁵⁾ Carmichael, 1989 e ⁽⁶⁾ Documento da ISRM de 1979 (citado em Bell, 2007).

Termo	R (MPa)	$I_p(50)$ (MPa)
Extremamente forte/Resistência extremamente alta	> 250 ⁽¹⁾ > 230 ⁽²⁾ > 200 ⁽³⁾ > 160 ⁽⁴⁾	> 10 ^(1,4)
Muito forte/Resistência muito alta	[100 - 250] ⁽¹⁾ [120 - 230] ⁽²⁾ [100 - 200] ⁽³⁾ [50 - 160] ⁽⁴⁾ > 221 ⁽⁵⁾ > 200 ⁽⁶⁾	[4 - 10] ⁽¹⁾ [3 - 10] ⁽⁴⁾
Forte/Resistência alta	[50 - 100] ⁽¹⁾ [50 - 120] ⁽²⁾ [50 - 100] ⁽³⁾ [15 - 50] ⁽⁴⁾ [110 - 221] ⁽⁵⁾ [60 - 20] ⁽⁶⁾	[2 - 4] ⁽¹⁾ [1 - 3] ⁽⁴⁾
Médio/Resistência média	[25 - 50] ⁽¹⁾ [15 - 50] ⁽²⁾ [12,5 - 50] ⁽³⁾ [5 - 15] ⁽⁴⁾ [55 - 110] ⁽⁵⁾ [10 - 60] ⁽⁶⁾	[1 - 2] ⁽¹⁾ [0,3 - 1] ⁽⁴⁾
Fraco/Resistência baixa	[5 - 25] ⁽¹⁾ < 15 ⁽²⁾ [5 - 12,5] ⁽³⁾ [1,6 - 5] ⁽⁴⁾ [28 - 55] ⁽⁵⁾ [6 - 10] ⁽⁶⁾	[0,1 - 0,3] ⁽⁴⁾
Muito fraco/Resistência muito baixa	[1 - 5] ⁽¹⁾ [1,25 - 5] ⁽³⁾ [0,5 - 1,6] ⁽⁴⁾ < 28 ⁽⁵⁾ < 6 ⁽⁶⁾	[0,03 - 0,1] ⁽⁴⁾
Extremamente fraco/Resistência extremamente baixa	[0,25 - 1] ⁽¹⁾ < 1,25 ⁽³⁾ < 0,5 ⁽⁴⁾	< 0,03 ⁽⁴⁾

Segundo Look & Griffiths (2001) normalmente, a carga pontual está relacionada com a força de compressão uniaxial da rocha por um fator de multiplicação de 24 e a força axial média pode ser um fator de 4,4 vezes maior do que a direção diametral mais fraca. Todavia na classificação *RMR* de Bieniawski (1989) o fator indicado para a relação da força de carga pontual e compressão uniaxial é de 25.

Quando Mishra & Basu (2013) projetaram a força de compressão uniaxial contra a carga pontual verificaram que existem relações exponenciais visíveis no caso do xisto. Já a correlação entre a força de compressão uniaxial e a velocidade das ondas, é curvilínea. No caso da força de compressão uniaxial vs. porosidade mostra relacionamento curvilíneo negativo. Quando a força de compressão uniaxial foi projetada contra a densidade, surgiu uma correlação curvilínea positiva.

3.2 Tratamento de dados de estudos anteriores

No contexto desta avaliação de resultados anteriores, são também apresentados resultados de estudos anteriores em xistos.

Os autores Noronha *et al.* (2011); Barros *et al.* (2015); Rezende (2016); Carmichael (1989); Bell (2007); Mishra & Basu (2013); Nasser *et al.* (2002) e Kobranova (1989) apresentam nos seus trabalhos valores específicos dos xistos que foram sujeitos ao estudo de vários parâmetros (Tabela 3.4). Para o módulo de elasticidade foram encontrados poucos resultados. No caso de Kobranova (1989) os valores aparecem sob a forma de intervalo correspondente a vários tipos de filitos, logo não é possível fazer gráficos para analisar os resultados. Este autor apresenta também dados de módulo de elasticidade para xistos que estão dentro do intervalo de valores indicados pelo mesmo autor para os filitos. Em González de Vallejo (2004) também há referência a valores de módulo de elasticidade em xistos (entre 5,9 GPa e 38 GPa) e micaxistos (1,0 GPa a 19,6 GPa) e a resultados apresentados por Bieniawski numa publicação de 1984 relativos a filitos (46 GPa a 69 GPa). Assim sendo, dos dados compilados só os resultados de Nasser *et al.* (2002) poderiam ser comparados com outras propriedades e optou-se por não fazer gráficos para esta propriedade.

Tabela 3.4 Resultados de estudos de propriedades físicas em rochas metassedimentares silicatadas. ρ_s : massa volúmica/densidade aparente; p_s : porosidade aberta; p_a : porosidade aparente; A_w : absorção de água à pressão atmosférica; v : velocidade de propagação dos ultrassons; $I_p(50)$: carga pontual; R : compressão uniaxial; E : módulo de elasticidade.

Autor		Noronha <i>et al.</i> (2011)	Barros <i>et al.</i> (2015)	Rezende (2016)	Carmichael (1989)	Bell (2007)	Mishra & Basu (2013)	Nasseri <i>et al.</i> (2002)	Kobranova (1989)
Litologia		Formações Xistentas	Xistos	Anfibolitos e Xistos	Filitos e Xistos	Xistos	Xistos	Xistos	Filitos
Nº Resultados		17	10	6	15	2	20	4	
ρ_s (kg/m ³)	Min.	2510	2530	-	2180	-	2740	2630	-
	Máx.	2880	2820	-	3240	-	2910	2880	-
p_s (%)	Min.	0,30	1,60	-	-	-	0,20	0,26	0,5
	Máx.	9,30	10,00	-	-	-	0,54	1,70	0,6
p_a (%)	Min.	-	-	0,21	-	-	-	-	-
	Máx.	-	-	0,65	-	-	-	-	-
A_w (%)	Min.	0,10	0,57	-	-	-	-	-	-
	Máx.	2,30	3,55	-	-	-	-	-	-
v (m/s)	Min.	-	626,00	5313,54	2630	-	5116	-	-
	Máx.	-	5228,15	6026,10	7200	-	6250	-	-
$I_p(50)$ (MPa)	Min.	-	0,50	0,93	-	5,70	1,15	3,8	-
	Máx.	-	5,00	9,04	-	7,20	7,42	15,0	-
R (MPa)	Min.	31,0	29,70	94,50	6,69	71,9	21,36	50,0	-
	Máx.	221,0	151,90	222,53	269,00	82,7	95,14	190,0	-
E (GPa)	Min.	-	-	-	-	-	-	4	9
	Máx.	-	-	-	-	-	-	20	70

Tentou-se o estudo de potenciais correlações considerando conjuntos globais dos resultados que estes autores estudaram anteriormente. Na Figura 3.1 apresentam-se os gráficos de dispersão entre propriedades não destrutivas.

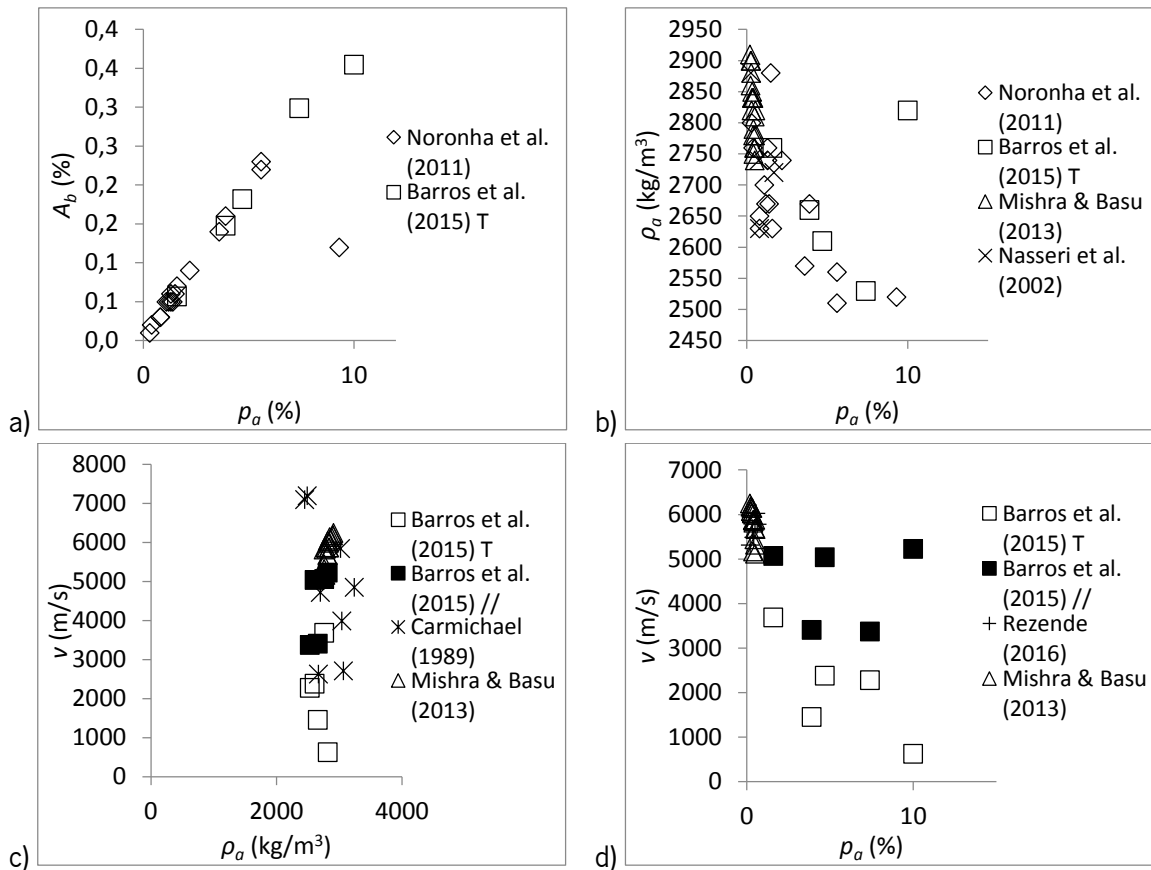


Figura 3.1 Gráficos de dispersão de resultados de estudos anteriores apresentados na Tabela 3.4 em propriedades não destrutivas: a) absorção de água à pressão atmosférica contra porosidade aberta; b) massa volúmica aparente contra porosidade aberta; c) velocidade de propagação de ondas contra massa volúmica aparente; d) velocidade de propagação de ondas contra porosidade aberta.

Para rochas com valores semelhantes de massa volúmica aparente, é possível demonstrar (Equação 3.1) que a absorção de água à pressão atmosférica é igual à porosidade aberta dividida pela massa volúmica aparente (expressa sob a forma de g/cm^3 , uma vez que nestas unidades admite-se para a água destilada uma massa volúmica igual a $1,0 \text{ g/cm}^3$). Para as duas publicações que apresentam resultados de absorção de água, observa-se (Figura 3.1a) essa boa correlação linear entre porosidade aberta e a absorção de água à pressão atmosférica (nomeadamente uma vez que a massa volúmica dos provetes considerados tem um pequeno intervalo de variação), tendência bem definida que permite definir um ponto que apresenta um comportamento anómalo. A absorção de água não será considerada em termos de avaliação de relações entre propriedades uma vez que só foram recolhidas informações sobre dois conjuntos de dados (todos os gráficos seguidamente apresentados consideram pelo menos três) e por poder considerar-se algo redundante em relação ao estudo das relações com a porosidade.

$$A_b (\%) = \rho_a (\%) \rho_w (\text{g/cm}^3) / \rho_a (\text{g/cm}^3) \quad \text{Equação 3.1}$$

A_b : absorção de água à pressão atmosférica;

ρ_a : porosidade aberta;

ρ_w : massa volúmica da água;

ρ_a : massa volúmica aparente.

De acordo com os procedimentos utilizados para a determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta, seria igualmente esperado obter uma correlação linear entre estes dois parâmetros num conjunto de provetes que tenham um esqueleto sólido com a mesma massa volúmica, de acordo com a Equação 3.2. Na projeção dos valores recolhidos para estas propriedades (Figura 3.1b) não se observa uma tendência linear (o que poderá resultar de variações na massa volúmica dos constituintes das rochas) mas observa-se uma clara tendência geral de diminuição da massa volúmica aparente com o aumento da porosidade (o coeficiente de correlação de Spearman obtido corresponde a um $\rho = 0,0000000003$), identificando-se também um resultado anómalo (em relação a esta tendência geral).

$$\rho_a = \rho_s - (\rho_s \rho_a (\%) / 100) \quad \text{Equação 3.2}$$

ρ_a : massa volúmica aparente;

ρ_s : massa volúmica do sólido;

ρ_a : porosidade aberta

Já nas correlações da velocidade de propagação das ondas com a massa volúmica aparente (Figura 3.1c) e com a porosidade aberta (Figura 3.1d) observa-se uma maior dispersão ainda que no caso da relação com a porosidade aberta exista uma certa tendência para a correlação negativa, nomeadamente se no caso dos resultados de Barros *et al.* (2015) forem considerados unicamente os resultados perpendiculares à xistosidade (mais influenciados pela porosidade).

Na Figura 3.2 apresentam-se os gráficos de dispersão dos resultados do ensaio de carga pontual contra os resultados de testes não destrutivos. As relações são menos claras mas mesmo assim parece existir uma certa tendência para o aumento dos valores obtidos no ensaio de carga pontual com o aumento da massa volúmica e com a diminuição da porosidade.

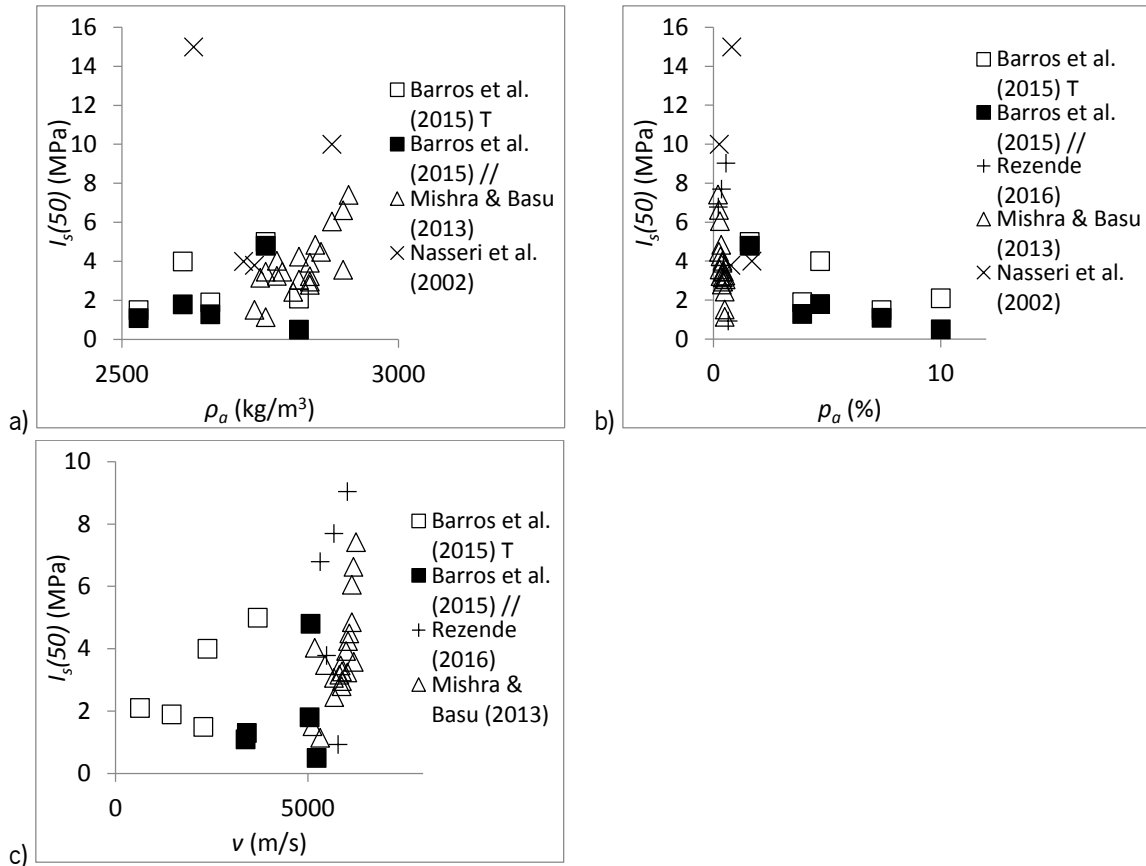


Figura 3.2 Gráficos de dispersão dos resultados apresentados na Tabela 3.4 do $I_s(50)$ obtido no ensaio de carga pontual contra resultados de testes não destrutivos: a) massa volúmica aparente; b) porosidade aberta; c) velocidade de propagação de ondas.

