

Contributo para a Caracterização Geológica e Geotécnica dos Diferentes Complexos Vulcânicos da Ilha da Madeira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Alexandre de Sousa Catanho

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

Susana Luisa Rodrigues Nascimento Prada

CO-ORIENTAÇÃO

José Fernando Vieira de Sousa

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Susana Nascimento Prada, minha orientadora, pela sua amabilidade em me facultar todo o apoio científico necessário para a elaboração do trabalho, bem como pela sua ajuda e seus úteis pareceres.

Ao Engenheiro Fernando Vieira, então presidente do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) e director do respectivo Departamento de Geotecnia, meu co-orientador, pela sua enorme disponibilidade para acompanhar o trabalho efectuado, pelas suas úteis sugestões técnicas, bem como pela cedência de todos elementos técnicos e bibliográficos necessários à elaboração deste trabalho.

À instituição LREC, IP-RAM, pela faculdade de todas as condições logísticas e humanas necessárias à elaboração da parte prática desta dissertação.

Ao Engenheiro Amílcar Gonçalves, responsável pelo Núcleo de Materiais de Construção do Departamento de Estruturas, Materiais de Construção e Vias de Comunicação do LREC, pela sua paciência no decorrer dos ensaios laboratoriais, bem como pelo auxílio prestado no extenso tratamento de dados.

A todos os técnicos-adjuntos do Departamento de Geotecnia do LREC, pela constante disponibilidade para qualquer esclarecimento, mesmo durante o decorrer dos ensaios laboratoriais.

A todos aqueles que, sem intenção, não foram aqui mencionados e que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

E por último, e não menos importante, aos meus pais, pelo apoio óbvio e pelas condições fornecidas para a frequência do curso, à Gina, por toda a sua paciência, motivação e amor para comigo, e a todos os meus amigos e colegas que de algum modo me impulsionaram para concluir a minha formação superior, pois sem eles seria muito difícil terminar esta etapa da minha vida.

O meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho permite oferecer uma contribuição para a caracterização geológica-geotécnica dos três complexos vulcânicos da ilha da Madeira, através de sete amostras de material geológico, pertencentes a quatro das sete unidades vulcano-estratigráficas presentes na ilha. São estudados materiais da Unidade do Porto da Cruz (CVI 1), da Unidade da Encumeada (CVM 1), da Unidade dos Lombos (CVS 1) e da Unidade do Funchal (CVS 2), correspondendo a rochas vulcânicas muito alteradas, solos sedimentares, tufos, basaltos e mugearitos, respectivamente.

No âmbito da caracterização geológica, é efectuada uma classificação litológica do material amostrado. Também é realizado um estudo das descontinuidades dos maciços onde se efectuaram as amostragens, em função dos parâmetros atitude, espaçamento, abertura, rugosidade, preenchimento, extensão e n.º de famílias de descontinuidades.

No âmbito da caracterização geotécnica, é realizada uma campanha de ensaios laboratoriais aos materiais rochosos e terrosos, de forma a determinar uma série de parâmetros geotécnicos. Os ensaios realizados para as amostras de solo são: análise granulométrica; determinação do teor em água; determinação do teor em cinzas e matéria orgânica; determinação da densidade das partículas; determinação do equivalente de areia; e determinação dos limites de consistência (limites de Atterberg). Para as amostras de rochas, são efectuados ensaios para a determinação dos seguintes parâmetros: absorção de água à pressão atmosférica; massa volúmica aparente seca; resistência à compressão uniaxial; módulo de deformabilidade; e resistência à compressão deduzida através da dureza de ressalto de Schmidt.

Após a caracterização geológica-geotécnica dos materiais amostrados, é efectuada uma análise de resultados, bem como uma comparação com resultados de outras referências bibliográficas.

Este trabalho é um contributo para um banco de dados geológicos e geotécnicos sobre os complexos vulcânicos da ilha da Madeira, deixando em aberto a continuidade de estudos nesta temática.

ABSTRACT

This work aims to contribute to the geological-geotechnical characterization of the volcanic complex of Madeira Island, through seven samples of geological materials, belonging to four of the seven volcano-stratigraphic units present on the island.

Materials from Porto da Cruz unit (CVI 1), Encumeada unit (CVM 2), Lombos unit (CVS 1) and Funchal unit (CVS 2) are studied, corresponding to high weathered volcanic rocks, sedimentary soils (alluvial), tuffs, basalts and mugearites, respectively.

Within the geological characterization, lithological classification of the sampled material is made. It is also made a field characterization of the rock masses discontinuities (joints), depending on such geotechnical parameters as, orientation and dip, spacing, aperture, roughness, filling, persistence and number of sets of discontinuities.

Within the geotechnical characterization, soil and rock samples are tested, to achieve some geotechnical parameters. The laboratorial tests carried out to soil samples are: particle size analysis; water content determination; ash content and organic matter determination; particle density determination; sand equivalent determination; and Atterberg limits determination. The tests carried out to rock samples are: water absorption at atmospheric pressure determination; uniaxial compressive strength test; deformability modulus determination; and compressive strength deduced from rebound hardness values of the Schmidt hammer test.

After the geological-geotechnical characterization of sampled material, the analysis of the tests results and comparison with data from other bibliographical references is made.

This work is a contribution to a geological-geotechnical database of the volcanic complex of Madeira Island, allowing the continuation of such studies on this topic.

PALAVRAS-CHAVE

Ilha da Madeira, Portugal

Caracterização geológica-geotécnica

Descontinuidades em maciços rochosos

Análise granulométrica

Dureza de ressalto de Schmidt

Resistência à compressão uniaxial

Módulo de deformabilidade

KEYWORDS

Madeira Island, Portugal

Geological-geotechnical characterization

Discontinuities in rock masses

Granulometric analysis

Schmidt rebound hardness

Uniaxial compressive strength

Deformability modulus

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Apresentação.....	1
1.1.1. Contexto e objectivos	1
1.1.2. Disposição da dissertação	1
1.2. Enquadramento geográfico do arquipélago da Madeira	2
1.3. Enquadramento geológico da ilha da Madeira	3
1.3.1. Localização geotectónica e progresso geocronológico	3
1.3.2. Geomorfologia.....	4
1.3.3. Vulcano-estratigrafia	5
1.4. Material amostrado e respectiva localização	7
1.4.1. Amostra n.º 1.....	9
1.4.2. Amostra n.º 2.....	11
1.4.3. Amostra n.º 3.....	13
1.4.4. Amostra n.º 4.....	14
1.4.5. Amostra n.º 5.....	15
1.4.6. Amostra n.º 6.....	17
1.4.7. Amostra n.º 7.....	18
2. Caracterização geológica.....	21
2.1. Processos e produtos vulcânicos	21
2.1.1. Tipos de actividade vulcânica.....	21
2.1.2. Produtos vulcânicos	23
2.2. Caracterização geológica dos materiais amostrados	24
2.2.1. Caracterização litológica dos maciços em estudo.....	26
2.2.2. Estudo das discontinuidades dos maciços em estudo	34
3. Caracterização geotécnica	47
3.1. Ensaio realizados aos solos amostrados	49
3.1.1. Determinação do teor em água	49
3.1.2. Determinação do teor em água, cinzas e matéria orgânica	50
3.1.3. Análise granulométrica	51
3.1.4. Determinação da densidade das partículas	53
3.1.5. Ensaio de equivalente de areia	54
3.1.6. Determinação do limite de liquidez.....	55
3.1.7. Determinação do limite de plasticidade.....	56
3.2. Ensaio realizados às rochas amostradas	57

3.2.1.	Determinação da absorção de água à pressão atmosférica	58
3.2.2.	Determinação da resistência à compressão uniaxial	63
3.2.3.	Determinação do módulo de deformabilidade	66
3.2.4.	Determinação da dureza de ressalto através do martelo de SCHMIDT	69
4.	Análise de resultados obtidos.....	73
4.1.	Descrição geotécnica básica – BGD	73
4.2.	Classificação dos solos amostrados.....	76
4.2.1.	Classificação para fins rodoviários (LNEC E 240 – 1971).....	76
4.2.2.	Classificação unificada (ASTM D 2487 – 00).....	77
4.3.	Confrontação e análise dos resultados obtidos com dados de outras referências bibliográficas .78	
4.3.1.	Propriedades geotécnicas das amostras de solo	78
4.3.2.	Peso volúmico seco das amostras rochosas	81
4.3.3.	Resistência à compressão uniaxial das amostras rochosas	85
4.3.4.	Resistência à compressão das amostras rochosas, deduzida através da dureza de ressalto de SCHMIDT	88
4.3.5.	Módulo de deformabilidade das amostras rochosas	90
4.3.6.	Correlações efectuadas entre os parâmetros geotécnicos das rochas estudadas	92
5.	Considerações finais	103
	Referências bibliográficas.....	105
	ANEXOS.....	109
	Anexo I.....	111
	Anexo II.....	115
	Anexo III.....	117
	Anexo IV	121
	Anexo V	129
	Anexo VI	135
	Anexo VII	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Em pleno oceano Atlântico, destaca-se o enquadramento geográfico do arquipélago da Madeira [Fonte: adaptado de <i>Google™ Earth</i>].	2
Figura 2 – Relação entre a geocronologia do <i>Hot-spot Madeira</i> e a sua evolução na placa tectónica [Fonte: adaptado de GELDMACHER <i>et. al.</i> (2000)].	3
Figura 3 – Noção batimétrica dos edifícios vulcânicos que constituem a crista Madeira/Tore [Fonte: PRADA (2000)].	3
Figura 4 – Noção da dimensão do edifício vulcânico da ilha da Madeira [Fonte: PRADA (2000)].	4
Figura 5 – Ilustração da ilha da Madeira com as respectivas relações de proximidade de todos os locais de amostragem [Fonte: adaptado de <i>Google™ Earth</i>].	8
Figura 6 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 1 [Fonte: adaptado de <i>Google™ Earth</i>].	9
Figura 7 – Fotografia da área onde foi recolhida a amostra n.º 1.	10
Figura 8 – Local da recolha da amostra n.º 1.	10
Figura 9 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha das amostras n.ºs 2, 3 e 4 [Fonte: adaptado de <i>Google™ Earth</i>].	11
Figura 10 – Local de recolha das amostras n.ºs 2, 3 e 4, com a ilustração da parte representativa do solo de granulometria grosseira presente no afloramento terroso.	12
Figura 11 – Parte representativa do solo de granulometria intermédia presente no afloramento terroso.	13
Figura 12 – Parte representativa do solo de granulometria fina presente no afloramento terroso.	14
Figura 13 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 5 [Fonte: adaptado de <i>Google™ Earth</i>].	15
Figura 14 – Fotografia do maciço rochoso onde foi recolhida a amostra n.º 5.	16
Figura 15 – a) Arriba costeira em fase inicial de obra; b) Arriba costeira em fase intermédia de obra.	16
Figura 16 - Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 6 [Fonte: adaptado de <i>Google™ Earth</i>].	17
Figura 17 – Fotografia da área onde foi recolhido o material para a amostra n.º 6.	17
Figura 18 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 7 [Fonte: adaptado de <i>Google™ Earth</i>].	18
Figura 19 – Fotografia da encosta, com ilustração do local de recolha da amostra n.º 7.	18
Figura 20 – Afloramento do maciço basáltico onde se recolheu material para a amostra n.º 7.	19
Figura 21 – Ilustração representativa de um vulcão-escudo do tipo Havaiano [Fonte: KRAFFT E KRAFFT (1975), em NUNES (2002)].	22
Figura 22 – a) Escoda lávica do vulcão Kilauea, Havai, E.U.A.; b) Erupção do vulcão Stromboli, Itália. [Fonte: www.usgs.gov].	23
Figura 23 – a) Exemplo de uma escoda de lava do tipo <i>pahoehoe</i> (local desconhecido); b) Exemplo de uma escoda de lava do tipo <i>aa</i> (vulcão Kilauea, Havai) [Fonte: www.usgs.gov].	24
Figura 24 – a) Pormenor do afloramento rochoso; b) sedimentos na base dos taludes rochosos.	26
Figura 25 – a) Filão que atravessa o maciço de onde se recolheu o material amostrado; b) local onde as amostras foram recolhidas.	27
Figura 26 – Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 1, sendo a vulcano-estratigrafia CVI 1 representada pela cor laranja [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA <i>et. al.</i> (2010)].	27
Figura 27 – Afloramento terroso de origem sedimentar, contíguo ao local onde foram recolhidas as amostras.	28

Figura 28 – Panorama do cais do Porto da Cruz. Intercalado no maciço mugearítico e no maciço basáltico, encontra-se o maciço terroso sedimentar estudado, com indicação do local de recolha das amostras n.ºs 2, 3 e 4.....	28
Figura 29 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foram recolhidas as amostras n.ºs 2, 3 e 4, sendo a vulcano-estratigrafia CVS 2 g representada pela cor verde [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA <i>et. al.</i> (2010)].	29
Figura 30 – a) Afloramento terroso no local de recolha das amostras; b) Pormenor da granulometria da amostra recolhida.	29
Figura 31 – Arriba do maciço rochoso de onde foi recolhida a rocha mugearítica.	30
Figura 32 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 5, sendo a vulcano-estratigrafia CVS 2 μ representada pela cor verde-escuro [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA <i>et. al.</i> (2010)].	30
Figura 33 – a) Afloramento mugearítico do maciço de onde foram recolhidas as amostras; b) pormenor de um bloco solto de mugearito encontrado no local.....	31
Figura 34 – a) Evidência de alternância de derrame lávico com tufo de piroclastos de queda; b) Afloramento rochoso onde se deu a amostragem do tufo.	31
Figura 35 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 6, sendo a vulcano-estratigrafia CVM 1 β representada pela cor lilás [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA <i>et. al.</i> (2010)].	32
Figura 36 – a) Afloramento onde se recolheram as amostras de tufo; b) Pormenor da superfície do tufo vulcânico da Ameixeira.	32
Figura 37 – Afloramento do maciço basáltico, onde foi feita a amostragem.....	33
Figura 38 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 7, sendo a vulcano-estratigrafia CVS 1 β representada pela cor verde-claro [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA <i>et. al.</i> (2010)].	33
Figura 39 – Pormenor da superfície de um plano de descontinuidade do basalto da Fajã do Cerejo.....	34
Figura 40 – Bússola de Geólogo utilizada neste trabalho.....	35
Figura 41 – Ilustração representativa das classes de rugosidades dos planos das descontinuidades [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].	38
Figura 42 – a) Afloramento rochoso da Fajã de Milho, com ilustração da família de fracturas <i>F1-a</i> ; b) o mesmo afloramento rochoso, mas com indicação da família de descontinuidades <i>F1-b</i>	40
Figura 43 – Determinação da atitude da família de descontinuidades <i>F1-b</i> , com o auxílio da bússola provida de clinómetro.....	40
Figura 44 – a) Momento da medição do espaçamento das fracturas da família <i>F1-a</i> ; b) medição do espaçamento das descontinuidades da <i>F1-b</i>	40
Figura 45 – Pormenor do afloramento rochoso onde se podem ver aberturas e espessuras na <i>F1-a</i> e <i>F1-b</i>	41
Figura 46 – Local onde se mediu a atitude da superfície de estratificação do maciço terroso.	42
Figura 47 – Afloramento inacessível de rocha mugearítica, fotografado a cerca de 25 metros da parede rochosa, de onde se pode ver o coroamento do muro de suporte.	42
Figura 48 – a) Afloramento mugearítico no sítio do Serrado, com ilustração da família de diaclases <i>F5-b</i> ; b) O mesmo afloramento, com indicação da família de superfícies de estratificação <i>F5-a</i> e da família de diaclases <i>F5-c</i>	43
Figura 49 – a) Pormenor das superfícies de estratificação da família <i>F5-a</i> , visíveis no afloramento; b) Aproximação ao pormenor da medição de uma abertura da família de diaclases <i>F5-b</i>	43

Figura 50 – a) Pormenor de uma espessura da família <i>F5-b</i> , preenchida com terra vegetal/matéria orgânica e material argiloso; b) Pormenor de uma abertura da família <i>F5-b</i>	44
Figura 51 – a) Vista do afloramento basáltico com as descontinuidades assinaladas; b) Pormenor do afloramento com boa percepção das descontinuidades.....	45
Figura 52 – a) Medição da direcção do plano da diaclase em estudo; b) Medição da inclinação da mesma fractura no maciço basáltico.	45
Figura 53 – a) Medição da abertura da descontinuidade da família <i>F7</i> ; b) Pormenor do preenchimento de uma descontinuidade da mesma família.	46
Figura 54- Parâmetros de resistência e deformabilidade referentes a solos e a rochas [Fonte: adaptado de LADEIRA (1986)].	48
Figura 55 – Parâmetros de resistência e deformabilidade de solos, rochas e rochas brandas [Fonte: adaptado de ROCHA (1977), em COSTA (2006)].	48
Figura 56 – Fotografia tirada ao interior da estufa, no LREC, onde se encontravam provetes de solo a secar para a determinação do seu teor em água.	50
Figura 57 - Curvas granulométricas referentes ao material considerado como solo, proveniente da rocha vulcânica profundamente alterada, correspondente à amostra n.º 1 (sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz).	52
Figura 58 - Curvas granulométricas referentes aos solos sedimentares correspondentes às amostras n.º 2, 3 e 4 (cais do Porto da Cruz).	53
Figura 59 – Momento em que se obtinha carotes de mugarito.....	57
Figura 60 – Provetes com relação $L/D=1$, das três amostras de rochas (da esquerda para a direita: tufos, basaltos, mugaritos) durante a fase de imersão do ensaio.	58
Figura 61 – a) Fase inicial do ensaio à RCU do carote 11 da amostra de mugarito; b) estado do mesmo carote após rotura; c) registo da força de rotura pelo software da máquina de ensaio.	63
Figura 62 – Alguns provetes de mugarito com relação $L/D=2$	66
Figura 63 – Ilustração descritiva do aparato montado para auxílio da determinação do módulo de deformabilidade.	66
Figura 64 – a) Provete de basalto no início do ensaio à RCU; b) monitorização dos deslocamentos no provete através do vídeo-extensómetro; c) software da máquina de compressão relacionando a carga aplicada com os deslocamentos transmitidos pelo vídeo-extensómetro; d) provete de basalto destruído após atingir carga de rotura.	67
Figura 65 – Martelo de Schmidt <i>Proceq N</i> , utilizado para a determinação da dureza de ressalto.....	70
Figura 66 – Momento do ensaio esclerométrico a um bloco de mugarito.....	70
Figura 67 – Comparação entre as curvas granulométricas do solo da amostra n.º 1 e as curvas granulométricas de um solo de origem vulcânica apresentado por PERNETA (2011).....	79
Figura 68 - Comparação entre as curvas granulométricas do solo da amostra n.º 1 e as curvas granulométricas de um solo de origem vulcânica apresentado por JESUS (2011).	80
Figura 69 – Valores médios, mínimos e máximos do peso volúmico seco das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.....	81
Figura 70 – Valores médios, mínimos e máximos de amostras do peso volúmico seco de rochas piroclásticas, retirados de várias referências bibliográficas.	82
Figura 71 - Valores médios, mínimos e máximos do peso volúmico seco de amostras de rochas vulcânicas, retirados de várias referências bibliográficas.	84
Figura 72 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão uniaxial das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.	85

Figura 73 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão uniaxial de amostras de rochas piroclásticas, retirados de várias referências bibliográficas.	86
Figura 74 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão uniaxial de amostras de rochas vulcânicas, retirados de várias referências bibliográficas.	87
Figura 75 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.....	88
Figura 76 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão, deduzida através do martelo de Schmidt, de amostras de rochas vulcânicas, retirados de várias referências bibliográficas.....	89
Figura 77 – Valores médios, mínimos e máximos do módulo de deformabilidade das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.	90
Figura 78 – Valores médios, mínimos e máximos do módulo de deformabilidade de amostras de rochas piroclásticas, retirados de outras referências bibliográficas.....	91
Figura 79 – Valores médios, mínimos e máximos do módulo de deformabilidade de amostras de rochas vulcânicas, retirados de outras referências bibliográficas.....	92
Figura 80 – Relação entre as durezas de ressalto de Schmidt e as RCU obtidas em laboratório, referentes ao basalto da amostra n.º 7.	93
Figura 81 – Relação entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, para as amostras n.ºs 5 e 6.....	94
Figura 82 – Relação entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, para amostras rochosas retiradas de várias referências bibliográficas.	94
Figura 83 – Relação entre a RCU e a massa volúmica seca de materiais vulcânicos retirados de outras referências bibliográficas.	95
Figura 84 – Relação entre a RCU e o peso volúmico seco das amostras n.ºs 5, 6 e 7 e de rochas de outras referências bibliográficas.	96
Figura 85 - Relação entre o módulo de deformabilidade e o peso volúmico seco das amostras n.ºs 5, 6 e 7 e de rochas de outras referências bibliográficas.....	97
Figura 86 - Relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU da amostra n.º 6 e de rochas piroclásticas de outras referências bibliográficas.....	98
Figura 87 - Relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU das amostras n.ºs 5 e 7 e de rochas basálticas de outras referências bibliográficas.	99
Figura 88 - Relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU das amostras n.ºs 5, 6 e 7 e de rochas de origem vulcânica de outras referências bibliográficas.	100
Figura 89 – Relação entre a RCU e a absorção de água [adaptado de ITO <i>et. al.</i> (2007)]......	101
Figura 90 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 1, (solo da Fajã de Milho, Porto da Cruz).....	115
Figura 91 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 2, (solo de granulometria grosseira do cais do Porto da Cruz).	115
Figura 92 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 3, (solo de granulometria intermédia do cais do Porto da Cruz).	115
Figura 93 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 4, (solo de granulometria fina do cais do Porto da Cruz).	116
Figura 94 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 5 (blocos de mugarito), a partir dos valores médios das durezas de ressalto de Schmidt obtidas no respectivo ensaio esclerométrico [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].	117

Figura 95 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 5 (blocos de mugarito), a partir do valor médio absoluto de dureza de ressalto de Schmidt obtido [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].	117
Figura 96 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 6 (blocos de tufo), a partir dos valores médios das durezas de ressalto de Schmidt obtidas no respectivo ensaio esclerométrico [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].	118
Figura 97 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 6 (blocos de tufo), a partir do valor médio absoluto de dureza de ressalto de Schmidt obtido [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].	118
Figura 98 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 7 (carotes cilíndricos de basalto), a partir dos valores médios das durezas de ressalto de Schmidt obtidas no respectivo ensaio esclerométrico [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].	119
Figura 99 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 7 (carotes cilíndricos de basalto), a partir do valor médio absoluto de dureza de ressalto de Schmidt obtido [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].	119
Figura 100 – Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 18 de mugarito (amostra n.º 5).	121
Figura 101 – Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 18 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	121
Figura 102 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 19 de mugarito (amostra n.º 5).	122
Figura 103 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 19 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	122
Figura 104 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 20 de mugarito (amostra n.º 5).	122
Figura 105 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 20 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	123
Figura 106 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 21 de mugarito (amostra n.º 5).	123
Figura 107 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 21 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	123
Figura 108 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 22 de mugarito (amostra n.º 5).	124
Figura 109 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 22 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	124
Figura 110 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 23 de mugarito (amostra n.º 5).	124
Figura 111 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 23 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	125
Figura 112 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 24 de mugarito (amostra n.º 5).	125
Figura 113 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 24 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	125
Figura 114 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 25 de mugarito (amostra n.º 5).	126

Figura 115 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 25 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	126
Figura 116 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 26 de mugarito (amostra n.º 5).	126
Figura 117 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 26 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	127
Figura 118 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 27 de mugarito (amostra n.º 5).	127
Figura 119 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 27 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	127
Figura 120 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 2 de tufo (amostra n.º 6).	129
Figura 121 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 2 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	129
Figura 122 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 3 de tufo (amostra n.º 6).	129
Figura 123 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 3 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	130
Figura 124 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 4 de tufo (amostra n.º 6).	130
Figura 125 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 4 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	130
Figura 126 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 5 de tufo (amostra n.º 6).	131
Figura 127 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 5 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	131
Figura 128 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 6 de tufo (amostra n.º 6).	131
Figura 129 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 6 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	132
Figura 130 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 7 de tufo (amostra n.º 6).	132
Figura 131 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 7 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	132
Figura 132 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 8 de tufo (amostra n.º 6).	133
Figura 133 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 8 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	133
Figura 134 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 9 de tufo (amostra n.º 6).	133
Figura 135 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 9 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	134
Figura 136 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 10 de tufo (amostra n.º 6).	134
Figura 137 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 10 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	134
Figura 138 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 1 de basalto poroso (amostra n.º 7).	135
Figura 139 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 1 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	135
Figura 140 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 2 de basalto poroso (amostra n.º 7).	136
Figura 141 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 2 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	136

Figura 142 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 6 de basalto poroso (amostra n.º 7).	136
Figura 143 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 6 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	137
Figura 144 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 16 de basalto poroso (amostra n.º 7).	137
Figura 145 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 16 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	137
Figura 146 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 19 de basalto poroso (amostra n.º 7).	138
Figura 147 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 19 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	138
Figura 148 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 4 de basalto compacto (amostra n.º 7).	139
Figura 149 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 4 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	139
Figura 150 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 8 de basalto compacto (amostra n.º 7).	139
Figura 151 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 8 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	140
Figura 152 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 9 de basalto compacto (amostra n.º 7).	140
Figura 153 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 9 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	140
Figura 154 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 23 de basalto compacto (amostra n.º 7).	141
Figura 155 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 23 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	141
Figura 156 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 24 de basalto compacto (amostra n.º 7).	141
Figura 157 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 24 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.	142

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Classificação da dimensão das partículas piroclásticas de queda [Fonte: adaptado de CANHA (2007)].	24
Quadro 2 – Terminologia que caracteriza o espaçamento entre descontinuidades [Fonte: adaptado de LADEIRA (1986) e de LIMA & MENEZES (2008)].	36
Quadro 3 – Descrição da abertura das descontinuidades [Fonte: adaptado de LADEIRA (1986) e de LIMA & MENEZES (2008)].	37
Quadro 4 – Descrição da rugosidade dos planos das fracturas. [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].	37
Quadro 5 – Descrição da extensão das descontinuidades [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].	39
Quadro 6 – Descrição das descontinuidades das famílias <i>F1-a</i> e <i>F1-b</i> em função dos parâmetros de estudo.	41
Quadro 7 - Descrição das descontinuidades das famílias <i>F5-a</i> , <i>F5-b</i> e <i>F5-c</i> em função dos parâmetros de estudo.	44
Quadro 8 - Descrição das famílias de descontinuidades em função dos parâmetros de estudo.	46
Quadro 9- Teores em água das amostras de solo.	50
Quadro 10 – Resultados do ensaio para a determinação da percentagem de cinzas e matéria orgânica das amostras de solo.	51
Quadro 11 – Frações granulométricas de cada tipo de solo [Fonte: adaptado de LNEC E 196 – 1966].	52
Quadro 12 – Densidade das partículas de cada amostra de solo.	54
Quadro 13 – Resultados do ensaio de Equivalente de Areia para cada amostra de solo e respectivos provetes.	54
Quadro 14 – Limites de liquidez referentes à amostra n.º 1 (Fajã de Milho, Porto da Cruz).	55
Quadro 15 - Limites de liquidez referentes à amostra n.º 2, solo de granulometria grosseira (cais do Porto da Cruz).	55
Quadro 16 - Limites de liquidez referentes à amostra n.º 3, solo de granulometria intermédia (cais do Porto da Cruz).	55
Quadro 17 - Limites de liquidez referentes à amostra n.º 4, solo de granulometria fina (cais do Porto da Cruz).	56
Quadro 18 – Limites de plasticidade da amostra n.º 1 (Fajã de Milho, Porto da Cruz).	56
Quadro 19 – Limites de plasticidade da amostra n.º 2, solo de granulometria grosseira (cais do Porto da Cruz).	56
Quadro 20 – Limites de plasticidade da amostra n.º 3, solo de granulometria intermédia (cais do Porto da Cruz).	57
Quadro 21 – Limites de plasticidade da amostra n.º 4, solo de granulometria fina (cais do Porto da Cruz).	57
Quadro 22 – Apresentação da massa volúmica seca e peso volúmico seco da amostra n.º 5, mugearito, e resultados do ensaio de absorção em água para os provetes L/D=1 da mesma amostra.	59
Quadro 23 – Apresentação da massa volúmica seca e peso volúmico seco da amostra n.º 6, tufo, e resultados do ensaio de absorção em água para os provetes L/D=1 da mesma amostra.	60
Quadro 24 - Apresentação da massa volúmica seca e peso volúmico seco da amostra n.º 7, basalto, e resultados do ensaio de absorção em água para os provetes L/D=1 da mesma amostra.	61
Quadro 25 – Reorganização dos provetes de basalto em função do seu estado de porosidade, conforme o respectivo peso volúmico seco.	62

Quadro 26 – Valores da resistência à compressão uniaxial simples resultantes do ensaio à amostra n.º 5.	64
Quadro 27 – Valores da resistência à compressão uniaxial simples resultantes do ensaio à amostra n.º 6.	64
Quadro 28 – Valores da resistência à compressão uniaxial simples resultantes do ensaio à amostra n.º 7.	65
Quadro 29 – Resultados do ensaio para determinação do módulo de deformabilidade da amostra n.º 5.	68
Quadro 30 – Resultados do ensaio para determinação do módulo de deformabilidade da amostra n.º 6.	68
Quadro 31 – Resultados do ensaio para determinação do módulo de deformabilidade da amostra n.º 7.	69
Quadro 32 – Resistências à compressão das amostras de mugearito e de tufo, deduzidas através das respectivas durezas de ressaltos de Schmidt.	71
Quadro 33 - Resistência à compressão da amostra de basalto, deduzida através da respectiva dureza de ressalto de Schmidt.	71
Quadro 34 – Graus de alteração dos maciços rochosos [Fonte: adaptado de COSTA (2006) e LIMA & MENEZES (2008)].	74
Quadro 35 – Graus de fracturação de maciços rochosos [Fonte: adaptado de COSTA (2006) e LIMA & MENEZES (2008)].	74
Quadro 36 – Espessura das camadas rochosas [Fonte: adaptado de ISRM (1981), por LIMA & MENEZES (2008)].	75
Quadro 37 – Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].	75
Quadro 38 – Quadro resumo da descrição geotécnica básica (BGD) para os maciços rochosos estudados.	76
Quadro 39 – Parâmetros necessários para efectuar a classificação para fins rodoviários.	77
Quadro 40 – Classificação para fins rodoviários, segundo LNEC E 240 – 1971.	77
Quadro 41 – Fracções de material retido e passado (acumulados) nos peneiros n.º 4 e n.º 200.	78
Quadro 42 – Classificação para fins de engenharia, segundo ASTM D 2487 – 00.	78
Quadro 43 – Comparação de parâmetros geotécnicos dos solos das amostras n.os 2, 3 e 4 e dos solos vulcânicos sedimentares apresentados por GONZALEZ DE VALLEJO <i>et. al.</i> (2007).	81
Quadro 44 – Legenda de cinco diferentes litologias de piroclastos pouco consolidados de Canárias [adaptado de SERRANO <i>et. al.</i> (2007)].	82
Quadro 45 - Legenda de diferentes litologias de rochas vulcânicas de Canárias [adaptado de RODRIGUEZ-LOSADA <i>et. al.</i> (2007)].	83
Quadro 46 – Relação entre a RCU de provetes com L/D=2 e a RCU de provetes com L/D=1.	85
Quadro 47 – Médias das relações entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, das amostras n.os 5 e 6, para provetes com L/D=1 e L/D=2.	94
Quadro 48 - Médias das relações entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, das amostras rochosas da ilha da Madeira, para provetes com L/D=1 e L/D=2.	95
Quadro 49 – Resultados da análise granulométrica realizada ao solo referente à amostra n.º 1 (sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz).	111
Quadro 50 - Resultados da análise granulométrica realizada ao solo sedimentar referente à amostra n.º 2 (solo de granulometria grosseira do cais do Porto da Cruz).	112
Quadro 51 - Resultados da análise granulométrica realizada ao solo sedimentar referente à amostra n.º 3 (solo de granulometria intermédia do cais do Porto da Cruz).	113
Quadro 52 - Resultados da análise granulométrica realizada ao solo sedimentar referente à amostra n.º 4 (solo de granulometria fina do cais do Porto da Cruz).	114

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

1.1.1. Contexto e objectivos

Com vista à obtenção do grau de Mestre do curso de Engenharia Civil, a presente dissertação compreende a área específica da Geologia de Engenharia, tendo como fim a caracterização geológica e geotécnica de um conjunto de diferentes tipos de materiais, terrosos e rochosos, encontrados e recolhidos nas formações vulcânicas existentes na ilha da Madeira.

A ilha da Madeira, bem como as restantes ilhas constituintes do arquipélago da Madeira, é de origem vulcânica, sendo por isso relevante efectuar estudos de caracterização geológica e geotécnica dos materiais de origem vulcânica. Este trabalho de investigação permite correlacionar os campos da Geotecnia com os da Geologia, criando desse modo as bases necessárias à aplicação da Mecânica dos Solos e da Mecânica das Rochas, ou seja, da Geologia de Engenharia.

O tema escolhido permite oferecer uma contribuição para os actuais níveis de conhecimento geotécnico das formações vulcano-estratigráficas da ilha da Madeira, cuja carta geológica foi publicada recentemente [BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)]. Nesse sentido, esta dissertação tem como objectivo principal contribuir para a existência de um banco de dados sobre as características geológicas e geotécnicas de materiais terrosos e rochosos da ilha da Madeira.

Esta contribuição fornece um auxílio para a engenharia civil e construção civil, nomeadamente no que toca à elaboração de projectos geotécnicos ou componentes geotécnicas de projectos de engenharia civil, pois é indispensável que se analise conjuntamente a cartografia geológica existente com dados geotécnicos/geomecânicos disponíveis. Esta interacção entre parâmetros geológicos e geotécnicos pode garantir um controlo ou uma minimização dos riscos associados a projectos geotécnicos, bem como é essencial na optimização de tecnologias, de equipamentos, de metodologias construtivas, e até na optimização de vantagens técnico-económicas.

1.1.2. Disposição da dissertação

Esta dissertação está disposta sob a forma de 5 capítulos. O presente capítulo é uma introdução à dissertação, na qual é feita uma apresentação à temática em questão, um enquadramento geográfico e geológico da ilha da Madeira e uma apresentação das amostras estudadas e respectivas localizações de amostragem.

O capítulo 2 apresenta a caracterização geológica efectuada, o qual é dividido em dois subcapítulos: um que aborda, a título introdutório, os processos e produtos vulcânicos associados ao tema do trabalho e outro que apresenta os resultados da caracterização geológica propriamente dita, nomeadamente da classificação litológica e do estudo das discontinuidades dos maciços terrosos e rochosos.

O capítulo 3 trata da caracterização geotécnica levada a cabo neste trabalho, estando dividido em dois subcapítulos que apresentam os diversos ensaios realizados às amostras terrosas e rochosas, bem como os respectivos resultados daí obtidos.

No capítulo 4 é realizada uma análise aos parâmetros obtidos nas respectivas caracterizações geológicas e geotécnicas. Este está dividido em três subcapítulos que apresentam as classificações geológico-

INTRODUÇÃO

geotécnicas efectuadas e as comparações dos parâmetros geotécnicos obtidos neste trabalho com parâmetros idênticos, retirados de outras referências bibliográficas.

Por último, o capítulo 5 expõe as considerações finais acerca de toda a dissertação, apresentando as vicissitudes do trabalho, bem como as conclusões retiradas.

1.2. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

Localizado no Oceano Atlântico Norte, aproximadamente a Sudoeste da Península Ibérica e a Oeste da costa de Marrocos, o arquipélago da Madeira situa-se entre as latitudes $30^{\circ} 01' N$ e $33^{\circ} 08' N$ e as longitudes $15^{\circ} 51' W$ e $17^{\circ} 30' W$ de Greenwich.

Tratando-se de um conjunto de ilhas, com uma área total aproximada de $802,00 \text{ km}^2$, o arquipélago da Madeira conta com dois grupos de ilhas sem habitantes permanentes, nomeadamente as ilhas Desertas, com $13,75 \text{ km}^2$, e as ilhas Selvagens, com $2,78 \text{ km}^2$, e ainda duas ilhas habitadas, nomeadamente a ilha do Porto Santo, com $42,59 \text{ km}^2$, e a ilha da Madeira, com $742,26 \text{ km}^2$, sendo esta última, o palco da recolha de amostragens necessárias à realização deste trabalho [PRAM (2002)].

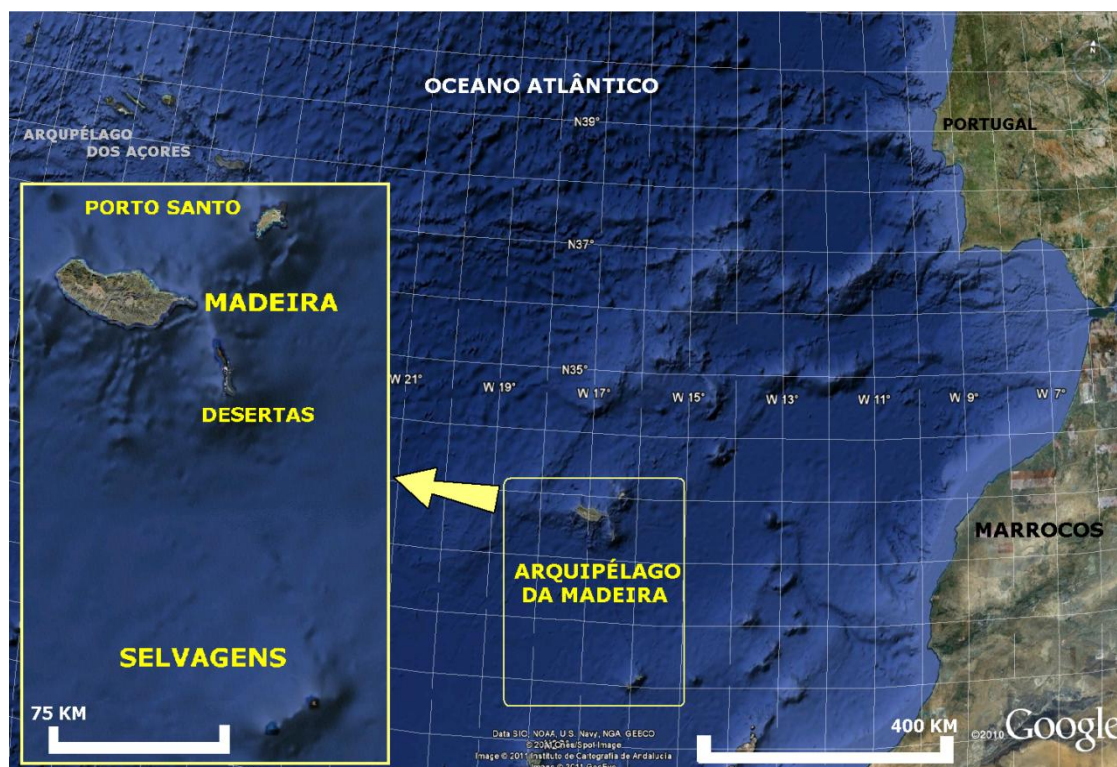


Figura 1 - Em pleno oceano Atlântico, destaca-se o enquadramento geográfico do arquipélago da Madeira [Fonte: adaptado de Google™ Earth].

1.3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DA ILHA DA MADEIRA

1.3.1. Localização geotectónica e progresso geocronológico

As ilhas do arquipélago da Madeira enquadram-se na placa tectónica africana e foram formadas por um fenómeno de magmatismo de intraplaca oceânica denominado de ponto quente¹, o qual tem o nome de *Hot-spot Madeira*. Esse ponto quente é o presumível responsável pela constituição da crista Madeira/Tore, na qual existe um conjunto de edifícios vulcânicos ao longo de, aproximadamente, 700 km da placa tectónica africana, a qual se enquadra num contexto de placa de movimentação lenta ou semi-estacionária, que se move a uma velocidade média de 1,2 cm/ano.

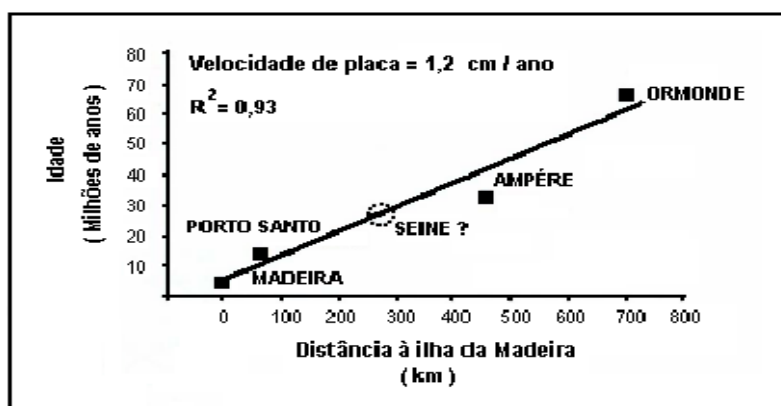


Figura 2 – Relação entre a geocronologia do *Hot-spot Madeira* e a sua evolução na placa tectónica [Fonte: adaptado de GELDMACHER *et. al.* (2000)].

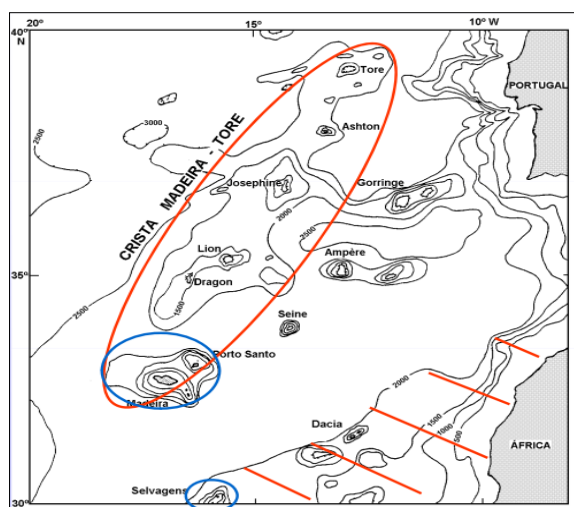


Figura 3 – Noção batimétrica dos edifícios vulcânicos que constituem a crista Madeira/Tore [Fonte: PRADA (2000)].

Do conjunto de montanhas que compõem a crista Madeira/Tore, o arquipélago da Madeira é o único grupo de edifícios vulcânicos que ainda emerge acima do nível das águas do mar, não esquecendo que a emersão das ilhas Selvagens não foi causada pelo *Hot-spot Madeira*. Estas ilhas Selvagens, graças a outro ponto quente, emergiram há, aproximadamente, 27 milhões de anos (Ma), uma cronologia que

¹ Ponto quente – Segundo SCHMINCKE (2004), este fenómeno consiste em um episódio de magmatismo oceânico intraplaca, vulgarmente conhecido no domínio da Vulcanologia como “hot-spot”. É um fenómeno vulcânico originado por um fluxo de calor anómalo proveniente do núcleo do planeta, capaz de criar uma pluma mantélica ao atingir o manto, formando uma coluna de magma ascendente até atingir a crosta terrestre e resumir-se a um episódio vulcânico isolado na placa tectónica.

INTRODUÇÃO

difere das datas de emersão das restantes ilhas do arquipélago da Madeira e que corresponde à época denominada de Oligocénico.

Proveniente do *Hot-spot Madeira*, a emersão do edifício vulcânico da ilha do Porto Santo está datada de, aproximadamente, 14 Ma, situada cronologicamente entre o Miocénico médio e o Miocénico superior, no período Neogénico, e a emersão das ilhas Desertas e ilha da Madeira terá ocorrido há pouco mais de 5,6 Ma, numa época compreendida entre o Miocénico e o Pliocénico, já no período Quaternário [BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

1.3.2. Geomorfologia

Alimentados pelo *Hot-spot Madeira*, aparelhos vulcânicos elevaram-se do fundo do oceano Atlântico fazendo emergir a ilha da Madeira que, com um crescimento abrupto e variado, aumentaram e alongaram o perímetro irregular da ilha, tal como é hoje, nunca esquecendo que a ilha não é mais do que a parte culminante de um gigante edifício vulcânico que ultrapassou o nível das águas do oceano (Figura 4).

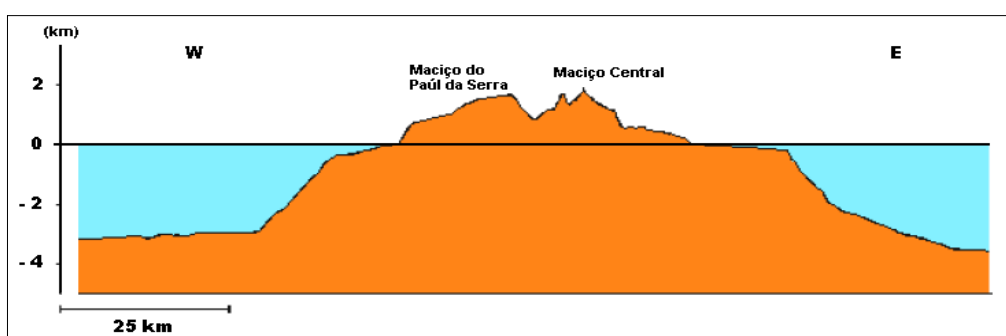


Figura 4 – Noção da dimensão do edifício vulcânico da ilha da Madeira [Fonte: PRADA (2000)].

Durante largos milhões de anos, a ilha da Madeira teve vários períodos de intensa actividade vulcânica fissural, interrompida também por longos períodos de actividade vulcânica muito reduzida ou nula que contribuiu principalmente para que a erosão alterasse e reduzisse as dimensões do edifício vulcânico. Desse modo, é comum vislumbrar-se por toda a ilha os vários picos e conseqüentes depressões incisivas, sendo que a costa é predominantemente constituída por vales e arribas com alturas a rondar, por vezes, as centenas de metros, podendo-se afirmar que áreas planas são escassas, quer na costa, quer no interior.

Conforme se pode ver na Figura 4, o relevo da ilha da Madeira é essencialmente constituído por dois maciços, o Maciço Central e o Maciço do Paúl da Serra.

No Maciço Central, situa-se o ponto de cota mais alta da ilha, o Pico Ruivo, com 1862 m de altitude, o qual se associa a outros tantos picos de grande altitude e respectivas depressões profundas entre eles, das quais se destaca os 600 metros de paredes verticais de uma espectacular depressão que é o vale do Curral das Freiras. A conservação destas edificações vulcânicas é caracterizada pela vasta rede de filões, muitos dos quais são facilmente perceptíveis nos declives das depressões. Segundo HARTNACK (1939), citado por PRADA (2000), a função que a rede filoneana exerce como suporte e factor de resistência à erosão dos materiais piroclásticos por ela atravessados, é comparada à actuação de barras de ferro no interior do betão armado.

Como continuidade estrutural que foi, há milhões de anos atrás, do Maciço Central, o Maciço do Paúl da Serra é igualmente imponente nas suas dimensões, mas morfologicamente distinto do maciço vizinho. Trata-se de um planalto que está separado pelas depressões dos vales da Ribeira Brava (a Sul) - localização esta que foi palco da recolha de parte do material amostrado neste trabalho - e de São

Vicente (a Norte), cujas cabeceiras das respectivas ribeiras foram recuando ao longo dos tempos. O Paúl da Serra, conta com dimensões na ordem dos 16 km de comprimento e 6 km de largura, sendo um planalto mais vasto da ilha da Madeira com 25 km² de área, a uma cota que ronda os 1400 m de altitude [PRADA (2000)].

O edifício vulcânico da ilha da Madeira (a principal ilha do arquipélago) é considerado um vulcão-escudo² cuja construção se sucedeu durante três períodos principais de erupção intensa. Mas a evolução geológica da ilha da Madeira não se prende apenas por esse facto. Segundo MADEIRA *et. al.* (2007), esta pode ser compreendida e resumida, do acontecimento mais antigo para o mais recente, pela seguinte maneira:

- **Fase de montanha submarina:** construção do edifício vulcânico submarino que corresponde aos produtos vulcânicos mais antigos que actualmente se pode encontrar na ilha da Madeira, a cotas relativamente baixas, pois isso significa que correspondem ao topo da estrutura submarina que emergiu a mais de 5,6 Ma;
- **Fase de construção do vulcão-escudo:** Após a emersão da montanha submarina, esta fase é a responsável pela construção do vulcão em escudo que correspondeu a uma fase intermédia de actividade vulcânica, que se seguiu por uma acalmia vulcânica, associada à erosão natural do edifício vulcânico;
- **Fase de colmatção ou “capeamento”:** como o nome indica, esta fase colmatou e capeou as irregularidades erosivas da ilha, cujos produtos vulcânicos correspondem às actividades vulcânicas mais recentes;
- **Fase de rejuvenescimento ou pós-erosiva:** Após algum tempo de nova acalmia vulcânica e consequente erosão, esta fase dita as últimas ocorrências de vulcanismo na ilha da Madeira, de pouca expressão volumétrica, as quais se verificaram na zona do Funchal.
- **Fase de destruição do edifício vulcânico actual.**

1.3.3. Vulcano-estratigrafia

Como anteriormente referido, e segundo BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010), a construção do grande vulcão-escudo da Madeira sucedeu-se no decorrer de três principais fases de erupção intensa, podendo-se traduzir em uma estratigrafia separada, do mais antigo para o mais recente, por três complexos vulcânicos principais e respectivas unidades vulcano-estratigráficas:

▪ COMPLEXO VULCÂNICO INFERIOR (CVI)

Com mais de 5,57 Ma, este complexo formou-se na época do Miocénico e corresponde à parte final do estádio imerso do edifício vulcânico, onde se pode afirmar que ocorreram soerguimentos, isto é, movimentos verticais positivos. Da base para o topo, dentro deste complexo vulcânico, destacam-se as duas seguintes unidades estratigráficas:

- Unidade do Porto da Cruz (CVI 1): unidade cujos materiais vulcânicos correspondem aos mais antigos expostos na ilha da Madeira, podendo encontrar afloramentos apenas em duas zonas da

² Vulcão-escudo – Segundo SCHMINCKE (2004), são edifícios vulcânicos com pouca altitude relativamente às suas dimensões na horizontal, ou seja, são edifícios com uma morfologia baixa e larga, com declives nas vertentes na ordem dos 10%, fazendo parecer a forma de um escudo. São formados por erupções efusivas que originam sobreposições de escoadas essencialmente basálticas, intercaladas por depósitos piroclásticos de queda. É bastante comum nestes vulcões-escudo a existência de complexas redes de filões derivadas de alimentação fissural por zonas de *rift*.

ilha, nomeadamente no Porto da Cruz e em São Vicente (zona Norte). Esta unidade é caracterizada pelo extremo grau de alteração de rochas de origem hidromagmática e pela densa rede de filões que as atravessa. As rochas presentes desta unidade são de composição máfica, normalmente irreconhecíveis no que toca à própria estrutura interna, sendo que grande parte dos afloramentos conhecidos correspondem a rochas bastante argilizadas. Sendo assim, e à semelhança de rochas encontradas e estudadas em outras ilhas da Macaronésia, pode-se afirmar que esta unidade está correlacionada com uma fase eruptiva submarina, muito provavelmente com o final da fase de construção vulcânica imersa da ilha;

- Unidade dos Lameiros (CVI 2): Aflorando apenas em um único sítio na ilha, em São Vicente, numa zona de má exposição, esta unidade é constituída por conglomerados originários de rochas sedimentares marinhas carbonatadas a baixa profundidade, bem como calcários, calcarenitos e fossilíferos. Todas estas rochas assentam sobre a CVI 1, estão colmatadas por rochas do complexo vulcânico intermédio (Unidade da Penha d'Águia) e são atravessadas por um conjunto de filões máficos.

▪ COMPLEXO VULCÂNICO INTERMÉDIO (CVM)

Correspondendo à segunda grande fase de actividade vulcânica edificante, já em situação emersa, este complexo compreende períodos de actividade entre os 5,57 Ma e os 1,8 Ma, aproximadamente. As lavas provenientes destas erupções originaram raros basaltos e basanitos, estruturando três unidades estratigráficas seguintes (da base para o topo):

- Unidade da Encumeada (CVM 1): Abrangendo o maciço central e extremo oriental da ilha, esta unidade é caracterizada por erupções estrombolianas e vulcanianas, que expeliram derrames lávicos e piroclastos de queda (originando tufos), e *block-and-ash flow*³ juntamente com brechas vulcânicas, respectivamente. Entre as sequências vulcânicas dos afloramentos rochosos, avistam-se estruturas sedimentares grosseiras conglomeráticas, brechóides e areníticas, que geralmente evidenciam situações de enxurrada. No essencial, esta unidade é constituída por produtos vulcânicos subaéreos de composição máfica, medianamente a muito alterados;
- Unidade da Penha d'Águia (CVM 2): presente em quase toda a ilha, principalmente nas grandes arribas do litoral e imponentes vertentes incisadas de vale, está geralmente colmatada por rochas de unidades estratigráficas mais recentes, exceptuando uma faixa entre Porto da Cruz e Machico. É uma unidade essencialmente composta por escoadas pouco alteradas de basaltos, basanitos, depósitos piroclásticos diferenciados e produtos freato-magmáticos, provenientes de actividade vulcânica quer efusiva, quer explosiva, intercalados por depósitos sedimentares derivados de processos erosivos;
- Unidade do Curral das Freiras (CVM 3): unidade predominante nas vertentes abruptas dos vales interiores, arribas litorais da zona Norte e em quase toda a costa ocidental da ilha. As suas sequências vulcânicas são, de um modo geral, pouco alteradas e cortadas por poucos filões, apresentando escoadas basálticas, depósitos piroclásticos de queda, como tufos de escórias, *lapilli*⁴ e cinzas, quer basálticas, quer traquíticas, evidenciando também actividade freato-

³ *Block-and-ash flow* – Em português, *escoadas de blocos e de cinzas*, segundo NUNES (2002), trata-se de um fenómeno de escoada piroclástica de alta densidade, que se desloca junto ao solo, denominado também por *nuvens ardentes*. A conjugação de clastos densos resultantes do colapso gravítico dos flancos do vulcão, com escoadas lávicas extremamente viscosas, origina este tipo de escoadas piroclásticas.

⁴ *Lapilli* – Segundo NUNES (2002), são piroclastos de queda cuja granulometria varia entre os 2 mm e os 64 mm.

magmática ocasional. Existem nesta unidade depósitos sedimentares de fácies⁵ conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de lama ou de detritos, ou até mesmo fluxos hiperconcentrados.

▪ COMPLEXO VULCÂNICO SUPERIOR (CVS)

Sendo das ocorrências vulcânicas principais mais recentes na ilha da Madeira, pois enquadra-se cronologicamente entre os 1,8 Ma e os 7000 anos, este complexo relaciona-se directamente com a geomorfologia actual da ilha. As lavas expelidas são alcalinas, que originaram também basaltos e basanitos, tendo também ocorrido rochas do tipo mujearito e pedra-pomes traquítica. Este complexo divide-se nas duas unidades seguintes:

- Unidade dos Lombos (CVS 1): o nome desta unidade não indica para nenhuma conotação geográfica local mas sim para o regionalismo “lombos” que significa, geomorfologicamente, interflúvios⁶ de topo aplanado e declive suave para o mar, materializando deste modo o momento cronológico em que a actividade vulcânica da ilha cobriu e aumentou o edifício insular das fases eruptivas anteriores. Trata-se de uma unidade constituída essencialmente por derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos), por intercalações de depósitos piroclásticos de queda (*lapilli*, escórias, cinzas basálticas, blocos e bombas) e materiais de origem sedimentares idênticos aos presentes na CVM 3 relacionados com enxurradas.
- Unidade do Funchal (CVS 2): unidade que aflora em toda ilha, tem particular abundância na zona do Funchal e Câmara de Lobos, daí o seu nome. Na origem dos materiais geralmente pouco alterados desta unidade, está a ocorrência de actividade vulcânica fissural que originou derrames lávicos basálticos e mujearíticos, com intercalações de piroclastos de queda alterados, nomeadamente escórias, *lapilli* e cinzas, produtos de actividade freato-magmática e também de actividade submarina, nomeadamente tufo basáltico e pedra-pomes traquítica. É de notar também a deposição de sedimentos por ocorrência de enxurradas, cujas fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas correspondem a ocorrências de fluxos diversos. As formas vulcânicas (derrames lávicos e cones piroclásticos) encontram-se, nos dias de hoje, ainda pouco alteradas pela erosão.

1.4. MATERIAL AMOSTRADO E RESPECTIVA LOCALIZAÇÃO

No âmbito da caracterização geológica e geotécnica de formações vulcânicas da ilha da Madeira, foi escolhido um certo número de produtos vulcânicos presentes na ilha, nomeadamente material-rocha e material-solo, de modo a que, por um lado, fosse possível efectuar ensaios *in-situ* sem prejudicar os seus resultados e, por outro lado, criar e/ou obter condições para extrair amostras de material sem danificá-las de maneira a que os carotes possuíssem, posteriormente, as condições físicas exigidas para a execução de ensaios laboratoriais. Desta forma, é possível garantir uma das condições necessárias para que este estudo seja considerado como um válido contributo à complementaridade dos dados presentes na nova carta geológica da ilha da Madeira e ao estado de conhecimento geotécnico das formações vulcânicas da ilha da Madeira

⁵ Fácies – Conjunto de características distintivas, paleontológicas, litológicas, etc., que permite identificar onde e quando se deu a formação do material geológico.

⁶ Interflúvios – Consistem em elevações geomorfológicas situadas entre linhas fluviais. Por outras palavras, e no contexto deste trabalho, são pequenos montes vulcânicos formados em tal localização que se situam entre duas linhas de água.

INTRODUÇÃO

Utilizou-se então um leque de diversos materiais de modo a poder efectuar uma série de ensaios, *in-situ* e laboratoriais, necessários à caracterização geológica e geotécnica dos mesmos. A recolha do material foi feita em localizações previamente pensadas e estudadas, em sítios acessíveis, dado que poderia não existir condições humanas, financeiras e de ordem técnica, para recolher material em localizações de difícil acesso.

A Figura 5 demonstra a relação geográfica entre as diferentes localizações onde foram efectuadas as amostragens de material a ser caracterizado neste trabalho.



Figura 5 – Ilustração da ilha da Madeira com as respectivas relações de proximidade de todos os locais de amostragem [Fonte: adaptado de *Google™ Earth*].

Ao vislumbrar a Figura 5, obtém-se uma percepção geográfica sobre a localização das áreas de onde foram colhidos os materiais amostrados. Pode-se, de uma forma geral e juntamente com o auxílio da carta geológica da ilha da Madeira, associar as localizações dos materiais colhidos com o respectivo enquadramento vulcano-estratigráfico.

De modo a obter uma diferenciação do material recolhido, numerou-se de 1 a 7 todas as amostras de acordo com a respectiva localização. Sendo assim, o conjunto de amostras compreendidas entre o n.º 1 e o n.º 5 foram todas retiradas da freguesia do Porto da Cruz, concelho de Machico, e as amostras n.º 6 e n.º 7 foram recolhidas na freguesia da Serra d'Água e na freguesia da Ribeira Brava, respectivamente, ambas no concelho da Ribeira Brava.

1.4.1. Amostra n.º 1

Definida como amostra n.º 1, a recolha do seu material foi efectuada no sítio da Fajã de Milho, freguesia do Porto da Cruz, concelho de Machico. Mais precisamente, a recolha foi feita a cerca de 145 m a Sudoeste de um troço da Via Expresso 1 (VE1) e a cerca de 620 m a Noroeste da segunda saída do Porto da Cruz na VE1 (sentido Funchal - Porto da Cruz).



Figura 6 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 1 [Fonte: adaptado de Google™ Earth].

Dados inerentes à localização da amostra n.º 1:

- **Coordenadas geográficas:** 32° 45' 47" N, 16° 50' 9" W;
- **Localização:** Sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz, Machico;
- **Vulcano-estratigrafia:** Complexo Vulcânico Inferior, Unidade do Porto da Cruz (CVI 1);
- **Tipo de material encontrado:** Rocha vulcânica com grau de alteração muito elevado (considerado geotecnicamente como solo).

INTRODUÇÃO



Figura 7 – Fotografia da área onde foi recolhida a amostra n.º 1.



Figura 8 – Local da recolha da amostra n.º 1.

1.4.2. Amostra n.º 2

A amostra n.º 2, bem como as próximas amostras apresentadas (n.º 3 e n.º 4), foi recolhida em um afloramento terroso da zona costeira do Porto da Cruz, mais propriamente numa vertente virada a Nordeste da zona do cais do Porto da Cruz, junto à estrada.



Figura 9 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha das amostras n.ºs 2, 3 e 4 [Fonte: adaptado de *Google™ Earth*].

Dados inerentes à localização da amostra n.º 2:

- **Coordenadas geográficas:** 32° 46' 32" N, 16° 49' 34" W;
- **Localização:** Cais do Porto da Cruz, Porto da Cruz, Machico;
- **Vulcano-estratigrafia:** Complexo Vulcânico Superior, Unidade do Funchal (CVS 2 g);
- **Tipo de material encontrado:** Depósito sedimentar de fácies conglomerática e arenítica, associado a fluxos de detritos e de lamas (assumido geotecnicamente como solo de granulometria grosseira).

INTRODUÇÃO

Esta zona de afloramento sedimentar tinha a particularidade de possuir mais que uma granulometria diferente no local da recolha das amostras. Por isso, o material foi separado em três partes distintas de acordo com as fáceis do afloramento. Por tal motivo, a recolha de amostras foi feita de modo a que se obtivesse três amostras distintas, de acordo com a sua granulometria.

O material que se considerou representativo do solo de granulometria grosseira ficou como o material representado pela amostra n.º 2, conforme ilustrado na Figura 10, na área delimitada de entre as linhas tracejadas de cor vermelho.

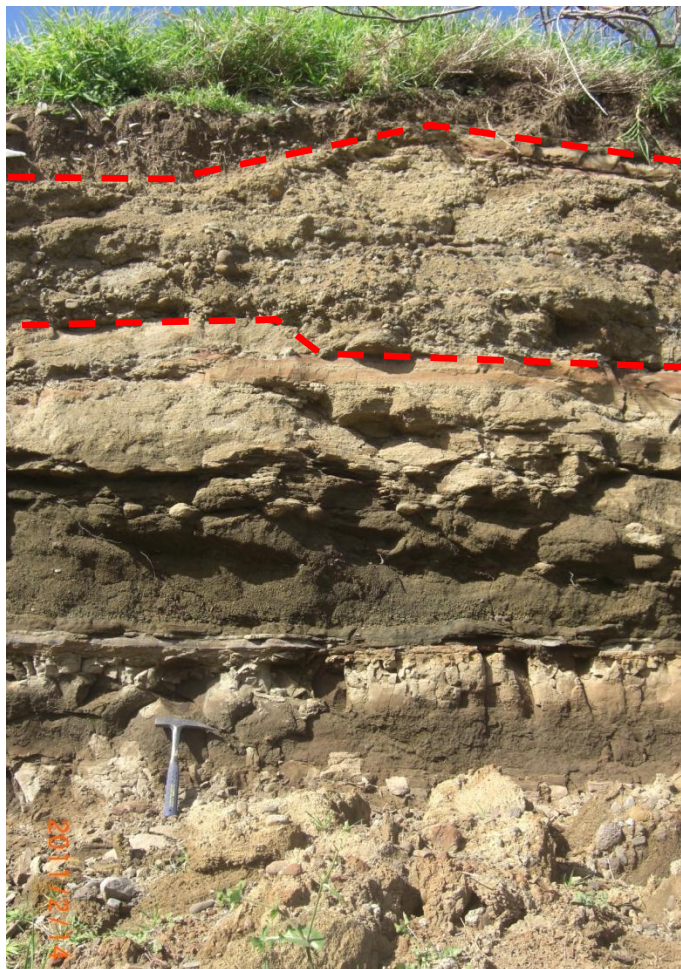


Figura 10 – Local de recolha das amostras n.ºs 2, 3 e 4, com a ilustração da parte representativa do solo de granulometria grosseira presente no afloramento terroso.

1.4.3. Amostra n.º 3

A amostra n.º 3 foi recolhida também no cais do Porto da Cruz, exactamente no mesmo local onde as amostras n.º 1 e n.º 2 foram recolhidas (Figura 9). Devido à heterogeneidade do conglomerado presente no local, procedeu-se à recolha do material de modo a que a amostra n.º 3 representasse o solo de granulometria intermédia, conforme se pode ver na ilustração presente na Figura 11, na área de entre as linhas tracejadas de cor vermelho.

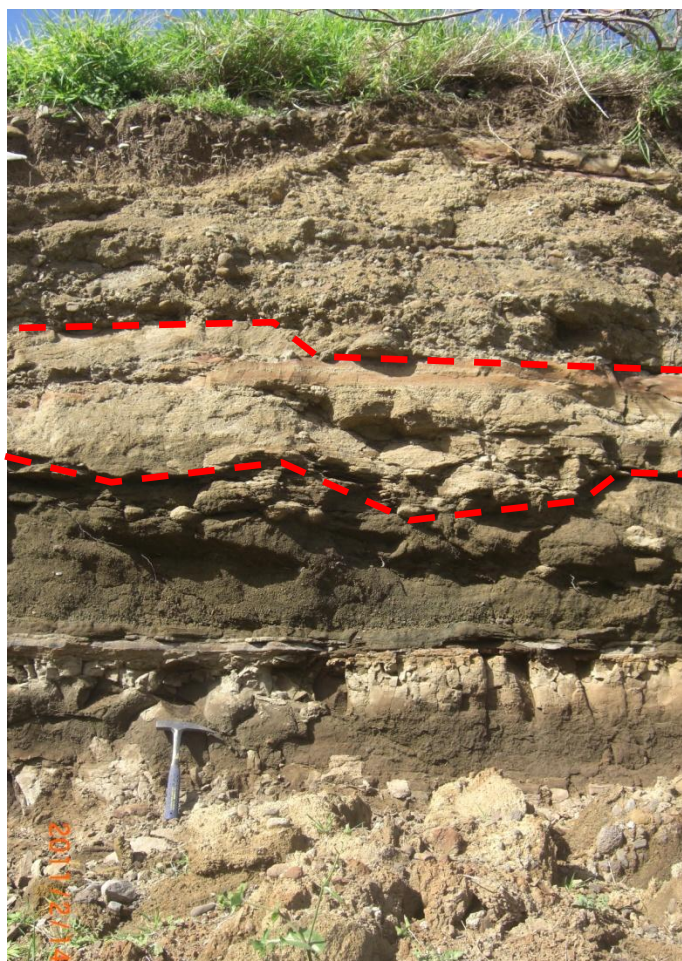


Figura 11 – Parte representativa do solo de granulometria intermédia presente no afloramento terroso.

Dados inerentes à localização da amostra n.º 3:

- **Coordenadas geográficas:** 32° 46' 32" N, 16° 49' 34" W;
- **Localização:** Cais do Porto da Cruz, Porto da Cruz, Machico;
- **Vulcano-estratigrafia:** Complexo Vulcânico Superior, unidade do Funchal (CVS 2 g);
- **Tipo de material encontrado** Depósito sedimentar de fácies arenítica associado a fluxos de detritos e de lamias (assumido geotecnicamente como solo de granulometria intermédia).

1.4.4. Amostra n.º 4

Seguindo a mesma localização do palco de recolha das amostras n.º 2 e n.º 3, e podendo também recorrer à mesma fotografia do afloramento terroso (Figura 12) para ilustrar a sua exacta localização (área delimitada entre linhas tracejada de cor vermelho), a amostra n.º 4 foi recolhida e armazenada de modo a que fosse representativa, desta vez, de solo de granulometria fina.

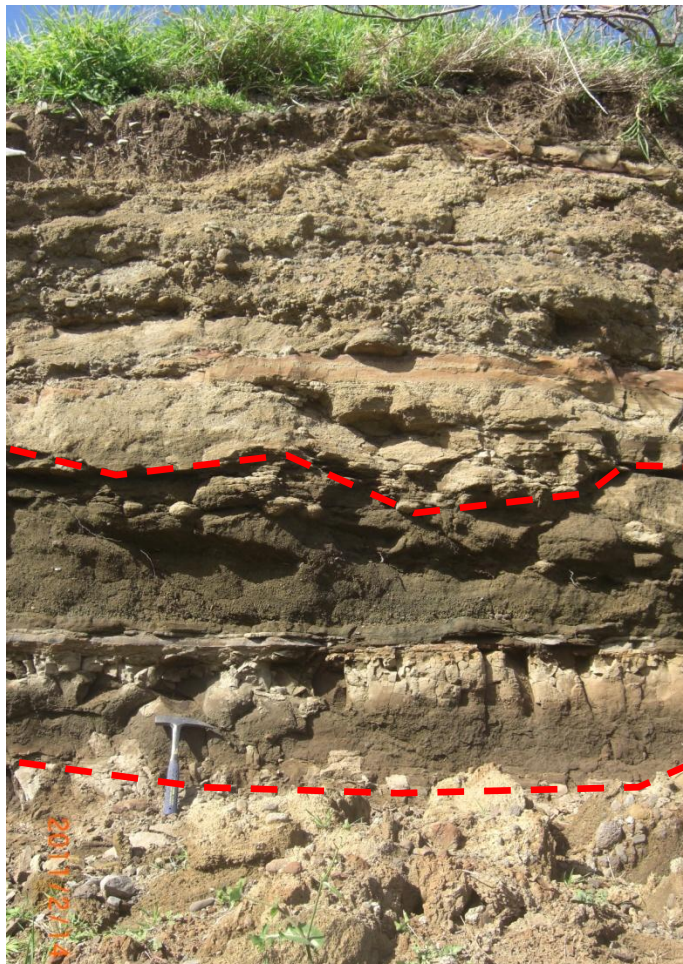


Figura 12 – Parte representativa do solo de granulometria fina presente no afloramento terroso.

Dados inerentes à localização da amostra n.º 4:

- **Coordenadas geográficas:** 32° 46' 32" N, 16° 49' 34" W;
- **Localização:** Cais do Porto da Cruz, Porto da Cruz, Machico;
- **Vulcano-estratigrafia:** Complexo Vulcânico Superior, unidade do Funchal (CVS 2 g);
- **Tipo de material encontrado:** Depósito sedimentar de fácies fina associado a fluxos de lamas (assumido geotecnicamente como solo de granulometria fina).

1.4.5. Amostra n.º 5

Também na freguesia do Porto da Cruz, mas em localização um pouco diferente do palco de recolhas das amostras n.º 2, 3 e 4, a recolha da amostra n.º 5 foi efectuada na zona ilustrada na Figura 13. Esta amostra é representativa de material rocha e foi recolhida na base de uma arriba costeira com um afloramento rochoso instável.



Figura 13 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 5 [Fonte: adaptado de Google™ Earth].

Dados inerentes à localização da amostra n.º 5:

- **Coordenadas geográficas:** 32° 46' 10" N, 16° 49' 35" W;
- **Localização:** Sítio do Serrado, Porto da Cruz, Machico;
- **Vulcano-estratigrafia:** Complexo Vulcânico Superior, Unidade do Funchal (CVS 2 μ);
- **Tipo de material encontrado:** Rocha proveniente de derrame lávico subaéreo de composição mugearítica⁷.

⁷ Composição mugearítica – Segundo SCHMINCKE (2004), uma rocha vulcânica com composição mugearítica é uma rocha melanocrática a mezomelanocrática (de cor escura a intermédia), mais rica em alcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) do que os basaltos.



Figura 14 – Fotografia do maciço rochoso onde foi recolhida a amostra n.º 5.