Na Figura 3.3 é possível observar a relação entre a resistência à compressão uniaxial e as outras propriedades consideradas. Estes gráficos apresentam uma marcada dispersão sem definição de tendências de correlação nesses conjuntos. No caso específico do quociente entre a compressão uniaxial e a carga pontual, $R / I_s(50)$, os resultados recolhidos mostram uma enorme variação (entre 8 e 172), sendo que, todavia, a média (arredondada às unidades) fornece o valor indicado na classificação *RMR* (Bieniawski, 1989) para o quociente entre os valores destas propriedades (25). Já a mediana deste quociente forneceu um resultado igual a 14, a média geométrica obtida foi igual 18 e a assimetria igual a 4; resultados que indicam a presença de uma cauda longa nos valores mais elevados. A curtose apresenta um resultado igual a 20, sugerindo a presença de valores anómalos. O resultado da mediana poderá merecer especial atenção uma vez que é claramente inferior ao valor referido na classificação *RMR* (25).

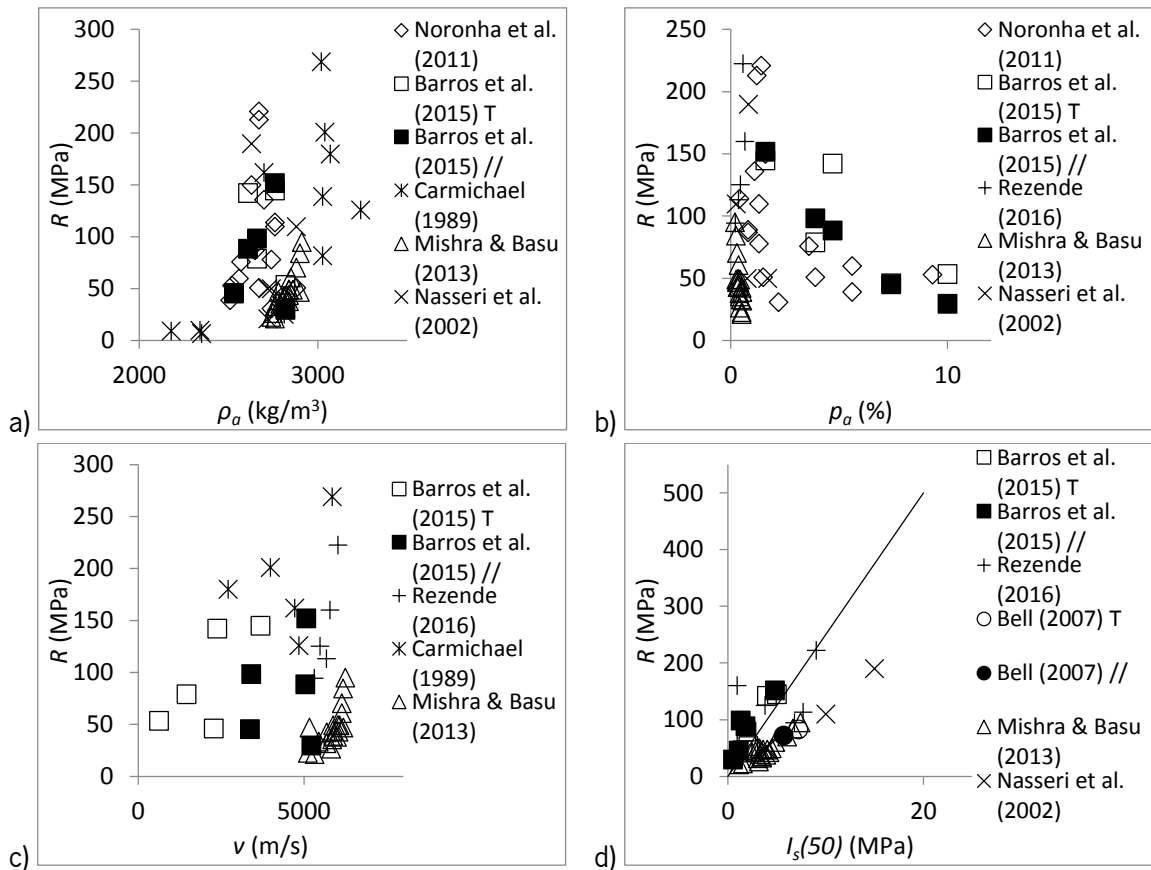


Figura 3.3 Gráficos de dispersão dos resultados apresentados na Tabela 3.4 de resistência à compressão em xistos e as outras propriedades consideradas: a) massa volúmica aparente; b) porosidade aberta; c) velocidade de propagação de ondas; d) $I_s(50)$ obtido no ensaio de carga pontual (neste último gráfico a reta representada corresponde a $R = 25 I_s(50)$).

O histograma dos valores do quociente entre a resistência uniaxial e o resultado do ensaio de carga pontual mostra que em mais de metade dos resultados compilados (aproximadamente 2/3), a resistência uniaxial obtida foi inferior ao valor que seria calculado a partir dos ensaios de carga pontual e de um fator de conversão igual a 25. O histograma da Figura 3.4 também mostra que a distribuição apresenta-se alongada para os valores mais elevados (o que explica a marcada diferença entre a mediana e a média). De referir por último que o primeiro quartil dos valores de $R / I_s(50)$ no conjunto de resultados recolhidos corresponde a 12 (menos de metade do valor referido). Bieniawski (1989) refere que para valores até 2 MPa no ensaio de carga pontual será preferível utilizar os valores do ensaio de compressão uniaxial (e as tabelas apresentadas indicam uma maior variação do quociente $R / I_s(50)$). Mas como é visível pelo gráfico da Figura 3.3d, só três dos valores que se situam claramente abaixo da linha correspondente a $R / I_s(50) = 25$ apresentam um resultado até 2 MPa no ensaio de carga pontual

e um dos que está claramente abaixo dessa linha é o correspondente ao valor mais elevado encontrado (15 MPa).

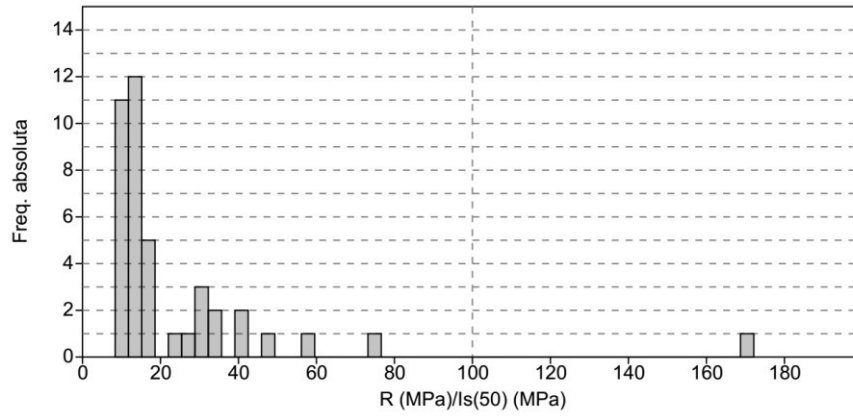


Figura 3.4 Histograma dos valores $R / I_s(50)$ nos resultados compilados em estudos anteriores referidos na Tabela 3.4

4. Resultados

Neste capítulo é apresentado o tratamento dos resultados obtidos dividido por três subcapítulos: análise dos resultados em cada variável, possíveis correlações entre pares de variáveis consideradas. O presente capítulo termina com a comparação dos provetes de diferentes sondagens com base em várias técnicas estatísticas (incluindo multivariáveis) assim como os dados da observação petrográfica.

Em anexo são apresentadas tabelas onde são mencionados todos os resultados obtidos nos ensaios para cada provete (Tabela A.4 - Sondagem 15, Tabela A.5 - Sondagem 21 e Tabela A.6 - Sondagem 22).

4.1 Análise univariada

Os resultados dos ensaios realizados são apresentados na Tabela 4.1 (ensaios não destrutivos dos provetes da sondagem 15), Tabela 4.2 (resultados dos ensaios não destrutivos dos provetes da sondagem 21), Tabela 4.3 (ensaios mecânicos e associados do conjunto de provetes das sondagens 15 e 21) e Tabela 4.4 (resultados dos vários ensaios nos provetes da sondagem 22).

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios não destrutivos dos provetes obtidos a partir dos tarolos da sondagem 15. p_a : porosidade aberta; ρ_a : massa volúmica aparente; ρ_s : massa volúmica do sólido; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à pressão atmosférica. N: número de provetes; Min: mínimo; Máx: máximo; Méd: média; Med: mediana; MG: média geométrica; DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; P25: percentil 25; P75: percentil 75; Assim: assimetria; Curt: curtose.

	p_a (%)	ρ_a (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	v_{sec} (m/s)	v_{sat} (m/s)	A_b (%)
N	25	25	25	25	25	16
Min	0,24	2738	2754	3388	4544	0,11
Máx	0,58	2802	2818	4797	5251	0,23
Méd	0,42	2771	2783	4188	4866	0,15
Med	0,41	2770	2782	4249	4891	0,14
MG	0,41	2771	2783	4169	4863	0,15
DP	0,11	16,16	15,23	391,94	186,74	0,05
CV	25,64	0,58	0,55	9,36	3,84	27,90
P25	0,35	2764	2774	3908	4706	0,11
P75	0,53	2783	2794	4510	5016	0,19
Assim	0,06	-0,02	0,18	-0,53	-0,05	0,68
Curt	-1,07	-0,30	-0,01	-0,80	-0,55	-0,87

Tabela 4.2 Resultados dos ensaios não destrutivos dos provetes obtidos a partir dos tarolos da sondagem 21. p_a : porosidade aberta; ρ_a : massa volúmica aparente; ρ_s : massa volúmica do sólido; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à pressão atmosférica. As etiquetas da primeira coluna tem o mesmo significado que na Tabela 4.1

	p_a (%)	ρ_a (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	v_{sec} (m/s)	v_{sat} (m/s)	A_b (%)
N	20	20	20	20	20	10
Min	0,29	2743	2763	2970	4490	0,09
Máx	0,79	2804	2815	4596	4955	0,21
Méd	0,49	2778	2792	3759	4783	0,17
Med	0,46	2781	2797	3734	4831	0,17
MG	0,47	2778	2792	3741	4781	0,16
DP	0,13	15,48	14,65	382,60	143,40	0,04
CV	26,43	0,56	0,52	10,18	3,00	22,61
P25	0,43	2765	2782	3516	4660	0,15
P75	0,51	2791	2804	3970	4908	0,18
Assim	1,03	-0,52	-0,60	0,55	-0,76	-1,08
Curt	1,00	-0,23	-0,64	1,07	-0,58	1,46

Tabela 4.3 Resultados de ensaios mecânicos e associados do conjunto de provetes das sondagens 15 e 21. E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R : compressão uniaxial; $I_p(50)_A$: índice de carga pontual (ensaio axial); $I_p(50)_D$: índice de carga pontual (ensaio diametral); A_{bE} : absorção depois do módulo de elasticidade. As etiquetas da primeira coluna tem o mesmo significado que na Tabela 4.1

	E_{sec} (GPa)	E_{sat} (GPa)	R (MPa)	$I_p(50)_A$ (MPa)	$I_p(50)_D$ (MPa)	A_{bE} (%)
N	7	7	10	6	7	7
Min	42,0	22,5	65,5	3,1	1,8	0,10
Máx	61,0	53,6	142,0	5,7	3,9	0,23
Méd	52,0	38,9	104,7	4,6	2,4	0,15
Med	56,3	43,8	97,8	4,5	2,0	0,16
MG	51,3	37,1	102,0	4,5	2,3	0,14
DP	8,82	12,70	24,37	0,96	0,74	0,05
CV	16,96	32,59	23,28	20,88	31,25	33,67
P25	43,0	25,0	86,9	4,0	1,9	0,10
P75	59,9	50,7	126,1	5,6	2,6	0,19
Assim	-0,28	-0,28	0,07	-0,50	1,96	0,27
Curt	-2,65	-2,08	-0,95	0,02	4,11	-1,29

Tabela 4.4 Resultados dos ensaios da sondagem 22. p_a : porosidade aberta; ρ_a : massa volúmica aparente; ρ_s : massa volúmica do sólido; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R : compressão uniaxial; $I_p(50)_A$: índice de carga pontual (ensaio axial). As etiquetas da primeira coluna tem o mesmo significado que na Tabela 4.1

	p_a (%)	ρ_a (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	v_{sec} (m/s)	v_{sat} (m/s)	E_{sec} (GPa)	E_{sat} (GPa)	R (MPa)	$I_p(50)_A$ (MPa)
N	24	24	24	24	24	5	5	10	4
Min	0,12	2722	2725	4355	5091	38,4	24,5	73,4	4,4
Máx	0,70	2809	2816	6472	5951	64,4	57,4	221,6	6,4
Méd	0,24	2782	2789	5483	5329	49,1	42,3	111,7	5,6
Med	0,19	2788	2797	5469	5260	47,1	44,8	95,0	5,8
MG	0,21	2782	2789	5451	5324	48,3	40,4	105,1	5,6
DP	0,16	22,87	24,33	596,48	236,80	10,41	13,29	46,27	0,92
CV	66,80	0,82	0,87	10,88	4,44	21,18	31,43	41,41	16,36
P25	0,14	2771	2776	5180	5158	40,04	29,0	82,8	4,7
P75	0,23	2799	2804	5926	5365	59,3	54,3	133,9	6,4
Assim	1,88	-1,28	-1,24	-0,23	1,52	0,75	-0,37	1,79	-1,21
Curt	2,51	1,14	1,01	-0,45	1,46	-0,43	-1,44	3,07	0,76

Os valores encontrados estão dentro dos intervalos dos resultados de estudos anteriores. Como é de esperar para variáveis que só podem assumir valores positivos, os resultados da média geométrica são sempre inferiores aos da média aritmética. A relação entre a média aritmética e a mediana é variável, sendo a primeira umas vezes superior e outras inferior do que a segunda (relação que é acompanhada pelos valores da assimetria).

Os valores de massa volúmica aparente e massa volúmica do sólido são próximos (dado os baixos valores de porosidade), mostrando um intervalo restrito; o conjunto de todos os resultados (massa volúmica aparente e massa volúmica do sólido) varia entre 2722 kg/m³ e 2816 kg/m³, uma diferença inferior a 5%, sendo que quer o mínimo da massa volúmica aparente quer o máximo da massa volúmica do sólido foram obtidos para provetes da sondagem 22. Estes valores de massa volúmica situam-se entre o alto (próximos do limite superior) e o muito alto da classificação referida por Bell (2007).

No caso dos valores de módulo de elasticidade, os resultados mostram um intervalo algo mais largo quer em termos absolutos quer em termos relativos, verificando-se desde já que mínimo, máximo, média, mediana, média geométrica e quartis são sempre inferiores nos provetes saturados do que nos provetes secos, sendo que os resultados obtidos nos provetes estudados situam-se na porção superior do intervalo dos resultados anteriores que foram compilados. O teste de Wilcoxon para duas amostras emparelhadas indica para a diferença entre as medianas dos valores saturados e seco um $p = 0,0005$ (Monte Carlo, $n = 99999$).

Iguais considerações, em termos de intervalo, podem ser feitas em relação aos valores do $I_{(50)}$ obtido nos ensaios de carga pontual. Neste ensaio destaca-se a comparação dos resultados axiais e diametrais em que estes últimos apresentam resultados inferiores nos pontos que caracterizam a distribuição. A comparação dos resultados dos ensaios de carga pontual axial e diametral mostra que este segundo grupo tende a ter resultados inferiores (Figura 4.1). Este gráfico sugere ainda que um dos resultados dos testes diametrais (o mais elevado) poderá ser um valor anómalo moderado. Em termos de parâmetros estatísticos de localização, estes resultados fornecem uma média igual a 4,5 MPa e uma média igual a 4,6 MPa para os testes axiais contra uma mediana igual a 2,0 MPa (menos de metade, portanto) e uma média igual a 2,4 para os testes diametrais. Os testes não paramétricos de Mann-Whitney e de Kolmogorov-Smirnov forneceram (Monte Carlo, 9999 permutações), respetivamente, $p = 0,002$ e $p = 0,009$.