Conforme se pode ver nas Figuras 14 e 15, a escarpa rochosa em questão encontrava-se, no momento de elaboração deste trabalho, em obras de contenção devido à elevada instabilidade do maciço rochoso mugearítico. Essa instabilidade originava frequentemente a queda de blocos de mugearito em uma estrada, pelo que foi através de blocos caídos dessa escarpa que se recolheu o material necessário e em dimensões suficientes para a amostra n.º 5. Infelizmente, não foi possível adquirir imagens à escala macroscópica da fácies do afloramento rochoso originário dos blocos mugearíticos recolhidos.



Figura 15 – a) Arriba costeira em fase inicial de obra; b) Arriba costeira em fase intermédia de obra.

1.4.6. Amostra n.º 6

No maciço montanhoso central da ilha da Madeira, foi efectuada mais uma recolha de material rochoso para caracterização, desta feita no sítio da Ameixieira, concelho da Ribeira Brava, mais precisamente num vale com vários cursos de água afluentes à ribeira da Serra d'Água, a Este do imponente vale da Serra d'Água.



Figura 16 - Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 6 [Fonte: adaptado de Google™ Earth].

Dados inerentes à localização da amostra n.º 6:

- **Coordenadas geográficas:** 32° 43' 46" N, 17° 00' 06" W;
- **Localização:** Sítio do Ameixieira, Ribeira Brava;
- **Vulcano-estratigrafia:** Complexo Vulcânico Intermédio, Unidade da Encumeada (CVM 1 β)
- **Tipo de material encontrado:** Rocha originada por depósitos piroclásticos de queda. Tufo.



Figura 17 – Fotografia da área onde foi recolhido o material para a amostra n.º 6.

Para a recolha de material rochoso nesta localização não foram efectuados quaisquer trabalhos de prospecção, como operações de furação para obtenção de carotes, sendo que as amostras foram obtidas a partir da recolha de blocos de rocha intacta que se encontravam caídos (devido a obras de alargamento de um caminho), com dimensões consideradas suficientes para os ensaios a que se destinavam.

1.4.7. Amostra n.º 7

A sul da ilha da Madeira, foi efectuada a recolha do material rochoso para a amostra n.º 7. O palco de recolha localiza-se no sítio da Fajã do Cerejo, freguesia e concelho da Ribeira Brava, em uma zona de depressão topográfica acentuada, nomeadamente numa escarpa rochosa do imponente vale da Ribeira Brava.

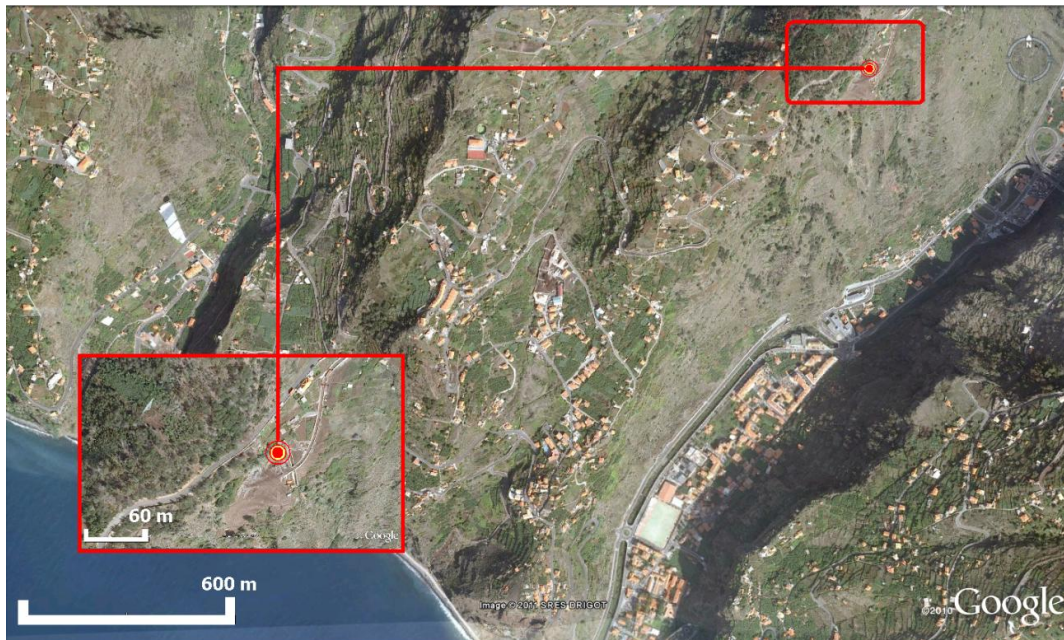


Figura 18 – Fotografia de satélite adaptada com a localização do palco de recolha da amostra n.º 7 [Fonte: adaptado de Google™ Earth].

Dados inerentes à localização da amostra n.º 7:

- **Coordenadas geográficas:** 32° 41' 8" N, 17° 3' 29" W;
- **Localização:** Sítio da Fajã do Cerejo, Ribeira Brava;
- **Vulcano-estratigrafia:** Complexo Vulcânico Superior, Unidade dos Lombos (CVS 1 β);
- **Tipo de material encontrado:** Rocha proveniente de derrame lávico subaéreo de composição basáltica.



Figura 19 – Fotografia da encosta, com ilustração do local de recolha da amostra n.º 7.

Esta amostra foi obtida através de operações de furação da rocha basáltica para a obtenção de tarolos cilíndricos, sendo que estes foram aproveitados e armazenados de seguida nas instalações do LREC para serem alvo de estudos de caracterização geológica/geotécnica. Note-se que, no momento das sondagens para obtenção dos tarolos, não foram registados comprimentos totais de furação nem de tarolos aproveitados/recuperados.



Figura 20 – Afloramento do maciço basáltico onde se recolheu material para a amostra n.º 7.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A Geologia, ciência que estuda a origem e transformação da estrutura da Terra, contém especial importância no desenvolver do tema desta dissertação, pois uma parte constituinte da Geologia investiga, define e caracteriza as propriedades físico-químicas dos materiais rochosos e terrosos, bem como os seus processos de criação e transformação inerentes à geomorfologia da camada superficial da crosta do nosso planeta.

Com o estudo de características geológicas dos materiais rochosos e terrosos, é possível criar bases imprescindíveis e suficientemente sustentadas de modo a contribuir para aplicação das várias vertentes da Geotecnia, como a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas.

Este capítulo, exclusivamente relacionado com a Geologia em si, não deixa de ser uma componente essencial do estudo levado a cabo para a caracterização das formações vulcânicas presentes na ilha da Madeira. A abordagem deste capítulo contempla uma série de aspectos científicos e técnicos que vão desde a explicação da origem dos materiais vulcânicos e sedimentares presentes na ilha, à compreensão da transformação dos mesmos através da avaliação do seu comportamento físico, obtendo assim as respectivas classificações geológicas que caracterizam os maciços rochosos e terrosos e seus materiais associados. Segundo LIMA & MENEZES (2008), este conjunto de informação geológica torna possível a criação de uma ligação directa com a Geotecnia, de modo a que possa existir uma contribuição, se for o caso, à Engenharia Civil, pois a definição dos parâmetros universais que melhor descrevem as formações do ponto de vista da Geologia de Engenharia é extremamente importante, mesmo que de caso para caso, dependendo do tipo de estrutura que se queira projectar, sejam requeridos apenas alguns parâmetros.

2.1. PROCESSOS E PRODUTOS VULCÂNICOS

Para uma melhor assimilação e compreensão da origem geológica da ilha da Madeira, este subcapítulo aborda alguns aspectos sobre actividade vulcânica em geral, tais como os estilos eruptivos e respectivos produtos vulcânicos, entre os quais se encontram os associados à realidade geológica da ilha da Madeira.

2.1.1. Tipos de actividade vulcânica

A classificação e/ou atribuição do tipo de erupções vulcânicas ocorridas numa dada área geológica pode, por vezes, revelar-se uma tarefa complicada. Segundo NUNES (2002), essa dificuldade é originada devido ao facto de, em determinados locais distintos de um aparelho vulcânico, existir ou ter existido diferentes tipos de acontecimentos vulcânicos, em simultâneo ou sucessivamente intercalados.

O caso específico da formação do edifício vulcânico da ilha da Madeira reflecte bem a dificuldade em assegurar, com toda a certeza, a exclusividade a um certo número de tipos de erupções vulcânicas que ocorreram na ilha. Mesmo assim, e com o devido estudo da vulcano-estratigrafia conjugado com a geomorfologia da ilha, pode-se afirmar que a sua actividade vulcânica teve episódios efusivos e explosivos, dada a existência de várias escoadas lávicas e depósitos piroclásticos, respectivamente. No caso dos episódios explosivos, houve ocorrência de actividade vulcânica freato-magmática (ou hidromagmática), dada a interacção directa do magma/lava com água, e em ambos os episódios (efusivos e explosivos) houve a ocorrência de actividade vulcânica subaérea, visto que esta última é caracterizada pela não envolvimento de água exterior ao magma.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Quanto ao tipo de erupções vulcânicas, no que toca à sua classificação em ambiente subaéreo, existem vários tipos, tais como: *Havaianas*, *Estrombolianas*, *Vulcanianas*, *Sub-plinianias*, *Plinianias*, *Ultraplinianas*, *Surtseianas* e *Freatoplinianias*. Mas no âmbito do tema deste estudo, optou-se por isolar e mencionar apenas a actividade vulcânica *Havaiana*, *Estromboliana* e *Vulcaniana*, visto que as suas definições se assemelham com a realidade geológica da ilha da Madeira.

As características do vulcão-escudo da ilha da Madeira são maioritariamente associadas à actividade vulcânica *Havaiana*⁸, pois a formação por fases de um edifício vulcânico origina, geralmente, grandes vulcões-escudo oceânicos. É também possível confirmar a existência de inúmeras escoadas lávicas basálticas na ilha da Madeira formadas por processos fissurais situados ao longo de zonas de *rift*⁹.

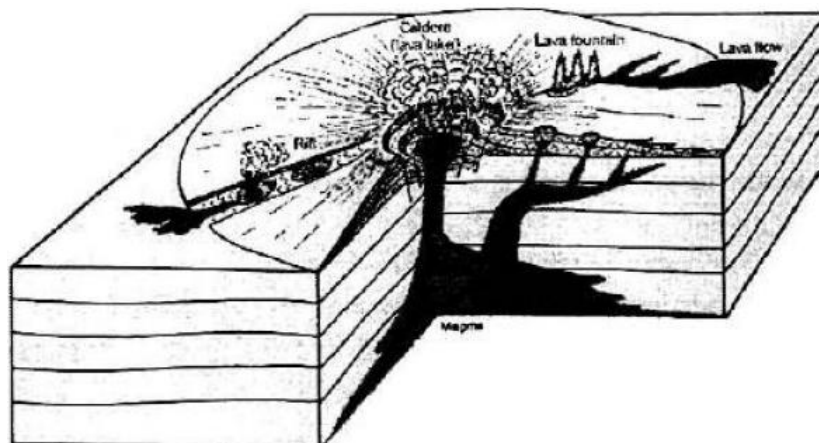


Figura 21 – Ilustração representativa de um vulcão-escudo do tipo Havaiano [Fonte: KRAFFT E KRAFFT (1975), em NUNES (2002)].

As características do edifício vulcânico relatam também inúmeras evidências da actividade *Estromboliana*¹⁰ no processo de formação da ilha da Madeira, pois a grande maioria dos seus materiais vulcânicos são originários de magmas básicos e é relativamente fácil o avistamento de cones de escórias e de depósitos piroclásticos projectados (tufos de *lapilli* e cinzas).

Existem também indícios, embora muito fracos, de ter existido episódios de actividade *Vulcaniana*¹¹ em quantidades não tão grandes como a *Havaiana* e *Estromboliana*. Esses indícios remontam a episódios típicos de actividade vulcânica poligenética, devido à intercalação das sequências vulcânicas que ocorreram na formação da ilha, durante milhares de anos. Podem-se avistar, em localizações remotas, brechas de explosão vulcânicas e depósitos de fluxo piroclástico de queda provenientes de erupções muito explosivas [BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010); NUNES (2002)].

⁸ Erupção *Havaiana* – Segundo NUNES (2002), trata-se de uma erupção efusiva, com emissão de grandes derrames lávicos basálticos, predominantemente originadas por zonas fissurais. Geralmente, no início destas erupções, ocorrem repuxos lávicos com pequenas extrusões de piroclastos. Este tipo de actividade vulcânica é a responsável pela formação de vulcões-escudo, como por exemplo o arquipélago do Havai, (E.U.A.) ou a ilha da Madeira, (Portugal).

⁹ Zonas de *rift* – Zona de rotura resultante de uma coluna magmática ascendente que origina na crosta terrestre um alinhamento direccional de erupções vulcânicas.

¹⁰ Erupção *Estromboliana* – Segundo NUNES (2002), trata-se de uma actividade vulcânica medianamente explosiva, de forma intermitente e discreta, que favorece a formação de cones de escórias, escoadas lávicas e projecção balística de bombas e *lapilli*. São erupções características de magmas básicos.

¹¹ Erupção *Vulcaniana* – Segundo NUNES (2002), são erupções que originam grandes explosões em fase inicial devido à desobstrução da conduta vulcânica. Trata-se de uma actividade vulcânica associada a magmas suficientemente viscosos que impedem a extensão de escoadas lávicas, sendo por isso maioritariamente associada à projecção de grandes blocos/bombas.

Remetendo especificamente ao trabalho efectuado nesta dissertação, é de referir que do leque de material amostrado, apenas consta de rochas originadas por actividade vulcânica *Havaiana* e *Estromboliana*. O afloramento rochoso mugearítico do Porto da Cruz, representado pela amostra n.º 5, e o afloramento rochoso basáltico da Fajã do Cerejo, representado pela amostra n.º 7, foram originados por derrames lávicos de erupções do tipo *Havaiana*, devido à sua morfologia se associar a escoadas lávicas. Quanto aos afloramentos rochosos da Ameixeira, representado pela amostra n.º 6, possui uma morfologia que indica um depósito piroclástico, evidenciando uma actividade vulcânica do tipo *Estromboliana*.

2.1.2. Produtos vulcânicos

Dependendo do tipo de erupções a que os vulcões se associam e do tipo de magma que é expelido pelos mesmos, é possível associar esses factores à composição das rochas existentes em uma determinada zona vulcânica. Para todos os efeitos, o decorrer do processo eruptivo passa pela ascensão do magma até à superfície da crosta terrestre (que passa a ser denominado de lava), onde este processo pode ser sob a forma de escoadas lávicas e/ou de emissões piroclásticas.



Figura 22 – a) Escoada lávica do vulcão Kilauea, Havai, E.U.A.; b) Erupção do vulcão Stromboli, Itália. [Fonte: www.usgs.gov]

O magma, uma mistura entre rocha fundida, cristais e gases a temperaturas na ordem dos 600°C ou superiores, ao entrar em contacto com fontes de arrefecimento (como o ar ou a água) inicia o seu processo de consolidação que, depois de concluído, dá origem às rochas magmáticas, ou ígneas. A classificação das rochas magmáticas depende do seu processo de arrefecimento, isto é, se se dão a pouca ou muita profundidade, se se consolidam rápida ou lentamente, podendo ser consideradas como extrusivas ou intrusivas, respectivamente [SCHMINCKE (2004); PERNETA (2011)].

Na ilha da Madeira, o ambiente geológico característico é, na sua maioria, composto por rochas magmáticas provenientes quer de escoadas lávicas, quer de emissões piroclásticas.

No caso das escoadas lávicas, características de erupções efusivas, deram origem a materiais efusivos, nomeadamente escoadas lávicas *pahoehoe* e *aa*, cuja distinção é baseada na sua morfologia da escoada. Com o conseqüente arrefecimento das lavas, os maciços rochosos podem adquirir diferentes morfologias estruturais, quer internamente, quer quanto ao seu aspecto no afloramento, ou seja, o efeito de arrefecimento dá início a um processo de fracturação que origina disjunções na estrutura rochosa. Essas fracturas podem ser denominadas de *disjunções prismáticas*, quando as fracturas são aproximadamente perpendiculares à direcção da escoada lávica e são resultantes do processo de consolidação das lavas que, com o tempo, alivia o campo de tensões interno e origina as descontinuidades. Também existe outro tipo de fracturas, de nome *disjunção em lajes*, que resultam também do processo de arrefecimento das lavas mas relaciona-se com o comportamento da escoada

lávica, isto é, resultam da variação de velocidade do fluxo de lava, originando planos de retracção que são aproximadamente paralelos ao sentido da escoada [CANHA (2007); NUNES (2002)].

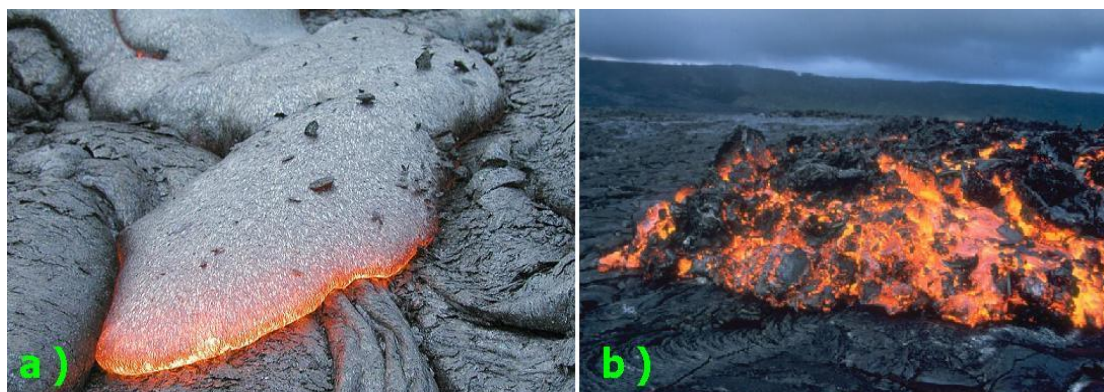


Figura 23 – a) Exemplo de uma escoada de lava do tipo *pahoehoe* (local desconhecido); b) Exemplo de uma escoada de lava do tipo *aa* (vulcão Kilauea, Havaí) [Fonte: www.usgs.gov].

Quanto a erupções explosivas, que aconteceram em alguns episódios vulcânicos da ilha da Madeira, estas dão origem ao fenómeno de queda de materiais que consolidam antes de tocar o solo ou logo após o contacto com o solo. Esses materiais, denominados de piroclastos de queda, estão presentes nas formações vulcânicas da ilha e classificam-se como cinzas, *lapilli*, bombas e blocos. Os mais comuns encontrados na ilha da Madeira são as cinzas e *lapilli*, os quais, quando consolidados, são denominados de tufo e tufo de *lapilli*, respectivamente. Quanto às bombas e blocos, que ao consolidarem ganham o nome de aglomerados e/ou brechas, também têm alguma presença no ambiente geológico da ilha da Madeira [NUNES (2002); PERNETA (2011)].

Quadro 1- Classificação da dimensão das partículas piroclásticas de queda [Fonte: adaptado de CANHA (2007)].

DESIGNAÇÃO	DIMENSÃO (mm)	NOMENCLATURA DOS DEPÓSITOS CONSOLIDADOS
Cinzas	< 2	Tufo
<i>Lapilli</i>	2 a 64	Tufo de <i>lapilli</i>
Bombas e blocos	> 64	Aglomerados e brechas

É de referir que os materiais rochosos amostrados e caracterizados neste trabalho são todos de origem vulcânica, bem como uma das amostras rochosas consideradas geotecnicamente como solo (amostra n.º 1). O afloramento rochoso do sítio da Fajã de Milho, representado pela amostra n.º 1, representa uma rocha vulcânica de composição máfica, extremamente alterada. O afloramento rochoso do sítio do Serrado, representado pela amostra n.º 5, representa uma escoada lávica de composição mugearítica. Quanto ao afloramento rochoso do sítio da Fajã do Cerejo (amostra n.º 7), também representa uma escoada lávica mas de composição basáltica. No que toca ao afloramento rochoso do sítio da Ameixeira (amostra n.º 6), indica um depósito piroclástico de queda, designado por tufo.

2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DOS MATERIAIS AMOSTRADOS

A necessidade de fazer uma caracterização geológica dos materiais recolhidos, para o estudo das formações vulcânicas da ilha da Madeira, prende-se com o facto de ser significativamente relevante definir os parâmetros que caracterizam os maciços de origem vulcânica, que são a grande maioria dos casos presentes na ilha, e também os casos de maciços geológicos de origem sedimentar. Para isso, é necessário efectuar uma caracterização dos maciços com base em critérios geológicos volúmicos e

previamente estabelecidos, que resultam de parâmetros de aplicação da área da geologia, associada à vertente da Geologia de Engenharia.

A título de uma melhor compreensão das duas diferentes nomenclaturas atribuídas aos materiais geológicos, ou ao conjunto destes, usadas constantemente ao longo deste trabalho, importa explicar o que se entende por rocha e solo, ou maciço rochoso e maciço terroso, respectivamente.

Fundamentalmente e focado no âmbito da geologia, a rocha é um agregado de um ou mais grãos minerais (sendo que a maioria das rochas é composta por mais de um tipo de mineral) e, em certos casos, de matéria amorfa¹², sendo que o termo rocha é atribuído a estes agregados devido ao facto destes conterem vários minerais em grandes quantidades impuras. No entanto, as rochas não são todas formadas pelos mesmos processos, sendo que podem ser designadas como ígneas, sedimentares e metamórficas. As rochas ígneas, ou magmáticas, são as rochas derivadas do magma (produtos vulcânicos que arrefecem e solidificam). As rochas sedimentares são depósitos de sedimentos, cujo processo de formação dos mesmos passa pela erosão de qualquer tipo de rocha e consequente transporte e deposição que, ao serem cimentados e compactados, transformam-se em rochas sedimentares. Quanto às rochas metamórficas, são produtos originados na crosta terrestre, geralmente a grandes profundidades, que resultam na alteração da textura e composição mineral de qualquer tipo de rocha pela influência de altas pressões e temperaturas [LIMA & MENEZES (2008)].

O termo rocha é muitas vezes substituído por “rocha intacta”, sendo esta nada mais que o agrupamento de grãos cristalinos e matéria amorfa, compactados entre fracturas ou descontinuidades de um maciço rochoso, que por vezes são mais facilmente compreendidas se se chamarem como “matriz rochosa”, pois podem possuir grau de alteração e/ou fracturação. Em suma, rocha é um material formado por grãos minerais sólidos conectados entre si, sendo que podem ter descontinuidades ou volumes de vazio ao longo da sua estrutura, em várias escalas até um limite macroscópico (escala de mão).

No que diz respeito ao termo solo, quando utilizado no âmbito da geologia, deriva de um facto geomorfológico deveras muito simples. Chama-se solo ou considera-se como solo o volume de material rocha que se encontra de tal forma desintegrado e/ou alterado, com características granulométricas que se torna desadequado assumi-lo como rocha e que normalmente é associado a sedimentos de rocha. Por exemplo, areias, argilas, siltes ou outros tipos de disposições granulométricas de material geológico são casos considerados como sedimentos que demonstram a razão de serem denominados de solo. Os materiais componentes de um maciço rochoso profundamente alterado podem, por vezes, também ser considerados como solo, pois são facilmente desagregáveis devido ao facto de possuírem valores de coesão interna nula ou quase nula. Note-se que esses materiais solo podem ser compostos, essencialmente por minerais, ou podem conter também matéria orgânica.

Quanto às nomenclaturas de maciço rochoso ou maciço terroso, são dadas às formações que constituem um volume com proporção suficiente para ser assumido como todo um conjunto de rocha ou solo, respectivamente. Quanto aos maciços rochosos, embora sejam um conjunto de material rocha, não se deve esquecer que é um meio descontínuo devido à existência de fracturas, descontinuidades à escala megascópica (afloramento) e regional, podendo também um maciço terroso, em certos casos, ter as mesmas características de descontinuidades [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008)].

Neste capítulo, as caracterizações geológicas aos maciços em estudo neste trabalho foram iniciadas com base em observações, análises macroscópicas e megascópicas a afloramentos rochosos e terrosos que

¹² Matéria amorfa – Designação atribuída ao facto das partículas elementares estarem distribuídas desordenadamente, de uma maneira perfeitamente aleatória.

demonstrassem condições de observação para que as respectivas descrições fossem possíveis. A análise das observações mencionadas torna-se assim essencial para, posteriormente, classificar os maciços geológicos de acordo com critérios sugeridos pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas – ISRM (*International Society of Rock Mechanics*).

É de salientar que a caracterização feita neste capítulo foi, na medida do possível, efectuada aos maciços rochosos e terrosos de todas as localizações de recolha de material geológico, com base nas seguintes etapas de caracterização:

- **Caracterização litológica:** descrever a litologia do material rochoso ou terroso, isto é, identificar o tipo de material em estudo e as respectivas características morfológicas, tendo em conta a sua origem, formação, deposição e conseqüente estratigrafia;
- **Estudo das descontinuidades:** caracterizar descontinuidades (entidades geológicas que interrompem a continuidade física de um dado maciço rochoso), ou seja, caracterizar quanto à sua Atitude (direcção e inclinação), ao espaçamento entre descontinuidades sucessivas, à abertura existente entre os planos de fractura, à continuidade do plano de descontinuidade, à rugosidade dos planos da rocha, ao enchimento das aberturas e ao número de famílias de descontinuidades presentes/visíveis no maciço em questão.

2.2.1. Caracterização litológica dos maciços em estudo

2.2.1.1. Maciço rochoso da Fajã de Milho, Porto da Cruz (Amostra n.º 1)

A amostra n.º 1, proveniente do sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz, foi considerada como uma amostra de solo para fins da caracterização geotécnica de que será alvo mais adiante neste trabalho. No entanto, do ponto de vista geológico, trata-se de uma amostra que foi recolhida de um afloramento rochoso, mas com um grau de alteração elevado.



Figura 24 – a) Pormenor do afloramento rochoso; b) sedimentos na base dos taludes rochosos.

Conforme se pode ver na Figura 24 – a), este afloramento rochoso de fácies cor laranja-acastanhado evidencia um estado de alteração elevado, dada a facilidade com que se desagrega. Trata-se de uma fácies rochosa com textura bastante argilosa e cujas bases dos taludes se encontram com os próprios vestígios sedimentares (Figura 24 – b)) provenientes da acção da erosão a que o próprio afloramento rochoso está naturalmente sujeito, o que permite a existência de condições geológicas e orgânicas para o crescimento fácil de vegetação, conforme se pode ver na Figura 25.



Figura 25 – a) Filão que atravessa o maciço de onde se recolheu o material amostrado; b) local onde as amostras foram recolhidas.

Devido ao facto do maciço possuir tamanha alteração, torna-se difícil efectuar a sua classificação litológica de uma forma totalmente correcta e acertada, pois para isso talvez fosse necessária uma abordagem no âmbito da petrologia. Porém, presume-se que se trata de um maciço vulcânico enquadrado na Unidade do Porto da Cruz (CVI 1), pertencente ao Complexo Vulcânico Inferior (CVI), visto que as suas características de textura, de cor e grau de alteração elevado apontam para um maciço vulcânico geocronologicamente antigo cuja origem é devida a derrames lávicos submarinos, de composição máfica. Esta presunção deve-se ao facto das características da rocha sugerirem uma alteração palagonítica intensa e de existirem análises realizadas a rochas da mesma vulcano-estratigrafia que, segundo BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010), contam com características semelhantes que revelaram a existência de conteúdo idêntico à mineralogia dos basaltos.

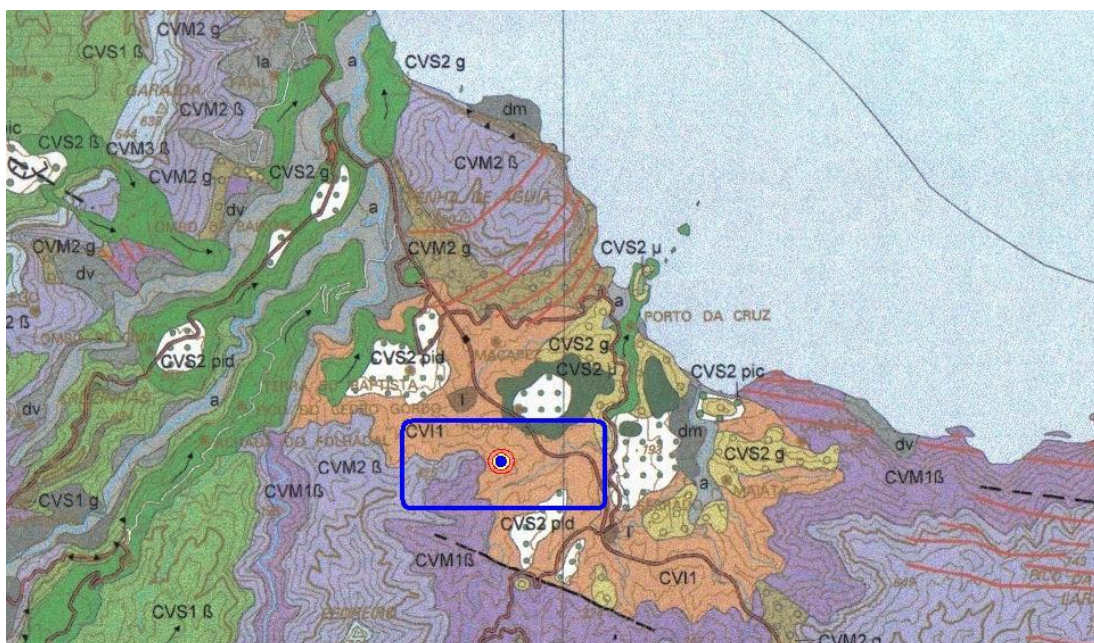


Figura 26 – Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 1, sendo a vulcano-estratigrafia CVI 1 representada pela cor laranja [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Assume-se também a vulcano-estratigrafia acima descrita, devido a outro facto relativo à existência de alguns filões que atravessam o maciço na zona de recolha das amostras, conforme a Figura 25 – a), o que comprova o enquadramento no complexo vulcânico mais antigo da vulcano-estratigrafia, pois os filões evidenciam que a sua origem é posterior à cronologia do maciço que atravessam [BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

2.2.1.2. Maciço terroso do cais do Porto da Cruz (Amostra n.ºs 2, 3 e 4)

Retiradas da mesma localização, estas três amostras pertencem a um maciço terroso de origem sedimentar. No afloramento terroso onde foram retiradas as amostras é possível verificar as camadas de deposição sedimentar do que, outrora, foram sedimentos arrastados por episódios de enxurrada.



Figura 27 – Afloramento terroso de origem sedimentar, contíguo ao local onde foram recolhidas as amostras.

O enquadramento vulcano-estratigráfico deste maciço terroso associa-se à Unidade do Funchal (CVS 2 g), que pertence ao Complexo Vulcânico Superior (CVS). Este enquadramento é assumido devido ao facto de o maciço possuir uma estrutura característica de um conjunto de depósitos sedimentares, cronologicamente sucessivos, que se sobrepõem a um maciço rochoso basáltico, geocronologicamente recente, que indica pertencer também ao CVS.



Figura 28 – Panorama do cais do Porto da Cruz. Intercalado no maciço mugearítico e no maciço basáltico, encontra-se o maciço terroso sedimentar estudado, com indicação do local de recolha das amostras n.ºs 2, 3 e 4.

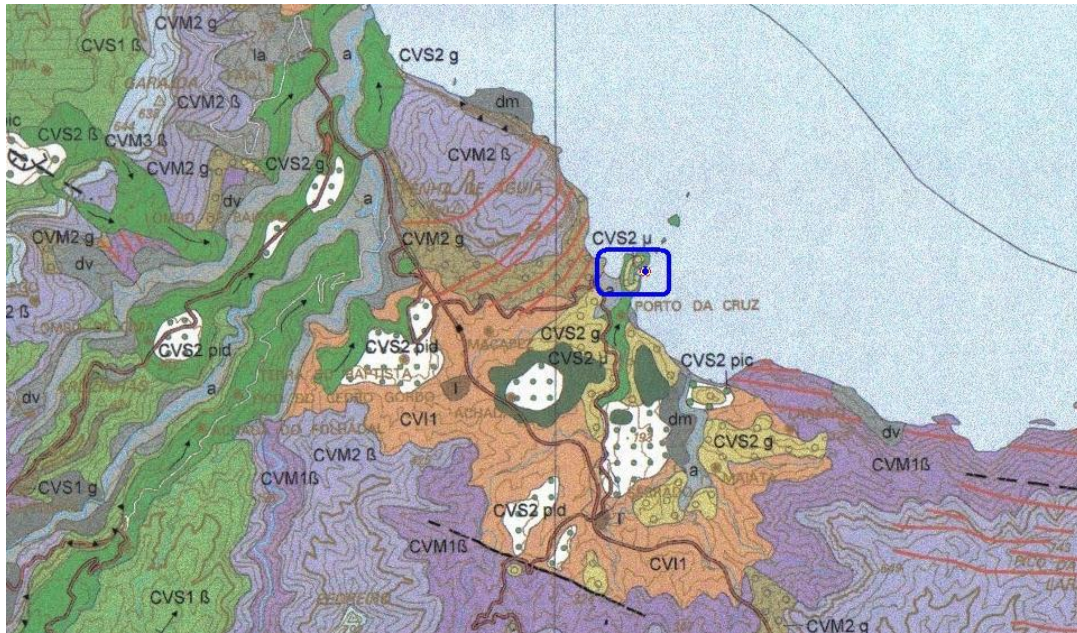


Figura 29 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foram recolhidas as amostras n.ºs 2, 3 e 4, sendo a vulcano-estratigrafia CVS 2 g representada pela cor verde [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

Quanto à constituição do maciço terroso correspondente às três amostras (n.ºs 2, 3 e 4), e segundo a observação e análise da carta geológica, sendo o seu enquadramento na CVS 2 g, note-se que a sigla da unidade estratigráfica acrescida da letra *g* significa a predominância de depósitos sedimentares. Este afloramento terroso apresenta uma granulometria diversa, nomeadamente de fácies conglomeráticas, arenítica e argilosa, presumindo assim que foram originados por depósitos sedimentares associados a eventos de fluxos de detritos e fluxos de lama, e também por fluxos hiperconcentrados [BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

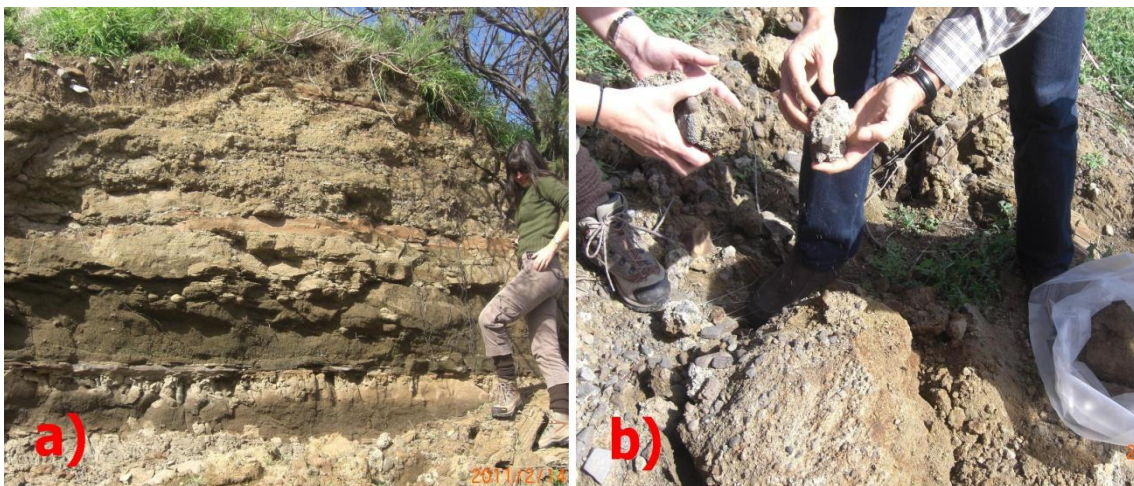


Figura 30 – a) Afloramento terroso no local de recolha das amostras; b) Pormenor da granulometria da amostra recolhida.