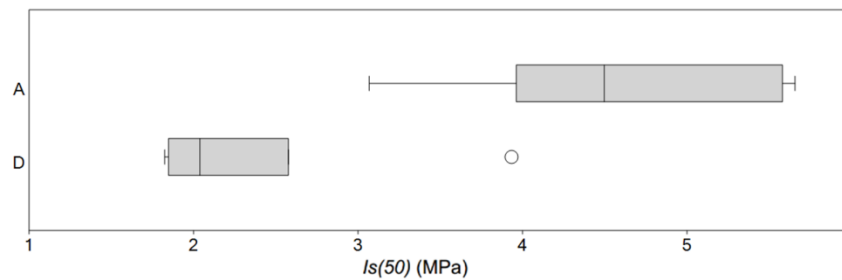


Figura 4.1 Comparação por caixa-de-bigodes de índice de carga pontual em ensaios axiais (A) e diametrais (D).

Os valores de porosidade aberta (e, concomitantemente, os valores de absorção de água, considerando o intervalo estreito de valores de massa volúmica) mostram um pequeno intervalo em termos absolutos e podem considerar-se extremamente baixos ou muito baixos (de acordo com as classificações apresentadas no capítulo anterior) mas apresentam uma significativa variação em termos relativos (o resultado mais elevado, 0,79%, é aproximadamente 6,6 vezes maior que o valor mais baixo, 0,12%).

O intervalo de variação também é significativo no caso dos resultados da resistência à compressão uniaxial, mas os resultados poderiam ser classificados genericamente (em função da classificação adotada) entre altos e extremamente altos, sendo os valores entre o primeiro e terceiro quartil classificados entre altos a muito altos. Pode salientar-se também que o valor de resistência à compressão mais elevado no conjunto de provetes estudados é semelhante ao valor mais elevado dos resultados anteriores que foram compilados. O conjunto dos valores de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas mostram um amplo intervalo que vai dos que seriam considerados baixos a outros que seriam considerados muito elevados (de acordo com a classificação da Commission of Engineering Geological Mapping de 1979 citada em Yagiz, 2010) e os valores entre o primeiro e o terceiro quartis estão dentro do intervalo referido por Bell (2007) para os xistos. Também podem ser apresentadas algumas notas em relação ao tipo de rotura observada. Segundo Loczy & Ladeira (1981) quando se aplica a compressão num corpo cilíndrico (Figura 4.2) desenvolvem-se numerosas superfícies de cisalhamento que podem ser agrupadas. Tais superfícies de cisalhamento aumentam em número e dimensão à medida que a tensão compressiva aumenta até ocorrer a rotura sob a forma de superfícies de fraturas longitudinais (na direção principal de tensão) ou de superfícies de cisalhamento inclinadas (com um ângulo inferior a 45° relativamente à direção principal de tensão).



Figura 4.2 Amostra (22.1.1) com fraturas de cisalhamento desenvolvidas durante o ensaio de compressão uniaxial.

Em termos de dispersão, os valores de coeficiente de variação (CV) são sensivelmente semelhantes, para cada parâmetro, nos diferentes conjuntos considerados. Os resultados da massa volúmica mostram os valores de coeficiente de variação mais baixos (sempre inferior a 1,0%). No caso da velocidade de propagação dos ultrassons os valores de coeficiente de variação são também relativamente baixos (atingindo no máximo valores à volta dos 10%), sendo destacável que para os ensaios nos provetes secos foram obtidos valores de coeficiente superiores aos dos ensaios com os provetes saturados (refletindo a minimização do efeito da fase fluida sólida dado que a velocidade de propagação de ultrassons é superior na água do que no ar e portanto menos afastada dos valores dos minerais). Os outros parâmetros mostram valores algo mais elevados, destacando-se a comparação dos resultados do módulo de elasticidade seco e saturado em que, nos dois casos considerados, o coeficiente de variação é superior para os provetes saturados do que para os provetes secos (sendo que o assunto merece algum cuidado dado o pequeno número de provetes ensaiados).

Em termos de curtose, existe alguma variabilidade de resultados nas diferentes propriedades e grupos mas pode destacar-se que os valores mais elevados deste parâmetro (4,11 - ensaios de carga pontual diametrais em provetes das sondagens 15 e 21; 3,07 - resistência à compressão uniaxial dos provetes da sondagem 22; 2,51 - porosidade aberta dos provetes da sondagem 22; 1,46 - velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes da sondagem 22 saturados com água) correspondem também aos valores mais elevados de

assimetria (respetivamente 1,96; 1,79; 1,88; 1,52) situação que sugere a potencial presença de valores anómalos nestes conjuntos.

Discussões mais detalhadas dos resultados obtidos, incluindo o tratamento diagramático e os testes estatísticos, serão apresentadas nos seguintes subcapítulos em termos de avaliação da relação entre variáveis e de comparação de conjuntos de provetes.

No subcapítulo seguinte são discutidas as relações entre os diferentes parâmetros. Essa discussão será seguida da análise da comparação dos vários grupos de provetes.

4.2 Relações entre variáveis

Nesta discussão de relações entre variáveis são utilizados símbolos diferentes para distinguir as duas amostragens realizadas nas sondagens 15 e 21 (conforme descrição apresentada no capítulo – Materiais e Métodos). Como já foi referido na discussão de resultados de estudos anteriores, seria de esperar, para rochas com a mesma massa volúmica de sólidos, uma correlação linear entre a absorção de água à pressão atmosférica e a porosidade aberta. Tal não se observa nos provetes onde os dois ensaios foram realizados, situação que poderá ser explicada por estes provetes apresentarem baixos valores de porosidade e um intervalo baixo de variação da porosidade em termos absolutos. O estudo de Carvalho (2015) tem referido uma questão semelhante. De acordo com este trabalho, em calcários, e por comparação com os resultados de absorção de água, o método proposto pela EN 1936 resultaria em valores subestimados de porosidade aberta. Esta mesma autora referiu (comunicação pessoal em julho de 2017) ter observado essa mesma tendência em outras rochas, incluindo granitos, e que a percentagem de subestimação é tanto maior quanto menor for o valor da porosidade aberta da rocha (Figura 4.3).

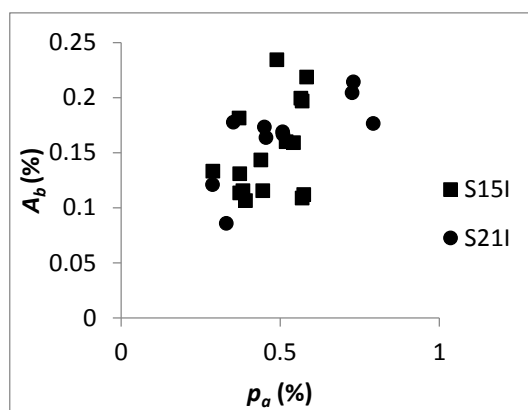


Figura 4.3 Projeção de valores de absorção de água à pressão atmosférica (A_b) contra porosidade aberta (p_a).

De acordo com os procedimentos utilizados para a determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta (EN 1936), e como já foi referido na discussão dos resultados de autores anteriores, seria igualmente esperado obter uma correlação linear entre estes dois parâmetros num conjunto de provetes que tenham um esqueleto sólido com a mesma massa volúmica.

No entanto, a projeção de valores de massa volúmica aparente contra porosidade aberta (Figura 4.4) mostra uma larga dispersão, sem definição de tendências lineares, nem no conjunto de todos os provetes nem nos conjuntos de provetes de cada uma das sondagens. Isto poderá explicar-se pela baixa variação, em termos absolutos dos valores de porosidade, sendo a variação relativa da massa volúmica aparente igual a 3% (pelo que os erros associados com as medições serão de uma ordem próxima das variações da massa volúmica resultantes de variações mineralógicas).

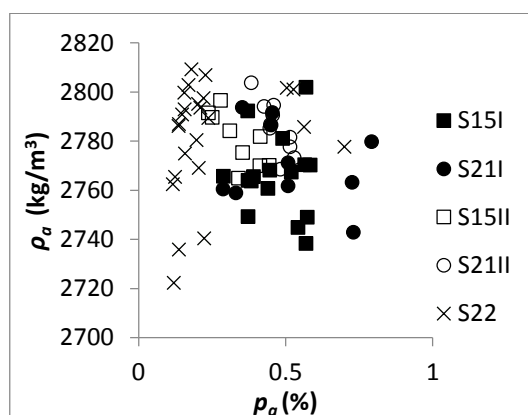


Figura 4.4 Projeção de valores de massa volúmica aparente (ρ_a) contra porosidade aberta (p_a).

A projeção (Figura 4.5) dos valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados (v_{sat}) contra essa mesma velocidade nos provetes secos (v_{sec}) mostra uma boa correlação entre as duas medições.

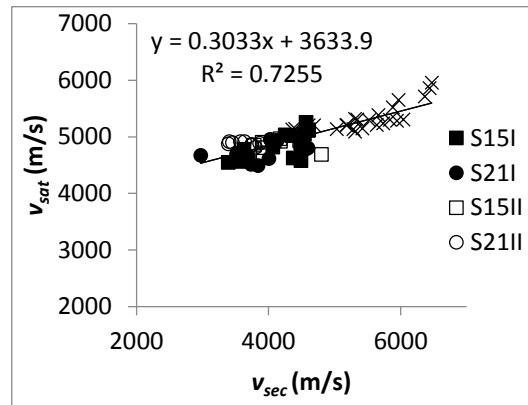


Figura 4.5 Projeções dos valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados (v_{sat}) contra essa mesma velocidade nos provetes secos (v_{sec}).

Os valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes secos mostram alguma tendência decrescente com a porosidade (Figura 4.6a), sendo que é obtido (para todo o conjunto de provetes), um coeficiente de correlação de Spearman igual a $-0,74651$ ($p = 0,0001$; valor obtido por permutação), resultado expectável dado que a velocidade de propagação dos ultrassons é inferior no ar do que nos sólidos. Experimentou-se a projeção dos valores do logaritmo do quociente v_{sat}/v_{sec} contra o logaritmo da porosidade (Figura 4.6b), observando-se alguma tendência decrescente, com um coeficiente de correlação de Spearman igual a $0,76138$ ($p = 0,0001$; valor obtido por permutação).

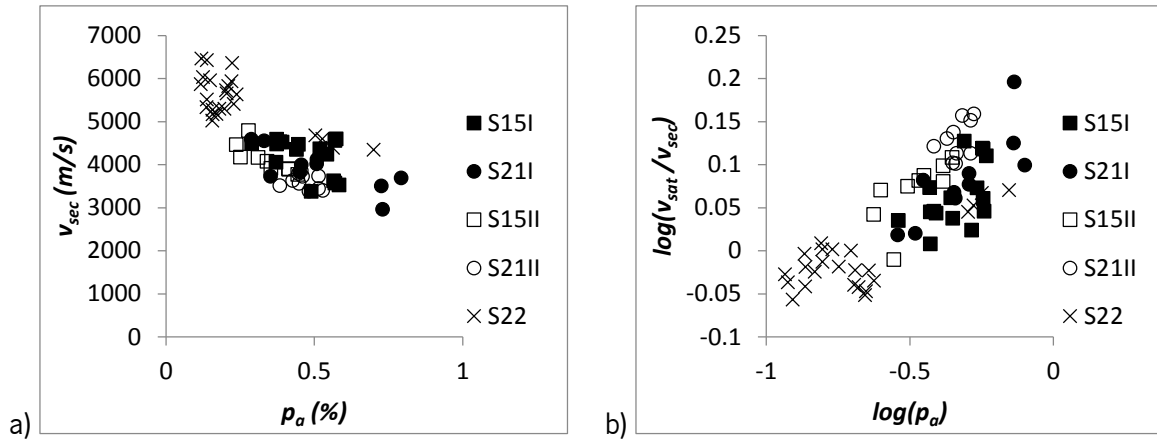


Figura 4.6 Avaliação da relação entre a velocidade de propagação de ultrassons e a porosidade aberta: a) projeção dos valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes secos (v_{sec}) contra a porosidade aberta (p_a); b) projeção dos valores do logaritmo do quociente da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados e secos ($\log(v_{sat}/v_{sec})$) contra o logaritmo da porosidade aberta ($\log(p_a)$).

A velocidade de propagação de ultrassons nos provetes secos não evidenciou relação com as estimativas de massa volúmica do sólido (Figura 4.7a) ou massa volúmica aparente (Figura 4.7b).

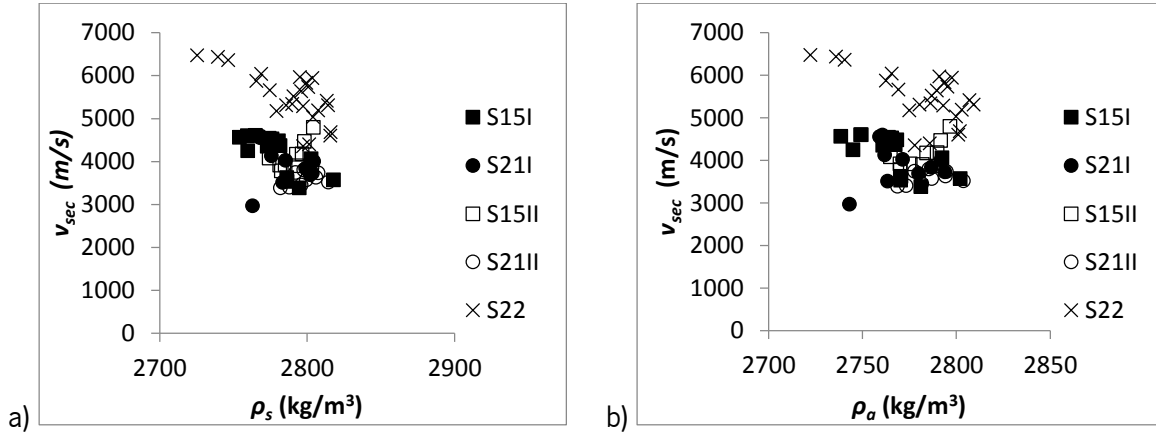


Figura 4.7 Projeção dos valores de velocidade de propagação de ultrassons nos provetes secos (v_{sec}) contra: a) massa volúmica do sólido (ρ_s); b) massa volúmica aparente (ρ_a).

Os resultados dos ensaios de carga pontual axiais não mostraram tendências nítidas em relação aos parâmetros não destrutivos (Figura 4.8), como a porosidade, massa volúmica aparente e sólida ou velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco. A avaliação dos coeficientes de correlação de Spearman mostrou resultados com $\rho \geq 0,1$ para todos os gráficos indicados.

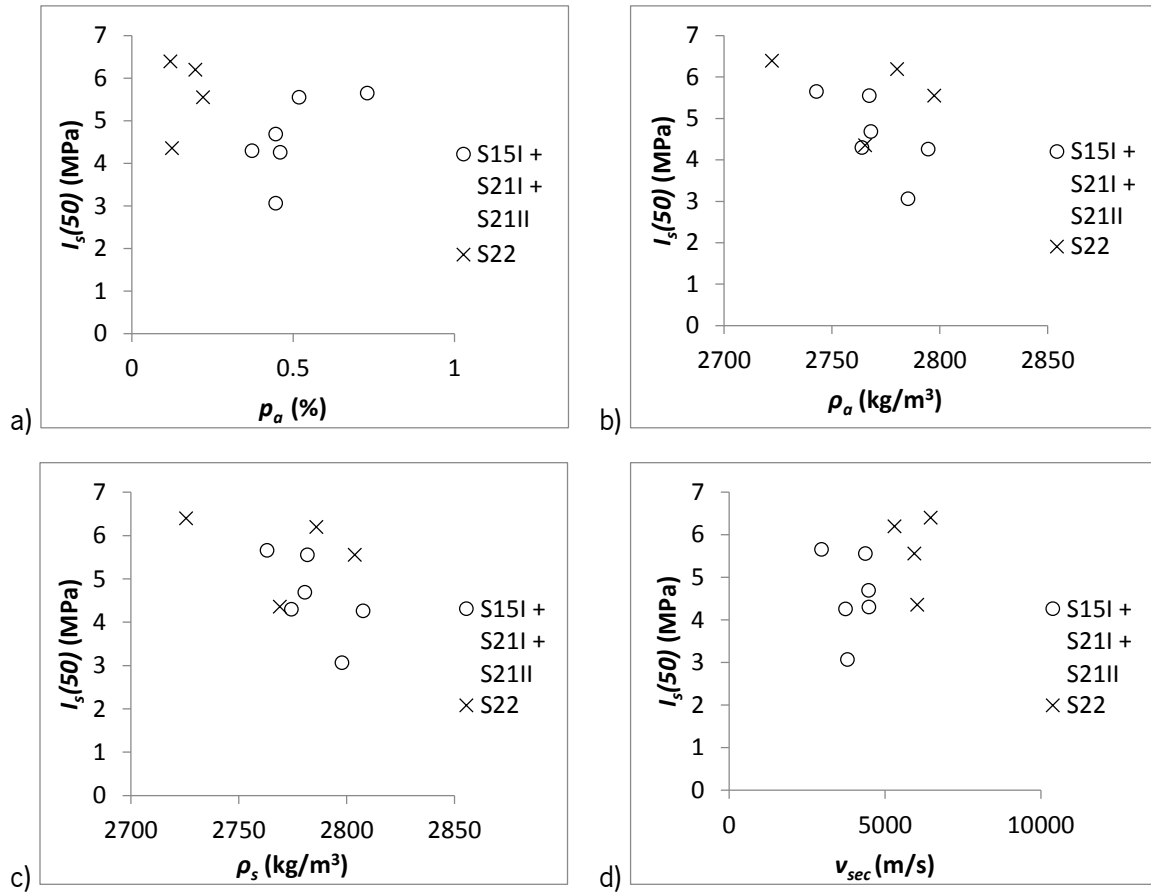


Figura 4.8 Projeção dos valores dos resultados dos ensaios de carga pontual axiais ($I_s(50)$) contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica do sólido (ρ_s); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}).