2.2.1.3. Maciço rochoso do Serrado, Porto da Cruz (Amostra n.º 5)

Também na mesma freguesia, mas em uma localização distanciada do palco de recolha das amostras anteriores, esta amostra revela um maciço rochoso de origem mugearítica que aflora numa pequena arriba marítima da vila do Porto da Cruz.



Figura 31 – Arriba do maciço rochoso de onde foi recolhida a rocha mugearítica.

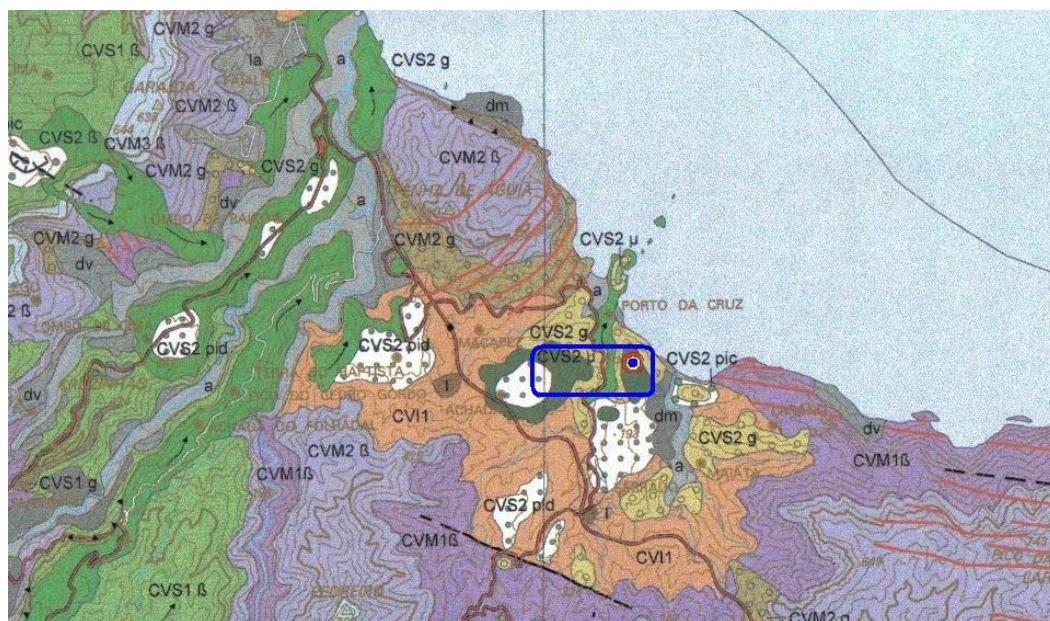


Figura 32 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 5, sendo a vulcano-estratigrafia CVS 2 μ representada pela cor verde-escuro [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

Trata-se de um afloramento rochoso enquadrado na Unidade do Funchal (CVS 2 μ), pertencente ao Complexo Vulcânico Superior (CVS). A letra grega μ , que se segue à sigla CVS 2, deve-se ao facto do maciço rochoso em questão corresponder a um derrame lávico de composição mugearítica. Estas rochas, designadas de mugearitos, têm uma estrutura característica mais frágil do que, por exemplo, os basaltos, o que não implica que, por senso comum, se associe os mugearitos a rochas geocronologicamente antigas e/ou alteradas, pois as suas características de fragilidade estrutural devem-

se ao facto das escoadas lávicas que as originaram terem sido fruto do início da actividade vulcânica subaérea após um suposto período de acalmia vulcânica [BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

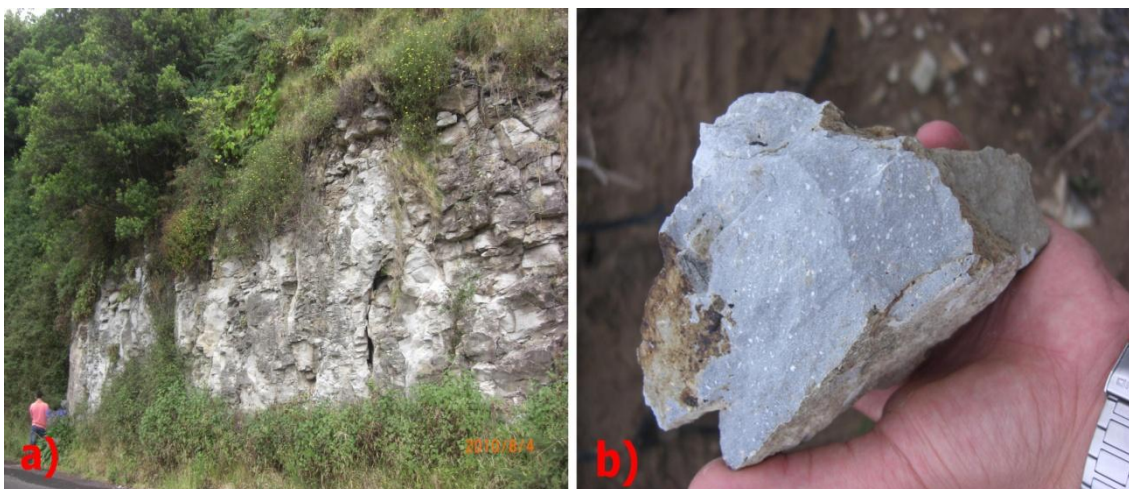


Figura 33 – a) Afloramento mugearítico do maciço de onde foram recolhidas as amostras; b) pormenor de um bloco solto de mugearito encontrado no local.

2.2.1.4. Maciço rochoso da Ameixeira, Ribeira Brava (Amostra n.º 6)

Situado no maciço montanhoso central da ilha, em uma zona de vale dotado com várias linhas de água afluentes à ribeira da Serra d'Água, a área onde foi recolhido o material para amostra n.º 6 é caracterizada por alguma heterogeneidade no que toca a formações vulcânicas e depósitos sedimentares ali existentes.

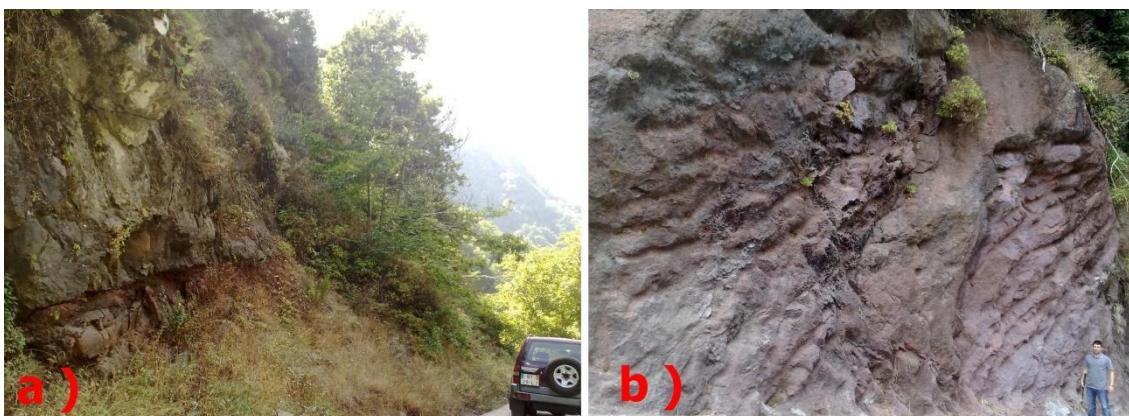


Figura 34 – a) Evidência de alternância de derrame lávico com tufo de piroclastos de queda; b) Afloramento rochoso onde se deu a amostragem do tufo.

A vulcano-estratigrafia da amostra n.º 6, material rocha designado por tufo, enquadra-se na Unidade da Encumeada (CVM 1 β) que pertence ao Complexo Vulcânico Intermédio (CVM). Trata-se de uma unidade vulcânica caracterizada pela existência de uma variedade de litofácies geológicas, sendo que uma dessas litofácies corresponde a tufos de piroclastos de queda.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

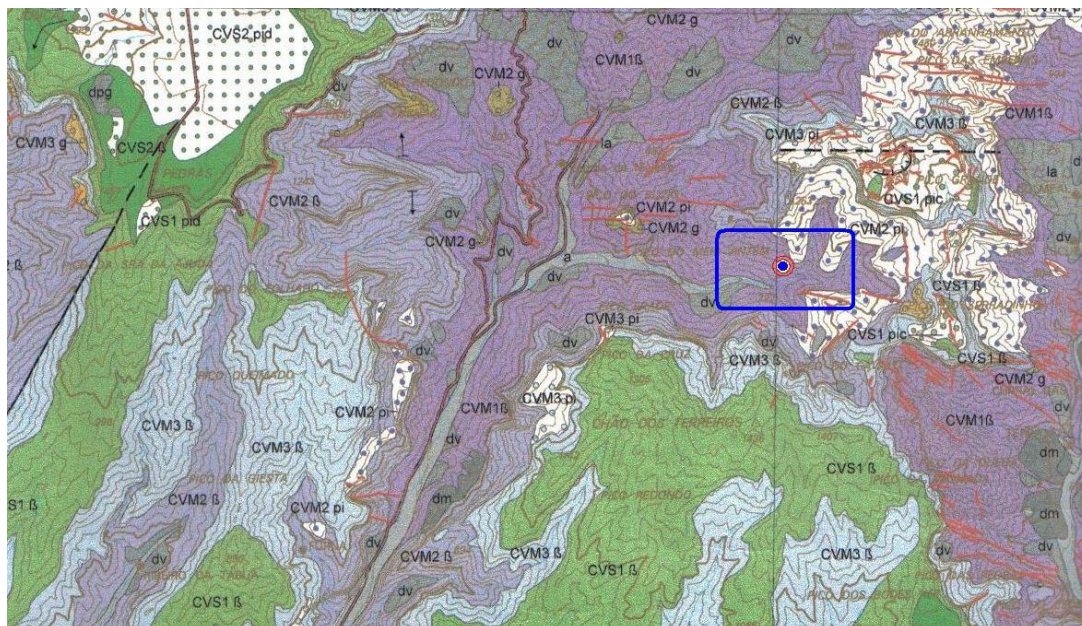


Figura 35 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 6, sendo a vulcano-estratigrafia CVM 1 β representada pela cor lilás [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

O tufo, embora sendo o resultado de um depósito da queda de piroclastos, é uma rocha com uma estrutura mais fraca que o mugearito, por exemplo, e muito mais frágil que o basalto. Trata-se de uma rocha de cor normalmente avermelhada, com textura arenítica e de superfície rugosa.

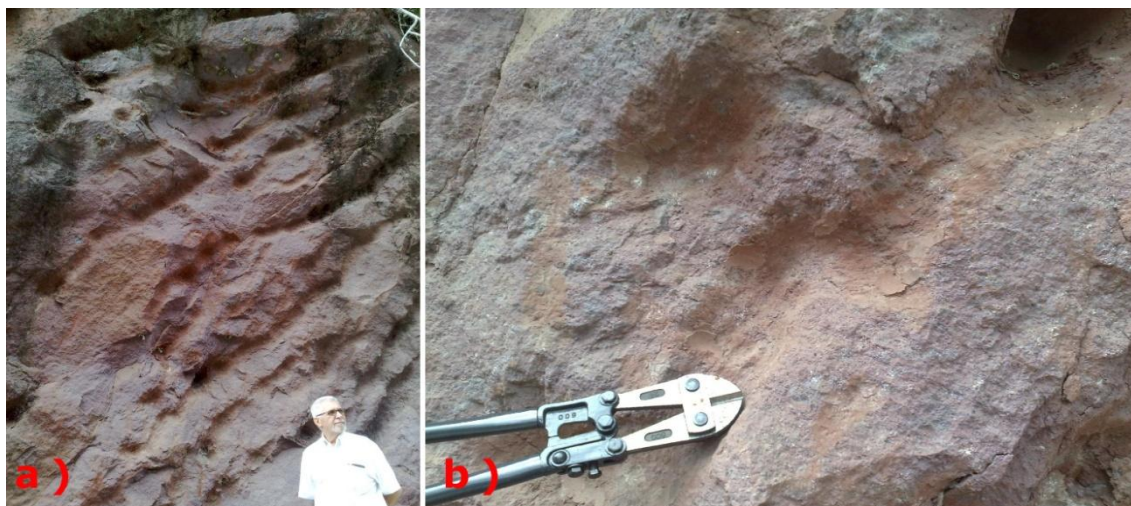


Figura 36 – a) Afloramento onde se recolheram as amostras de tufo; b) Pormenor da superfície do tufo vulcânico da Ameixeira.

2.2.1.5. Maciço rochoso da Fajã do Cerejo, Ribeira Brava (Amostra n.º 7)

A sul da ilha da Madeira, o palco de recolha da amostra n.º 7 representa-se por um maciço rochoso de origem basáltica situado na encosta Oeste do grande vale da Ribeira Brava.



Figura 37 – Afloramento do maciço basáltico, onde foi feita a amostragem.

Este maciço rochoso está estratigraficamente enquadrado na Unidade dos Lombos (CVS 1 β) do Complexo Vulcânico Superior (CVS), tendo sido originado por derrames lávicos subaéreos de composição basáltica.

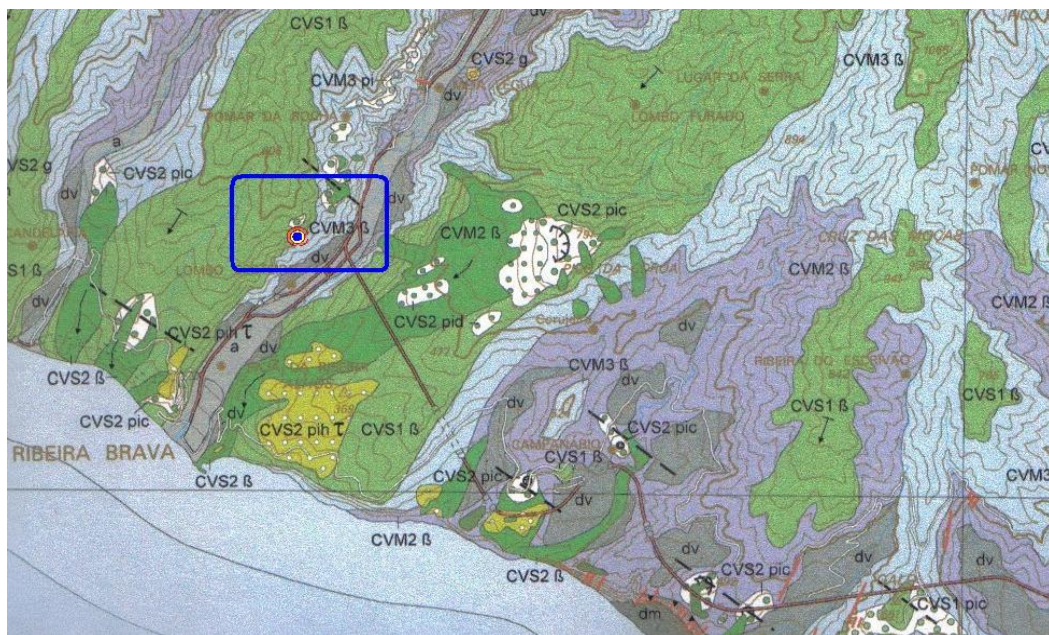


Figura 38 - Excerto da carta geológica da ilha da Madeira (escala 1:50000), com ilustração do local onde foi recolhida a amostra n.º 7, sendo a vulcano-estratigrafia CVS 1 β representada pela cor verde-claro [Fonte: adaptado de BRUM DA SILVEIRA *et. al.* (2010)].

O basalto, por ventura a rocha mais comum encontrada na ilha da Madeira, é uma rocha cuja estrutura é considerada forte, que no caso deste trabalho é muito mais forte quando comparada com as restantes rochas amostradas. Trata-se de uma rocha rija, de cor cinzenta, cuja textura compreendida entre plana e rugosa, admitindo-se variada pois esta depende de vários factores no momento de formação da rocha.



Figura 39 – Pormenor da superfície de um plano de descontinuidade do basalto da Fajã do Cerejo.

2.2.2. Estudo das descontinuidades dos maciços em estudo

Segundo ROCHA (1981), os maciços rochosos contêm descontinuidades a várias escalas, que vão desde fracturas microscópicas dos cristais constituintes até grandes falhas com extensões de milhares de quilómetros. Por isso, a estrutura interna de um maciço geológico torna-se um assunto curioso à Geologia de Engenharia, dada a possibilidade de influência das descontinuidades do meio no comportamento mecânico do maciço, principalmente quando este possa ser solicitado por acções. Por exemplo, a importância dos resultados deste estudo, no que toca a obras em ambientes geológicos, pode influenciar vários aspectos como a escolha do método de escavação de um maciço (escavação mecânica ou por explosivos, por exemplo), a escolha de cotas de implantação de certas estruturas complexas, a compreensão do comportamento mecânico de um maciço que contem uma determinada obra/construção, entre outros.

Quanto às descontinuidades à escala de obras de Engenharia Civil/Geotécnica existentes nos maciços (escala megascópica), estas podem ser descritas como 4 tipos distintos: superfícies de estratificação, xistosidade, falhas e diaclases. Neste trabalho, os afloramentos dos maciços estudados contam apenas com dois tipos de descontinuidades, nomeadamente superfícies de estratificação (descontinuidades paralelas entre si e à superfície de deposição de sedimentos) e diaclases (fractura no maciço rochoso onde não apresenta qualquer evidência de deslocamento significativo ao longo da superfície de rotura, isto é, entre os respectivos planos da descontinuidade).

Portanto, este estudo trata essencialmente da previsão da morfologia interna dos maciços rochosos a partir de reconhecimentos e análises superficiais, ou seja, a partir de estudos superficiais do afloramento alvo pretende-se localizar e conhecer o estado de fracturação do maciço à escala macroscópica e megascópica de modo a obter uma caracterização quanto a uma série de parâmetros que, posteriormente, serão úteis à análise do comportamento mecânico do maciço rochoso em questão [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008); ROCHA (1981)].

Para o estudo das descontinuidades presentes nos afloramentos rochosos de onde foram recolhidas as amostras para este trabalho, é feita uma análise com base nos parâmetros abaixo descritos em tópicos.

▪ ATITUDE

Trata-se da orientação dos planos das discontinuidades presentes/perceptíveis no afloramento em estudo. A orientação é obtida a partir da direcção e da inclinação do plano de discontinuidade, sendo que neste trabalho foi utilizada a convenção americana para o efeito (exemplo: N 45° W; 45° SW).

A direcção é obtida pelas linhas de nível da superfície do plano da discontinuidade, através do menor ângulo que essas rectas horizontais fazem com a direcção Norte-Sul, medindo do Norte para o Este ou o Oeste de modo a que o ângulo não se ultrapasse os 90°.

Já a inclinação, também conhecida por pendor ou mergulho, é representada pelo ângulo que resulta da intersecção de um plano horizontal com o plano da discontinuidade, contendo sempre a indicação do quadrante para o qual o plano da discontinuidade mergulha.

O conhecimento da orientação das discontinuidades torna-se relevante para obter uma noção do estado de compartimentação do maciço em questão e, assim, determinar a instabilidade potencial de determinados blocos de rocha suspeitos [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008); ROCHA (1981)].

Neste trabalho, a determinação da atitude dos planos de discontinuidade dos diversos maciços foi auxiliada por equipamento específico para o efeito, nomeadamente uma Bússola de Geólogo que mais não passa de uma bússola provida de clinómetro e de dois níveis, um para garantir que o equipamento se encontra na horizontal aquando da determinação da direcção e outro para auxiliar a determinação do ângulo da inclinação. A Bússola de Geólogo utilizada neste trabalho para o estudo das discontinuidades, representada na Figura 40, foi uma *Brunton Pocket Compass (Transits)* da marca *HOPE*, modelo no. 9-80 (0 – 360°).



Figura 40 – Bússola de Geólogo utilizada neste trabalho.

▪ N.º DE DESCONTINUIDADES

O número de discontinuidades é nada mais nada menos que o número de famílias de fracturas existentes no maciço rochoso ou terroso, cada uma delas com a respectiva atitude (orientação). Em conjunto e da mesma forma que o parâmetro atitude, este tem especial importância no conhecimento das superfícies de compartimentação dos maciços rochoso ou terrosos. Note-se que em cada família as suas discontinuidades são, regra geral, aproximadamente paralelas entre si e que a sua origem deve-se à libertação de tensões acumuladas no maciço que as contém.

Segundo LADEIRA (1986), os maciços rochosos não costumam ter muitas famílias de discontinuidades, podendo existir até 4 famílias e no máximo 5, caso haja evidência de acção tectónica.

No âmbito deste trabalho, no caso específico da ilha da Madeira, pode-se contar com maciços de rochas ígneas vulcânicas, que normalmente apresentam entre 2 a 3 famílias de descontinuidades (sendo 1 subhorizontal e 1 ou 2 subverticais), e com maciços terrosos de origem sedimentar que apresentam pelo menos 1 família.

▪ ESPAÇAMENTO

Menos importante que a atitude segundo ROCHA (1981), mas nunca desprezível, o espaçamento é a distância medida entre cada descontinuidade da mesma família, normal ao plano da fractura (aproximadamente), sendo que convém efectuar várias medidas de modo a caracterizá-lo por um valor médio.

Segundo a ISRM (1977), a descrição do espaçamento característico entre descontinuidades da mesma família pode ser feita pela terminologia seguinte:

Quadro 2 – Terminologia que caracteriza o espaçamento entre descontinuidades [Fonte: adaptado de LADEIRA (1986) e de LIMA & MENEZES (2008)].

DESCRIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	ESPAÇAMENTO (mm)	ESTRATIFICAÇÃO
Extremamente próximas	< 20	Laminada
Muito próximas	20 a 60	Muito fina
Próximas	60 a 200	Fina
Moderadamente afastadas	200 a 600	Média
Afastadas	600 a 2000	Espessa
Muito afastadas	2000 a 6000	Muito espessa
Extremamente afastadas	> 6000	Extremamente espessa

A importância da caracterização do espaçamento, no estudo de descontinuidades de um maciço rochoso ou terroso, prende-se com o facto de este influenciar com alguma relevância o comportamento mecânico de um maciço, nomeadamente nos mecanismos de rotura e de deformação. Por exemplo, se o espaçamento for muito pequeno, assume-se que o tamanho de blocos de rocha intacta é condicionado e o comportamento mecânico aproxima-se do de corpos granulares, resultando em uma perda óbvia de coesão do maciço. Desse ponto de vista, uma possível rotura planar pode até se transformar em uma rotura circular. Segundo LIMA & MENEZES (2008), nestes casos volúmicos, o parâmetro atitude perde alguma importância em relação à resistência e deformabilidade dos maciços.

O espaçamento entre fracturas pode também ser relevante quanto à permeabilidade do maciço. Este parâmetro, juntamente com o número de famílias de descontinuidades, influencia fortemente as condições de percolação fazendo com que a velocidade de alteração do material constituinte do maciço aumente [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008); ROCHA (1981)].

▪ ABERTURA

Trata-se da distância entre planos de descontinuidade, ou seja, é a distância medida na perpendicular que separa as paredes da descontinuidade. É uma medida de difícil obtenção dada a variação da abertura ao longo da extensão da descontinuidade e ao longo do interior do maciço.

Esta medida, e principalmente a sua variação ao longo da descontinuidade, determina o aumento ou diminuição de contactos entre as paredes da fractura, sendo por isso importante para estudar problemas relacionados com a percolação de água e com problemas de resistência ao deslizamento das superfícies de compartimentação e deformabilidade do maciço, podendo sempre efectuar-se correlações nesse

sentido com os parâmetros Rugosidade e Preenchimento, descritos mais à frente [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008)].

A ISRM (1977) apresenta a seguinte classificação para a abertura das descontinuidades:

Quadro 3 – Descrição da abertura das descontinuidades [Fonte: adaptado de LADEIRA (1986) e de LIMA & MENEZES (2008)].

ABERTURA (mm)	DESIGNAÇÃO DA FRACTURA
< 0,1	Muito fechada
0,1 a 0,25	Fechada
0,25 a 0,5	Parcialmente fechada
0,5 a 2,5	Aberta
2,5 a 10	Larga
10 a 100	Muito larga
100 a 1000	Extremamente larga
> 1000	Cavernosa

▪ **RUGOSIDADE**

O parâmetro Rugosidade é caracterizado através da observação da superfície dos planos da descontinuidade. Dessa observação da morfologia da parede da fractura tem que resultar uma associação com a realidade mais ou menos fidedigna embora este parâmetro seja difícil de classificar, pois a mesma superfície pode conter ou parecer possuir mais do que um tipo de rugosidade, o que, por vezes, a experiência de observação nesta matéria pode ser vantajosa.

A rugosidade é um parâmetro extremamente importante no que toca à análise da resistência ao deslizamento de uma descontinuidade, pois quando correlacionada com o estado de abertura da fractura, com o preenchimento existente na mesma e, por vezes, com a respectiva atitude, pode ser feita uma boa perspectiva do comportamento mecânico do maciço no que toca ao movimento de escorregamento das suas descontinuidades. As rugosidades podem variar de sinuosas a muito planas, podendo entre essas variações conter vários tipos de morfologia, como se poderá ver na Figura 41, fazendo que haja inúmeras maneiras de relacionar a resistência ao deslizamento com a maior ou menor possibilidade de ambos os planos da descontinuidade se encaixarem mutuamente, ou com a impossibilidade de tal facto acontecer, aumentando a probabilidade de deslocamento relativo.

Para uma mais fácil classificação da rugosidade, pode-se utilizar os termos descritos no Quadro 4 e Figura 41, sugeridos pela ISRM (1977), referentes a uma escala intermédia de observação que resulta na combinação de nove classes agrupadas em três graus de rugosidades.

Quadro 4 – Descrição da rugosidade dos planos das fracturas. [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].

CLASSE	DESCRIÇÃO
I	Rugosa ou irregular, em patamares ou em degraus
II	Lisa ou macia, em patamares ou em degraus
III	Espelhada ou estriada, em patamares ou em degraus
IV	Rugosa ou irregular, ondulada
V	Lisa ou macia, ondulada
VI	Espelhada ou estriada, ondulada
VII	Rugosa ou irregular, planar
VIII	Lisa ou macia, planar
IX	Espelhada ou estriada, planar

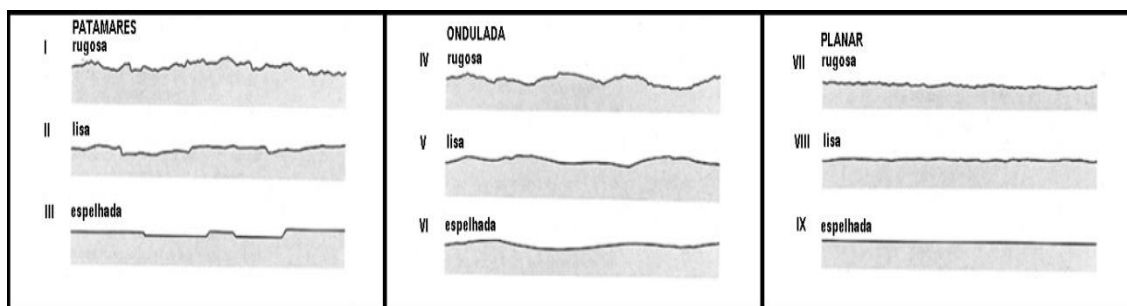


Figura 41 – Ilustração representativa das classes de rugosidades dos planos das discontinuidades [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].

Note-se que o termo “espelhada” ou “estriada” usado nas classes III, VI e IX só deverá ser atribuído quando houver indícios claros da ocorrência de deslizamento prévio na discontinuidade em causa [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008)].

▪ PREENCHIMENTO

O Preenchimento, ou Enchimento, é o nome que se dá ao material que preenche parcial ou totalmente o espaço existente entre cada plano de discontinuidade. No interior das aberturas das discontinuidades pode haver vários tipos de materiais como brechas, areias, argilas, calcites ou até mesmo matéria orgânica, sendo que às aberturas preenchidas dá-se o nome de Espessura. Quando se nota a ausência de qualquer material, havendo a circulação de ar, há a possibilidade de circulação de água ao longo da abertura da discontinuidade.

O estado da ocupação do espaço existente no interior de uma abertura em uma discontinuidade, principalmente em profundidade, é por vezes bastante variado e o seu estudo convém ser muito cuidadoso de modo a obter informação necessária para a análise do comportamento mecânico das discontinuidades no que toca à resistência ao deslizamento, à deformabilidade e a questões de permeabilidade. O relacionamento dos parâmetros Preenchimento, Abertura/Espessura e Rugosidade, permite efectuar um estudo melhor e mais credível acerca do deslocamento dos planos de discontinuidades [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008)].

▪ EXTENSÃO

O parâmetro Extensão, muitas vezes chamado de Continuidade ou Persistência, revela o comprimento visível/perceptível da discontinuidade, ao longo do afloramento. Este parâmetro costuma ser quantificado pelo comprimento da fractura, mas por vezes é quantificado pela extensão em área da discontinuidade, sendo que esta última medida é mais difícil de se efectuar e, por isso, neste trabalho optou-se por medir/estimar a Extensão pelo comprimento da discontinuidade e classificar o parâmetro com base no Quadro 5, sugerido pela ISRM (1977).

Este é um parâmetro que importa conhecer para obter as características mecânicas de potenciais superfícies de deslizamento de um maciço rochoso. No entanto, é um parâmetro de extrema relevância quando se trata de estudos inerentes a obras geotécnicas de Engenharia Civil, visto que o conhecimento da extensão de discontinuidades pode ajudar a perceber uma possível superfície de deslizamento de um determinado volume do maciço rochoso, o que pode influenciar ou prejudicar o andamento de uma dada obra, ou até mesmo a sua rotura se a fractura em causa tiver dimensões à escala da obra [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008)].

Quadro 5 – Descrição da extensão das descontinuidades [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].

EXTENSÃO	COMPRIMENTO (m)
Muito pequena	< 1
Pequena	1 a 3
Média	3 a 10
Elevada	10 a 20
Muito elevada	> 20

Todos os parâmetros acima descritos foram medidos quer com auxílio a equipamento devido para o efeito quer a partir de observações aproximadas. A atitude, como já referido, foi medida com o auxílio de uma bússola provida de clinómetro; o espaçamento foi medido com o auxílio de uma fita métrica convencional; a abertura foi medida com o auxílio de uma craveira; os restantes parâmetros foram obtidos com recurso a observações directas.

Feita a introdução e resumida explicação, descrita nos tópicos supracitados, dos parâmetros necessários a um estudo das descontinuidades de um maciço geológico, passa-se a revelar a informação obtida no trabalho de campo efectuado nas localizações de onde foram recolhidas amostras de rocha e de solo para a posterior caracterização geotécnica do capítulo seguinte.

Note-se que o estudo das descontinuidades transcrito nos subcapítulos abaixo foi efectuado apenas aos afloramentos rochosos que apresentavam condições para fazê-lo. Ou seja, das 5 localizações de recolha de amostras presentes neste trabalho, duas não apresentavam condições para a recolha de informação. Uma dessas localizações, no cais do Porto da Cruz, foi amostrado solo proveniente de um maciço terroso pouco rijo, de origem sedimentar detrítica, o que apenas permitiu que se observasse a atitude dos planos das superfícies de estratificação. Na outra localização, no sítio da Ameixieira, Ribeira Brava, o maciço rochoso é de um tufo vulcânico, uma rocha ígnea cuja origem deve-se à deposição de piroclastos, e que não apresenta, em regra, o tipo de descontinuidades à escala macroscópica/megascópica que interessasse a este estudo, fazendo disso um dos motivos para não o efectuar.

Optou-se então por revelar a informação separadamente, descrevendo o conjunto de parâmetros referente a cada uma das localizações dos maciços rochosos/terrosos estudados, distinguindo-as pelos respectivos nomes dos sítios onde se encontraram os afloramentos e enumerando-as de acordo com a numeração atribuída às amostras no início do trabalho.

2.2.2.1. Maciço rochoso da Fajã de Milho, Porto da Cruz (Amostra n.º 1)

O afloramento rochoso deste maciço, cujo material é descrito como rocha de origem vulcânica mas profundamente alterada, apresentava as condições suficientes para se efectuar o estudo das descontinuidades, embora esta amostra tenha sido considerada como solo para fins de caracterização geotécnica.

Da observação do afloramento no local onde foram recolhidas as amostras, percebeu-se que as descontinuidades são diáclases e que pelo menos existem 2 famílias de descontinuidades, sendo que uma delas (família *F1-a*), a mais evidente, é constituída por disjunções em lajes e a outra família (família *F1-b*) é composta por disjunções prismáticas.

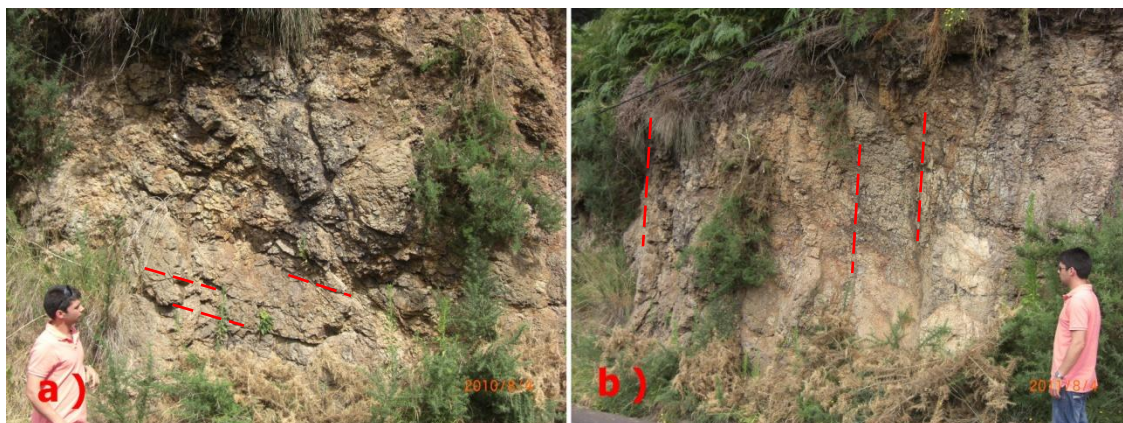


Figura 42 – a) Afloramento rochoso da Fajã de Milho, com ilustração da família de fracturas *F1-a*; b) o mesmo afloramento rochoso, mas com indicação da família de descontinuidades *F1-b*.

A atitude da família de descontinuidade *F1-a*, obtida no local com o auxílio de uma bússola de geólogo fornecida pela Universidade da Madeira, é N 15° E; 26° SE e a atitude da família *F1-b* é N 84° W; 85° SW.



Figura 43 – Determinação da atitude da família de descontinuidades *F1-b*, com o auxílio da bússola provida de clinómetro.

Na família *F1-a*, mediram-se espaçamentos entre os 80 mm e os 120 mm, aberturas de 7,20 mm (no máximo) e extensões visíveis de sensivelmente 8 m. Observaram-se rugosidades lisas, em patamares, e o preenchimento era normalmente imperceptível, podendo por vezes parecer a existência de material argiloso e terra vegetal nas espessuras.



Figura 44 – a) Momento da medição do espaçamento das fracturas da família *F1-a*; b) medição do espaçamento das descontinuidades da *F1-b*.

Quanto à família *F1-b*, mediram-se espaçamentos entre os 700 mm e os 1450 mm, aberturas máximas de 0,1 mm e extensões visíveis de sensivelmente 5 m. Observaram-se rugosidades irregulares, em degraus, e o preenchimento era da mesma forma imperceptível (como na *F1-a*), podendo em algumas zonas notar-se a existência de material argiloso e terra vegetal no interior das aberturas.



Figura 45 – Pormenor do afloramento rochoso onde se podem ver aberturas e espessuras na *F1-a* e *F1-b*.

Apresenta-se de seguida um quadro resumo para os dados obtidos no campo, referentes às duas famílias de descontinuidades estudadas no afloramento rochoso da Fajã de Milho, de acordo com as descrições sugeridas pela ISRM (1977) para o estudo de descontinuidades.

Quadro 6 – Descrição das descontinuidades das famílias *F1-a* e *F1-b* em função dos parâmetros de estudo.