Os resultados dos ensaios de carga pontual diametral também não mostraram tendências de associação com os resultados dos ensaios não destrutivos (Figura 4.9).

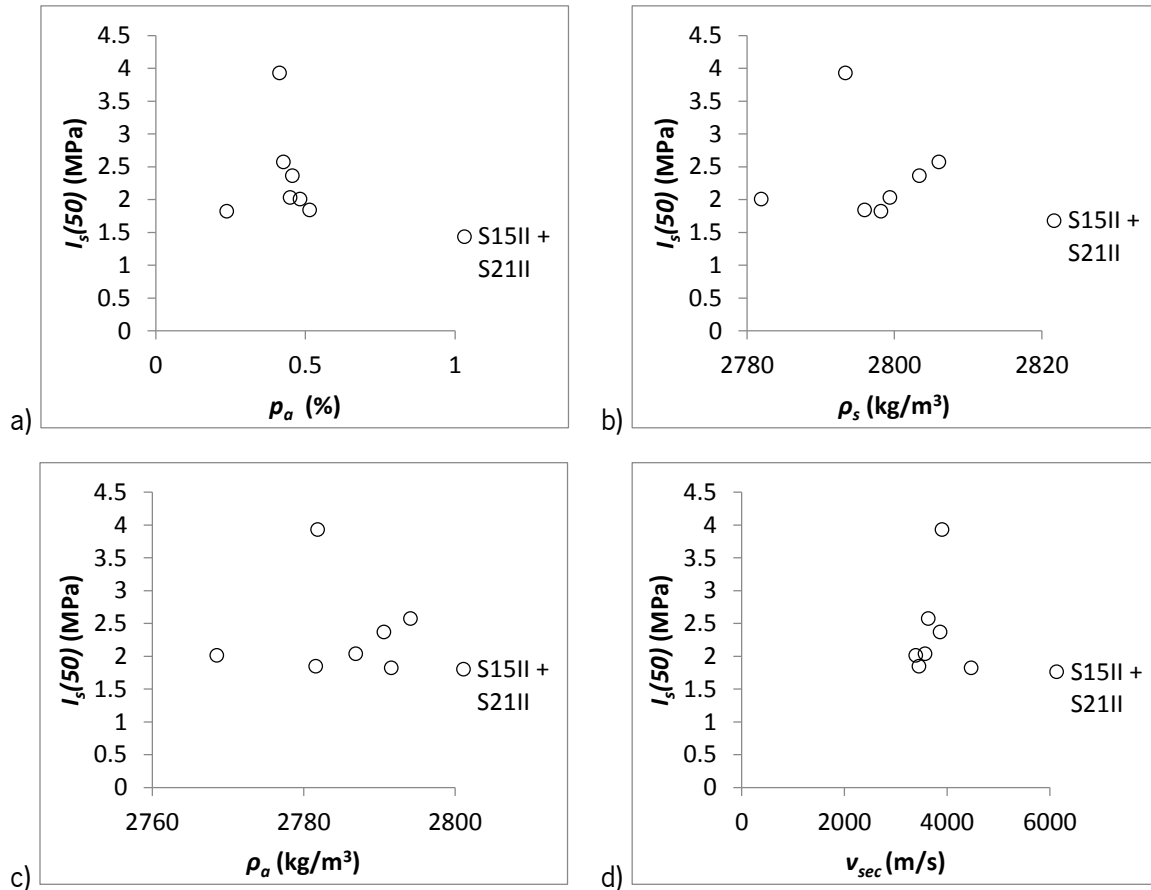


Figura 4.9 Projeção dos resultados do ensaio de carga pontual diametral ($I_s(50)_s$) contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica do sólido (ρ_s); c) massa volúmica aparente (ρ_a); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}).

A comparação dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade nos provetes saturados e secos (Figura 4.10a) mostra uma tendência de correlação linear (o coeficiente de correlação de Spearman apresenta um $p = 0,002$; valor obtido por permutação), sendo os valores no estado saturado sempre inferiores aos valores no estado seco (chegando a atingir uma redução de aproximadamente 46%). Experimentou-se avaliar a relação entre o logaritmo do quociente entre módulo de elasticidade saturado sobre módulo de elasticidade seco e o logaritmo da porosidade aberta (Figura 4.10b) ou o logaritmo do quociente v_{sat}/v_{sec} (Figura 4.10c) mas não foram detetadas tendências (os coeficientes de correlação de Spearman fornecem $p \geq 0,07$; valor obtido por permutação).

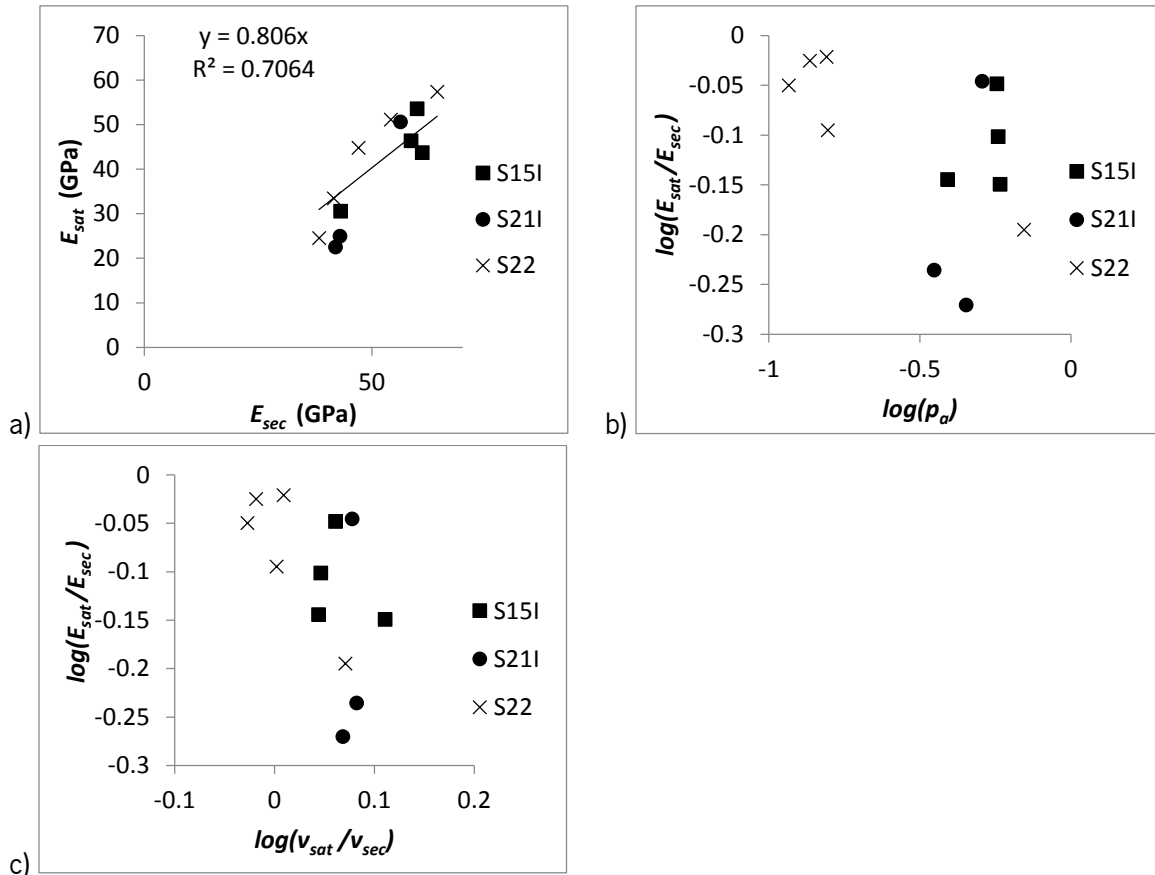


Figura 4.10 Investigação da relação entre resultados de módulo de elasticidade para provetes no estado seco e saturado: a) projeção dos valores dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade nos provetes saturados (E_{sat}) contra os secos (E_{sec}); b) projeção da relação entre o logaritmo do quociente entre módulo de elasticidade saturado sobre o seco ($\log(E_{sat}/E_{sec})$) contra o logaritmo da porosidade aberta ($\log(p_a)$); c) projeção da relação entre o logaritmo do quociente entre módulo de elasticidade saturado sobre o seco ($\log(E_{sat}/E_{sec})$) contra o logaritmo do quociente da velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados sobre os secos ($\log(v_{sat}/v_{sec})$).

Foi feita uma expedita avaliação do carácter não destrutivo dos ensaios de módulo de elasticidade através do ensaio de absorção de água à pressão atmosférica (antes e depois dos ensaios de módulo de elasticidade). Os poucos resultados considerados (Figura 4.11) mostram alguma dispersão em torno da tendência linear esperada, sobretudo nos valores mais baixos de absorção de água, mas a comparação pelo teste t (Student) para amostras emparelhadas, mais sensível a diferenças do que o teste de Wilcoxon, fornece $p = 0,75$ na comparação das médias.

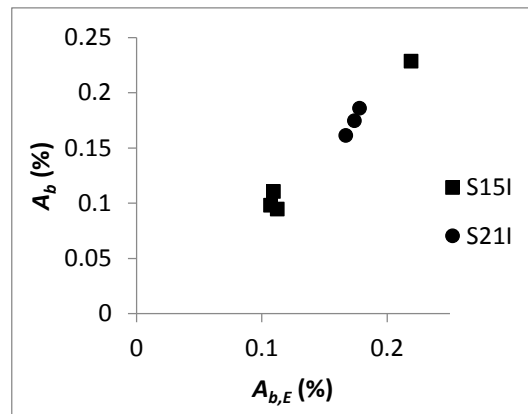


Figura 4.11 Projeção dos valores de absorção de água à pressão atmosférica antes (A_b) e depois do ensaio do módulo de elasticidade ($A_{b,E}$).

Na comparação dos valores do módulo de elasticidade no estado seco com porosidade e estimativas de massa volúmica (Figura 4.12), parecem existir algumas tendências decrescentes, sendo que no caso da correlação, sendo os valores de ρ (todos obtidos por permutação) para os coeficientes de correlação de Spearman iguais a 0,4081 (porosidade aberta), 0,0382 (massa volúmica aparente) e 0,0155 (massa volúmica do sólido).

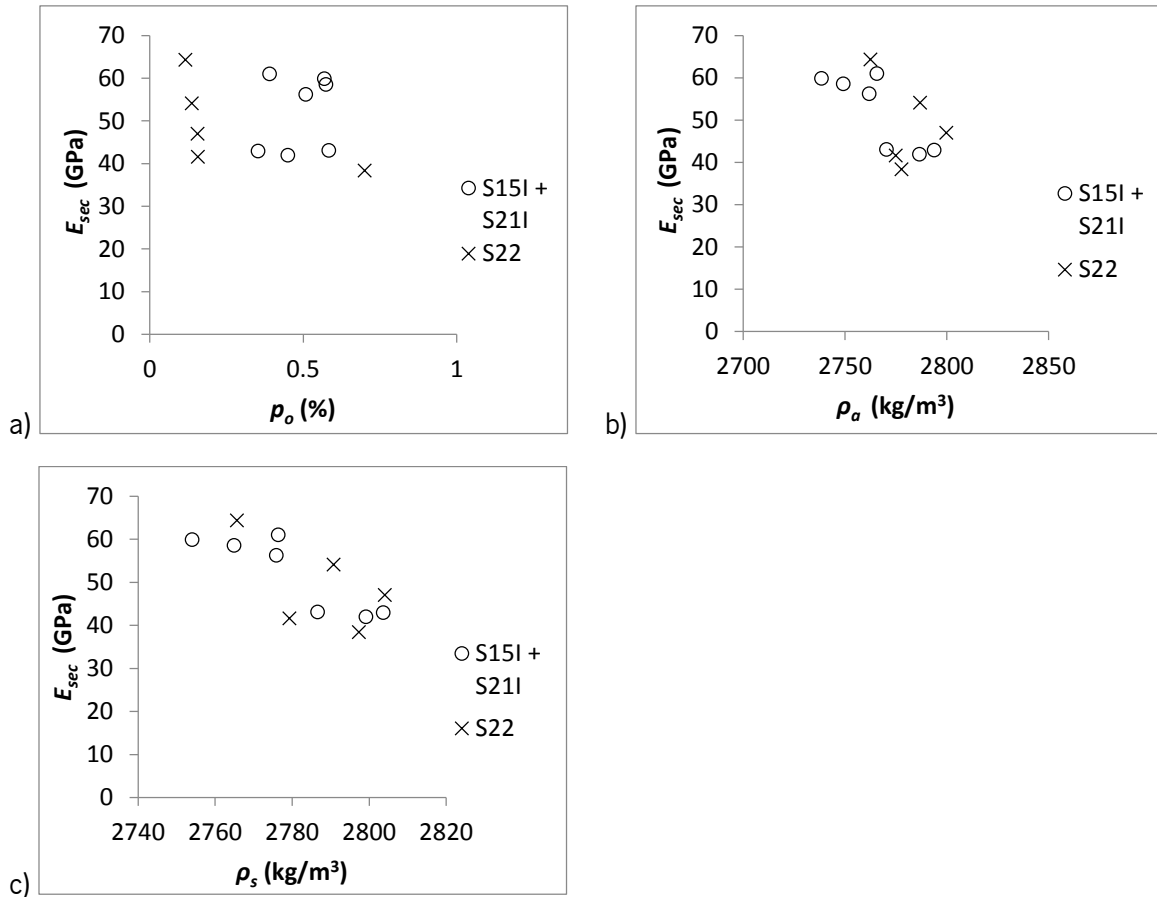


Figura 4.12 Projeção dos valores do módulo de elasticidade no estado seco (E_{sec}) contra: a) porosidade aberta (p_o); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica do sólido (ρ_s).

Os resultados do módulo de elasticidade nos provetes secos definem (Figura 4.13a) duas retas de declive positivo aproximadamente paralelas (mas com diferentes ordenadas na origem) em relação aos valores de velocidade de propagação dos ultrassons secos, retas essas relacionadas com os conjuntos definidos com base na orientação das sondagens em relação a S_0 (mas o conjunto de todos os provetes não define uma boa tendência, obtendo-se por permutação para o coeficiente de correlação de Spearman um $\rho = 0,22$). Já ao projetar os valores do módulo de elasticidade dos provetes saturados contra a velocidade de propagação dos ultrassons também no estado saturado (Figura 4.13b) é possível observar uma tendência global crescente com um $\rho = 0,007$ para o coeficiente de correlação de Spearman. A comparação dos logaritmos dos quocientes entre módulos de elasticidade e velocidade de propagação dos ultrassons nos estados seco e saturado, sugere alguma tendência de associação ainda que fraca (sendo obtido por permutação para o coeficiente de correlação de Spearman um $\rho = 0,07$).