	F1-a	F1-b
Atitude	N 15° E ; 26° SE	N 84° W ; 85° SW
Espaçamento	Próximas	Afastadas
Abertura	Muito fechadas a largas	Muito fechadas
Extensão	Média	Média
Rugosidade	Classe II, Patamares - Lisa	Classe I, Patamares - Rugosa
Preenchimento	Ar / argilas / terra vegetal /material orgânico	Ar / argilas / terra vegetal /material orgânico

Note-se que o afloramento deste maciço rochoso era constituído por material rocha profundamente alterado e que os parâmetros observados para o estudo das respectivas descontinuidades não são de fácil percepção, admitindo-os como aproximados à realidade, sendo que os de mais difícil caracterização foram a Extensão, a Abertura e o Preenchimento.

2.2.2.2. Maciço terroso do cais do Porto da Cruz (Amostra n.ºs 2, 3 e 4)

Tratando-se de um maciço terroso de origem sedimentar detrítica, as descontinuidades presentes no afloramento de onde foram recolhidas as amostras são superfícies de estratificação. Por isso, e dadas as características do maciço terroso sedimentar em estudo, achou-se coerente obter só a atitude dessas descontinuidades, visto que os restantes parâmetros eram de difícil observação ou mesmo impossíveis de caracterizar. Por exemplo, os espaçamentos entre superfícies de estratificação poderiam ser medidos, mas não seria lógico visto se tratar de depósitos sedimentares (fluxos de detritos e de lamas) onde se poderia medir vários espaçamentos diferentes.



Figura 46 – Local onde se mediu a atitude da superfície de estratificação do maciço terroso.

Portanto, o único parâmetro registado para este maciço terroso foi a atitude (orientação) das suas superfícies de estratificação. Para tal, foi necessário estudar a área de modo a entender a direcção do evento de enxurrada que originou tal maciço sedimentar. Utilizou-se então a bússola de geólogo para medir a atitude do maciço, cujo resultado foi N 21° E; 0° NW (inclinação subhorizontal).

2.2.2.3. Maciço rochoso do Serrado, Porto da Cruz (Amostra n.º 5)

Nesta localização, de onde foram recolhidos blocos de rocha mugearítica para a amostra n.º 5, o afloramento rochoso que originou a queda dos blocos recolhidos encontra-se parcialmente revestido com betão projectado devido a uma obra de contenção da escarpa (Figura 47), sendo que a parte do afloramento ainda visível estava inacessível devido à existência de um muro de suporte de grandes dimensões na base da escarpa. Por isso, foi impossível efectuar o estudo das discontinuidades desde maciço no exacto local onde foi recolhido o material para amostra n.º 5.



Figura 47 – Afloramento inacessível de rocha mugearítica, fotografado a cerca de 25 metros da parede rochosa, de onde se pode ver o coroamento do muro de suporte.

Dada a impossibilidade de acesso ao exacto local de recolha de amostras, analisou-se o maciço nas suas proximidades de modo a encontrar um local mais próximo possível da localização original, que

apresentasse descontinuidades presumíveis de serem as mesmas das que eram visíveis no afloramento original e que tivesse condições para efectuar o respectivo estudo.

Foi, portanto, escolhido um local a cerca de 100 metros de distância à localização original, com um afloramento adequado para o estudo visto que possuía uma geomorfologia (orientação das descontinuidades) que se presumiu ser a mesma que a do afloramento original.

Este maciço de rocha mugearítica, segundo o que foi perceptível no afloramento, conta com 3 famílias de descontinuidades, sendo que uma delas é constituída por superfícies de estratificação (família *F5-a*) e as restantes duas por diaclases (famílias *F5-b* e *F5-c*), conforme se pode ver nas ilustrações da Figura 48.



Figura 48 – a) Afloramento mugearítico no sítio do Serrado, com ilustração da família de diaclases *F5-b*; b) O mesmo afloramento, com indicação da família de superfícies de estratificação *F5-a* e da família de diaclases *F5-c*.

O parâmetro atitude foi obtido às 3 famílias de descontinuidades, sendo que para a família *F5-a* tem-se a orientação EW; 10° SN, para a família *F5-b* tem-se a atitude N 47° E; 82° NW e para a família *F5-c* tem-se N 35° W; 52° WS.

Quanto aos restantes parâmetros, na família *F5-a*, foram medidos espaçamentos entre os 20 mm e os 45 mm, aberturas máximas de 3 mm e uma extensão visível de pelo menos 3 m. A rugosidade dos planos de estratificação desta família aparenta ser lisa, ondulada, e as aberturas eram ocupadas por ar e, por vezes, preenchidas por terra vegetal/matéria orgânica.



Figura 49 – a) Pormenor das superfícies de estratificação da família *F5-a*, visíveis no afloramento; b) Aproximação ao pormenor da medição de uma abertura da família de diaclases *F5-b*.

A família de diaclases *F5-b* tem espaçamentos que variam dos 500 mm aos 1200 mm, aberturas máximas de 95,2 mm e uma extensão observável de pelo menos 4 m. Já a rugosidade dos planos das

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

descontinuidades aparenta ser lisa, ondulada, e o preenchimento alterna entre ar, fragmentos de mugarito de granulometria diversa e terra vegetal/matéria orgânica.



Figura 50 – a) Pormenor de uma espessura da família *F5-b*, preenchida com terra vegetal/matéria orgânica e material argiloso; b) Pormenor de uma abertura da família *F5-b*.

Na família de diaclases *F5-c*, os espaçamentos medidos foram de 1190 mm a 1800 mm, as aberturas máximas de 5 mm e observaram-se extensões de pelo menos 3 m. As superfícies dos planos das diaclases foram dadas como lisas, onduladas, quanto à sua rugosidade, e o preenchimento observado era semelhante ao das famílias anteriormente descritas, alternado entre ar e terra vegetal/matéria orgânica.

Apresenta-se de seguida o quadro resumo do estudo das descontinuidades deste maciço de rocha mugarítica.

Quadro 7 - Descrição das descontinuidades das famílias *F5-a*, *F5-b* e *F5-c* em função dos parâmetros de estudo.

	F5-a	F5-b	F5-c
Atitude	EW; 10° SN	N 47° E; 82° NW	N 35° W; 52° WS
Espaçamento	Muito próximas	Moderadamente afastadas a afastadas	Afastadas
Abertura	Fechadas a largas	Muito largas	Abertas a largas
Extensão	Pequena a Média	Média	Média
Rugosidade	Classe V, Ondulada - Lisa	Classe V, Ondulada - Lisa	Classe V, Ondulada - Lisa
Preenchimento	Ar / fragmentos mugaríticos de granulometria diversa / terra vegetal /material orgânico	Ar / fragmentos mugaríticos de granulometria diversa / terra vegetal /material orgânico	Ar / fragmentos mugaríticos de granulometria diversa / terra vegetal /material orgânico

2.2.2.4. Maciço rochoso da Fajã do Cerejo, Ribeira Brava (Amostra n.º 7)

Nesta localização, palco de recolha da amostra n.º 7, o afloramento do maciço rochoso basáltico demonstrava duas famílias de descontinuidades (famílias *F7-a* e *F7-b*) perceptíveis a olho nu, sendo que outras famílias expectáveis não foram avistadas.



Figura 51 – a) Vista do afloramento basáltico com as descontinuidades assinaladas; b) Pormenor do afloramento com boa percepção das descontinuidades.

Devido ao facto de se tratar de um maciço basáltico geocronologicamente recente e por isso não apresentar muito estado de fracturação, dado que o basalto, comparando com a rocha do maciço estudado no subcapítulo anterior (mugearito), é uma rocha mais rija que abarca durante mais tempo os estados de tensão após o arrefecimento da escoada lávica, os planos de diaclases nem sempre eram facilmente observados com a frequência sistemática exigida. Ainda assim, conseguiu-se identificar duas famílias de descontinuidades, sendo estas aproximadamente perpendiculares à direcção do escoamento do magma basáltico.



Figura 52 – a) Medição da direcção do plano da diaclase em estudo; b) Medição da inclinação da mesma fractura no maciço basáltico.

As atitudes deste maciço basáltico são $N 78^\circ W; 71^\circ SW$ para a família *F7-a* e $NS; 80^\circ E$ para a família *F7-b*. Quanto aos restantes parâmetros do estudo das descontinuidades, na família *F7-a* mediram-se espaçamentos que variam entre os 660 mm e os 1360 mm e mediram-se aberturas entre os 3,35 mm e os 23,15 mm. No que diz respeito à continuidade das diaclases, estas rondavam os 13 m de extensão, embora seja uma observação difícil dada a densa vegetação que se encontrava no topo do afloramento. Já a rugosidade dos planos das descontinuidades eram ondulados – lisos e o preenchimento das

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

aberturas era variado, podendo conter fragmentos basálticos de granulometria diversa, terra vegetal ou simplesmente ar, sendo que em algumas zonas avistava-se percolação de água nas fracturas.

Respeitante à família de descontinuidade F7-b, mediram-se espaçamentos entre diaclases que variam entre os 900 mm e os 2100 mm. Quanto aos parâmetros Extensão, Abertura, Rugosidade, Continuidade e Preenchimento, verificaram-se idênticos aos observados na família F7-a. Presume-se que essa semelhança deve-se ao facto de se tratar de famílias de descontinuidades relativamente parecidas no que toca aos seus factores de origem e formação, visto que os planos de ambas as famílias são aproximadamente perpendiculares à direcção do escoamento lávico e, por isso, partilharem um estado de tensões semelhante na estrutura rochosa.

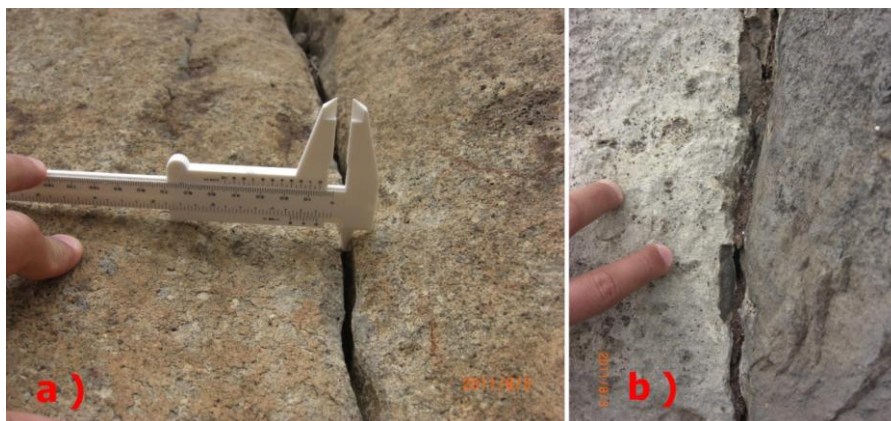


Figura 53 – a) Medição da abertura da descontinuidade da família F7; b) Pormenor do preenchimento de uma descontinuidade da mesma família.

Segue-se o quadro resumo com as descrições dos parâmetros do estudo das descontinuidades sugerido pela ISRM (1977).

Quadro 8 - Descrição das famílias de descontinuidades em função dos parâmetros de estudo.

	F7-a	F7-b
Atitude	N 78° W; 71° SW	NS; 80° E
Espaçamento	Afastadas	
Abertura	Largas a Muito largas	
Extensão	Elevada	
Rugosidade	Classe V, Onduladas - lisas	
Preenchimento	Ar / fragmentos basálticos de granulometria diversa / terra vegetal / água	

3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A matéria da caracterização geotécnica abordada neste capítulo, deveras a mais relevante do trabalho, é essencialmente guiada pelos padrões normais da Mecânica dos Solos e da Mecânica das Rochas, dada a importância a nível científico e técnico no que toca à sua aplicação directa e indirecta pelo conhecimento inerente da Geologia de Engenharia, que por sua vez actua directamente na Engenharia Civil.

Na grande maioria das obras de Engenharia Civil, principalmente no arranque da elaboração de projectos, nomeadamente nas fases de projecto designadas de “reconhecimento” e “anteprojecto”, é extremamente necessária aos projectistas a existência de uma base de dados concretos e suficientemente credíveis relativamente a propriedades e parâmetros geotécnicos dos materiais, rochosos ou terrosos, que se encontram na área/terreno onde se vai desenrolar a obra, de modo a que seja avaliada a viabilidade de construção da obra, haja condições para o estudo de soluções alternativas, se necessário, e permita o arranque da elaboração do zonamento geotécnico¹³ dos maciços em estudo, se for caso para tal.

Portanto, a implementação de uma caracterização geotécnica implica o conhecimento de um conjunto de propriedades e parâmetros geotécnicos que, para os obter, implica a realização de um leque de ensaios, quer laboratoriais, quer de campo. Do mesmo modo, este trabalho soma uma quantidade de testes normativos e sob critérios técnicos volúnicos, pensada de modo a que se obtivesse o conjunto de dados relevantes para a caracterização de diferentes materiais de maciços rochosos e terrosos presentes nas formações vulcânicas da ilha da Madeira.

No âmbito da caracterização geotécnica, pretende-se diferenciar os termos material rochoso (ou rocha) e material terroso (ou solo) em virtude das suas características mecânicas e do respectivo comportamento quando solicitado por tensões. Portanto, as rochas e/ou os solos são diferenciados conforme o conhecimento existente acerca dos seus módulos de deformabilidade, resistências à compressão uniaxial simples e coesões, podendo por vezes ser relevante conhecer as suas resistências à tracção. No entanto, e em muitos dos casos, não é necessária a realização de ensaios para que seja possível distinguir uma rocha de um solo. Essa distinção é muitas vezes previamente feita com base na experiência do estudioso e, conseqüentemente, é pensado e seleccionado qual o leque de testes adequados a realizar quer em amostras de rocha, quer em amostras de solo, visto que nem todos os tipos de ensaios são realizáveis a ambos os materiais.

O material rochoso, do ponto de vista da Mecânica das Rochas, é um material sólido e agregado de matéria mineral (e por vezes orgânica), que se encontra consolidado por processos naturais e que se apresenta em grande quantidade ou fragmentos de entre as superfícies de compartimentação de um maciço rochoso (descontinuidades). O material rochoso é dotado de uma gama (ou intervalo) de valores de uma série de parâmetros que permite classificar esse material como rocha. Ou seja, os principais parâmetros são a resistência à compressão uniaxial (simples), a coesão interna, a resistência à tracção, que em comparação com o material terroso, as rochas têm geralmente características que remetem a

¹³ Zonamento geotécnico – Em um reconhecimento geológico e geotécnico geralmente para fins de projecto, é a divisão de um maciço geológico em várias unidades de volume, apresentando cada uma delas uma certa homogeneidade e individualidade quanto aos parâmetros que caracterizam o maciço, sob o ponto de vista geológico-geotécnico. Em geral, são usadas três ou quatro zonas (ou unidades) geotécnicas, denominadas pela sigla ZG(#-número).

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

que esses parâmetros sejam relativamente elevados. Por exemplo, os basaltos detêm uma resistência à tracção que pode ir de 15 a 30 MPa e uma coesão interna que ronda os 10 MPa. Para a generalidade das rochas, a resistência à compressão uniaxial que pode variar entre 2 e 300 MPa.

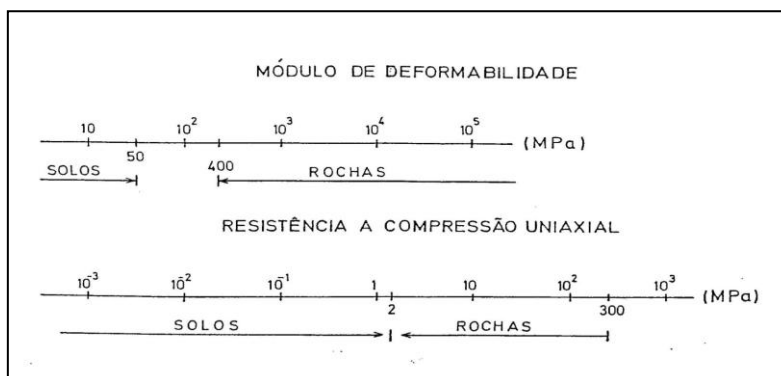


Figura 54- Parâmetros de resistência e deformabilidade referentes a solos e a rochas [Fonte: adaptado de LADEIRA (1986)].

Parâmetros	Solos	Rochas	Rochas de baixa resistência
Módulo de Deformabilidade (MPa)	<50	4×10^2 a 10^5	4×10^2 a 4×10^3
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)	<2	2 a 3×10^2	2 a 20

Figura 55 – Parâmetros de resistência e deformabilidade de solos, rochas e rochas brandas [Fonte: adaptado de ROCHA (1977), em COSTA (2006)].

O material terroso, embora podendo ser constituído também por um agregado de matéria mineral e orgânica, é basicamente distinguido pela sua disposição granulométrica (variando de grosseira até muito fina) ou pelo facto de se tratar de um material rochoso com grau de alteração extremamente elevado que permite uma muito fácil desagregação quando qualquer tipo de tensões é-lhe aplicado. Os solos são materiais geológicos cujas resistências à compressão e a tracção, são relativamente inferiores quando comparados com as rochas. A resistência à tracção de um solo é normalmente classificada como quase nula, sendo que para a análise de estabilidade de taludes pode vir a ser considerada. No entanto, a resistência à tracção é um parâmetro que não é normalmente considerado devido à dificuldade de aplicação de tensão de tracção, quer a um solo, quer a uma rocha. Quanto à compressão uniaxial simples, um solo pode apresentar valores máximos de 2MPa.

Porém, é necessário dotar estas distinções com extremo cuidado, pois existem rochas que podem ou não ser consideradas como solos, dependendo do ponto de vista de estudo a que se destinam. Por exemplo, do ponto de vista da Engenharia de Construção Civil, nomeadamente na gestão de obra, pode-se facilmente atribuir o termo solo a uma rocha branda (rochas de baixa resistência apresentadas na Figura 55, a qual pode ser facilmente escavada com recurso a uma pá ou equipamento mecânico de escavação, podendo desta forma causar alguma desconexão caso a atribuição do termo seja revelada a uma entidade técnico-científica [LADEIRA (1986); LIMA & MENEZES (2008); ROCHA (1981)].

Portanto, com vista à caracterização geotécnica efectuada quer para as amostras de solos, quer para as amostras de rochas, descreve-se sucintamente os ensaios realizados neste trabalho da seguinte forma:

- **Ensaio de caracterização realizados a solos:**
 - Determinação do teor em água;
 - Determinação do teor em água, cinzas e matéria orgânica;
 - Análise granulométrica;
 - Determinação da densidade das partículas;
 - Ensaio de equivalente de areia;
 - Determinação dos limites de consistência (*Limites de Atterberg*): Limite de liquidez e Limite de plasticidade.
- **Ensaio de caracterização realizados a rochas:**
 - Determinação da absorção de água à pressão atmosférica;
 - Determinação da resistência à compressão uniaxial;
 - Determinação do módulo de deformabilidade;
 - Determinação da dureza de ressalto através do martelo de SCHMIDT.

Os testes efectuados às amostras de rocha obtidas para este trabalho foram todos realizados em laboratório, em sede do LREC, no âmbito de uma parceria existente entre a UMA e o LREC, IP-RAM.

3.1. ENSAIOS REALIZADOS AOS SOLOS AMOSTRADOS

O material recolhido no campo, normalmente não possui condições físicas para que seja utilizado directamente nos ensaios laboratoriais a que se destina, mesmo que este tenha que ser armazenado e transportado com o intuito de preservar as suas condições naturais, em particular o seu estado de humidade. Mesmo assim, para a maioria dos ensaios, as quantidades recolhidas de solo necessitam de um tratamento inicial, uma preparação.

Para a separação do material recolhido em campo, de modo a obter as variadas amostras que se necessita, foi seguido um conjunto de procedimentos e actividades que está descrito na especificação do LNEC E 195-1966, «SOLOS- *Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*». Este documento normativo permite que se efectue uma série de passos de preparação do material recolhido no campo, nomeadamente o modo como se obtém a quantidade de solo para cada amostra e a respectiva preparação da sua disposição, de maneira a que, posteriormente, as amostras sejam utilizadas correctamente nos ensaios de que serão alvo.

3.1.1. Determinação do teor em água

O ensaio para a determinação do teor em água de um solo, foi efectuado segundo o documento normativo português NP-84 1965, «SOLOS – *Determinação do teor em água*».

Trata-se de um ensaio de simples execução que, porém, requer algum cuidado quanto ao processo de amostragem. Isto é, após a recolha do material no campo há que transferi-lo o mais rapidamente possível para o laboratório (devidamente armazenado para não haver perdas de humidade natural do material), de modo a que se possa efectuar o ensaio às amostras com as condições, senão idênticas, as mais aproximadas possíveis da realidade de onde foram recolhidas.

Resumidamente, o ensaio consiste em obter o quociente da massa de água que se evapora do provete em questão (em estufa a 105 °C – 110 °C), pela massa do provete depois de seco (com a massa mantendo-se constante em sucessivas leituras).



Figura 56 – Fotografia tirada ao interior da estufa, no LREC, onde se encontravam provetes de solo a secar para a determinação do seu teor em água.

Após a conclusão do ensaio e com o tratamento dos dados efectuado, apresentam-se no quadro seguinte os resultados dos teores em água dos solos do Porto da Cruz, nomeadamente do sítio da Fajã de Milho (amostra n.º 1) e do cais (n.ºs 2, 3 e 4).

Quadro 9- Teores em água das amostras de solo.

N.º da amostra	Teor em água, W (%)
1	52,3
2	19,3
3	23,0
4	18,4

3.1.2. Determinação do teor em água, cinzas e matéria orgânica

Este ensaio também se rege pela determinação do teor em água de um solo, sendo que, por isso, o procedimento de recolha das amostras foi feito com todo o cuidado possível para que as condições naturais do solo fossem preservadas, para que os resultados do ensaio fossem representativos.

Este ensaio, no entanto, não serve apenas para a determinação do teor em água, mas serve também à determinação do teor em cinzas e matéria orgânica presente no solo amostrado. Para isso, foi utilizada a norma ASTM D2974 – 07a, «*Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*» tendo sido utilizado o método de ensaio C da referida norma para a determinação do teor em cinzas.

Sendo o teor em água determinado de forma idêntica como o determinado em 3.1.1., já o resto do ensaio requer o seguimento da norma ASTM acima mencionada. Sucintamente, a determinação do teor em cinzas e matéria orgânica é feita pelos mesmos procedimentos da determinação do teor em água, mas neste caso os provetes são remetidos à secagem em uma mufla, onde estão sujeitos a temperaturas que rondam os 440 °C. Assim, e após os provetes atingirem uma massa constante, determina-se a percentagem de matéria orgânica pela diferença de massas de antes e depois da secagem, sendo que o restante é a percentagem de cinzas.

Tendo o ensaio sido realizado sobre mais que um provete de cada amostra, o quadro seguinte apresenta as percentagens de cinzas e matéria orgânica para cada uma das 4 amostras de solo estudadas neste trabalho.

Quadro 10 – Resultados do ensaio para a determinação da percentagem de cinzas e matéria orgânica das amostras de solo.

N.º da amostra	Provete	Teor em cinzas (%)	Teor em cinzas médio (%)	Teor em matéria orgânica (%)	Teor em matéria orgânica médio (%)
1	A	93,7	94,5	6,3	5,5
	B	95,3		4,7	
2	A	97,7	97,6	2,3	2,4
	B	97,5		2,5	
3	A	97,4	97,4	2,6	2,6
	B	97,5		2,5	
4	A	94,9	94,2	5,1	5,8
	B	93,6		6,4	

3.1.3. Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica visa quantificar a distribuição, por tamanhos, das partículas que constituem um determinado solo. Isto é, o ensaio determina a granulometria de um solo (ou composição granulométrica de um solo), sendo que a distribuição de todas as partículas, de acordo com as suas dimensões, vem expressa em percentagem do peso total do solo amostrado. Essencialmente, o ensaio consiste na separação mecânica do solo, sendo que para tal é utilizada uma série de peneiros com malhas de diferentes aberturas, para separar o solo por fracções e quantificando-as como fracções grossas e fracções finas. De seguida, o ensaio é continuado com o processo de sedimentação das partículas de granulometria mais fina, que se baseia na sua velocidade de queda em suspensão aquosa, durante num determinado tempo, e assim, de acordo com métodos de cálculo normativos, determinar as dimensões granulométricas do material mais fino e correspondentes percentagens.

De seguida, é traçada uma curva granulométrica, que se representa graficamente pela relação dos diâmetros das partículas com as percentagens acumuladas de material passado, em função do peso total da amostra.

Para a execução deste ensaio laboratorial, seguiu-se os procedimentos normativos contidos na especificação LNEC E 196 – 1966, «SOLOS – Análise granulométrica».

De modo a obter uma melhor apresentação dos resultados às análises granulométricas efectuadas, optou-se por apresentar um quadro de resultados para cada amostra. Quanto às curvas granulométricas, optou-se por apresentar a amostra n.º1 em um diagrama separado do diagrama das restantes. Portanto, apresenta-se as curvas granulométricas das amostras n.ºs 2, 3 e 4 num mesmo diagrama, de modo a poder compará-las entre si, visto que estas três amostras provêm todas de um mesmo maciço terroso de origem sedimentar, no qual se evidenciam as camadas de deposição de sedimentos, situação já referida e explicada neste trabalho nos capítulos 1.4. e 2.2.1.2.

As curvas granulométricas traçadas estão legendadas de acordo com as fracções granulométricas sugeridas na especificação LNEC E 196 – 1966, as quais estão descritas no quadro seguinte.

Quadro 11 – Frações granulométricas de cada tipo de solo [Fonte: adaptado de LNEC E 196 – 1966].

Tipo de solo	Designação da granulometria	Fracção granulométrica (mm)
CALHAU		> 60
SEIXO	GROSSO	60 a 20
	MÉDIO	20 a 6
	FINO	6 a 2
AREIA	GROSSA	2 a 0,6
	MÉDIA	0,6 a 0,2
	FINA	0,2 a 0,06
SILTE	GROSSO	0,06 a 0,02
	MÉDIO	0,02 a 0,006
	FINO	0,006 a 0,002
ARGILA		< 0,0020

Passa-se então a apresentar os resultados da análise granulométrica efectuada à amostra n.º 1, correspondente aos fragmentos de rocha vulcânica muito alterada recolhida no sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz, a qual foi considerada como solo para fins de caracterização geotécnica neste trabalho (dado o seu estado de alteração e muito fácil desagregação).

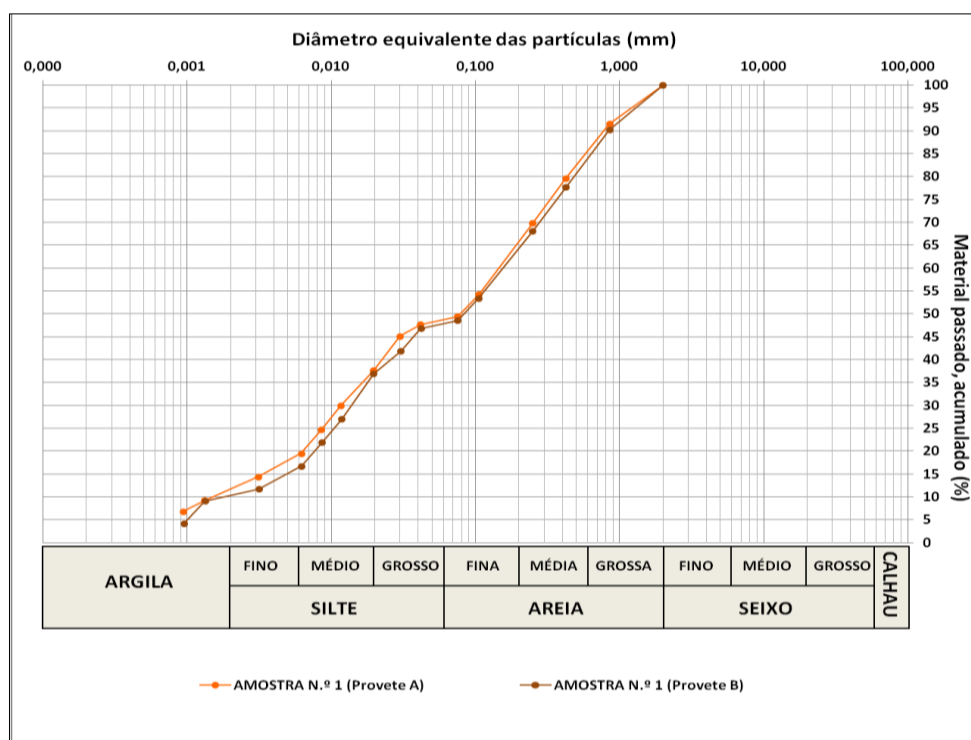


Figura 57 - Curvas granulométricas referentes ao material considerado como solo, proveniente da rocha vulcânica profundamente alterada, correspondente à amostra n.º 1 (sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz).

Anteriormente neste trabalho, nomeadamente no capítulo 1.4., estas três amostras de solo foram individualmente designadas de acordo com a sua granulometria aparente no momento da sua recolha, sendo que a amostra n.º 2 foi previamente assumida como solo de granulometria grosseira, a amostra n.º 3 como solo de granulometria intermédia e a amostra n.º 4 como solo de granulometria fina. Estes pormenores são lembrados neste momento do trabalho de modo a que seja feita uma observação mais consciente das curvas granulométricas seguintes (Figura 58).

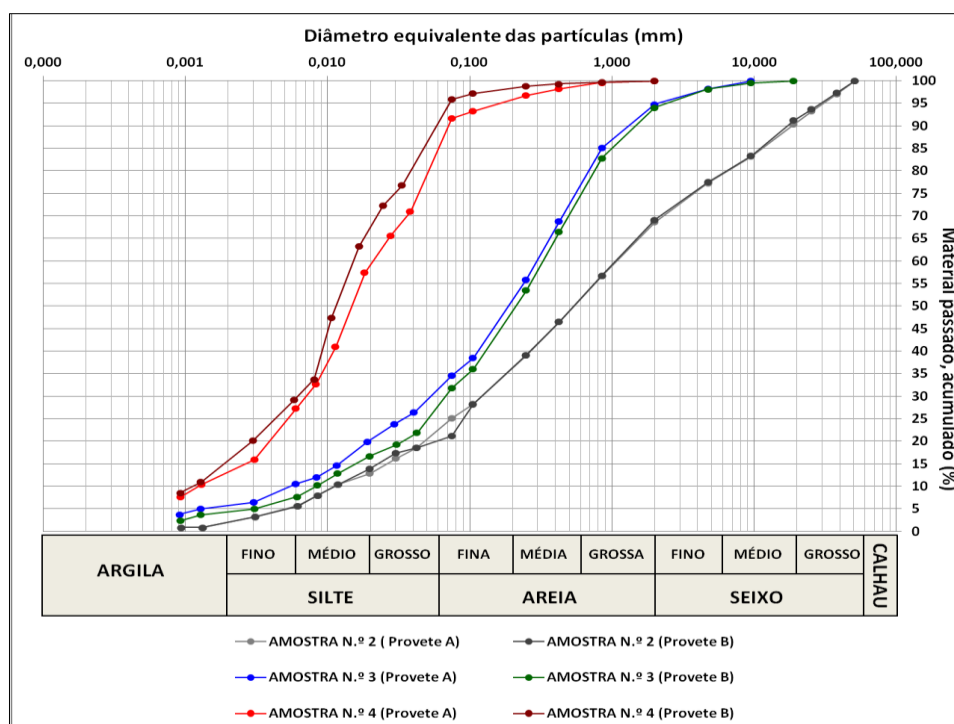


Figura 58 - Curvas granulométricas referentes aos solos sedimentares correspondentes às amostras n.º 2, 3 e 4 (cais do Porto da Cruz).

Os quadros com os resultados das análises granulométricas, efectuadas às 4 amostras de solo, encontram-se disponíveis para consulta no Anexo I deste trabalho.

3.1.4. Determinação da densidade das partículas

Para este ensaio, os procedimentos volúnicos efectuados foram seguidos pela norma portuguesa NP – 83 1965, «SOLOS – *Determinação da densidade das partículas*».

Trata-se de um ensaio laboratorial que tem incidência nas partículas com dimensões inferiores a 4,75 mm (que passam no peneiro de 4,75 mm de abertura – ASTM n.º 4).

Para partículas com diâmetros maiores que 4,75 mm seria utilizada uma outra norma, o que não é o caso das amostras deste trabalho, visto que se trataria da consideração de inertes.

Portanto, a realização deste ensaio permite determinar a densidade das partículas (de dimensões inferiores a 4,75 mm) de um solo, sendo o seu resultado expresso pelo quociente da massa de um certo volume dessas partículas (à temperatura do ensaio), pela massa de igual volume de água destilada a 20 °C.

Tendo o ensaio sido realizado sobre mais do que um provete de cada amostra, o Quadro 12 apresenta os resultados da densidade das partículas de cada provete bem como a densidade média obtida para cada amostra estudada neste ensaio, sendo referenciada a temperatura a que o ensaio foi realizado, a fracção granulométrica das partículas e o modo de realização do ensaio (sem secagem prévia dos provetes).

Quadro 12 – Densidade das partículas de cada amostra de solo.

N.º da Amostra	Provete	Sub-provete	Temperatura durante o ensaio (°C)	Densidade (a 20° C)	Densidade média (a 20° C)
1	A	1	18,7	2,91	2,92
		2	18,9	2,92	
	B	1	17,7	2,92	
		2	17,7	2,91	
2	A	1	17,5	3,02	3,01
		2	17,5	3,01	
	B	1	19,0	3,01	
		2	18,8	3,01	
3	A	1	18,9	3,00	2,99
		2	19,9	2,99	
	B	1	19,6	2,99	
		2	19,2	2,99	
4	A	1	19,7	2,89	2,90
		2	19,0	2,90	
	B	1	19,0	2,90	
		2	19,8	2,90	

3.1.5. Ensaio de equivalente de areia

Este ensaio visa quantificar e qualificar o equivalente de areia de um solo, que é uma característica associada aos elementos plásticos finos existentes em uma amostra de solo.

Para a realização deste teste, está fixada a especificação E 199 – 1967, «SOLOS – Ensaio de equivalente de areia», a qual foi utilizada para este trabalho como referência normativa ao procedimento laboratorial respectivo.

Sucintamente, este ensaio consiste na agitação de uma proveta com a mistura do provete com água e, segundo um determinado método normativo, deixá-la repousar durante um período de tempo estipulado e verificar, se for o caso, a separação do material da amostra em suspensão na proveta. Assim, e de acordo com os procedimentos normativos, avalia-se a qualidade e quantidade dos finos plásticos de um solo através do equivalente de areia (E.A.) e do equivalente de areia visual (E.A.V.).

Apresentam-se no quadro seguinte os resultados do E.A. e do E.A.V. sobre as amostras ensaiadas, que são as médias aritméticas dos valores determinados para cada provete.

Quadro 13 – Resultados do ensaio de Equivalente de Areia para cada amostra de solo e respectivos provetes.

N.º da Amostra	Provete	E.A. (%)	E.A.V. (%)
1	A	22	38
	B	21	38
2	A	23	55
	B	23	55
3	A	23	33
	B	23	34
4	A	7	ND
	B	7	ND

3.1.6. Determinação do limite de liquidez

Sendo o limite de liquidez, um limite de consistência de um solo, o procedimento de ensaio de determinação deste parâmetro encontra-se devidamente descrito na norma portuguesa NP – 143, 1969, «SOLOS – Determinação dos limites de consistência», também conhecidos por *Limites de Atterberg*.

Os ensaios para a determinação dos limites de consistência, são essencialmente focados para a área de geologia de engenharia/engenharia civil, pois o seu resultado permite uma valiosa ajuda à avaliação geotécnica das propriedades de um determinado solo e à respectiva previsão do seu comportamento.

A técnica do ensaio, de uma forma sucinta, consiste em utilizar um aparelho, chamado de *Concha de Casagrande*, que abarca o provete no qual é feito um sulco de 1 cm de largura, para dividir o provete em duas porções. De seguida aplica-se um número de golpes a cadência constante, suficientes para que o sulco se una em uma extensão de 1 cm. Posteriormente é determinado o teor em água de uma porção do provete da zona do sulco unido.