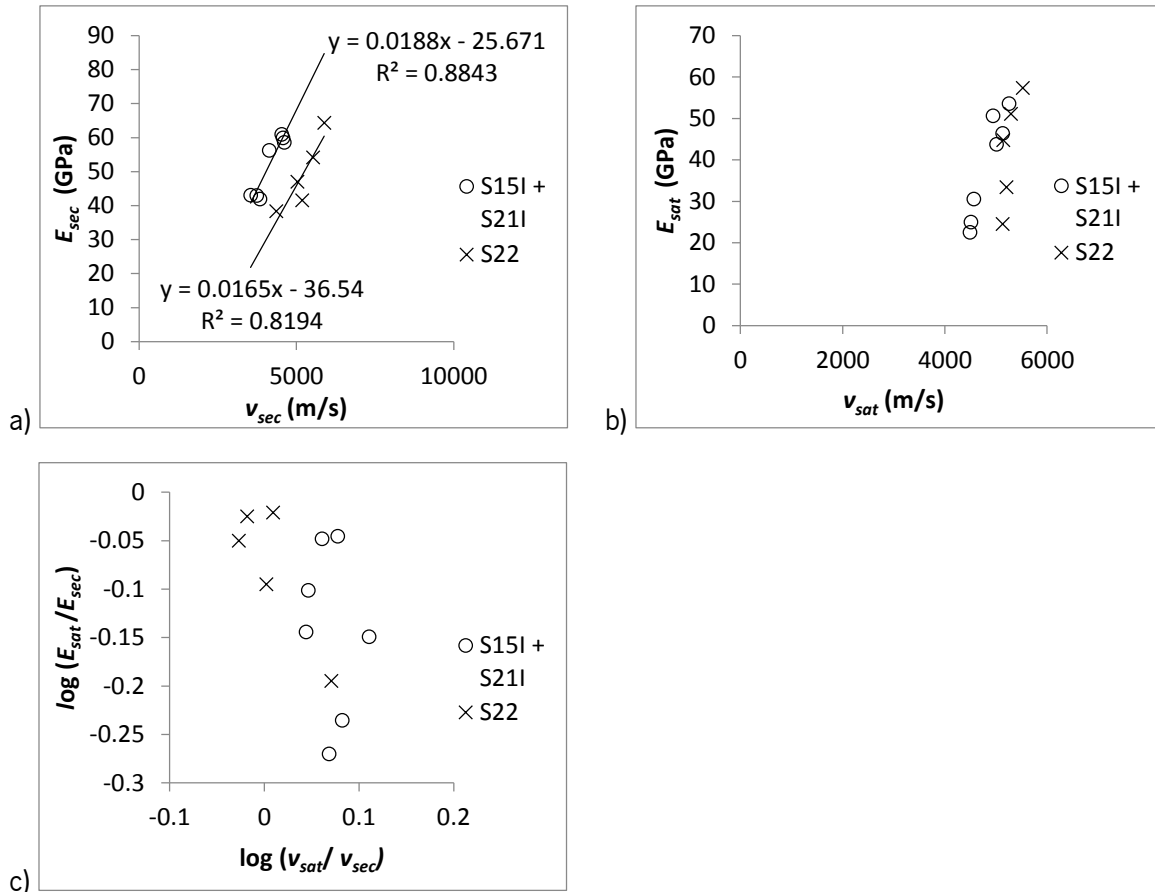


Figura 4.13 a) Projeção dos valores de módulo de elasticidade nos provetes secos (E_{sec}) contra os valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes secos (v_{sec}). b) Projeção dos valores de módulo de elasticidade nos provetes saturados (E_{sat}) contra os valores de velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados (v_{sat}). c) Projeção do logaritmo do quociente entre os módulos de elasticidade nos provetes secos e saturados ($\log(E_{sat}/E_{sec})$) e o logaritmo do quociente entre as velocidades de propagação dos ultrassons nos provetes secos e saturados ($\log(v_{sat}/v_{sec})$).

A investigação da relação entre a resistência à compressão uniaxial e os parâmetros não destrutivos não mostrou tendências evidentes (Figura 4.14) ainda que as relações com as estimativas de massas volúmicas parecem sugerir alguma tendência de associação decrescente, sendo que foi obtido, por permutação, para o coeficiente de correlação de Spearman $\rho = 0,042$ para a massa volúmica aparente e $\rho = 0,05$ para a massa volúmica do sólido. Pode também destacar-se que os provetes que apresentam os valores mais elevados de resistência à compressão uniaxial são aqueles que apresentam resultados mais elevados de velocidade de propagação dos ultrassons (mas também os resultados mais baixos nas estimativas da massa volúmica).

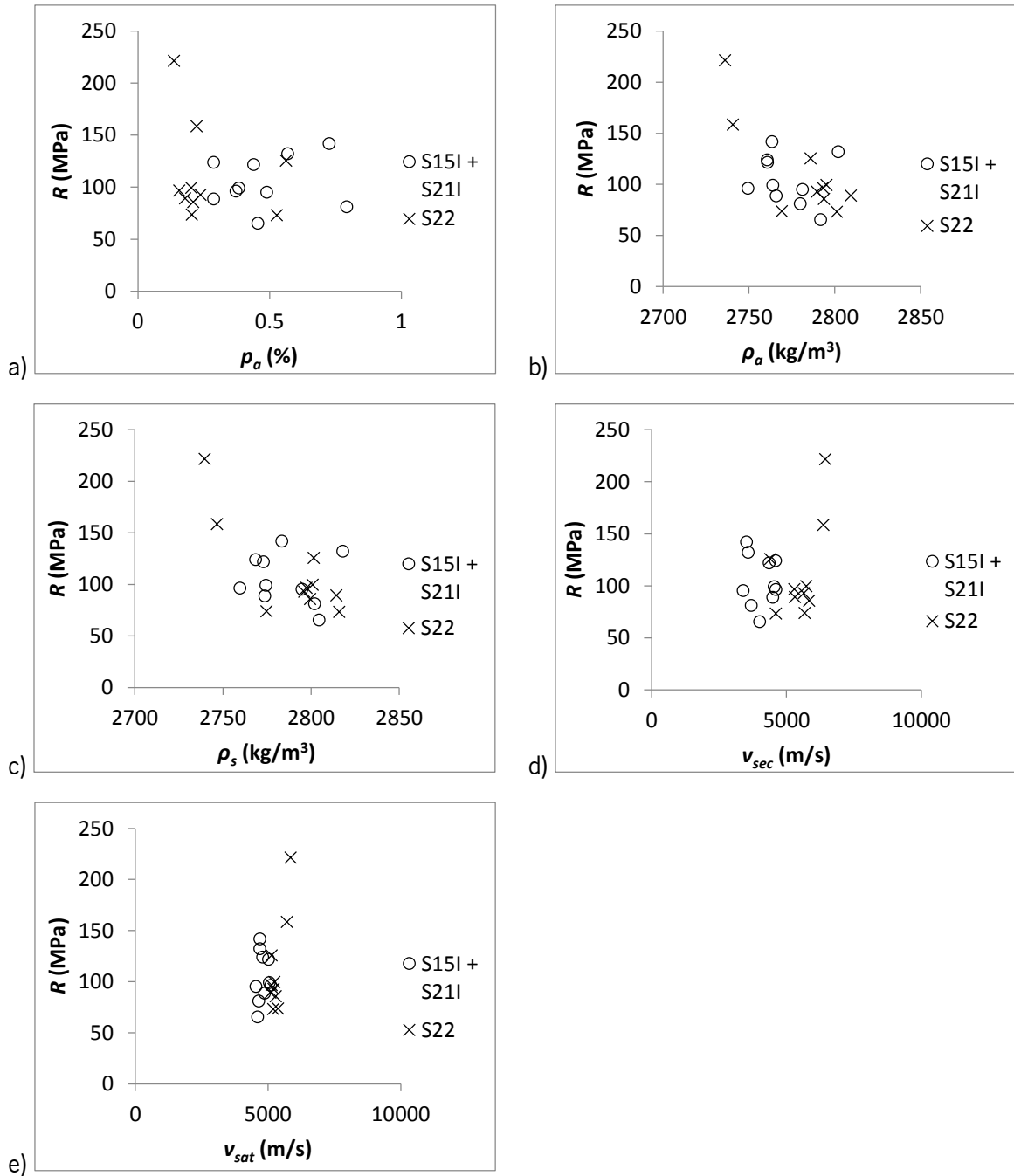


Figura 4.14 Projeção dos valores da resistência à compressão uniaxial (R) contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica sólida (ρ_s); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}); e) velocidade de propagação dos ultrassons no estado saturado (v_{sat}).

Não é possível comparar os valores de carga pontual e resistência à compressão uniaxial no mesmo provete mas foi possível ter 8 casos em que o provete ensaiado na compressão uniaxial era vizinho do provete ensaiado à carga pontual (ensaios axiais). Todavia, o gráfico obtido (Figura 4.15) não mostra qualquer tendência de associação. Comparou-se o conjunto de valores de

quociente entre a resistência à compressão uniaxial e o índice de carga pontual obtidos para pares de provetes vizinhos com o valor indicado na classificação *RMR* (Bieniawski, 1989) para a relação entre essas propriedades (25), utilizando logaritmos por serem quocientes. Os resultados dos testes de Wilcoxon e *t* de Student (mais sensível às variações) para comparação de uma amostra estatística com um valor de referência forneceram valores de $p \geq 0,3$ pelo que não são detetáveis desvios significativos desse valor.

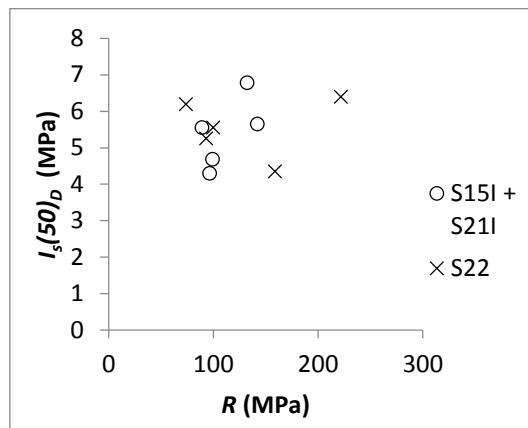


Figura 4.15 Projeção dos valores de carga pontual em ensaios axiais ($I_{3(50)b}$) contra os valores de resistência à compressão uniaxial (R).

Utilizando também provetes vizinhos projetaram-se os resultados da compressão uniaxial contra os resultados do módulo de elasticidade (Figura 4.16) não se observando tendências de associação entre estes parâmetros nestas condições.

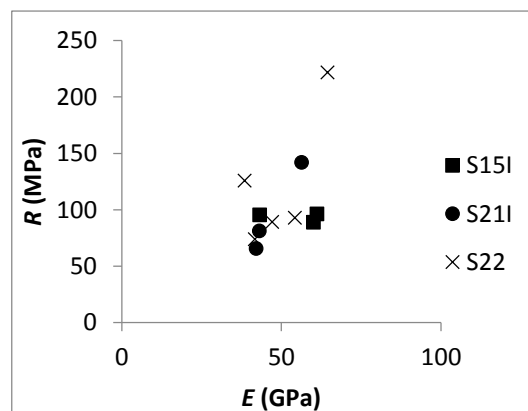


Figura 4.16 Projeção dos valores de resistência à compressão uniaxial (R) contra os valores do módulo de elasticidade (E).

4.3 Comparação dos conjuntos de provetes (sondagens)

Como referido no Capítulo 2, os provetes estudados são provenientes de diferentes profundidades de diferentes sondagens. A Figura 4.17 apresenta a projeção dos valores das propriedades não destrutivas (realizadas em todos os provetes) contra a profundidade. É visível que a maioria dos provetes de S22 corresponde a profundidades claramente superiores às dos provetes das outras sondagens, o que parece ter implicações mais importantes no caso da porosidade aberta e dos valores de velocidade de propagação dos ultrassons (provetes secos e saturados).

A avaliação gráfica do ajuste à distribuição normal (Figura 4.18) mostra alguns desvios no caso da velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco e na massa volúmica aparente mas sobretudo nos valores de porosidade aberta e massa volúmica sólida (valores baixos) e na velocidade de propagação dos ultrassons no estado saturado (nos valores elevados).

O teste de Mann-Whitney entre os grupos considerados (com correção de Bonferroni) indica $p \leq 0,00000003$ para a velocidade de propagação dos ultrassons para o estado saturado na comparação entre os provetes de S22 e os provetes das outras sondagens (com $p = 0,3$ na comparação de S15 com S21 no mesmo tipo de medição), $p \leq 0,0000001$ para os valores de propagação de velocidade de ultrassons nos provetes secos (e $p = 0,005$ na comparação de S15 com S21 nesta propriedade), $p \leq 0,00004$ para a porosidade aberta (a comparação entre S15 e S21 fornece $p = 0,29$), $p \geq 0,06$ para a massa volúmica aparente e $p \geq 0,15$ para a massa volúmica do sólido.

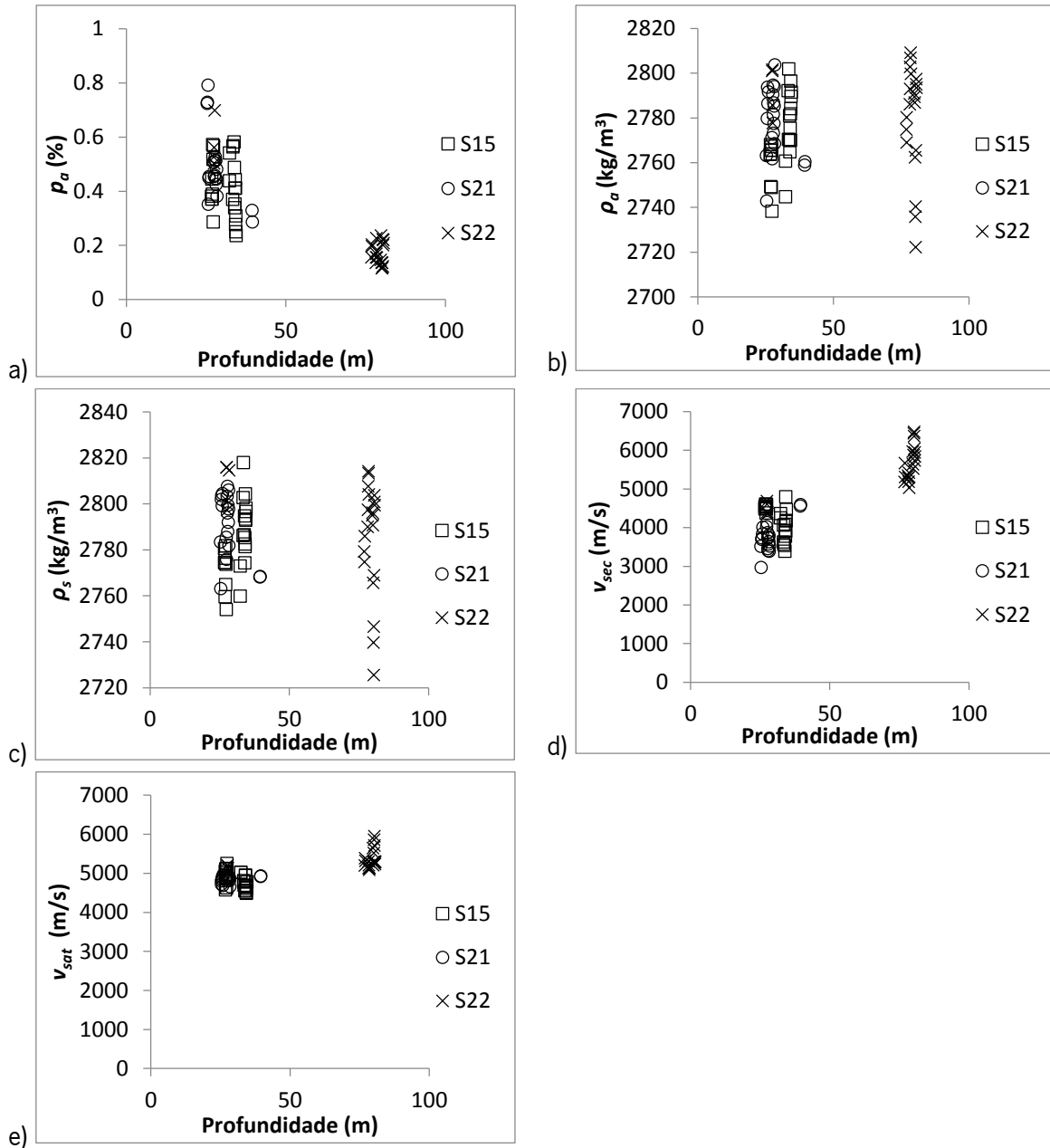


Figura 4.17 Projeção da profundidade dos provetes contra: a) porosidade aberta (p_a); b) massa volúmica aparente (ρ_a); c) massa volúmica sólida (ρ_s); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (v_{sec}); e) velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes saturados (v_{sat}).