Este é aplicável a amostras de solo onde 30% das partículas constituintes tenham, no mínimo, dimensões inferiores a 0,05 mm. Dimensões maiores que essas apontam para solos arenosos, ficando esses excluídos deste ensaio, visto que o mesmo fica sem significado lógico.

Os resultados deste ensaio são apresentados sob a forma de diagramas que relacionam o teor em água dos provetes com o número de golpes efectuadas no ensaio, sendo que o limite de liquidez de cada provete é representado pelo teor em água correspondente a 25 pancadas. Os diagramas referidos estão disponíveis para consulta no Anexo II. Nos quadros seguintes apresentam-se os resultados obtidos, correspondentes a cada amostra, com a referência ao estado dos provetes no momento em que são ensaiados (se secos ao ar ou em estufa).

Quadro 14 – Limites de liquidez referentes à amostra n.º 1 (Fajã de Milho, Porto da Cruz).

N.º da Amostra	1			
Provete	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de liquidez (%)	62	52	63	52

Quadro 15 - Limites de liquidez referentes à amostra n.º 2, solo de granulometria grosseira (cais do Porto da Cruz).

N.º da Amostra	2			
Provete	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de liquidez (%)	59	56	60	54

Quadro 16 - Limites de liquidez referentes à amostra n.º 3, solo de granulometria intermédia (cais do Porto da Cruz).

N.º da Amostra	3			
Provete	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de liquidez (%)	53	49	52	48

Quadro 17 - Limites de liquidez referentes à amostra n.º 4, solo de granulometria fina (cais do Porto da Cruz).

N.º da Amostra	4			
Proвете	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de liquidez (%)	63	57	63	57

3.1.7. Determinação do limite de plasticidade

Para determinação deste limite de consistência, tal como o anterior, é aplicável o documento normativo NP – 143, 1969 para a execução do respectivo ensaio laboratorial.

O ensaio para a determinação do limite de plasticidade contém a mesma importância para o campo de actuação da geologia de engenharia e é também aplicável às mesmas condições que o ensaio para a determinação do limite de liquidez, descritas em 3.1.6., no que toca às dimensões das partículas do solo em questão.

A técnica deste ensaio, de uma forma resumida, baseia-se em rolar cada provete até que este se transforme num filamento cilíndrico de diâmetro de 3 mm. Quando tal acontecer, transforma-se o provete em uma pequena esfera e repete-se o procedimento de rolamento até que, a determinada repetição, se dê a rotura do filamento quando este atingir os 3 mm. Após a rotura, determina-se o teor em água do provete.

O limite de plasticidade é simplesmente a média aritmética dos teores em água dos provetes. Caso tenha sido impossível determinar o limite de plasticidade do solo amostrado, este é apresentado como «não plástico» (NP).

Seguem-se, nos quadros seguintes, os resultados do limite de plasticidade de cada amostra de solo estudada neste trabalho, com a referência do respectivo estado dos provetes no momento do ensaio (se secos ao ar ou em estufa).

Quadro 18 – Limites de plasticidade da amostra n.º 1 (Fajã de Milho, Porto da Cruz).

N.º da Amostra	1			
Proвете	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de plasticidade (%)	49	45	48	45

Quadro 19 – Limites de plasticidade da amostra n.º 2, solo de granulometria grosseira (cais do Porto da Cruz).

N.º da Amostra	2			
Proвете	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de plasticidade (%)	NP*	NP*	NP*	NP*

* NP - solo «não plástico». Não foi possível obter o seu limite de plasticidade.

Quadro 20 – Limites de plasticidade da amostra n.º 3, solo de granulometria intermédia (cais do Porto da Cruz).

N.º da Amostra	3			
Proвете	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de plasticidade (%)	38	35	37	35

Quadro 21 – Limites de plasticidade da amostra n.º 4, solo de granulometria fina (cais do Porto da Cruz).

N.º da Amostra	4			
Proвете	A	B	C	D
Estado da amostra	Seco ao AR	Seco em ESTUFA	Seco ao AR	Seco em ESTUFA
Limite de plasticidade (%)	36	33	35	33

3.2. ENSAIOS REALIZADOS ÀS ROCHAS AMOSTRADAS

Para o conjunto de ensaios efectuados sobre as amostras rochosas deste trabalho, foram utilizados dois tipos de provetes diferentes. Isto é, em todos os ensaios realizados, foram utilizados provetes cilíndricos, excepto no ensaio esclerométrico do martelo de Schmidt, para as amostras n.º 5 (mugarito) e n.º 6 (tufo), foram utilizados blocos de rocha com dimensões suficientes para o efeito. A utilização deste tipo de provetes deveu-se ao facto de os mugaritos e os tufos terem sido as únicas amostras de rochas obtidas pela recolha de blocos rochosos, sendo que a amostra n.º 7 (basalto) deu entrada no laboratório já em formato caroteado. A Figura 59 demonstra como foram obtidos os provetes caroteados das amostras n.ºs 5 e 6.

Note-se que, mesmo tendo recolhido blocos de rocha para as amostras n.ºs 5 e 6, foi possível obter os carotes necessários dessas mesmas amostras para outros ensaios, pois tinham dimensões suficientes para que tais provetes fossem obtidos.

É de referir também que, no que toca à amostra n.º 7, de rocha basáltica, foram obtidos provetes caroteados um tanto ou quanto distintos quanto à sua porosidade e conseqüente peso volúmico. Devido a esse facto, e sempre que possível, apresentam-se os respectivos resultados dos ensaios efectuados separadamente, isto é, separando em dois conjuntos distinguíveis de provetes de basalto: os mais porosos e os mais compactos.



Figura 59 – Momento em que se obtinha carotes de mugarito.

3.2.1. Determinação da absorção de água à pressão atmosférica

Para a realização deste ensaio seguiu-se a norma portuguesa NP EN – 13755, 2008 «*Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da absorção de água à pressão atmosférica.*». Trata-se de um ensaio simples de se concretizar, pois baseia-se em secar os provetes de rocha até massa constante e, de seguida, imergir os provetes em água à pressão atmosférica, de acordo com os procedimentos normativos, com o objectivo de voltar a pesá-los quando estes atingirem uma nova massa constante, mas desta feita saturados. O parâmetro desejado, a absorção de água, é obtido através da divisão da diferença entre a massa do provete saturado e a massa do provete seco com a massa do mesmo provete seco.

De uma forma análoga a este ensaio, foi calculado o peso volúmico seco de cada provete rochoso, com o auxílio da norma NP EN – 1936, 2001 «*Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta.*».



Figura 60 – Provetes com relação L/D=1, das três amostras de rochas (da esquerda para a direita: tufos, basaltos, mugaritos) durante a fase de imersão do ensaio.

De seguida apresentam-se os quadros com os resultados do ensaio de absorção de água à pressão atmosférica, sendo o peso volúmico e a absorção os mais relevantes.

Note-se que, para este ensaio, foram utilizados os provetes cilíndricos de relação L/D=1, sendo que para os provetes cilíndricos de relação L/D=2 não se realizou o ensaio de absorção, obtendo apenas a massa volúmica e respectivo peso volúmico seco. Apesar disso, optou-se por apresentar os resultados da determinação do peso volúmico de todas as amostras neste capítulo, juntamente com as percentagens de absorção de água determinadas.

Quadro 22 – Apresentação da massa volúmica seca e peso volúmico seco da amostra n.º 5, mugearito, e resultados do ensaio de absorção em água para os provetes L/D=1 da mesma amostra.

Relação L/D	Provete	Massa volúmica seca (g/cm ³)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	Absorção de água (%)	
1	1	2,51	24,59	3,5	
	2	2,51	24,61	3,4	
	3	2,46	24,09	4,0	
	4	2,52	24,73	3,4	
	5	2,46	24,09	4,0	
	7	2,58	25,33	2,6	
	8	2,57	25,18	2,9	
	9	2,59	25,43	2,4	
	10	2,60	25,51	2,2	
	11	2,61	25,61	2,1	
	13	2,60	25,51	2,4	
	15	2,57	25,22	2,7	
	2	18	2,56	25,09	-
		19	2,59	25,40	-
		20	2,59	25,39	-
21		2,53	24,82	-	
22		2,59	25,38	-	
23		2,60	25,48	-	
24		2,57	25,19	-	
25		2,49	24,43	-	
26		2,51	24,63	-	
27		2,60	25,48	-	
		Valor máximo	2,61	25,61	4,0
		Valor mínimo	2,46	24,09	2,1
	Desvio padrão	0,05	0,47	0,7	
	Valor médio	2,55	25,05	3,0	
	Coefficiente de variação (%)	1,89	1,89	23,0	

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Quadro 23 – Apresentação da massa volúmica seca e peso volúmico seco da amostra n.º 6, tufo, e resultados do ensaio de absorção em água para os provetes L/D=1 da mesma amostra.

Relação L/D	Provete	Massa volúmica seca (g/cm ³)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	Absorção de água (%)
1	11	1,87	18,38	12,1
	12	1,89	18,58	11,5
	13	1,83	17,98	12,6
	14	1,85	18,15	12,3
	15	1,83	18,00	12,7
	16	1,86	18,27	12,3
	17	1,84	18,10	12,7
	18	1,87	18,30	12,6
	19	1,87	18,32	12,3
	20	1,89	18,50	13,0
	21	1,91	18,77	12,6
	22	1,86	18,29	13,2
2	1	1,86	18,21	-
	2	1,83	17,94	-
	3	1,84	18,02	-
	4	1,85	18,18	-
	5	1,89	18,52	-
	6	1,82	17,82	-
	7	1,83	17,95	-
	8	1,84	18,07	-
	9	1,89	18,54	-
	10	1,90	18,66	-
	Valor máximo	1,91	18,77	13,2
	Valor mínimo	1,82	17,82	11,5
	Desvio padrão	0,03	0,26	0,4
	Valor médio	1,86	18,25	12,5
	Coeficiente de variação (%)	1,42	1,42	3,4

Quadro 24 - Apresentação da massa volúmica seca e peso volúmico seco da amostra n.º 7, basalto, e resultados do ensaio de absorção em água para os provetes L/D=1 da mesma amostra.

Relação L/D	Provete	Massa volúmica seca (g/cm ³)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	Absorção de água (%)	
1	3	2,76	27,07	1,0	
	5	2,80	27,50	0,9	
	7	2,70	26,45	1,6	
	10	2,91	28,51	0,7	
	11	2,47	24,20	3,6	
	12	2,78	27,25	0,9	
	13	2,36	23,17	1,7	
	14	2,81	27,56	0,8	
	15	2,73	26,75	2,6	
	17	2,76	27,05	1,0	
	18	2,60	25,47	1,4	
	20	2,30	22,53	2,1	
	21	2,18	21,40	3,8	
	22	2,63	25,78	1,5	
	27	2,99	29,36	0,3	
	28	2,92	28,62	0,8	
	29	2,86	28,10	1,3	
	2	1	2,72	26,72	-
		2	2,74	26,90	-
4		2,80	27,44	-	
6		2,14	20,95	-	
8		2,83	27,77	-	
9		2,88	28,21	-	
16		2,50	24,48	-	
19		2,70	26,54	-	
23		2,89	28,38	-	
24		2,94	28,80	-	
25		2,97	29,13	-	
26	2,92	28,66	-		
	Valor máximo	2,99	29,36	3,8	
	Valor mínimo	2,14	20,95	0,3	
	Desvio padrão	0,23	2,26	1,0	
	Valor médio	2,71	26,58	1,5	
	Coefficiente de variação (%)	8,50	8,50	64,7	

No caso das amostras de basalto (amostra n.º 7), achou-se coerente dividir o conjunto de provetes em dois grupos distinguíveis devido ao facto de existir um conjunto de provetes com uma porosidade considerável, sendo que os restantes se apresentavam como um basalto relativamente mais compacto.

A distinção dos provetes basálticos quanto à sua porosidade é feita a partir do peso volúmico seco de cada provete. Visto que o peso volúmico seco dos basaltos estudados situa-se numa gama entre os 21 e os 29 kN/m³ (aproximadamente), optou-se por estabelecer um limite de 27 kN/m³ para separar o que se considera de “basalto poroso” e “basalto compacto”, com o auxílio de uma análise visual aos próprios provetes. Assim, os provetes com peso volúmico seco inferior ao limite supracitado são considerados como “porosos” e os restantes como “compactos”.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Para uma melhor análise de resultados neste trabalho, trabalhar-se-á com os resultados separados, referentes à amostra basáltica n.º 7, como consta na reorganização de dados presente no quadro abaixo.

Quadro 25 – Reorganização dos provetes de basalto em função do seu estado de porosidade, conforme o respectivo peso volúmico seco.

Relação L/D	Estado do provete	N.º do provete	Peso volúmico seco (kN/m ³)
1	Poroso	7	26,4
		11	24,2
		13	23,2
		15	26,8
		18	25,5
		20	22,5
		21	21,4
		22	25,8
		Desvio padrão	2,0
		Valor médio	24,5
	Coef. variação (%)	7,9	
	Compacto	3	27,1
		5	27,5
		10	28,5
		12	27,2
		14	27,6
		17	27,1
		27	29,4
		28	28,6
		29	28,1
Desvio padrão		0,8	
Valor médio	27,9		
Coef. variação (%)	2,9		
2	Poroso	1	26,7
		2	26,9
		6	21,0
		16	24,5
		19	26,5
	Desvio padrão	2,5	
	Valor médio	25,1	
	Coef. variação (%)	10,1	
	Compacto	4	27,4
		8	27,8
9		28,2	
23		28,4	
24		28,8	
25	29,1		
26	28,7		
Desvio padrão	0,6		
Valor médio	28,3		
Coef. variação (%)	2,1		

3.2.2. Determinação da resistência à compressão uniaxial

Para o procedimento efectuado na realização deste teste foi utilizada a norma portuguesa NP EN – 1926, 2008, «Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão uniaxial».

Este ensaio visa determinar a resistência à compressão uniaxial simples (RCU) de um provete rochoso. Os provetes rochosos são caroteados e, no caso deste ensaio, em forma cilíndrica recta, de bases circulares planas e paralelas, com o diâmetro aproximadamente igual à altura ($L \approx D$).

Sucintamente, o ensaio para a determinação da RCU baseia-se na colocação de um provete na máquina de ensaio de carga e sujeitá-lo a um estado de compressão uniaxial simples, aplicando uma força uniformemente distribuída de incremento contínuo, até que se dê a rotura do provete. De seguida, anota-se a carga máxima de compressão suportada pelo provete para cálculos e correlações posteriores.

Este ensaio foi realizado após a conclusão do ensaio para a determinação da absorção de água à pressão atmosférica, com os provetes secos e com massa constante.



Figura 61 – a) Fase inicial do ensaio à RCU do carote 11 da amostra de mugearito; b) estado do mesmo carote após rotura; c) registo da força de rotura pelo software da máquina de ensaio.

Os valores da RCU foram obtidos a partir do cálculo da tensão máxima, ou seja, mais não é do que a razão entre a força axial máxima exercida pela máquina em compressão do provete pela área média da secção transversal do mesmo.

Nos quadros que se seguem, apresentam-se os resultados do ensaio à RCU efectuado às três amostras de material rochoso, nomeadamente aos mugearitos, tufos e basaltos (amostras n.ºs 5, 6 e 7, respectivamente).

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Quadro 26 – Valores da resistência à compressão uniaxial simples resultantes do ensaio à amostra n.º 5.

Rocha: Mugarito (amostra n.º 5)			
Relação entre altura e diâmetro dos provetes: L/D=1			
Número total de provetes ensaiados: 12			
Provete	Área da secção transversal do provete (mm²)	Carga máxima de compressão atingida (kN)	RCU (MPa)
1	2042	160	78
2	2040	162	80
3	2020	138	68
4	2035	179	88
5	2038	135	66
7	2040	236	116
8	2037	228	112
9	2042	309	151
10	2041	333	163
11	2042	336	165
13	2041	324	159
15	2039	226	111
Valor máximo	-	-	165
Valor mínimo	-	-	66
Desvio padrão	-	-	38
Valor médio	-	-	113
Coef. variação (%)	-	-	34

Quadro 27 – Valores da resistência à compressão uniaxial simples resultantes do ensaio à amostra n.º 6.

Rocha: Tufo (amostra n.º 6)			
Relação entre altura e diâmetro dos provetes: L/D=1			
Número total de provetes ensaiados: 12			
Provete	Área da secção transversal do provete (mm²)	Carga máxima de compressão atingida (kN)	RCU (MPa)
11	3759	129	34
12	3760	139	37
13	3754	113	30
14	3762	125	33
15	3765	127	34
16	3756	131	35
17	3759	126	34
18	3759	129	34
19	3757	128	34
20	3735	83	22
21	3722	98	26
22	3735	84	22
Valor máximo	-	-	37
Valor mínimo	-	-	22
Desvio padrão	-	-	5
Valor médio	-	-	31
Coef. variação (%)	-	-	16

Quadro 28 – Valores da resistência à compressão uniaxial simples resultantes do ensaio à amostra n.º 7.

Rocha: Basalto (amostra n.º 7)					
Relação entre altura e diâmetro dos provetes: L/D=1					
Número total de provetes ensaiados: 17					
Estado	Provete	Área da secção transversal do provete (mm²)	Carga máxima de compressão atingida (kN)	RCU (MPa)	
Poroso	7	4000	388	97	
	11	3999	410	102	
	13	3949	434	110	
	15	3949	554	140	
	18	3943	614	156	
	20	4001	444	111	
	21	3964	319	80	
	22	3985	405	102	
		Valor máximo			156
		Valor mínimo			80
		Desvio padrão			24
	Valor médio			112	
	Coef. variação (%)			22	
Compacto	3	4008	762	190	
	5	3957	702	177	
	10	4008	1017	254	
	12	4000	584	146	
	14	4000	839	210	
	17	3984	603	151	
	27	3994	762	250	
	28	3964	702	269	
	29	4056	925	228	
		Valor máximo			269
		Valor mínimo			146
	Desvio padrão			45	
	Valor médio			208	
	Coef. variação (%)			22	

3.2.3. Determinação do módulo de deformabilidade

A determinação deste parâmetro foi efectuada sob exigências de procedimento descritas no documento normativo ASTM D 7012 – 04, «*Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*», cujo procedimento de compressão uniaxial simples difere um pouco dos procedimentos descritos na norma utilizada em 3.2.2.

Neste caso, os provetes possuíam dimensões cilíndricas diferentes das dimensões dos provetes do ensaio anterior (3.2.2.), pois a sua altura era duas vezes o respectivo diâmetro ($L \approx 2D$).



Figura 62 – Alguns provetes de mugearito com relação $L/D=2$.

Foram também efectuadas algumas adaptações de modo a criar condições para a determinação do módulo de deformabilidade (ou módulo de elasticidade ou módulo de *Young*) das amostras de rochas presentes neste trabalho, adaptações que não influenciaram o ensaio no que diz respeito aos resultados da resistência à compressão uniaxial.

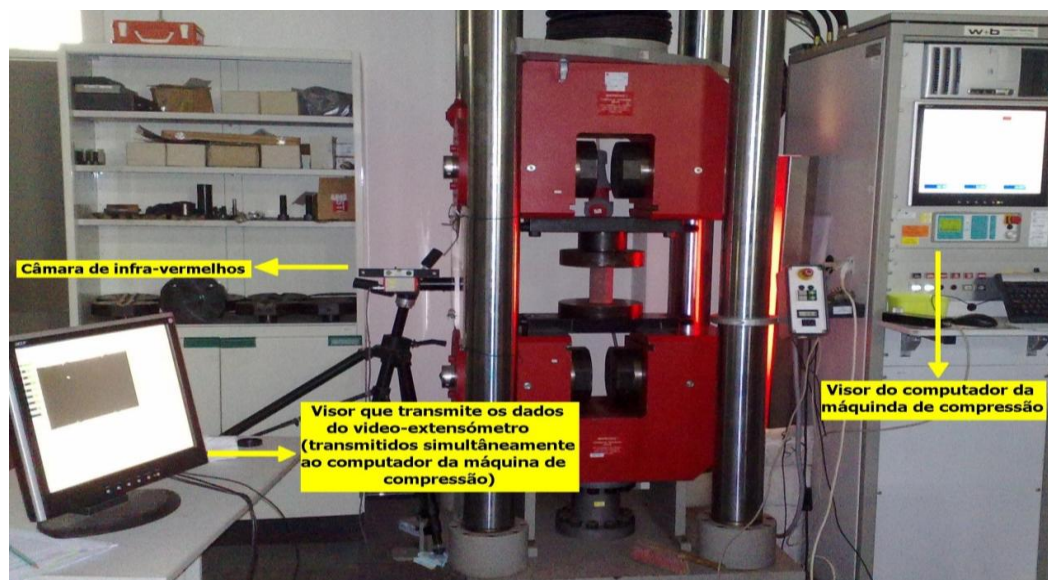


Figura 63 – Ilustração descritiva do aparato montado para auxílio da determinação do módulo de deformabilidade.

O aparato da Figura 63 baseia-se no acoplamento à máquina de compressão de um vídeo-extensómetro (auxiliado por uma câmara de infravermelhos) de modo a poder registar deslocamentos no provete durante a actuação da carga de compressão. Para poder efectuar essa medição, colocaram-se pequenos pregos colados na face lateral da amostra cilíndrica (em ambos os lados, conforme se pode ver na Figura 62), de modo a que o vídeo-extensómetro pudesse registar quaisquer deformações longitudinais que ocorressem no provete. Esse pequeno engenho permite também monitorizar o comportamento das faces

laterais do provete, dado que este podia sofrer ligeiras deformações em relação ao seu eixo vertical devido à possibilidade de existirem pequenas imperfeições geométricas do cilindro e/ou a imperfeições naturais da própria rocha (fissuras, poros, pequenas descontinuidades). Note-se que tais deformações também podem surgir sob a forma de fracturas localizadas na superfície lateral do provete, que podem ser a causa, por vezes, de pequenas alterações de leitura do vídeo-extensómetro.

Refira-se que, segundo LADEIRA (1986), a deformação de provetes rochosos submetidos à compressão uniaxial simples é influenciada pela conjugação de diversos factores, nomeadamente a velocidade de carregamento axial, a temperatura e grau de humidade, a composição mineralógica e a quantidade de vazios e descontinuidades na estrutura da rocha amostrada.

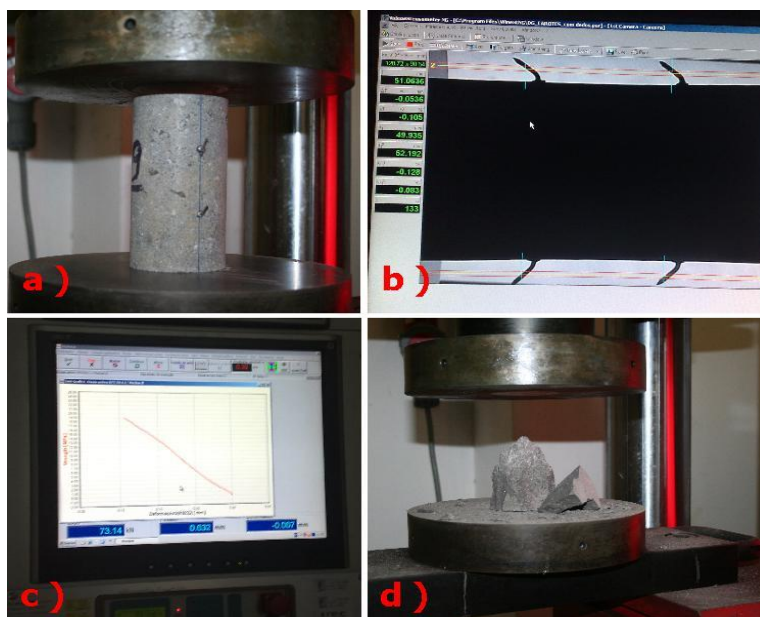


Figura 64 – a) Provede de basalto no início do ensaio à RCU; b) monitorização dos deslocamentos no provede através do vídeo-extensómetro; c) software da máquina de compressão relacionando a carga aplicada com os deslocamentos transmitidos pelo vídeo-extensómetro; d) provede de basalto destruído após atingir carga de rotura.

Sucintamente, o valor do módulo de deformabilidade, correspondente a cada provede, foi determinado a partir de um trecho rectilíneo da respectiva curva da relação tensão – extensão, correspondentes a um intervalo específico de tensão aplicada. Procurou-se utilizar um mesmo intervalo de tensão para cada amostra ensaiada, que representasse uma linearidade no que toca à relação de parâmetros e , por consequência, um módulo de deformabilidade constante. Desse modo, utilizou-se um intervalo de tensões de 20 a 60 MPa para a amostra n.º 5 (mugarito), um intervalo de tensões de 5 a 15 MPa para a amostra n.º 6 (tufo) e um intervalo de tensões também de 20 a 60 MPa para a amostra n.º 7 (basalto).

Nos casos em que não foi possível estabelecer os referidos intervalos na curva tensão – extensão, devido ao facto de a carga de rotura ter-se situado dentro do intervalo previamente estabelecido, procurou-se utilizar um intervalo igual, ou aproximado, em um trecho da curva também linear, na medida do possível.

De modo a obter um módulo de deformabilidade associado a todo o trecho linear da curva, e não apenas pelo valor inicial e final de tensão do intervalo, obteve-se uma linha de tendência para cada trecho, determinando assim o módulo de deformabilidade a partir do respectivo declive da recta.

Passam-se a apresentar, nos quadros seguintes, os resultados dos ensaios à RCU para obtenção dos módulos de deformabilidade das rochas amostradas, sendo que as curvas da relação tensão – extensão obtidas para cada provede rochoso estão apresentadas nos Anexos IV, V, VI e VII deste trabalho.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Quadro 29 – Resultados do ensaio para determinação do módulo de deformabilidade da amostra n.º 5.

Rocha: Mugearito (amostra n.º 5)		
Relação entre altura e diâmetro dos provetes: L/D=2		
Número total de provetes ensaiados: 10		
Provete	Tensão de rotura do provete (MPa)	Módulo de deformabilidade (GPa)
18	81	8
19	99	12
20	100	9
21	47	4
22	98	12
23	103	10
24	72	7
25	40	7
26	43	5
27	110	11
Valor máximo	110	12
Valor mínimo	40	4
Desvio Padrão	27	3
Valor médio	79	8
Coef. variação (%)	34	33

Devido à amostra n.º 5 (mugearito) ter revelado valores de RCU altos quando comparados com os valores obtidos para o tufo da amostra n.º 6, e por se aproximarem dos valores obtidos para o basalto poroso da amostra n.º 7, era espectável que os módulos de deformabilidade dos provetes de mugearito resultassem relativamente maiores do que os obtidos.

Quadro 30 – Resultados do ensaio para determinação do módulo de deformabilidade da amostra n.º 6.

Rocha: Tufo (amostra n.º 6)		
Relação entre altura e diâmetro dos provetes: L/D=2		
Número total de provetes ensaiados: 10		
Provete	Tensão de rotura do provete (MPa)	Módulo de deformabilidade (GPa)
2	22	7
3	22	7
4	23	7
5	24	8
6	18	6
7	22	7
8	23	7
9	24	8
10	12	2
Valor máximo	24	8
Valor mínimo	18	6
Desvio padrão	2	0,4
Valor médio	22	7
Coef. variação (%)	9	6

No quadro anterior, o valor do módulo de deformabilidade do provete n.º 10 foi assumido como anómalo, quando comparado com os restantes. Deste modo, não se considera o resultado do provete n.º 10 para a obtenção do valor médio de módulo de deformabilidade nem para o valor médio da RCU.

Quadro 31 – Resultados do ensaio para determinação do módulo de deformabilidade da amostra n.º 7.

Rocha: Basalto (amostra n.º 7)			
Relação entre altura e diâmetro dos provetes: L/D=2			
Número total de provetes ensaiados: 10			
Estado	Provete	Tensão de rotura do provete (MPa)	Módulo de deformabilidade (GPa)
Poroso	1	130	30
	2	91	31
	6	58	29
	16	76	38
	19	132	161
	Valor máximo	132	38
	Valor mínimo	58	29
	Desvio padrão	33	4
	Valor médio	97	32
	Coef. variação (%)	34	12
Compacto	4	101	28
	8	176	48
	9	183	41
	23	210	51
	24	246	46
	Valor máximo	246	51
	Valor mínimo	101	28
	Desvio padrão	54	9
	Valor médio	183	43
	Coef. variação (%)	29	21

Como se pode constatar no quadro anterior, o valor obtido para o módulo de deformabilidade do provete n.º 19 é muito superior quando comparado com os restantes. A causa de se ter obtido esse valor pode estar associada com a possibilidade de ter havido um erro de leitura do aparato montado em laboratório. Esse valor não foi considerado para calcular o valor médio de módulo de deformabilidade para os provetes de basalto poroso.

3.2.4. Determinação da dureza de ressalto através do martelo de SCHMIDT

Também conhecido como Ensaio Esclerométrico, este teste necessita da utilização de um esclerómetro que, neste caso, foi um aparelho calibrado denominado de “martelo de Schmidt”. Para este trabalho, foi facultado pelo LREC um martelo de Schmidt da marca *Proceq* e modelo *N*. Trata-se de um aparelho que liberta repentinamente um êmbolo contra uma superfície, permitindo que se efectue a leitura da altura do ressalto da massa, sendo esta considerada como a medida de dureza do material ensaiado. Este aparelho é portátil e relativamente pequeno, o que permite que o ensaio possa ser realizado quer no campo, directamente no maciço rochoso, quer em amostras representativas da rocha a ser estudada (carotes cilíndricos, cubos ou blocos de rocha).



Figura 65 – Martelo de Schmidt *Proceq N*, utilizado para a determinação da dureza de ressalto

O procedimento efectuado para a realização deste ensaio foi o sugerido pela ISRM (1978) para a determinação da dureza de ressalto através do martelo de Schmidt, de nome «*SM for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks – 1978, Part 3- SM for Determination of the Schmidt Rebound Hardness*».

Segundo documento supracitado, determina-se a dureza de ressalto das amostras rochosas com pelo menos 20 impactos do martelo de Schmidt, em uma área suficientemente plana e lisa do provete rochoso para que os valores da sua dureza sejam minimamente credíveis em relação ao tipo de rocha em estudo. Dos 20 impactos efectuados para cada ensaio, utilizam-se os 10 maiores valores obtidos para obter o valor médio de dureza de ressalto.

Parte dos provetes rochosos utilizados neste trabalho e só para este ensaio (de modo a representarem a rocha a ser estudada), nomeadamente as amostras n.º 5 e 6, são blocos de rocha com comprimento de aresta maior que 6 cm e um volume prismático suficiente para que se efectue as pancadas numa área do provete com pelo menos 6 cm de profundidade e, presumivelmente, livre de fissuras.

A amostra n.º 7, referente ao basalto, foi ensaiada sob o formato de carotes cilíndricas com diâmetro de 70 mm, aproximadamente.

Houve o cuidado que os provetes, no momento dos ensaios, estivessem bem apoiados de modo a que não sofressem vibrações ou movimentos durante a realização dos impactos.



Figura 66 – Momento do ensaio esclerométrico a um bloco de mugearito.

De seguida apresentam-se os resultados do ensaio esclerométrico, nomeadamente os valores médios da dureza de ressalto obtidos para todas as amostras de rochas e os valores correspondentes à resistência

à compressão, obtidos através dos ábacos disponíveis para o efeito no manual de instruções do martelo de Schmidt. Estão disponíveis para consulta, no anexo deste trabalho, várias figuras dos dois ábacos utilizados após este ensaio, sendo que um é destinado a provetes cúbicos (ou blocos) de rocha e outro a provetes cilíndricos.

Os valores da resistência à compressão obtidos pelos ábacos, apresentados nos quadros seguintes, são considerados como valores estimados prováveis [PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].

Quadro 32 – Resistências à compressão das amostras de mugearito e de tufo, deduzidas através das respectivas durezas de ressaltos de Schmidt.

Amostra	Tipo de rocha	N.º de ensaios	Valor médio absoluto da dureza de Schmidt	Resistência à compressão provável (kg/cm²)	Resistência à compressão provável (MPa)
5	Mugearito	5	44	570	57
6	Tufo	4	28	280	28

Quadro 33 - Resistência à compressão da amostra de basalto, deduzida através da respectiva dureza de ressalto de Schmidt.

Amostra	Tipo de rocha	N.º de ensaios	Valor médio absoluto da dureza de Schmidt (dos 10 maiores valores)	Resistência à compressão provável (N/mm²)	Resistência à compressão provável (MPa)
7	Basalto	29	42	42	42

No que toca ao ensaio esclerométrico realizado aos carotes de basalto (amostra n.º 7), é de referir que o resultado obtido para RCU provável, de 42 MPa, suscita dúvidas quanto à sua validade, pois difere substancialmente dos valores obtidos nos ensaios laboratoriais à RCU, apresentados em 3.2.2. A respectiva análise/discussão destes resultados está descrita no capítulo da análise de resultados, nomeadamente no subcapítulo 4.3.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

4.1. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA BÁSICA – BGD

Segundo LIMA & MENEZES (2008), no ponto de vista da Geologia de Engenharia, aquando de construções que assentam essencialmente em ambiente geológico, é comum e aconselhável que a fase inicial do projecto seja acompanhada de classificações geológicas e geotécnicas do terreno em estudo, pois poderá alertar para a possibilidade de uma gama de problemas comuns em obras de construção civil, cuja importância não pode/deve ser descartada.

No entanto, uma classificação baseada apenas na litologia é definitivamente insuficiente para o projectista da obra, pois o conhecimento de qual o tipo de material geológico encontrado não fornece todas as informações necessárias para o projecto de uma obra geotécnica. O estudo das descontinuidades de um maciço, por si só, também se torna incoerente à avaliação geológica necessária a um projecto geotécnico que, devido à possibilidade de vicissitudes de avaliação do estudo pelos demais projectistas, pode originar uma certa confusão quanto às características geotécnicas do maciço em estudo.

Pretendendo simplificar a classificação de um maciço rochoso, a ISRM (1981) elaborou um conjunto de designações específicas que classifiquem a qualidade das estruturas rochosas de modo a que seja unânime a sua avaliação por parte dos técnicos interessados, reduzindo substancialmente a possibilidade de existir mais que uma classificação para um mesmo maciço rochoso, devido a factores de opinião técnica.

A descrição referida, também conhecida por BGD (*“Basic Geotechnical Description”*), resume-se a uma classificação geológico-geotécnica e não descarta a classificação litológica e o estudo de descontinuidades, mas utiliza esses estudos como fonte de auxílio, visto que a sua elaboração é fundada pelo estado de alteração do maciço em estudo, pelo grau de fracturação e espessura das camadas rochosas, pela resistência à compressão uniaxial simples e pela avaliação do ângulo de atrito das descontinuidades [COSTA (2006); LIMA & MENEZES (2008)].

Para a avaliação da alteração de um maciço geológico e respectiva qualidade, é comum apoiar-se na percentagem de recuperação¹⁴ das peças caroteadas obtidas por sondagens de prospecção, caso estas tenham sido efectuadas e registadas. Segundo LIMA & MENEZES (2008), quanto maior a percentagem de recuperação, menor é o seu estado de alteração. É claro que esse parâmetro acaba sempre por ser influenciado pelas fracturas do maciço, sendo que daí também se pode tirar algumas ilações acerca do estado de fracturação do maciço.

Para este trabalho, embora tenham sido efectuadas sondagens a um dos maciços rochosos estudados, não houve registo dos comprimentos dos tarolos obtidos por parte da equipa técnica a cargo da prospecção, impossibilitando o cálculo da percentagem de recuperação e de outros parâmetros que poderiam ser úteis para uma melhor e mais completa classificação geológica e geotécnica dos maciços geológicos e respectivos materiais aqui estudados. Quanto à classificação do ângulo de atrito das

¹⁴ Percentagem de recuperação – Graças à realização de sondagens, isto é, de operações de perfuração em um maciço geológico, a percentagem de recuperação calcula-se, segundo LIMA & MENEZES (2008), dividindo o somatório dos comprimentos de todos os tarolos conseguidos numa manobra pelo comprimento total do trecho furado nessa mesma manobra e, de seguida, multiplicando razão obtida por 100.

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

descontinuidades, não foi possível obter registo de informação que possibilitasse a obtenção desse parâmetro.

Esta classificação, embora incompleta, não deixa de ser um auxílio importante para análises de caracterizações geológicas e geotécnicas. Utilizando a proposta da ISRM (1980), e de acordo com os dados obtidos para este trabalho, a BGD efectuada neste trabalho é baseada nos seguintes parâmetros e designações:

▪ Estado de alteração do maciço rochoso

A avaliação deste parâmetro e consequente atribuição de designação é assente em métodos expeditos de observação. A classificação do estado de alteração de maciços rochosos pode ter particular importância, por exemplo, para avaliar a facilidade de desmonte/quebra do material e quais os equipamentos adequados, ou mesmo para obter um estado de conhecimento de um talude sobranceiro a uma estrada e possibilidade de queda de material [LIMA & MENEZES (2008)].

O quadro seguinte classifica o estado de alteração de um maciço rochoso, de acordo com 5 graus.

Quadro 34 – Graus de alteração dos maciços rochosos [Fonte: adaptado de COSTA (2006) e LIMA & MENEZES (2008)].

SÍMBOLO	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO DO ESTADO DE ALTERAÇÃO
W1	SÃO	Rocha sem quaisquer sinais de alteração
W2	POUCO ALTERADO	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W3	MEDIANAMENTE ALTERADO	Alteração visível em todo o maciço rochoso (mudança de cor) mas a rocha não é friável
W4	MUITO ALTERADO	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável
W5	DECOMPOSTO	O maciço apresenta-se completamente friável com comportamento de solo

▪ Grau de fracturação do maciço rochoso

O método mais comum de avaliação deste parâmetro é essencialmente baseado no espaçamento entre descontinuidades do maciço em estudo, sendo feita para todas as famílias de descontinuidades existentes.

A ISRM (1980) sugere as classes e respectivas designações para a avaliação da fracturação descritas no quadro seguinte:

Quadro 35 – Graus de fracturação de maciços rochosos [Fonte: adaptado de COSTA (2006) e LIMA & MENEZES (2008)].

SÍMBOLO	INTERVALO ENTRE FRACTURAS (cm)	DESIGNAÇÃO (em relação ao intervalo entre cada fractura)	ESTADO DE FRACTURAÇÃO DO MACIÇO
F1	> 200	Muito afastadas	Muito pouco fracturado
F2	60 - 200	Afastadas	Pouco fracturado
F3	20 - 60	Medianamente afastadas	Medianamente fracturado
F4	6 - 20	Próximas	Muito fracturado
F5	< 6	Muito próximas	Fragmentado

- **Espessura das camadas do maciço rochoso**

Para quantificar este parâmetro, é necessário avaliar, se possível, o afloramento ou o maciço rochoso de modo a se perceber a espessura das camadas que o compõem. Resumidamente, camadas representam a espessura da escoada lávica, do episódio sedimentar ou do episódio vulcânico que formou uma estrutura consolidada no seu ponto de vista individual (exemplo: camada de tufo de piroclastos de queda).

Quadro 36 – Espessura das camadas rochosas [Fonte: adaptado de ISRM (1981), por LIMA & MENEZES (2008)].

SÍMBOLO	ESPESSURA DA CAMADA (cm)	DESIGNAÇÃO DAS CAMADAS
L1	> 200	Muito espessas
L2	60 - 200	Espessas
L3	20 - 60	Medianamente espessas
L4	6 - 20	Delgadas
L5	< 6	Muito delgadas

- **Resistência à compressão uniaxial simples**

A partir dos resultados obtidos de ensaios de caracterização geotécnica, nomeadamente os ensaios à RCU simples, contribui-se para a avaliação da qualidade do material rocha que compõe o maciço em questão, utilizando o contido no quadro seguinte:

Quadro 37 – Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta [Fonte: adaptado de LIMA & MENEZES (2008)].

SÍMBOLO	RCU* (MPa)	DESIGNAÇÃO DA RCU*
S1	> 200	Muito elevada
S2	60 - 200	Elevada
S3	20 - 60	Média
S4	6 - 20	Baixa
S5	< 6	Muito baixa

*RCU – Resistência à compressão uniaxial simples.

Em suma, as BGD efectuadas neste trabalho estão descritas por «(nome da rocha), W#, F#, L#, S#», para todas as famílias de descontinuidades.

Assim, e de acordo com as caracterizações geológicas e geotécnicas efectuadas aos maciços e respectivos materiais geológicos que os constituem, elaboraram-se descrições geotécnicas básicas na medida do possível, visto que as BGD são análises de dados utilizadas apenas para o caso de maciços rochosos, sendo que os maciços terrosos não podem ser incluídos nas BGD.

No caso do maciço terroso estudado neste trabalho, que deu origem às amostras de solo n.ºs 2, 3 e 4, não foi efectuada a BGD por não se tratar de um maciço rochoso.

Quadro 38 – Quadro resumo da descrição geotécnica básica (BGD) para os maciços rochosos estudados.

Amostra	Localização do maciço rochoso originário	Família de descontinuidades	BGD
1	Fajã de Milho, Porto da Cruz	F1-a	Rocha vulcânica, W4-5, F4-5, L1, S5
		F1-b	Rocha vulcânica, W4-5, F2-3, L1, S5
5	Serrado, Porto da Cruz	F5-a	Mugarito, W3 , F5, L1, S2-3
		F5-b	Mugarito, W3 , F2-3, L1, S2-3
		F5-c	Mugarito, W3 , F2, L1, S2-3
6	Ameixieira, Ribeira Brava	-	Tufo, W1-2, F1, L1, S3-4
7	Fajã do Cerejo, Ribeira Brava	F7-a	Basalto, W1, F2, L1, S1-2
		F7-b	Basalto, W1, F1-2, L1, S1-2

4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS AMOSTRADOS

Como forma de analisar os resultados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho, nomeadamente ao material terroso amostrado, optou-se por efectuar duas classificações geotécnicas de carácter útil. Desse modo, contribui-se para uma melhor caracterização dos solos vulcânicos da ilha da Madeira estudados, tornando este trabalho, no mínimo, útil, aos propósitos da engenharia civil.

Neste subcapítulo, como já referido, efectuam-se duas classificações dos solos amostrados, nomeadamente a classificação de solos para fins rodoviários e a classificação de solos para fins de engenharia. A primeira é elaborada de acordo com a especificação do LNEC E 240 – 1971 «SOLOS – Classificação para fins rodoviários» e a segunda de acordo com o documento normativo ASTM D 2487 – 00 «Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)».

4.2.1. Classificação para fins rodoviários (LNEC E 240 – 1971)

De acordo com a especificação LNEC E 240 – 1971, esta classificação tem como principal objectivo utilizar os resultados de alguns dos ensaios de determinação realizados aos solos amostrados de modo a colocá-los em um determinado grupo que os caracterize no âmbito do seu comportamento em estradas.

Os dados utilizados para esta classificação são provenientes dos resultados dos ensaios para a análise granulométrica e dos ensaios para a determinação dos limites de consistência (*Limites de Atterberg*). Note-se que os valores dos limites de consistência utilizados para esta classificação foram os valores respeitantes aos provetes secos ao ar.

No Quadro 39, apresentam-se os Índices de Grupo dos provetes de cada amostra e respectivos Índices de Plasticidade calculados, sendo este último parâmetro a diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade de cada provete. Os Índices de Grupo são necessários para posterior elaboração da descrição classificativa, conforme dita a especificação normativa.

Quadro 39 – Parâmetros necessários para efectuar a classificação para fins rodoviários.

Amostra	Proвете	IP	IG	LL*	IP*	IG*
1	A	13	5	63	14	6
	C	15	6			
2	A	NP	0	60	NP	0
	C	NP	0			
3	A	15	1	53	15	1
	C	15	1			
4	A	27	19	63	27	19
	C	28	19			

* LL - média dos limites de liquidez dos provetes de cada amostra; IP – média dos índices de plasticidade dos provetes de cada amostra; IG – média dos índices de grupo dos provetes de cada amostra. Todos estes três parâmetros referem-se aos valores dos provetes secos ao ar.

Os parâmetros apresentados no quadro acima, juntamente com os dados resultantes dos ensaios de análise granulométrica e de determinação dos limites de consistência das amostras (presentes em 3.1.3., 3.1.6. e 3.1.7.), permitem que seja elaborada a classificação para fins rodoviários, sempre de acordo com os procedimentos descritos na especificação LNEC E 240 – 1971.

No quadro seguinte, apresentam-se os grupos que classificam cada amostra de solo e respectiva descrição do comportamento que teriam em uma camada sob um suposto pavimento.

Quadro 40 – Classificação para fins rodoviários, segundo LNEC E 240 – 1971.

Amostra	Grupo classificativo	Descrição do comportamento do solo para fins rodoviários
1	A-7-5 (5)	Muito mau
2	A-1-B (0)	Próximo de excelente
3	A-2-7 (1)	Regular
4	A-7-5 (5)	Muito mau

4.2.2. Classificação unificada (ASTM D 2487 – 00)

Esta classificação, traduzida como Sistema Unificado de Classificação de Solos, também tem como principal objectivo agrupar os solos em função dos resultados dos ensaios de análise granulométrica e de determinação dos limites de consistência. Concluída a análise classificativa, a cada tipo de solo amostrado deverá ser indicado um grupo que o caracterize no âmbito do seu comportamento para fins de engenharia.

No Quadro 41 apresentam-se os dados retirados das análises granulométricas efectuadas aos solos amostrados, que em conjunto com os dados dos limites de consistência das mesmas amostras (presentes em 3.1.6. e 3.1.7.), formam o conjunto de informação necessária para seguir os procedimentos de classificação exigidos pela ASTM D 2487 – 00.

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

Quadro 41 – Fracções de material retido e passado (acumulados) nos peneiros n.º 4 e n.º 200.

Amostra	Provete	Material retido no peneiro n.º 4 (%)	Material passado no peneiro n.º 4 (%)	Material retido no peneiro n.º 200 (%)	Material passado no peneiro n.º 200 (%)
1	A	0,0	100,0	50,5	49,5
	B	0,0	100,0	51,5	48,5
2	A	22,7	77,3	63,4	25,1
	B	22,5	77,5	69,4	21,1
3	A	1,8	98,2	63,6	34,5
	B	1,9	98,1	66,2	31,8
4	A	0,0	100,0	8,3	91,7
	B	0,0	100,0	4,2	95,8

No Quadro 42 apresentam-se os grupos classificativos e respectivas descrições a que cada amostra de solo corresponde.

Quadro 42 – Classificação para fins de engenharia, segundo ASTM D 2487 – 00.

Amostra	Símbolo do grupo	Descrição do grupo
1	SM	Areia siltosa
2	SM	Areia siltosa com seixo
3	SM	Areia siltosa
4	MH	Silte elástico

4.3. CONFRONTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM DADOS DE OUTRAS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pretende-se com este subcapítulo fazer uma análise dos resultados obtidos na caracterização geotécnica, levada a cabo neste trabalho, de modo a que se possa tirar algumas ilações acerca das propriedades geotécnicas do material geológico estudado.

Pretende-se também efectuar uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e os resultados, provenientes de outras referências bibliográficas, de materiais que sejam considerados como, no mínimo, semelhantes ou dignos de comparação. Para tal, foi feita uma selecção bibliográfica de modo a encontrar, na medida do possível, o maior número de trabalhos que contivessem os parâmetros necessários para efectuar uma confrontação quantitativa. Todas as referências bibliográficas encontradas que apresentam resultados úteis de caracterizações geotécnicas a material geológico (solos e rochas, na medida do possível) semelhante ao material estudado nesta dissertação foram tidas em conta para a respectiva confrontação de resultados experimentais.

4.3.1. Propriedades geotécnicas das amostras de solo

A partir das análises granulométricas efectuadas neste trabalho para o solo vulcânico do Porto da Cruz (amostra n.º 1), decidiu-se efectuar uma confrontação das respectivas curvas granulométricas com os resultados de análises granulométricas levadas a cabo por outros autores, nomeadamente PERNETA (2011) e JESUS (2011), também para amostras de solos de origem vulcânica.

Na Figura 67 apresenta-se uma confrontação de resultados entre dois solos de origem vulcânica, oriundos da ilha da Madeira, pertencentes à mesma unidade vulcano-estratigráfica. Ambos os solos pertencem à unidade do Porto da Cruz, Complexo Vulcânico Inferior (CVI 1), sendo que um compõe a

amostra n.º 1 recolhida no sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz, e outro corresponde a uma amostragem de solo realizada no concelho de S. Vicente, estudada por PERNETA (2011), havendo a particularidade de ambas as amostras serem consideradas como solos devido ao facto de se tratar de material vulcânico rochoso extremamente alterado e friável.

Na Figura 68 pretende-se efectuar, do mesmo modo, uma confrontação entre dois solos de origem vulcânica, também oriundos da ilha da Madeira, mas não pertencentes à mesma vulcano-estratigrafia. Apresenta-se assim as curvas granulométricas da amostra n.º 1, confrontando-a com uma amostra terrosa oriunda do sítio do Chão da Loba, Funchal, estudada por JESUS (2011). Trata-se de uma amostragem de um depósito freato-magmático de queda, o qual apresenta características que tendem na fronteira entre se considerar como um material rochoso e um material terroso. Por isso, achou-se interessante comparar as curvas granulométricas, apresentadas por JESUS (2011), com as curvas granulométricas da amostra n.º 1 estudada neste trabalho.

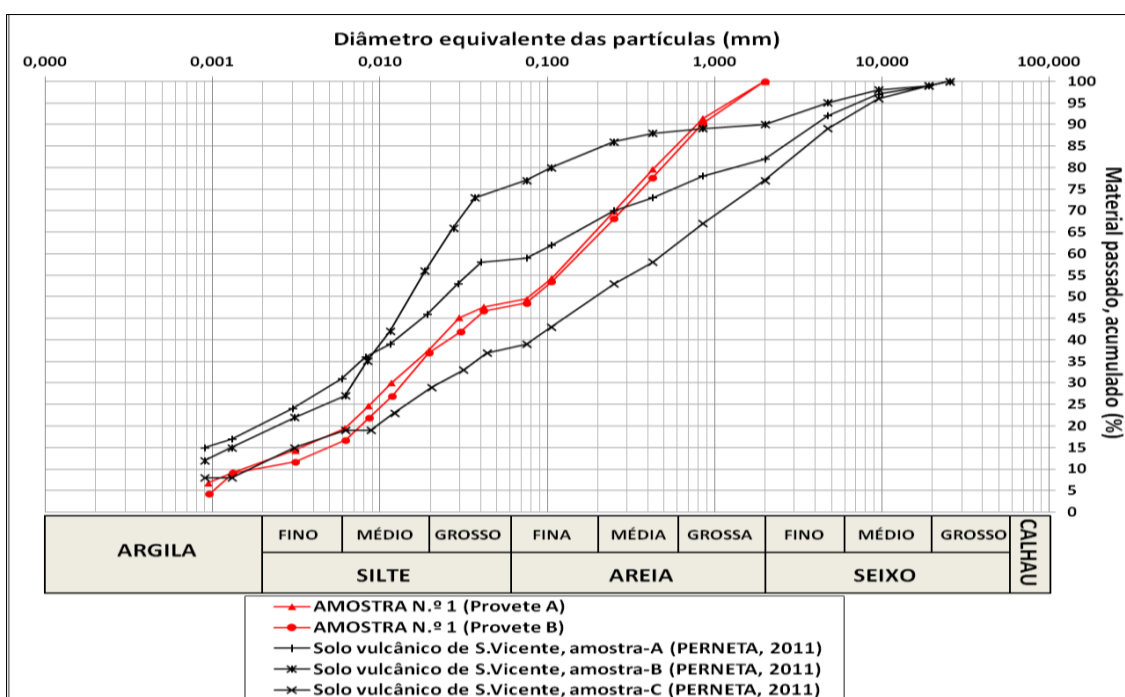


Figura 67 – Comparação entre as curvas granulométricas do solo da amostra n.º 1 e as curvas granulométricas de um solo de origem vulcânica apresentado por PERNETA (2011).

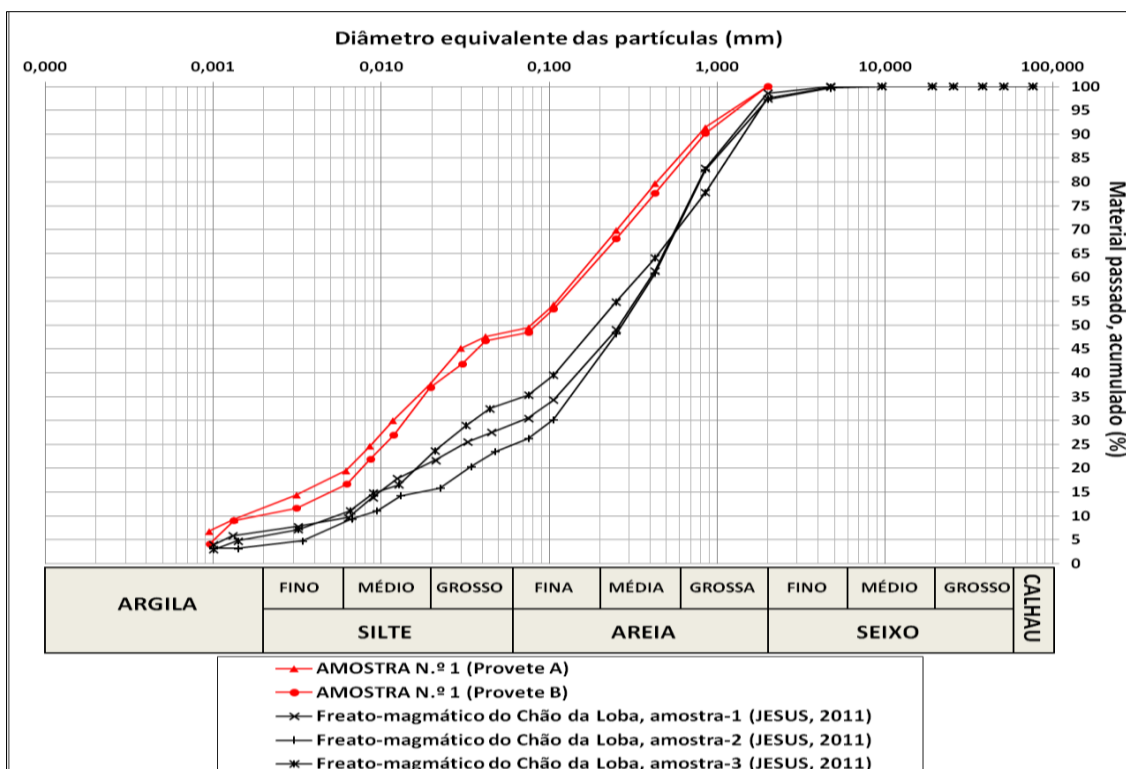


Figura 68 - Comparação entre as curvas granulométricas do solo da amostra n.º 1 e as curvas granulométricas de um solo de origem vulcânica apresentado por JESUS (2011).

Analisando a comparação das curvas granulométricas da Figura 67, constata-se que existe uma dispersão considerável nos valores apresentados por PERNETA (2011), pois embora a amostragem tenha sido efectuada ao mesmo solo, foram obtidas 3 amostras desse mesmo solo. No entanto, na curva granulométrica da amostra-A, apresentada por PERNETA (2011), existe uma próxima semelhança entre as curvas granulométricas da amostra n.º 1 deste trabalho, embora com menos percentagem de partículas siltosas e mais percentagem de partículas arenosas e seixos.

Quanto à Figura 68, as curvas granulométricas do solo apresentado por JESUS (2011), dividido em três provetes, são mais semelhantes entre si, sendo que também se aproximam ao solo do Porto da Cruz da amostra n.º 1 deste trabalho, embora com menor percentagem de partículas argilosas e siltosas, tendendo para um solo mais arenoso.

Também com o intuito de comparar propriedades geotécnicas de solos, com dados de outras referências bibliográficas, efectuou-se uma confrontação entre resultados de limites de consistência de solos considerados como semelhantes do ponto de vista da sua formação. Para tal, procurou-se comparar os três tipos de solos sedimentares das amostras n.ºs 2, 3 e 4, oriundos da freguesia do Porto da Cruz, com solos considerados como vulcânicos, mas também de origem sedimentar (originados por enxurradas, aluviões), apresentados por GONZALEZ DE VALLEJO *et. al.* (2007) e oriundos da ilha de Tenerife (Canárias). Para tal, o Quadro 43 apresenta os parâmetros geotécnicos supracitados dos solos em questão.

Quadro 43 – Comparação de parâmetros geotécnicos dos solos das amostras n.os 2, 3 e 4 e dos solos vulcânicos sedimentares apresentados por GONZALEZ DE VALLEJO *et. al.* (2007).

	LL*	LP*	IP*	W*
	(%)	(%)		(%)
Amostra-2 SOLO SEDIMENTAR GROSSEIRO	54 a 60	NP*	NP*	8 a 63
Amostra-3 SOLO SEDIMENTAR INTERMÉDIO	48 a 53	35 a 38	13 a 15	7 a 58
Amostra-4 SOLO SEDIMENTAR FINO	57 a 63	33 a 36	24 a 28	10 a 65
Solos vulcânicos sedimentares de Tenerife	35 a 90	25 a 45	12 a 25	18 e 43

* LL – Limite de liquidez; LP – Limite de plasticidade; IP – Índice de plasticidade; W – Teor em água; NP - solo considerado como «não plástico».

Pode-se constatar do quadro acima que, no que toca aos limites de consistência, o solo vulcânico sedimentar de Tenerife apresenta gamas mais alargadas, sendo que os limites de liquidez dos solos das amostras n.ºs 2, 3 e 4 enquadram-se dentro da gama do solo apresentado por GONZALEZ DE VALLEJO *et. al.* (2007), podendo-se dizer o mesmo para os limites de plasticidade, com excepção da amostra n.º 2 que é considerada como solo «não plástico» e, logo, não é relacionável com os limites de plasticidade do solo de Tenerife.

Já quanto à comparação dos teores em água dos solos, embora seja uma comparação com pouco sentido, visto que o teor em água de um solo é um parâmetro muito relativo e sujeito a grandes variabilidades devido às condições hidrológicas do momento em que se recolhe as amostras, optou-se por incluir a informação disponível. Pode-se, no entanto, constatar que o solo sedimentar de Tenerife apresenta uma gama de teor em água menos alargada que as gamas correspondentes às amostras n.ºs 2, 3 e 4.

4.3.2. Peso volúmico seco das amostras rochosas

Na Figura 69, passa-se a apresentar graficamente os resultados do peso volúmico seco, determinado em laboratório, das amostras rochosas estudadas neste trabalho.

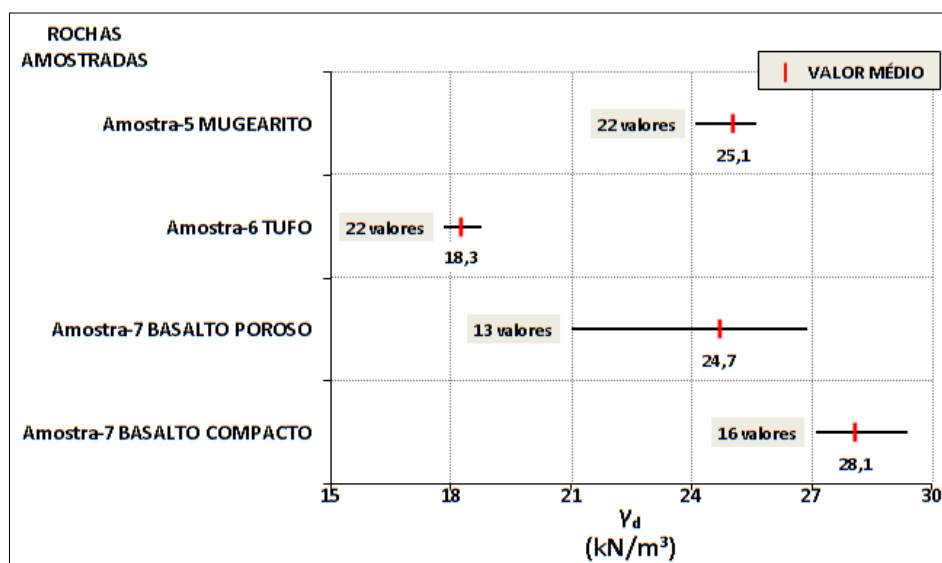


Figura 69 – Valores médios, mínimos e máximos do peso volúmico seco das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

Pode-se notar claramente que as rochas mugearíticas e as basálticas possuem maiores pesos volúmicos quando comparadas com os tufos piroclásticos de queda. Note-se também que o valor médio do basalto poroso da amostra n.º 7 é inferior ao valor médio do mugearito, o que pode significar uma considerável quantidade de vazios naquela rocha basáltica. O mesmo não se pode associar ao basalto compacto da amostra n.º 7, suspeitando-se de um menor volume de vazios nas amostras rochosas, visto que o seu valor mínimo de peso volúmico até é superior ao valor máximo do basalto poroso.

Na Figura 70 apresentam-se os resultados do peso volúmico seco de várias rochas piroclásticas de outras referências bibliográficas, juntamente com os resultados da amostra n.º 6 (tufo). Na mesma figura está também representada uma amostra de um depósito vulcânico submarino, nomeadamente um depósito freato-magmático fino de queda, originário da ilha da Madeira (sítio do Chão da Lomba), apresentado por JESUS (2011). Quanto às restantes rochas representadas, tem-se pesos volúmicos do arquipélago das Canárias, nomeadamente um conjunto de 57 amostras de ignimbritos consolidados de Arico (Tenerife) e Arucas (Gran Canaria), apresentados por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007) e um outro conjunto de 5 litologias diferentes de piroclastos pouco consolidados, retirado de SERRANO *et. al.* (2007), também originários do arquipélago das Canárias, cuja legenda está no quadro abaixo.

Quadro 44 – Legenda de cinco diferentes litologias de piroclastos pouco consolidados de Canárias [adaptado de SERRANO *et. al.* (2007)].

Piroclastos basálticos	<i>Lapilli</i> não consolidado	LPS
	<i>Lapilli</i> pouco consolidado	LPT
	Escórias pouco consolidadas	EST
Piroclastos ácidos	Pedra-pomes pouco consolidada	PZT
	Cinzas vulcânicas ácidas pouco consolidadas	CST

Apresenta-se ainda graficamente os pesos volúmicos secos de outras três amostras: tufo de *lapilli* originário do sítio da Encumeada (ilha da Madeira), apresentado por PERNETA (2011); tufo originário da Turquia, apresentado por DINÇER *et. al.* (2004) e tufo de *lapilli*/escórias de origem basáltica originários da ilha de S. Jorge (Açores), retirado de MOTTA & NUNES (2003) por MALHEIRO *et. al.* (2007).

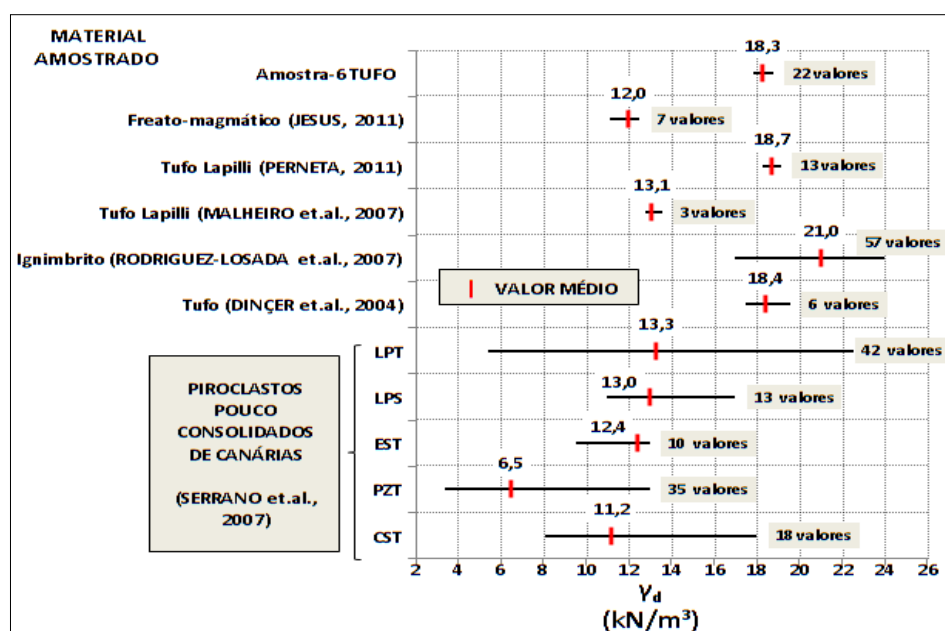


Figura 70 – Valores médios, mínimos e máximos de amostras do peso volúmico seco de rochas piroclásticas, retirados de várias referências bibliográficas.

Analisando a figura acima, pode-se notar que o tufo de piroclastos de queda amostrado neste trabalho (amostra n.º 6) possui uma gama de pesos volúmicos secos muito semelhante à do tufo de DINÇER (2004) e à do tufo de *lapilli* de PERNETA (2011), sendo que este último tem a particularidade de ter sido recolhido numa área geográfica da ilha da Madeira muito próxima da área originária da amostra n.º 6 (sítio da Encumeada dista cerca de 2 km do sítio da Ameixeira, ambos em Serra d'Água). Note-se também que o valor médio de peso volúmico seco do tufo da amostra n.º 6 é claramente superior aos valores médios das restantes amostras de piroclastos pouco consolidados de Canárias, bem como do tufo de *lapilli* dos Açores (o que se presume que também seja um tufo pouco consolidado) e do depósito freato-magmático da ilha da Madeira (também pouco consolidado). Apenas o valor médio de peso volúmico dos ignimbritos de Canárias é que se destaca por ser consideravelmente maior em relação ao tufo da amostra n.º 6, possivelmente devido ao facto de o processo de formação dos ignimbritos originar, normalmente, rochas piroclásticas mais consolidadas que os tufos ou tufos de *lapilli*, podendo mesmo, em alguns casos, se assimilar a um produto de uma escoada lávica, que por sua vez possui maiores pesos volúmicos [COSTA (2006); e-geo.ineti.pt].

Na Figura 71 apresentam-se, em conjunto, os resultados do peso volúmico seco de várias rochas de origem vulcânica e de todas as amostras rochosas deste trabalho (amostras n.ºs 5, 6 e 7). Na Figura 71, há um conjunto de siglas que representam as rochas vulcânicas do arquipélago de Canárias descritas em RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), cuja legenda está no quadro abaixo.

Quadro 45 - Legenda de diferentes litologias de rochas vulcânicas de Canárias [adaptado de RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007)].

BAFM	Basaltos afaníticos compactos
BAFV	Basaltos afaníticos vesiculares
BES	Basaltos escoriáceos
BOPM	Basaltos compactos (com fenocristais de olivina e piroxena)
BOPV	Basaltos vesiculares (com fenocristais de olivina e piroxena)
BPLM	Basaltos compactos
BPLV	Basaltos vesiculares
FON	Fonólitos
IGNS	Ignimbritos não consolidados
IGS	Ignimbritos consolidados
TRQ	Traquitos
TRQB	Basaltos traquíticos

RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007) apresenta também dados de massas volúmicas secas (g/cm^3), representados no gráfico da Figura 71 como peso volúmico seco (kN/m^3), que correspondem a ignimbritos consolidados de Arico e Arucas (Canárias). Representam-se graficamente, na mesma figura, dados de rochas vulcânicas da ilha de S. Jorge (Açores), nomeadamente ignimbritos, basaltos esponjosos de escoadas *pahoehoe* e basaltos compactos recolhidos de um filão, retirados de MALHEIRO *et. al.* (2007), e também basaltos e *lapilli* / escórias de origem basáltica, retirados de MOTTA & NUNES (2003), também por MALHEIRO *et. al.* (2007). Representam-se ainda na Figura 71 dados de basaltos e tufos da Turquia, apresentados por DINÇER *et. al.* (2004), sendo que os restantes dados correspondem a rochas da ilha da Madeira, nomeadamente as apresentadas por MOURA *et. al.* (2007), PERNETA (2011) e por JESUS (2011), seguindo-se as amostras rochosas estudadas neste trabalho.

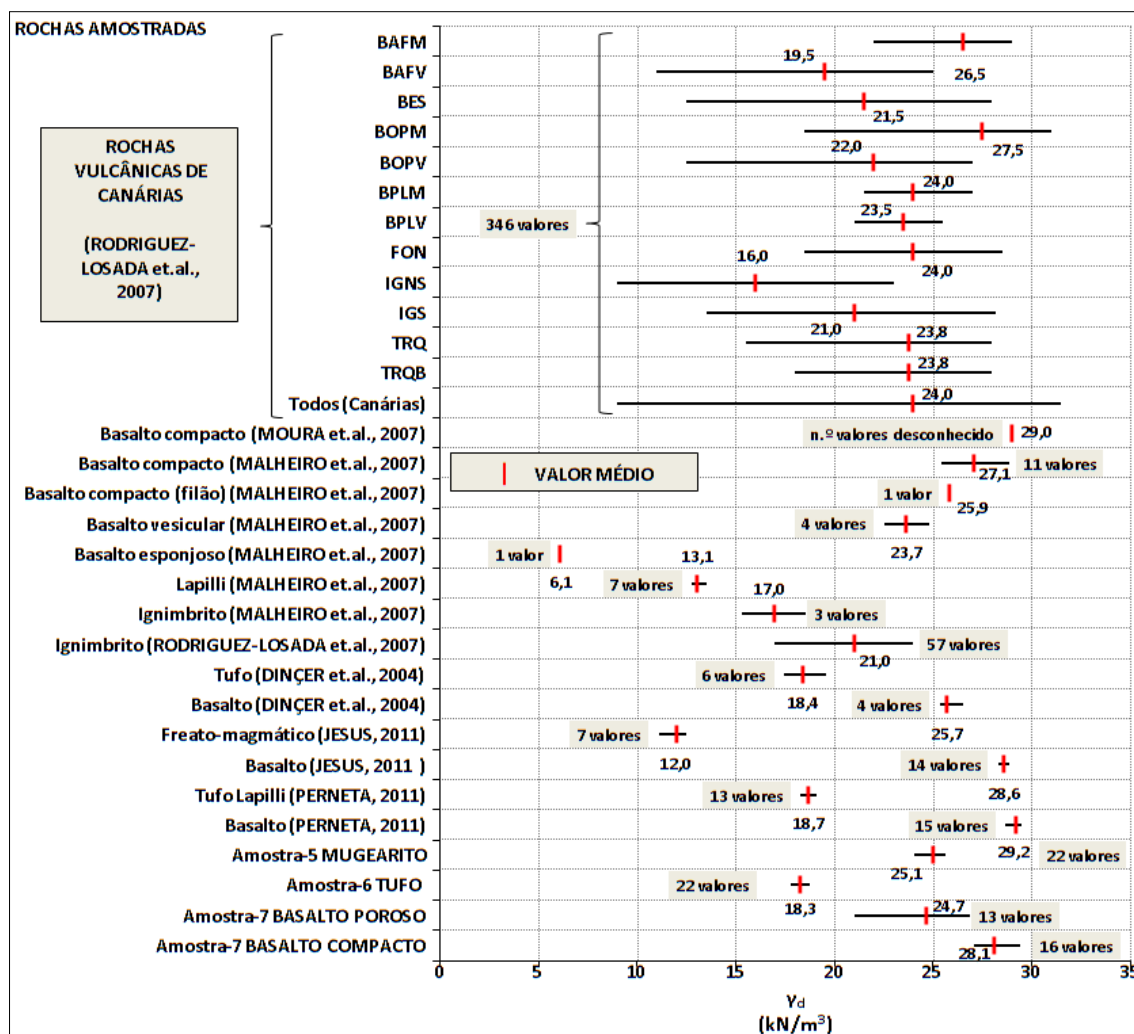


Figura 71 - Valores médios, mínimos e máximos do peso volúmico seco de amostras de rochas vulcânicas, retirados de várias referências bibliográficas.