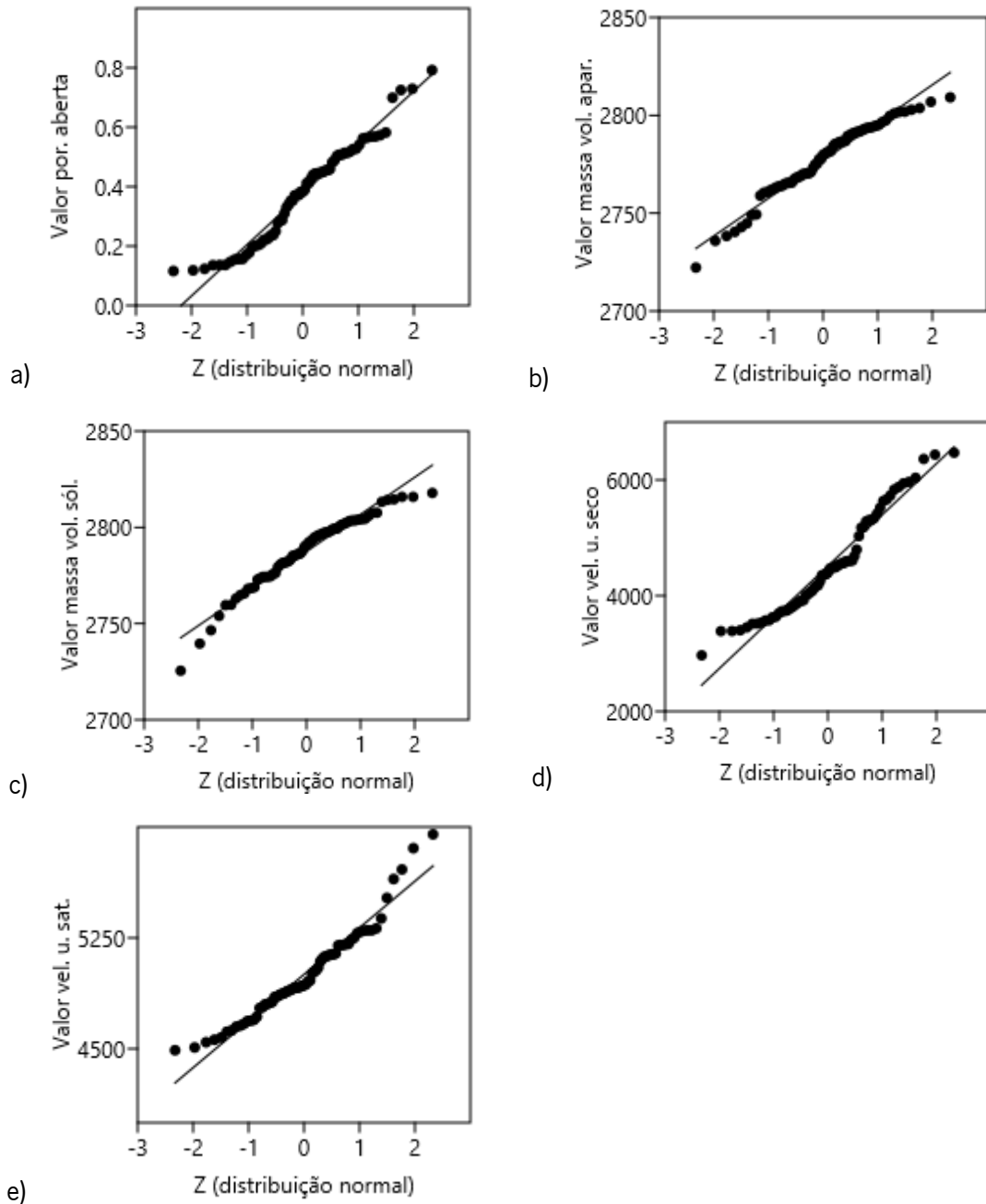


Figura 4.18 Avaliação gráfica do ajuste à distribuição normal para: a) porosidade aberta (%); b) massa volúmica aparente (kg/m^3); c) massa volúmica do sólido (kg/m^3); d) velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco (m/s); e) velocidade de propagação dos ultrassons no estado saturado (m/s).

Foi ainda feito um estudo de classificação estatística hierárquica (análise grupal ou "cluster analysis") pelo método de Ward e utilizando os valores normalizados (por subtração da média e divisão pelo desvio-padrão para evitar o efeito de utilização de variáveis com diferentes variâncias) de porosidade, massa volúmica e velocidade de propagação dos ultrassons (estado seco). O dendrograma obtido (Figura 4.19) mostra um agrupamento de todos os provetes da

sondagem 22 de maior profundidade, enquanto os outros provetes desta sondagem e os provetes das outras sondagens ocorrem misturados.

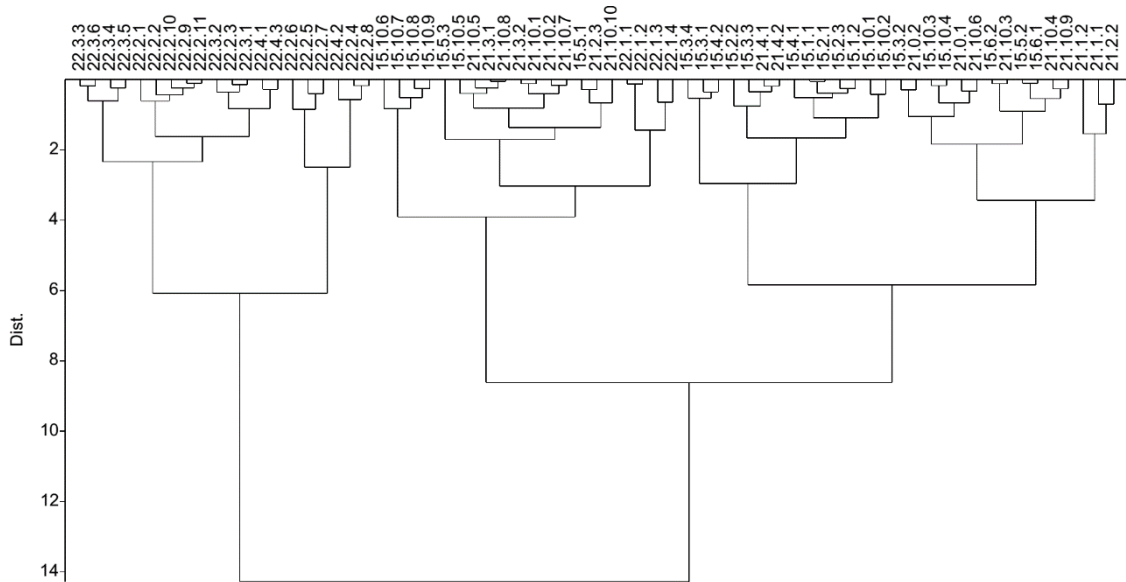


Figura 4.19 Dendrograma (método de Ward) obtido a partir dos valores normalizados de porosidade, massa volúmica aparente e velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco.

Para os outros ensaios serão considerados dois grupos: num grupo os provetes de S15 e S21 e noutro grupo os provetes de S22 (o número de provetes é menor e os ensaios não destrutivos realizados em todos os provetes não evidenciaram significativas diferenças entre S15 e S21, sondagens que são próximas geograficamente e apresentam a mesma orientação em relação a S_0). Os resultados desses ensaios são projetados contra a profundidade (Figura 4.20). Nesta mesma figura são ainda projetados os resultados anteriormente obtidos pela empresa para provetes da sondagem 15 (índice de carga pontual em ensaios axiais) e 21 (resistência à compressão uniaxial), utilizando o mesmo símbolo mas com uma maior dimensão. Em geral não são observadas variações significativas nos provetes ensaiados nesta dissertação nem entre grupos nem em função da profundidade, ainda que se destaquem em S22 alguns valores mais elevados de resistência à compressão uniaxial e do logaritmo do quociente entre o módulo de elasticidade no estado saturado e seco. Todavia, a comparação por via dos dois grupos de provetes considerados pelos testes de Mann-Whitney e Kolmogorov-Smirnov, ou mesmo com o teste t de Student, forneceu valores muito altos de p ($\geq 0,2$).

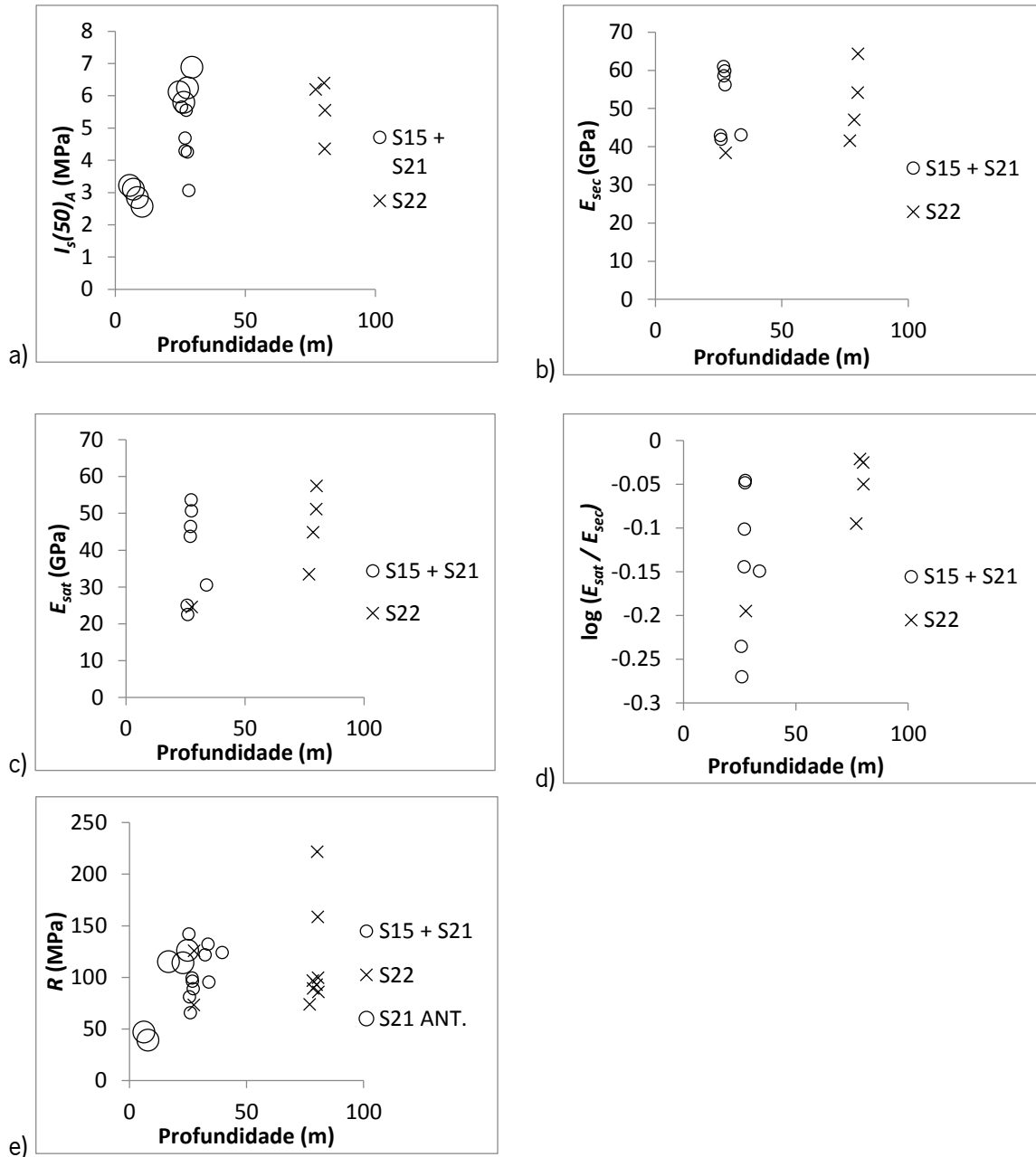


Figura 4.20 Projeção contra profundidade dos provetes para valores de: a) carga pontual em ensaios axiais ($I_p(50)_A$); b) módulo de elasticidade no estado seco (E_{sec}); c) módulo de elasticidade no estado saturado (E_{sat}); d) logaritmo do quociente do módulo de elasticidade no estado seco e saturado ($\log(E_{sat}/E_{sec})$); e) resistência à compressão uniaxial (R). S15 ANT.: provetes da sondagem 15 ensaiados anteriormente a esta dissertação. S21 ANT.: provetes da sondagem 21 ensaiados anteriormente a esta dissertação.

Em relação aos ensaios realizados anteriormente (antes do conjunto de ensaios da presente dissertação), pode observar-se que os provetes de menores profundidades (que correspondiam a zonas mais meteorizadas) apresentam menores valores de índice de carga pontual e de resistência à compressão uniaxial. Os provetes de profundidades semelhantes aos ensaiados

nesta dissertação apresentam valores semelhantes de resistência à compressão uniaxial mas observam-se valores superiores em termos de índice de carga pontual. A comparação destes dois grupos suporta esta distinção com $p = 0,01$ para os testes de Mann-Whitney e Kolmogorov-Smirnov.

O valor mais elevado de resistência à compressão uniaxial em S22 parece separar-se do conjunto de resultados obtidos nesta sondagem (e dos valores nas outras sondagens). Houve por isso interesse em avaliar a possibilidade de este valor constituir um valor anómalo, utilizando-se (Figura 4.21) um gráfico de caixa de bigodes e um gráfico de probabilidade (para a distribuição normal) com os valores de resistência à compressão uniaxial (mas sem incluir os resultados das zonas mais superficiais e meteorizadas de ensaios anteriores à presente dissertação). É visível que em qualquer dos casos o resultado mais elevado destaca-se do conjunto dos resultados obtidos.

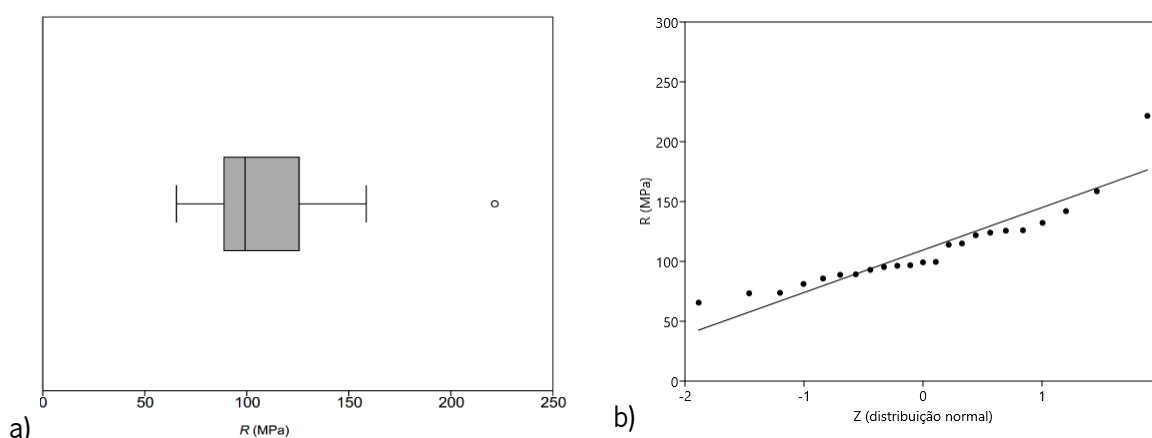


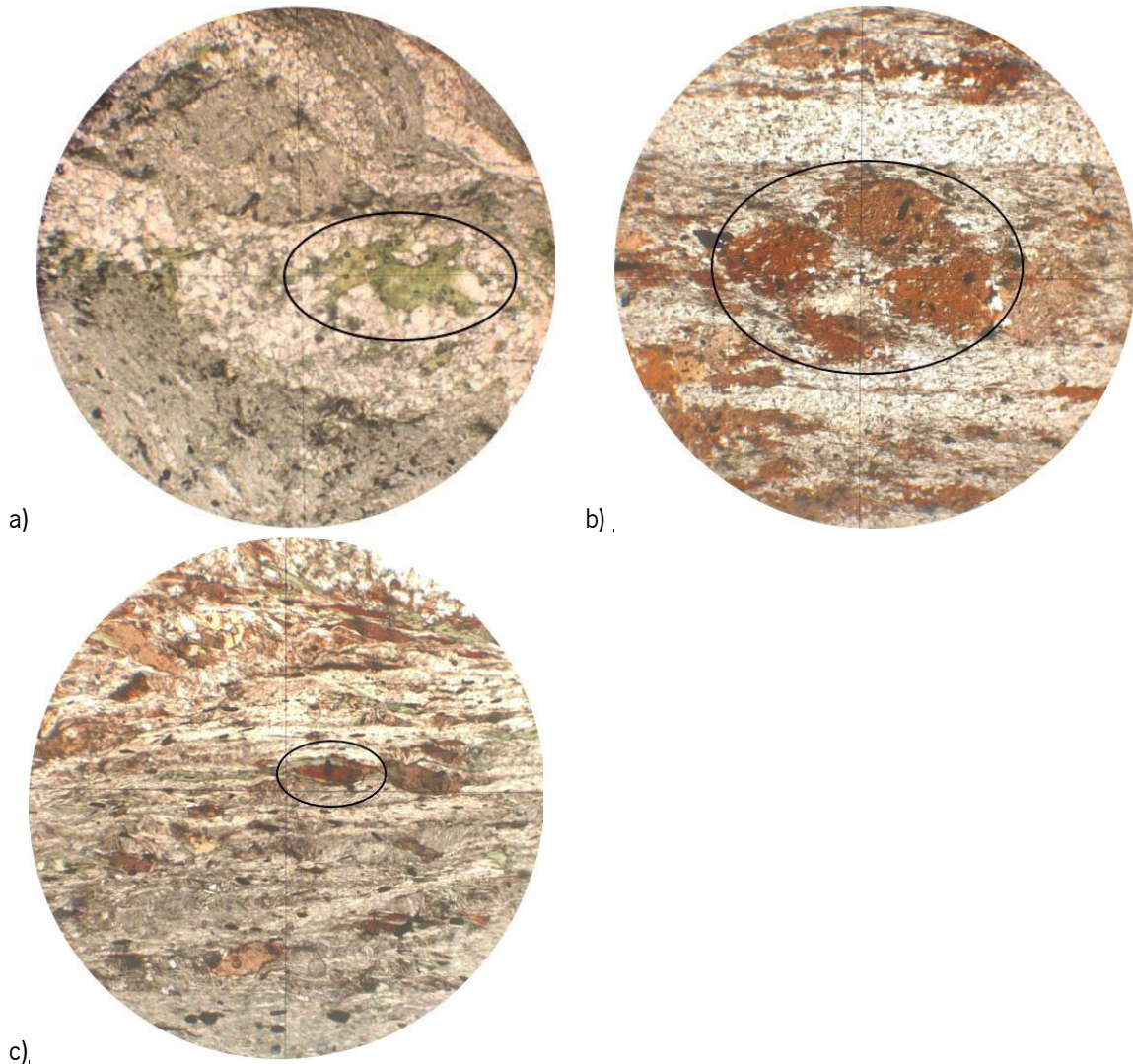
Figura 4.21 Comparação do valor mais elevado da resistência à compressão uniaxial com os outros valores obtidos para este parâmetro (nos provetes desta dissertação e nos provetes ensaiados anteriormente, excluindo os provetes das zonas mais superficiais e mais meteorizadas): a) caixa de bigodes; b) gráfico de ajuste à distribuição normal.

Inclui-se ainda nesta análise a comparação entre os dois grupos considerados da relação entre a resistência à carga uniaxial e o ensaio de carga pontual. Os quocientes dos valores médios são iguais a 23, para o conjunto de provetes de S15 e S21, e a 20, para o conjunto de provetes de S22. Para os valores medianos obtém-se um quociente idêntico para o conjunto S15 e S21 mas para S22 o quociente passa para 16. Apesar de os valores não serem muito afastados do fator 25 indicado na classificação *RMR* (Bieławski, 1989), são ambos inferiores, sugerindo que esse fator poderá não ser no sentido da segurança (o que vai ao encontro das

questões consideradas na discussão dos resultados de autores anteriores). Obviamente, se os valores da resistência uniaxial forem comparados com os resultados dos ensaios de carga pontual diametral, esses quocientes seriam muito inferiores.

Em função de vários resultados obtidos ao longo dos ensaios realizados, foram feitas 16 lâminas polidas de 15 provetes que, provam que tal como é referido na notícia explicativa da carta geológica referente a esta zona de estudo (Sousa & Sequeira, 1989), é possível indicar que o tipo de amostras estudadas fazem parte do tipo petrográfico dos filitos cinzentos. Uma vez que é possível observar uma reorganização do quartzo, com as micas a ocupar os espaços entre os cristais e denotam-se também aspetos induzidos por diferenciação metamórfica. Os principais constituintes minerais deste tipo petrográfico são o quartzo, clorite e biotite tal como o que é referido nos estudos petrográficos destas rochas (Figura 4.22).

As principais diferenças entre as três sondagens estudadas são: na sondagem 15 as lâminas observadas são essencialmente cloríticas de grão fino, já na sondagem 21 são essencialmente biotíticas, na sondagem 22 as amostras já apresentam uma variedade maior sendo tanto cloríticas como biotíticas. Parece também existir uma maior proporção de quartzo em relação aos filossilicatos nas lâminas dos provetes da sondagem 22 quando comparadas com as lâminas dos provetes das sondagens 15 e 21.



c),
Figura 4.22 Exemplos das características mineralógicas presentes nas lâminas estudadas: a) clorite; b) biotites; c) cloritização da biotite. Observação com o microscópio petrográfico, em nicóis paralelos, objetiva 4X.

5. Conclusões

A dissertação realizada permitiu obter resultados de diversas propriedades físicas em provetes de rochas metamórficas silicatadas da Formação de Bateiras do Complexo Xisto-Grauváquico do Grupo do Douro em profundidade, aproveitando a disponibilização de tarolos de sondagens realizadas nestas rochas (que serão referenciadas de acordo com a numeração original, como 15, 21 e 22). A disponibilidade desses tarolos de sondagens permitiu a realização de um número interessante de ensaios relativos às diferentes propriedades mas também impôs algumas condicionantes no estudo realizado, nomeadamente em termos de dimensão e orientação dos provetes (salientando-se a extrema dificuldade de obter provetes para realização de ensaios na direção perpendicular ao eixo do tarolo). Adicionalmente, os provetes obtidos revelaram um limitado contraste mineralógico-textural ainda que por vezes fossem visíveis (macroscopicamente) algumas heterogeneidades.

A sondagem 15 pode ser caracterizada pelos ensaios não destrutivos por ter muito altos valores de massa volúmica, muito baixos a extremamente baixos valores de porosidade e valores altos de velocidade de propagação dos ultrassons.

A sondagem 21 tem muito em comum com a sondagem 15 mudando apenas nos valores da velocidade de propagação dos ultrassons, tendo estes um intervalo maior, sendo considerados moderados a altos.

Já os ensaios destrutivos das sondagens 15 e 21 mostram que os valores da resistência da compressão uniaxial são médios a muito altos e os de carga pontual altos a muito altos.

Os valores referentes à sondagem 22 caracterizam-se por uma porosidade muito baixa a extremamente baixa, uma massa volúmica e uma velocidade de propagação dos ultrassons muito alta; já em termos destrutivos a resistência à compressão uniaxial deu valores altos a muito altos e uma carga pontual muito alta. Esta sondagem apresentou uma maior variação de massa volúmica.

Não se verificou correlação linear entre a absorção da água à pressão atmosférica e a porosidade aberta devido talvez aos valores de porosidade serem baixos e terem um pequeno intervalo de variação. Esta também poderá ser a causa de existir uma larga dispersão dos valores quando se projeta os valores da massa volúmica aparente contra a porosidade aberta.

Existe uma boa correlação quando projetados os valores de propagação dos ultrassons nos provetes saturados contra a propagação dos ultrassons nos provetes secos. Já quando projetados os valores de propagação de ultrassons nos provetes secos contra a porosidade denota-se alguma tendência decrescente. Na projeção dos ultrassons em provetes secos não se tornou evidente qualquer relação com a massa volúmica do sólido e aparente.

Os resultados de carga pontual axial e diametral não mostram tendências nítidas com os parâmetros não destrutivos, como a porosidade, a massa volúmica aparente e do sólido ou a velocidade de propagação dos ultrassons no estado seco.

A projeção de valores do módulo de elasticidade nos provetes saturados contra nos provetes secos mostra uma correlação linear.

Quando foram projetados os valores da absorção de água à pressão atmosférica antes e depois do ensaio do módulo de elasticidade foi possível identificar alguma dispersão em torno da tendência linear esperada.

A comparação dos valores do módulo de elasticidade nos provetes no estado seco com a porosidade e estimativas de massa volúmica, mostram parecer existir algumas tendências decrescentes. Já o módulo de elasticidade nos provetes secos quando projetados contra a velocidade de propagação dos ultrassons nos provetes secos no seu conjunto não definem uma boa tendência, mas quando isto acontece na condição dos provetes saturados é possível observar uma tendência global crescente.

A investigação da relação entre a resistência à compressão uniaxial e os parâmetros não destrutivos não mostrou tendências evidentes, ainda que as relações com as estimativas de massas volúmicas pareçam sugerir alguma tendência de associação decrescente.

A projeção dos valores em provetes vizinhos da carga pontual e compressão uniaxial não mostrou qualquer tendência de associação. O mesmo aconteceu quando a compressão uniaxial foi projetada contra o módulo de elasticidade.

Em geral não são observadas variações significativas nos provetes ensaiados nesta dissertação, nem entre grupos, nem em função da profundidade. Apesar de a sondagem 22 apresentar alguns valores mais elevados de resistência à compressão uniaxial e do quociente entre o módulo de elasticidade nos provetes no estado saturado e seco.

Na análise global dos diversos resultados obtidos na dissertação apresentada pode destacar-se a porosidade (máximo = 0,79% e com valores tão baixos quanto 0,12%, inferior aos valores mais baixos encontrados nos estudos anteriores recolhidos) e os valores de resistência à

compressão uniaxial que podem atingir valores semelhantes aos valores mais elevados encontrados nos estudos anteriores que foram coligidos (capítulo 3), ainda que esse valor tenha sido atingido unicamente num provete (sondagem 22). Estes resultados podem ser interessantes na perspectiva de valorização destas rochas enquanto materiais geológicos (por comparação com outras rochas metamórficas com valores semelhantes). Todavia, como foi sugerido por indicações obtidas durante o manuseamento dos provetes e quantificado pelos ensaios de carga pontual, a direção paralela a S_0 poderá apresentar valores substancialmente inferiores em termos de resistência mecânica. Do ponto de vista de aproveitamento destes materiais geológicos essa menor resistência pode, no entanto, facilitar a obtenção de fragmentos com forma apropriada para algumas opções construtivas baseadas no empilhamento de fragmentos, tal como acontece com outras rochas metamórficas utilizadas para esse fim.

Destaque-se também os ensaios de carga pontual, na comparação de ensaios diametrais e axiais (correspondentes, respetivamente, a direções perpendiculares e paralelas aos eixos dos tarolos), que permitiram salientar uma notável variação de propriedades mecânicas relacionada com a direção de ensaio e com a orientação de características microestruturais. Refira-se ainda a comparação dos resultados destes ensaios de carga pontual com os resultados da compressão uniaxial (incluindo os resultados anteriores que foram recolhidos) parecem sugerir que o fator 25 implícito nos limites indicados na classificação *RMR* poderá não ser no sentido da segurança (isto é, esse fator pode implicar alguma sobrestimação do valores de resistência uniaxial a partir dos ensaios de carga pontual).

Merece também referência especial a comparação dos valores de módulo de elasticidade no estado seco e no estado saturado, sendo este último sempre inferior ao primeiro (chegando a ser quase metade), resultado de especial interesse no contexto das escavações subterrâneas em maciços rochosos dado o potencial efeito das variações do nível de água subterrânea nesses maciços. Os valores de módulo de elasticidade podem ainda ser uma informação interessante na perspectiva de avaliação do módulo de deformabilidade dos maciços rochosos através de equações que propõem relações deste parâmetro com o módulo de elasticidade da rocha intacta e índices relacionados com as características de compartimentação dos maciços, como por exemplo o *GS* (Hoek, 2007).

Na comparação dos grupos de provetes das distintas sondagens estudadas, observaram-se algumas diferenças dos provetes da sondagem 22 em relação aos provetes das outras sondagens aqui estudadas (15 e 21), com valores (na sondagem 22) inferiores em termos de

porosidade e mais elevados para a velocidade de propagação dos ultrassons (mas aqui o contraste não é tão marcado). A análise multivariada de "clusters" baseada nos valores normalizados de propriedades que foram medidas em todos os provetes separa os provetes da sondagem 22 dos provetes das outras duas sondagens que aparecem misturados em vários "clusters". Estes resultados reforçam a opção (baseada na orientação das sondagens) de considerar os resultados dos provetes das sondagens 15 e 21 conjuntamente na comparação com os resultados dos provetes da sondagem 22. Parece existir alguma tendência para valores mais elevados de resistência mecânica nos provetes da sondagem 22 mas o escasso número de resultados e as características da distribuição de valores aconselham cautela nestas ilações (as medianas dos dois grupos são muito próximas com uma diferença inferior a 10%). Os estudos realizados não permitem concluir se essa distinção resulta da maior profundidade dos provetes da sondagem 22 ou de variações mineralógicas e texturais entre os provetes.

Termina-se esta dissertação com comentários sobre o ponto que poderá ser percebido como a lacuna mais criticável da mesma: o estudo petrográfico. É compreensível admitir que um estudo petrográfico mais detalhado (incluindo procedimentos de quantificação) de lâminas orientadas de provetes selecionados após a realização de todos os ensaios poderia contribuir para aprofundar a discussão dos resultados obtidos. Todavia, para além das questões temporais e laboratoriais implicadas (que certamente poderiam ter sido ultrapassadas com melhorias na organização dos trabalhos da dissertação), será conveniente ter em atenção que os contrastes observados encontrados entre as propriedades são pouco marcadas, com a exceção da diferença entre os resultados axiais e diametrais (um resultado que, em rochas metamórficas com superfícies de orientação superficial dificilmente poderá ser considerado particularmente entusiasmante). Adicionalmente, admite-se que algumas propriedades (nomeadamente a resistência à compressão uniaxial e os ensaios de carga pontual) são afetadas por variações de características mineralógicas e texturais à escala do provete e portanto com uma dimensão difícil de avaliar em lâmina delgada.

Bibliografia

ASTM D2845 (2005). Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. Pensilvânia: American Society for Testing and Materials.

ASTM D5731 (2005). Standard test method for determination of the point load strength index of rock. Pensilvânia: American Society for Testing and Materials.

Barros, R. S., Oliveira, D. V., Varum, H., Alves, C. A. S., Camões, A. (2014). Experimental characterization of physical and mechanical properties of schist from Portugal. *Construction and Building Materials*, 50, 617–630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.008>

Bell, F.G. (2007). *Engineering geology (Second Edition)*. Oxford/Burlington: Butterworth-Heinemann/Elsevier Ltd.

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. Nova York: Wiley.

Carmichael, R.S. (1989). *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals*. Flórida: CRC Press, Inc.

Carvalho, C.I.P. (2015). *Estudo da influência do nevoeiro salino nas propriedades de calcários portugueses*. Tese de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa.

Deere, D.U., Miller, R.P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Relatório técnico n°. AFWL-TR-65-116. Kirtland: Air Force Weapons Laboratory, Research and Technology Division, Air Force Systems Command, Kirtland Air Force Base.

EN 1936 (2006). *Natural stone test methods for determination of real density and apparent density, and of total and open porosity*. Bruxelas: European Committee for Standardization.

González de Vallejo, L.I.(coord.) (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P. D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9 pp. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002). Hoek-Brown criterion (2002 edition). Toronto: Proc. NARMS-TAC Conference. 1, 263-270.

Hoek, E. (2007). Practical rock engineering. Rocscience. Disponível, outubro 2017, em <https://www.rocscience.com/documents/hoek/corner/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>

Kahraman, S. (2007). The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics* 46, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2007.05.003>

Kobranova, V.N. (1989). Petrophysics. Berlim/ Heidelberg/New York/London/Paris/Tokyo/Hong Kong: Springer-Verlag.

Lin, H. (2015). A simple proof on the inequality of arithmetic and geometric means. arXiv:1201.5534v3. <https://arxiv.org/abs/1201.5534v3>

Livesey, J. H. (2007). Kurtosis provides a good omnibus test for outliers in small samples. *Clinical Biochemistry*, 40(13–14), 1032–1036. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2007.04.003>

Loczy, L., Ladeira, E.A. (1981). Geologia estrutural e introdução à geotectónica. São Paulo/Rio de Janeiro: Edgard Blücher/Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Look, B. G. & Griffiths, S. G. (2001). An engineering assessment of the strength and deformation properties of Brisbane rocks. *Aust Geomech*, 36 (3), 17-30.

Marini, P., Bellopede, R. (2010). The mechanical resistance of saturated stones. Alicante: Global Stone Congress 2010. <http://porto.polito.it/2372158/>

Maroco, J. (2010). Análise estatística - Com utilização do SPSS. 3ª ed., rev. e aumentada. Lisboa: Sílabo.

Mishra, D.A., Basu, A. (2013). Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system. *Engineering Geology* 160, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.04.004>

Nasseri, M.H.B., Rao, K.S., Ramamurthy, T. (2002). Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 3-23. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00103-X)

Noronha, F., Aires, S., Carvalho, C., Ramos, J.F., Moura, A.C., Moura, R., Sant'Ovaia, H., Ramos, V. (2011). Os xistos como recurso. O caso de Trás-os-Montes e Alto Douro. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Livro de Atas do VI Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território, 167-174.

NP EN 14579 (2007). Norma portuguesa para métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da velocidade de propagação do som. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 14580 (2007). Norma portuguesa para métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade estático. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1926 (2008). Norma portuguesa para métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão uniaxial. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 13755 (2008). Norma portuguesa para métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da absorção de água à pressão atmosférica. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

Rezende, K.S. (2016). Correlações entre propriedade geomecânicas para anfíbolitos e xistos do sul do estado de Minas Gerais, Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa.

Sousa, M.B. (1982). Litostratigrafia e estrutura do Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico – Grupo do Douro (NE Portugal). Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra.

Sousa, M.B., Sequeira, A.D., Neiva, J.C., Neiva, A., Azevedo, M., Colaboração de Ferreira, N. (1987). Folha 10-D (Alijó) da Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50 000. Lisboa: Serviços Geológicos.

Sousa, M.B., Sequeira, A.J. (1989). Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000. Notícia Explicativa da folha 10-D Alijó. Lisboa: Serviços Geológicos.

Wasserstein, R. L., & Lazar, N. A. (2016). The ASA's Statement on p -Values: Context, Process, and Purpose. *The American Statistician*, 70(2), 129–133. <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>

Xiaomeng, Y., E-chuan, Y., Yuju, L., Lianghua, Z. (2016). Anisotropic properties of Wudang group schist under the action of water and confining pressure. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21.17, 5509-5525.

Yagiz, S. (2010). Geomechanical properties of construction stones quarried in South-western Turkey. *Scientific Research and Essays* 5(8), 750-757.

A. Anexos

Tabela A.1 Informações dos provetes obtidos a partir da sondagem 15.

Referência	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Cota Superior (m)	Cota inferior (m)
15.1.1	63,18	61,61	282,50	282,45
15.1.2	63,08	61,63	282,45	282,38
15.2.1	63,12	66,74	282,38	282,32
15.2.2	63,15	61,64	282,32	282,27
15.2.3	63,20	124,74	282,27	282,15
15.3.1	63,10	126,29	282,15	282,03
15.3.2	63,09	56,12	282,03	281,97
15.3.3	63,08	62,23	281,97	281,91
15.3.4	63,15	127,26	281,91	281,79
15.4.1	63,12	61,44	276,92	276,86
15.4.2	63,24	61,55	276,86	276,79
15.5.1	63,09	67,12	275,87	275,81
15.5.2	63,11	61,92	275,81	275,76
15.5.3	63,14	65,43	275,76	275,68
15.6.1	63,15	126,13	275,46	275,34
15.6.2	63,10	63,70	275,34	275,26
15.10.1	63,22	62,98	275,26	275,18
15.10.2	63,29	62,36	275,18	275,12
15.10.3	63,20	60,30	275,12	275,07
15.10.4	63,52	59,85	275,07	275,01
15.10.5	63,10	60,21	275,01	274,95
15.10.6	63,21	61,88	274,95	274,90
15.10.7	63,50	61,12	274,90	274,84
15.10.8	63,39	58,79	274,84	274,78
15.10.9	63,35	67,69	274,78	274,67

Tabela A.2 Informações dos provetes obtidos a partir da sondagem 21.

Referência	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Cota Superior (m)	Cota inferior (m)
21.0.1	84,72	88,70	201,80	201,71
21.0.2	84,72	171,00	201,71	201,55
21.1.1	84,83	82,48	203,83	203,75
21.1.2	84,75	85,68	203,75	203,66
21.2.2	84,81	89,74	203,57	203,49
21.2.3	84,72	171,50	203,49	203,33
21.3.1	84,77	169,50	203,33	203,14
21.3.2	84,79	85,92	203,14	203,05
21.4.1	84,79	82,22	189,73	189,63
21.4.2	84,83	86,56	189,63	189,50
21.10.1	84,75	88,38	201,49	201,41
21.10.2	84,76	84,32	201,41	201,33
21.10.3	84,76	83,06	201,33	201,25
21.10.4	84,73	86,86	201,25	201,16
21.10.5	84,76	86,31	201,16	201,09
21.10.6	84,77	83,89	201,09	201,01
21.10.7	84,74	85,08	201,01	200,93
21.10.8	84,78	83,56	200,93	200,85
21.10.9	84,75	86,22	200,85	200,77
21.10.10	84,77	89,10	200,77	200,67

Tabela A.3 Informações dos provetes obtidos a partir da sondagem 22.

Referência	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Cota Superior (m)	Cota inferior (m)
22.1.1	62,98	61,69	350,59	350,49
22.1.2	62,91	60,69	350,49	350,42
22.1.3	62,98	61,15	350,42	350,36
22.1.4	62,97	125,15	350,36	350,20
22.2.1	63,46	64,95	298,22	298,12
22.2.2	63,16	61,45	298,12	298,05
22.2.3	63,24	127,71	298,05	297,91
22.2.4	63,31	125,78	297,91	297,78
22.2.5	63,36	60,52	297,78	297,71
22.2.6	63,42	61,59	297,71	297,64
22.2.7	63,26	61,41	297,64	297,57
22.2.8	63,32	61,59	297,57	297,50
22.2.9	63,34	62,67	297,50	297,43
22.2.10	63,28	61,80	297,43	297,36
22.2.11	63,31	60,68	297,36	297,26
22.3.1	63,04	117,59	299,81	299,72
22.3.2	63,09	62,89	299,72	299,65
22.3.3	63,10	61,73	299,65	299,58
22.3.4	63,23	61,31	299,58	299,51
22.3.5	63,27	60,50	299,51	299,44
22.3.6	63,24	126,86	299,44	299,30
22.4.1	63,07	126,32	301,15	301,01
22.4.2	63,05	59,56	301,01	300,94
22.4.3	63,06	63,16	300,94	300,86

Tabela A.4 Resultados dos ensaios da sondagem 15. p_a : porosidade aberta; ρ_s : massa volúmica do sólido; ρ_a : massa volúmica aparente; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à p pressão atmosférica; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R : compressão uniaxial; $I_p(50)$: carga pontual axial; $I_d(50)$: carga pontual diametral; $A_{b,E}$: absorção depois do módulo de elasticidade.

Amostra	p_a (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_a (kg/m ³)	v_{sec} (m/s)	v_{sat} (m/s)	A_b (%)	E_{sec} (GPa)	E_{sat} (GPa)	R (MPa)	$I_p(50)_a$ (MPa)	$I_d(50)_b$ (MPa)	$A_{b,E}$ (%)
15.1.1	0,38	2774,39	2763,77	4541,28	5050,00	0,12	-	-	99,22	-	-	-
15.1.2	0,45	2780,51	2768,14	4481,82	4890,87	0,12	-	-	-	4,69	-	-
15.2.1	0,37	2774,32	2764,00	4489,24	4576,46	0,11	-	-	-	4,30	-	-
15.2.2	0,37	2759,60	2749,34	4600,00	5108,29	0,13	-	-	96,39	-	-	-
15.2.3	0,39	2776,34	2765,51	4527,59	5009,44	0,11	61,04	43,78	-	-	-	0,10
15.3.1	0,57	2764,86	2749,01	4606,32	5123,33	0,11	58,61	46,41	-	-	-	0,10
15.3.2	0,52	2781,75	2767,34	4372,60	4624,86	0,16	-	-	-	5,56	-	-
15.3.3	0,29	2773,63	2765,65	4492,78	4874,02	0,13	-	-	88,84	-	-	-
15.3.4	0,57	2754,01	2738,35	4563,84	5251,24	0,11	59,93	53,63	-	-	-	0,11
15.4.1	0,44	2772,91	2760,74	4357,45	5022,34	0,14	-	-	121,85	-	-	-
15.4.2	0,54	2759,82	2744,87	4249,37	5030,93	0,16	-	-	-	-	-	-
15.5.1	0,37	2802,64	2792,26	4063,47	4816,87	0,18	-	-	-	-	-	-
15.5.2	0,57	2786,18	2770,45	3628,13	4775,32	0,20	-	-	-	-	-	-
15.5.3	0,57	2817,91	2801,89	3575,14	4695,57	0,20	-	-	132,23	-	-	-
15.6.1	0,58	2786,55	2770,32	3536,36	4561,66	0,22	43,11	30,57	-	-	-	0,23
15.6.2	0,49	2794,72	2781,06	3388,03	4544,23	0,23	-	-	95,31	-	-	-
15.10.1	0,34	2774,31	2764,89	4080,45	4926,34	-	-	-	-	-	-	-
15.10.2	0,35	2785,23	2775,40	3922,01	4803,08	-	-	-	-	-	-	-
15.10.3	0,41	2781,43	2769,97	3915,58	4717,08	-	-	-	-	-	-	-
15.10.4	0,44	2782,46	2770,12	3779,68	4852,30	-	-	-	-	-	-	-
15.10.5	0,41	2793,36	2781,83	3901,30	4901,76	-	-	-	-	-	3,93	-
15.10.6	0,28	2804,32	2796,53	4796,90	4687,88	-	-	-	-	-	-	-
15.10.7	0,31	2792,80	2784,146	4171,67	4961,98	-	-	-	-	-	-	-
15.10.8	0,25	2796,66	2789,67	4179,38	4919,67	-	-	-	-	-	-	-
15.10.9	0,24	2798,18	2791,56	4467,99	4928,88	-	-	-	-	-	1,82	-

Análise de propriedades físicas de rochas metassedimentares silicatadas

Tabela A.5 Resultados dos ensaios da sondagem 21. p_a : porosidade aberta; ρ_s : massa volúmica do sólido; ρ_a : massa volúmica aparente; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; A_b : absorção de água à pressão atmosférica; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R : compressão uniaxial; $I_c(50)$: carga pontual axial; $I_c(50)_b$: carga pontual diametral; $A_{b,E}$: absorção depois do módulo de elasticidade.

Amostra	p_a (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_a (kg/m ³)	v_{sec} (m/s)	v_{sat} (m/s)	A_b (%)	E_{sec} (GPa)	E_{sat} (GPa)	R (MPa)	$I_c(50)_a$ (MPa)	$I_c(50)_b$ (MPa)	$A_{b,E}$ (%)
21.0.1	0,51	2785,36	2771,23	4025,49	4955,03	0,17	-	-	-	-	-	-
21.0.2	0,51	2775,85	2761,76	4130,44	4937,44	0,17	56,27	50,65	-	-	-	0,16
21.1.1	0,73	2783,43	2763,24	3514,56	4690,52	0,21	-	-	141,99	-	-	-
21.1.2	0,73	2763,07	2742,91	2969,84	4669,21	0,22	-	-	-	5,66	-	-
21.2.2	0,79	2801,98	2779,79	3695,33	4649,48	0,18	-	-	81,17	-	-	-
21.2.3	0,35	2803,60	2793,74	3732,32	4509,20	0,18	43,00	25,00	-	-	-	0,19
21.3.1	0,45	2799,14	2786,55	3837,74	4490,07	0,17	41,99	22,53	-	-	-	0,18
21.3.2	0,46	2804,43	2791,67	4005,36	4614,95	0,16	-	-	65,53	-	-	-
21.4.1	0,33	2768,11	2758,98	4559,06	4779,94	0,09	-	-	-	-	-	-
21.4.2	0,29	2768,41	2760,47	4596,11	4800,00	0,12	-	-	124,04	-	-	-
21.10.1	0,46	2803,37	2790,59	3865,02	4882,87	-	-	-	-	-	2,37	-
21.10.2	0,46	2807,56	2794,67	3736,26	4850,34	-	-	-	-	4,26	-	-
21.10.3	0,51	2795,96	2781,59	3451,25	4895,48	-	-	-	-	-	1,85	-
21.10.4	0,53	2787,94	2773,22	3404,05	4911,97	-	-	-	-	-	-	-
21.10.5	0,45	2799,39	2786,85	3573,71	4913,00	-	-	-	-	-	2,04	-
21.10.6	0,51	2791,99	2777,64	3745,09	4863,19	-	-	-	-	-	-	-
21.10.7	0,43	2806,02	2794,07	3635,68	4912,90	-	-	-	-	-	2,58	-
21.10.8	0,45	2797,77	2785,31	3801,06	4811,52	-	-	-	-	3,07	-	-
21.10.9	0,48	2781,91	2768,52	3389,84	4870,90	-	-	-	-	-	2,01	-
21.10.10	0,38	2814,50	2803,73	3519,42	4656,79	-	-	-	-	-	-	-

Tabela A.6 Resultados dos ensaios da sondagem 22. p_a : porosidade aberta; ρ_s : massa volúmica do sólido; ρ_a : massa volúmica aparente; v_{sec} : velocidade de propagação dos ultrassons seco; v_{sat} : velocidade de propagação dos ultrassons saturado; E_{sec} : módulo de elasticidade seco; E_{sat} : módulo de elasticidade saturado; R : compressão uniaxial; $I_1(50)$: carga pontual axial; $A_{b\epsilon}$: absorção depois do módulo de elasticidade.

Amostra	p_a (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_a (kg/m ³)	v_{sec} (m/s)	v_{sat} (m/s)	E_{sec} (GPa)	E_{sat} (GPa)	R (MPa)	$I_1(50)_A$ (MPa)	$A_{b\epsilon}$ (%)
22.1.1	0,53	2815,84	2801,02	4603,73	5198,60	-	-	73,35	-	-
22.1.2	0,50	2815,89	2801,72	4686,10	5201,57	-	-	-	-	-
22.1.3	0,56	2801,48	2785,72	4399,28	5138,66	-	-	125,67	-	-
22.1.4	0,70	2797,32	2777,75	4355,39	5125,39	38,43	24,53	-	-	0,27
22.2.1	0,15	2795,03	2790,91	5967,84	5647,83	-	-	-	-	-
22.2.2	0,24	2796,09	2789,46	5637,62	5207,63	-	-	92,96	-	-
22.2.3	0,14	2790,70	2786,88	5520,39	5291,64	54,18	51,15	-	-	0,02
22.2.4	0,12	2765,66	2762,45	5877,34	5520,48	64,39	57,39	-	-	0,03
22.2.5	0,14	2739,61	2735,87	6437,77	5856,29	-	-	221,58	-	-
22.2.6	0,12	2725,50	2722,26	6471,80	5950,73	-	-	-	6,40	-
22.2.7	0,22	2746,56	2740,45	6363,73	5712,56	-	-	158,55	-	-
22.2.8	0,12	2768,91	2765,50	6037,75	5301,44	-	-	-	4,36	-
22.2.9	0,20	2800,76	2795,11	5732,01	5237,05	-	-	99,63	-	-
22.2.10	0,22	2803,65	2797,47	5942,31	5282,05	-	-	-	5,56	-
22.2.11	0,21	2799,41	2793,55	5834,14	5299,13	-	-	85,78	-	-
22.3.1	0,14	2789,94	2786,15	5340,95	5300,83	-	-	-	-	-
22.3.2	0,16	2797,36	2792,98	5284,87	5133,88	-	-	96,81	-	-
22.3.3	0,17	2807,59	2802,83	5186,98	5208,86	-	-	-	-	-
22.3.4	0,23	2813,30	2806,90	5417,67	5144,90	-	-	-	-	-
22.3.5	0,18	2814,22	2809,19	5306,58	5090,74	-	-	89,24	-	-
22.3.6	0,16	2804,05	2799,71	5030,80	5136,03	47,07	44,84	-	-	0,04
22.4.1	0,16	2779,29	2774,93	5177,05	5201,92	41,64	33,46	-	-	0,04
22.4.2	0,20	2774,70	2769,05	5663,39	5381,93	-	-	73,79	-	-
22.4.3	0,20	2785,85	2780,37	5307,14	5314,59	-	-	-	6,20	-