De acordo com a Figura 71, pode-se constatar que existe uma alguma discrepância entre valores médios de pesos volúmicosecos quando se comparam os mesmos tipos de rocha. Mesmo assim, consegue-se estabelecer ordens de grandeza para cada litologia. Ou seja, nos casos dos basaltos compactos, estes possuem valores médios que se situam aproximadamente entre os 25 e os 29 kN/m³, notando a particularidade de a amostra n.º 5 (mugarito) possuir o seu valor médio dentro do mesmo intervalo. No caso dos basaltos vesiculares/porosos, estes possuem uma menor ordem de grandeza, variando aproximadamente entre os 20 e os 25 kN/m³. Quanto ao peso volúmico seco das rochas vulcânicas de origem piroclástica, constata-se que são menos densas por possuírem valores médios de pesos volúmicosecos geralmente menores que os supracitados, rondando valores na casa dos 18 kN/m³.

No entanto, pode-se afirmar que os pesos volúmicosecos médios das rochas amostradas neste trabalho situam-se dentro dos valores considerados normais.

Apesar de se ter verificado estas gamas de valores médios de pesos volúmicosecos para cada tipo de rocha, existem algumas exceções fora desses intervalos. É o caso do ignimbrito apresentado por RODRIGUEZ-LOSADA *et al.* (2007), cujo material é considerado como não consolidado, bem como o caso do *lapilli* apresentado por MALHEIRO *et al.* (2007) que se presume ser um piroclasto também pouco ou nada consolidado. Há também uma exceção digna de registo que é o caso do basalto

esponjoso apresentado por MALHEIRO *et. al.* (2007), sendo o menor peso volúmico médio representado graficamente, provavelmente por possuir uma elevada porosidade.

4.3.3. Resistência à compressão uniaxial das amostras rochosas

No gráfico da figura abaixo apresentam-se os resultados de todos os ensaios à resistência à compressão uniaxial (RCU) efectuados às amostras de rochas estudadas neste trabalho. Note-se que os dados de cada amostra estão representados de forma separada, de acordo com a relação diâmetro-altura dos provetes (L/D=1 e L/D=2).

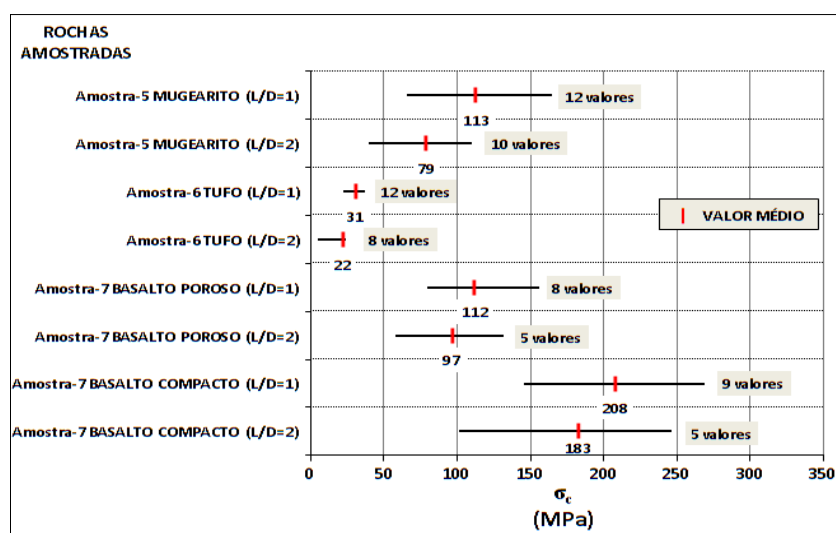


Figura 72 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão uniaxial das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.

Analisando o gráfico acima, constata-se que as resistências de cada tipo de rocha amostrada são adequadas quando comparadas entre si. Por ordem crescente, a menos resistente é o tufo da amostra n.º 6, seguindo-se o mugarito da amostra n.º 5 e o basalto poroso da amostra n.º 7, sendo que o basalto compacto da mesma amostra acaba por ser a rocha mais resistente de todas as amostras rochosas deste trabalho.

No mesmo gráfico, nota-se facilmente a influência da esbelteza dos provetes cilíndricos no resultado da sua RCU, pois todas as amostras com relação L/D=1 obtiveram valores médios de RCU superiores aos das amostras com relação L/D=2. Desse modo, obtém-se o seguinte conjunto de relações:

Quadro 46 – Relação entre a RCU de provetes com L/D=2 e a RCU de provetes com L/D=1.

Amostra	Relação $R_{1,2}/R_{1,1}$
Amostra n.º 5 (mugarito)	0,70
Amostra n.º 6 (tufo)	0,70
Amostra n.º 7 (basalto poroso)	0,87
Amostra n.º 7 (basalto compacto)	0,88

No quadro acima pode-se constatar que a relação $R_{1,2}/R_{1,1}$ parece aumentar quanto maior a resistência da rocha. Ou seja, no caso das amostras estudadas neste trabalho, quanto mais resistente for a rocha, menor será a diferença entre a RCU de provetes com L/D=1 e a RCU de provetes com L/D=2. Prova disso, foi o valor máximo de RCU obtido para uma das amostras de basalto compacto com L/D=2 (próximo de 250 MPa), considerado elevado quando comparado com os resultados de RCU das amostras

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

de menor esbelteza, ter provocado alguns problemas técnico-mecânicos no que respeita ao equipamento laboratorial utilizado.

Na Figura 73 representam-se graficamente os resultados dos ensaios à RCU, levados a cabo neste trabalho, juntamente com valores de RCU de rochas piroclásticas apresentados em diversas referências bibliográficas, bem como os valores de RCU respeitante a uma amostra de depósitos freato-magmáticos, apresentados por JESUS (2011). Os restantes valores representados graficamente correspondem a tufos de *lapilli* retirados de PERNETA (2011), oriundos da ilha da Madeira, a tufos da Turquia apresentados por DINÇER *et. al.* (2004), a ignimbritos de Canárias apresentados por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007) e a um conjunto de rochas piroclásticas de Canárias apresentadas por SERRANO *et. al.* (2007), cuja legenda está no Quadro 44.

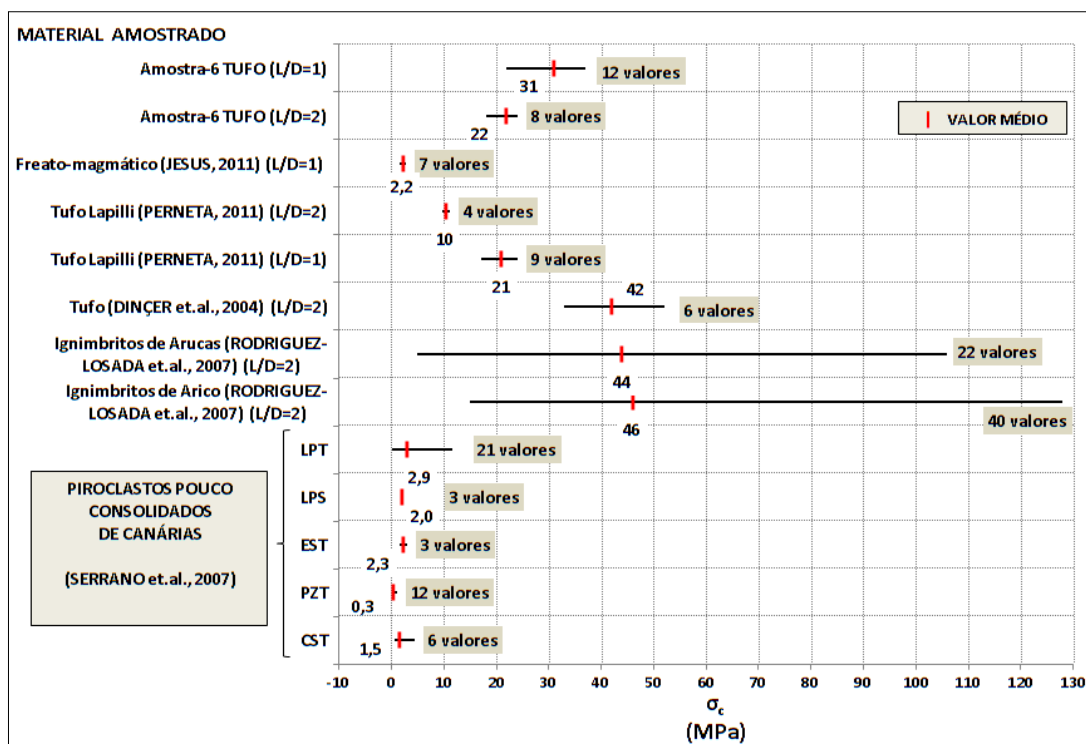


Figura 73 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão uniaxial de amostras de rochas piroclásticas, retirados de várias referências bibliográficas.

No gráfico acima nota-se uma certa discrepância ao comparar os valores médios de RCU das várias rochas amostradas. Os tufos de piroclastos de queda da amostra n.º 6 sugerem uma resistência de um depósito piroclástico rochoso bem consolidado quando comparados com os tufos de *lapilli* apresentados por PERNETA (2011), sendo que estes últimos, apesar de serem oriundos de um local relativamente próximo (como referido em 4.3.2.), sugerem ser menos consolidados, talvez por resultarem da consolidação de *lapilli* (partículas de granulometria ligeiramente maior que os tufos originados por cinzas vulcânicas).

Fazendo de novo uma comparação, desta feita entre o tufo da amostra n.º 6 e o tufo de DINÇER *et. al.* (2004), este último apresenta um valor médio de RCU de provetes L/D=2 mais elevado que o da amostra n.º 6 (quase o dobro), o que se suspeita de não se tratar de tufos de origem basáltica. Quanto aos ignimbritos apresentados por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), no que toca aos valores médios apresentados, são mais resistentes à compressão do que os tufos, por serem uma rocha melhor consolidada devido ao seu processo de formação ser diferente do dos tufos. Já quanto aos valores de RCU dos piroclastos por SERRANO *et. al.* (2007), são consideravelmente mais baixos em relação aos

valores afectos à amostra n.º6 e às RCU dos restantes tufos, sugerindo que a designação atribuída pelos autores de “piroclastos pouco consolidados” refere-se a depósitos piroclásticos com um estado de consolidação muito fraco, podendo-se equiparar ao comportamento mecânico do depósito freato-magmático de JESUS (2011).

Na Figura 74 representam-se os valores de RCU, desta feita de um leque de rochas vulcânicas apresentados em várias referências bibliográficas, juntamente com os valores de RCU obtidos para as amostras rochosas deste trabalho. As rochas apresentadas por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), cujos nomes estão descritos por siglas, são as mesmas que estão legendadas no Quadro 45. Representam-se ainda mais duas gamas de RCU de dois tipos de rochas vulcânicas oriundas de Canárias, retiradas de GONZALEZ DE VALLEJO *et. al.* (2007), dois tipos de rochas oriundas da ilha da Madeira, cujas RCU foram retiradas de MOURA *et. al.* (2007) e valores de um tufo *Lapilli* originário do Japão, apresentados por ITO *et. al.* (2007), sendo que os restantes dados de RCU representados neste gráfico correspondem a rochas já descritas nos gráficos anteriores de outros parâmetros.

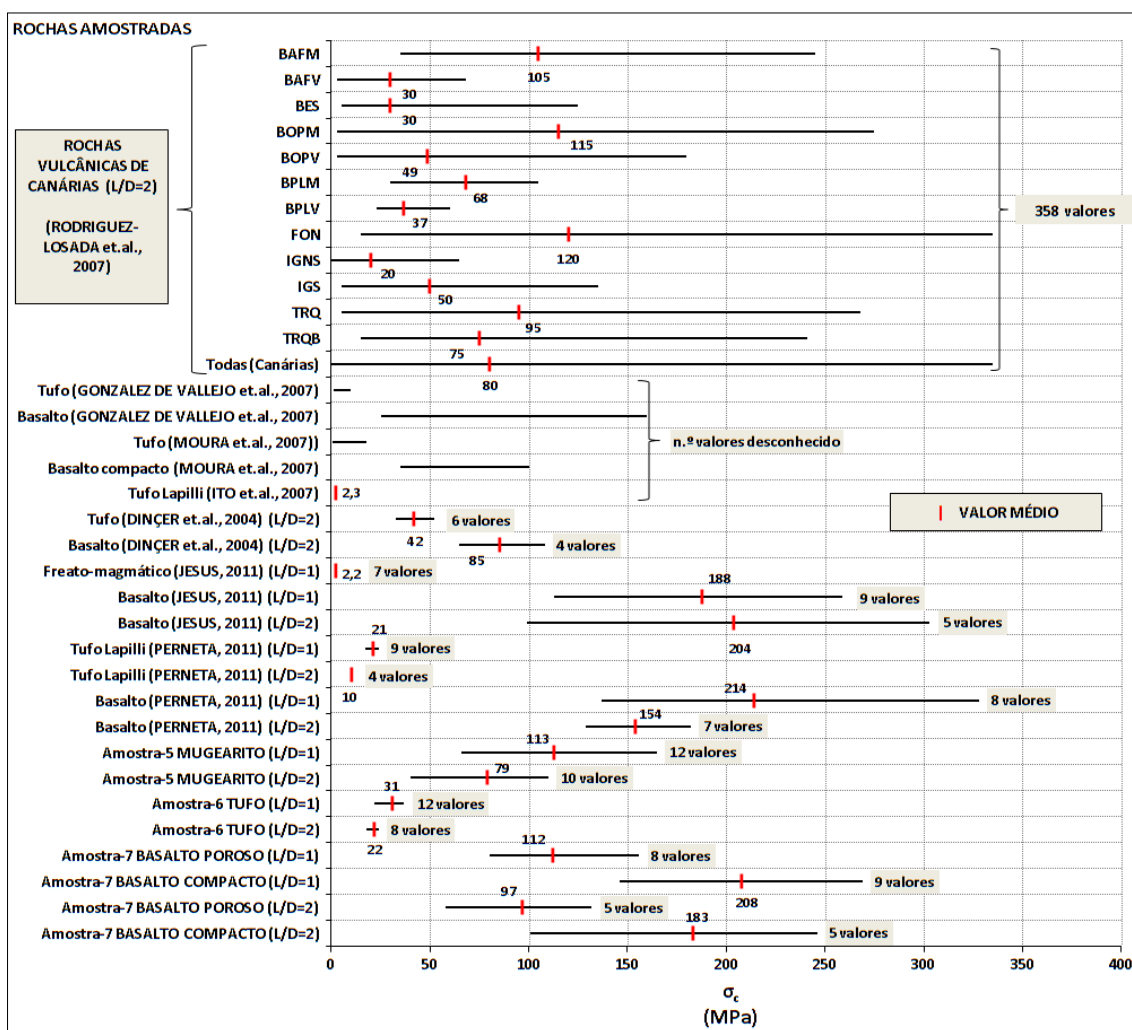


Figura 74 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão uniaxial de amostras de rochas vulcânicas, retirados de várias referências bibliográficas.

A partir da Figura 74, pode-se confirmar o baixo valor médio da RCU do tufo da amostra n.º 6, em relativa concordância com as gamas de RCU das restantes rochas piroclásticas, como os tufos, tufos de *lapilli* e ignimbritos, quando comparando com as RCU das rochas ígneas (basalto, por exemplo). Já no caso destas rochas mais resistentes, demarca-se a exceção verificada para quase todos os basaltos

apresentados por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007) e para os basaltos apresentados por MOURA *et. al.* (2007) e DINÇER *et. al.* (2004), cujas RCU médias apontam para valores numa ordem sempre inferior a 90 MPa, podendo considerar-se como valores baixos de RCU de basaltos, quando comparados com os restantes valores de RCU média de basaltos na Figura 74. Esses valores de RCU também são confirmados como baixos de acordo com o intervalo de valores médios de RCU para basaltos (150 – 215 MPa) apresentados por GONZALEZ DE VALLEJO *et. al.* (2002), em COSTA (2006), e de acordo com o valor típico de 215 MPa apresentado por ROCHA (1981). Assim, pode-se constatar que os restantes basaltos resultaram RCU aceitáveis de acordo com os valores apresentados pelos últimos autores referidos, excluindo o basalto poroso da amostra n.º 7.

Como particularidade, note-se os valores médios de RCU do mugearito da amostra n.º 5, que rondam os mesmos valores obtidos para o basalto poroso da amostra n.º 7 e aproximam-se também das resistências de alguns dos basaltos retirados das referências bibliográficas apresentadas no gráfico, o que pode significar uma RCU considerável para uma rocha mugearítica, sendo que a RCU desta, neste caso, pode ser equiparada à de um basalto poroso/vesicular/alterado.

4.3.4. Resistência à compressão das amostras rochosas, deduzida através da dureza de ressalto de SCHMIDT

Na Figura 75 apresentam-se as gamas de resistências à compressão deduzidas através dos valores da dureza de ressalto obtidos no ensaio esclerométrico com o martelo de Schmidt levado a cabo neste trabalho.

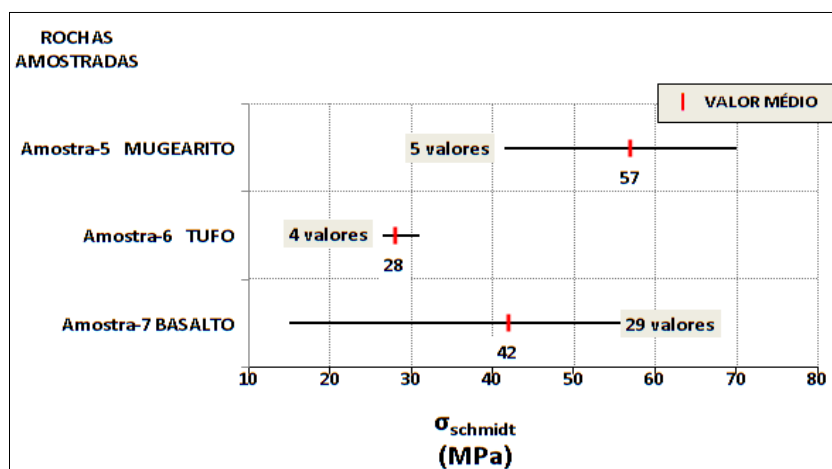


Figura 75 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.

No que toca ao ensaio esclerométrico realizado aos carotes de basalto (amostra n.º 7), é de referir que o resultado médio obtido para resistência à compressão (42 MPa) é considerado muito desfasado quando comparado com qualquer um dos valores obtidos nos ensaios à RCU levados a cabo em laboratório. Conforme o que se apurou em 3.2.2. e 3.2.3., os valores de RCU média situam-se entre os 58 MPa e os 269 MPa, sendo que o valor médio de 42 MPa e o valor máximo de 56,5 MPa obtidos no ensaio esclerométrico, situam-se ambos abaixo dos valores homólogos obtidos em laboratório para a RCU. Estes valores não foram considerados para comparações com outras referências neste trabalho.

A dedução da resistência à compressão do basalto através da sua dureza de ressalto, foi obtida pela utilização de um ábaco retirado do manual de instruções do martelo de Schmidt (tipo N). Este ábaco (Figuras 98 e 99, Anexo III) é destinado a provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de

altura, dimensões diferentes das carotes de basalto disponíveis para este trabalho que possuíam diâmetros de 70 mm, aproximadamente. Presume-se que, devido ao facto de se tratar de diâmetros com menos de metade da dimensão referida no ábaco, o embate do êmbolo do martelo de Schmidt não resulte leituras coerentes no que toca às alturas de ressalto da massa visto que as carotes possuíam uma menor área disponível na sua superfície lateral curva, onde foram efectuados os testes. Assim, resultaram valores muito baixos quando comparados com os valores de RCU obtidos em 3.2.2. e 3.2.3., e por isso não foram considerados para análise nem para comparação com outras referências bibliográficas. No entanto, optou-se por representar graficamente uma relação entre a dureza de ressalto de Schmidt e a RCU, com os resultados obtidos, a qual está descrita na Figura 80.

Na Figura 76 apresentam-se valores de resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, retirados de outras referências bibliográficas, para uma comparação com os resultados obtidos nas amostras n.ºs 5 e 6 (mugarito e tufo), sendo que a amostra n.º 7 (basalto) não é considerada, como justificado no parágrafo anterior.

Das referências bibliográficas citadas no gráfico abaixo, destacam-se os valores apresentados por POTRO *et. al.* (2007), referentes a basaltos e piroclastos oriundos de Tenerife (Canárias). Os restantes dados de resistência à compressão deduzida correspondem a referências bibliográficas já mencionadas anteriormente para os gráficos de outros parâmetros.

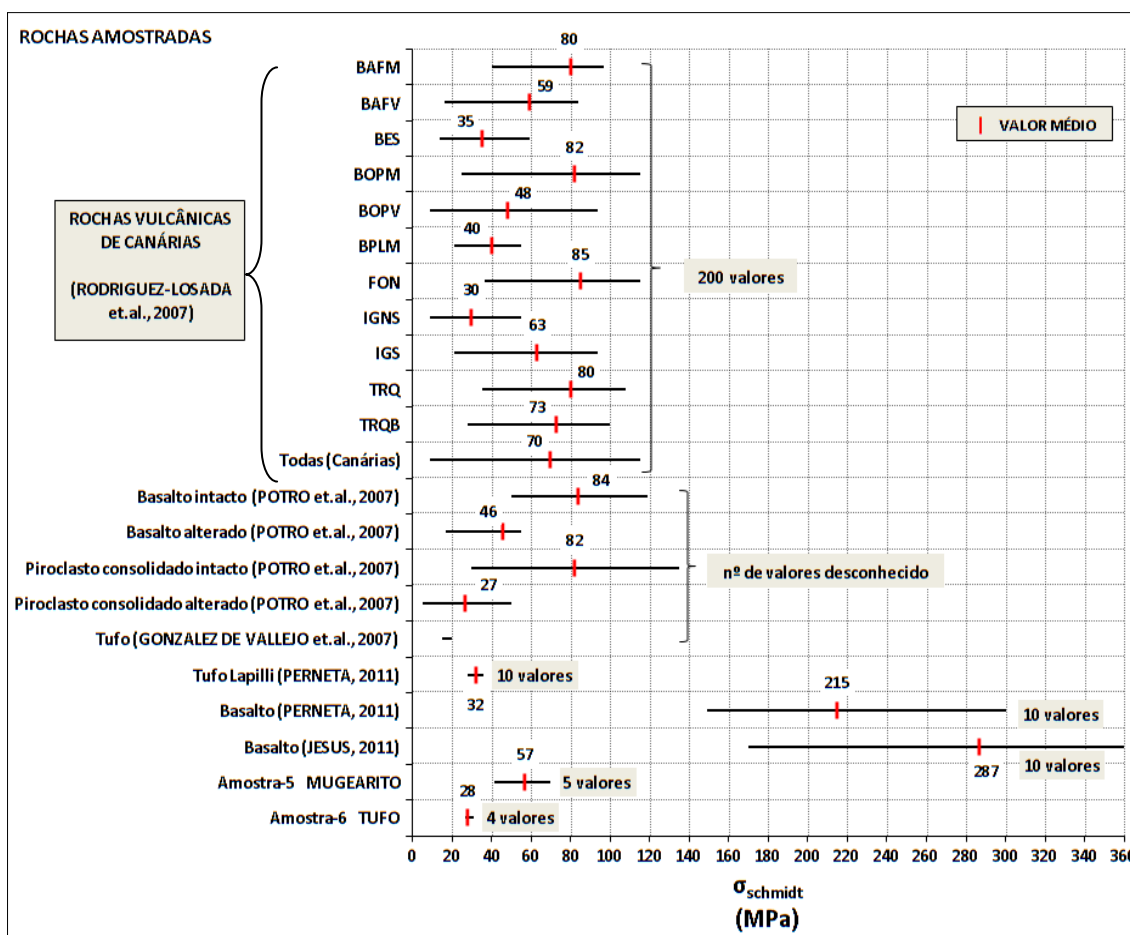


Figura 76 - Valores médios, mínimos e máximos da resistência à compressão, deduzida através do martelo de Schmidt, de amostras de rochas vulcânicas, retirados de várias referências bibliográficas.

Na figura acima constata-se novamente os baixos valores de resistência à compressão obtidos para as rochas de Canárias, apresentadas por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), tal como foi verificado em

4.3.3. Também constata-se as baixas resistências à compressão estimadas para os basaltos apresentados por POTRO *et. al.* (2007). Note-se ainda que os valores de resistência para os basaltos, apresentados por PERNETA (2011) e por JESUS (2011), são consideravelmente maiores que os valores dos basaltos das outras referências, estando também em concordância o que foi verificado na comparação de RCU em 4.3.3. Da mesma forma, os valores de resistência à compressão estimada para o tufo da amostra n.º 6 enquadra-se na mesma gama de valores que resultaram para o tufo de *lapilli* de PERNETA (2011), para o tufo apresentado por GONZALEZ DE VALLEJO *et. al.* (2007) e para a rocha piroclástica alterada apresentada por POTRO *et. al.* (2007), com excepção da rocha piroclástica intacta apresentada pelos mesmos autores.

A título de curiosidade, o valor médio da resistência à compressão estimada para a rocha mugearítica da amostra n.º 5 ronda os valores dos basaltos alterados/vesiculares, tal como se verificou nas RCU, em 4.3.3.

4.3.5. Módulo de deformabilidade das amostras rochosas

Na figura abaixo apresentam-se os módulos de deformabilidade obtidos a partir dos ensaios aos provetes com $L/D=2$, realizados para este trabalho.

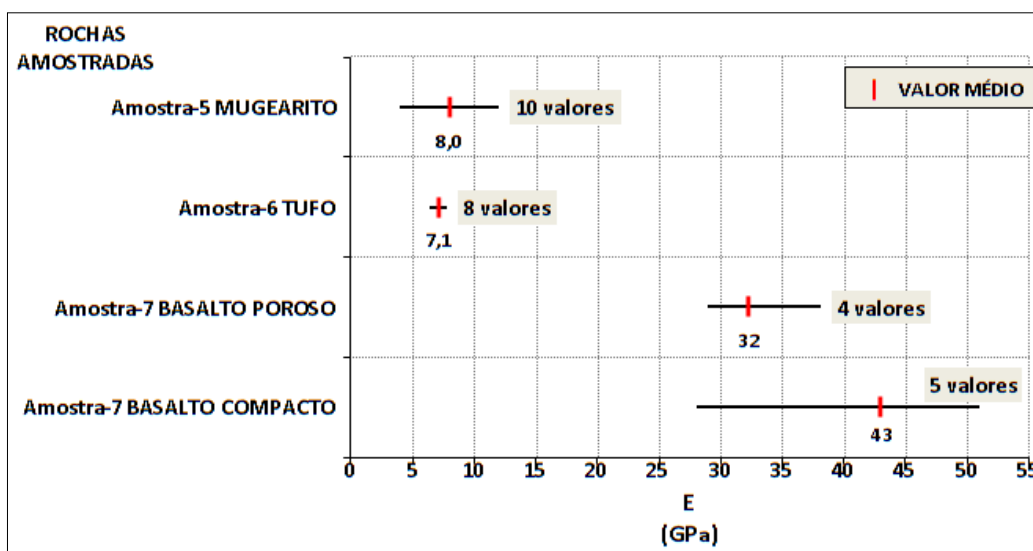


Figura 77 – Valores médios, mínimos e máximos do módulo de deformabilidade das amostras rochosas n.ºs 5, 6 e 7.

Constata-se que os resultados obtidos estão dentro das expectativas, sendo que os menores módulos de deformabilidade correspondem ao tufo e ao mugearito, tendo ambos valores médios aproximados entre si. Os maiores módulos de deformabilidade, por ordem crescente, correspondem ao basalto poroso e ao basalto compacto.

Na figura seguinte, representam-se os valores do módulo de deformabilidade de rochas piroclásticas apresentadas pelos autores já anteriormente referidos.

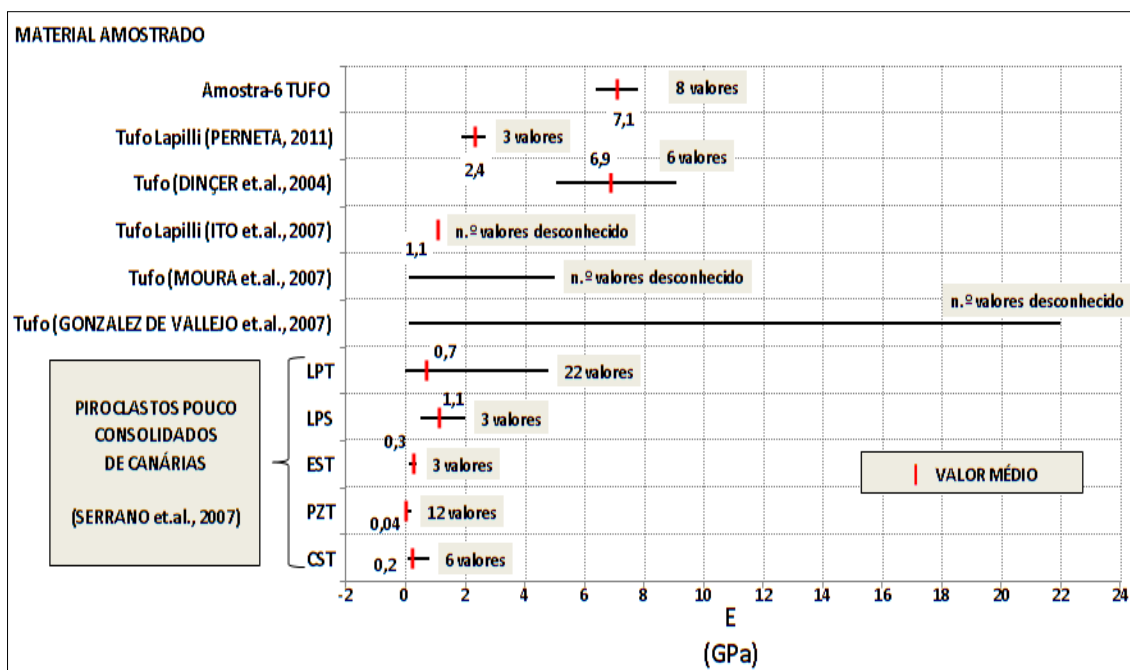


Figura 78 – Valores médios, mínimos e máximos do módulo de deformabilidade de amostras de rochas piroclásticas, retirados de outras referências bibliográficas.

Nesta figura constata-se que o valor médio de módulo de deformabilidade do tufo da amostra n.º 6 é o maior em comparação com os restantes, sendo o valor para o tufo apresentado por DINÇER *et al.* (2004) o que mais se aproxima do valor do tufo deste trabalho, sem contar com gama altamente dispersa apresentada por GONZALEZ DE VALLEJO *et al.* (2007), cujo valor médio se desconhece. Já os módulos de deformabilidade do tufo de *lapilli* de PERNETA (2011), oriundo também da ilha da Madeira, são consideravelmente baixos e aproximam-se dos valores apresentados por SERRANO *et al.* (2007), ITO *et al.* (2007) e por MOURA *et al.* (2007).

Na Figura 79, representam-se as gamas de módulos de deformabilidade apresentadas por um mesmo conjunto de autores, que correspondem a rochas de origem vulcânica oriundas de outros locais já mencionados anteriormente.

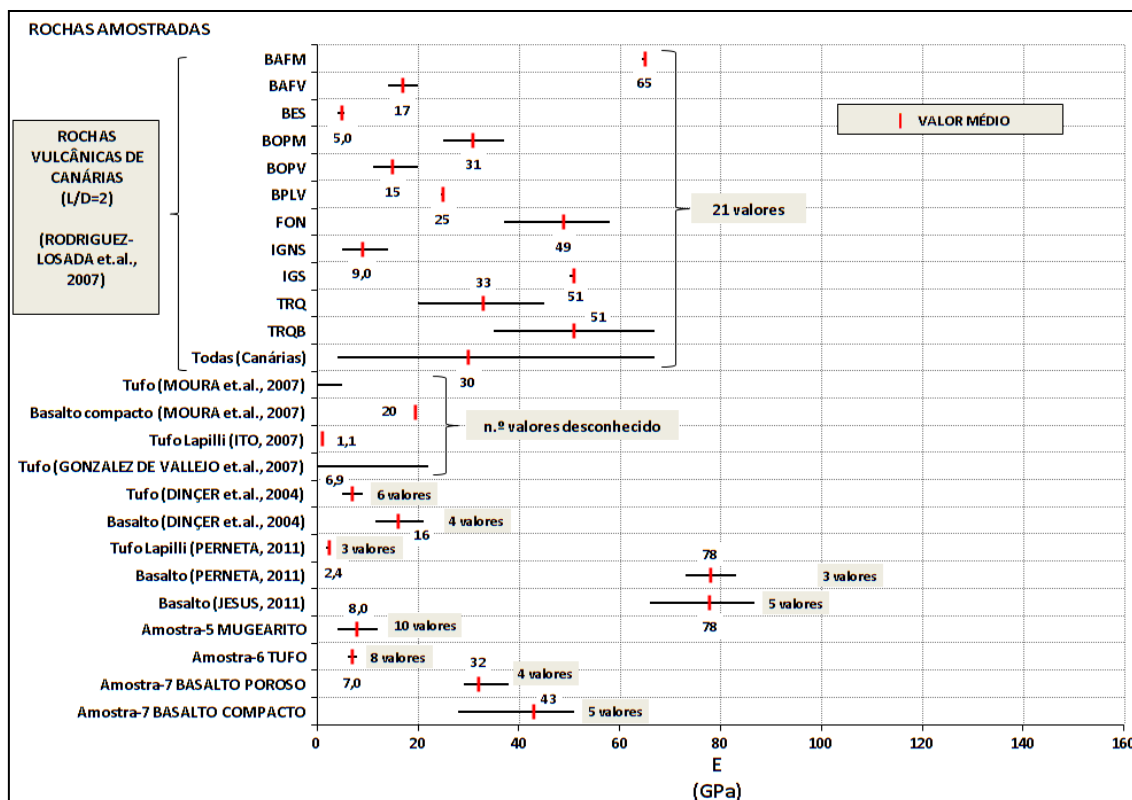


Figura 79 – Valores médios, mínimos e máximos do módulo de deformabilidade de amostras de rochas vulcânicas, retiradas de outras referências bibliográficas.

A partir da Figura 79, pode-se constatar que os módulos de deformabilidade do basalto da amostra n.º 7 enquadram-se, aproximadamente, nas gamas de valores correspondentes a algumas rochas vulcânicas apresentadas por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), sendo que o mesmo não se pode dizer ao comparar com os valores médios apresentados por PERNETA (2011) e JESUS (2011), que são claramente superiores, significando uma alta resistência à deformação quando sujeitos a tensão uniaxial.

Na mesma figura, constata-se que os valores médios obtidos para o mugearito da amostra n.º 5, e para o tufo da amostra n.º 6, são enquadráveis com os valores obtidos para o tufo de DINÇER *et. al.* (2004) e de GONZALEZ DE VALLEJO *et. al.* (2007), como também para o basalto escoriaço e para o ignimbrito pouco consolidado apresentado por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007).

4.3.6. Correlações efectuadas entre os parâmetros geotécnicos das rochas estudadas

Neste momento do trabalho são apresentadas as relações efectuadas entre os diversos parâmetros geotécnicos abordados neste trabalho, comparando, sempre que possível, com outras relações idênticas apresentadas por outras referências bibliográficas.

Começa-se por abordar a questão já mencionada em 4.3.4., referente à dificuldade encontrada em obter valores credíveis para a compressão à resistência simples deduzida através do martelo de Schmidt. Para isso, e tendo em conta que do ábaco do manual de instruções do aparelho resultavam valores duvidosos e visto que não se encontrou, em pesquisas bibliográficas, nenhuma correlação que satisfizesse o tipo de martelo e as dimensões dos provetes utilizados, optou-se por representar graficamente, na figura seguinte, uma relação entre a dureza de ressalto de Schmidt (obtida a partir do ensaio esclerométrico com o martelo de Schmidt do tipo N) e a RCU dos carotes da amostra n.º 7 obtida em laboratório.

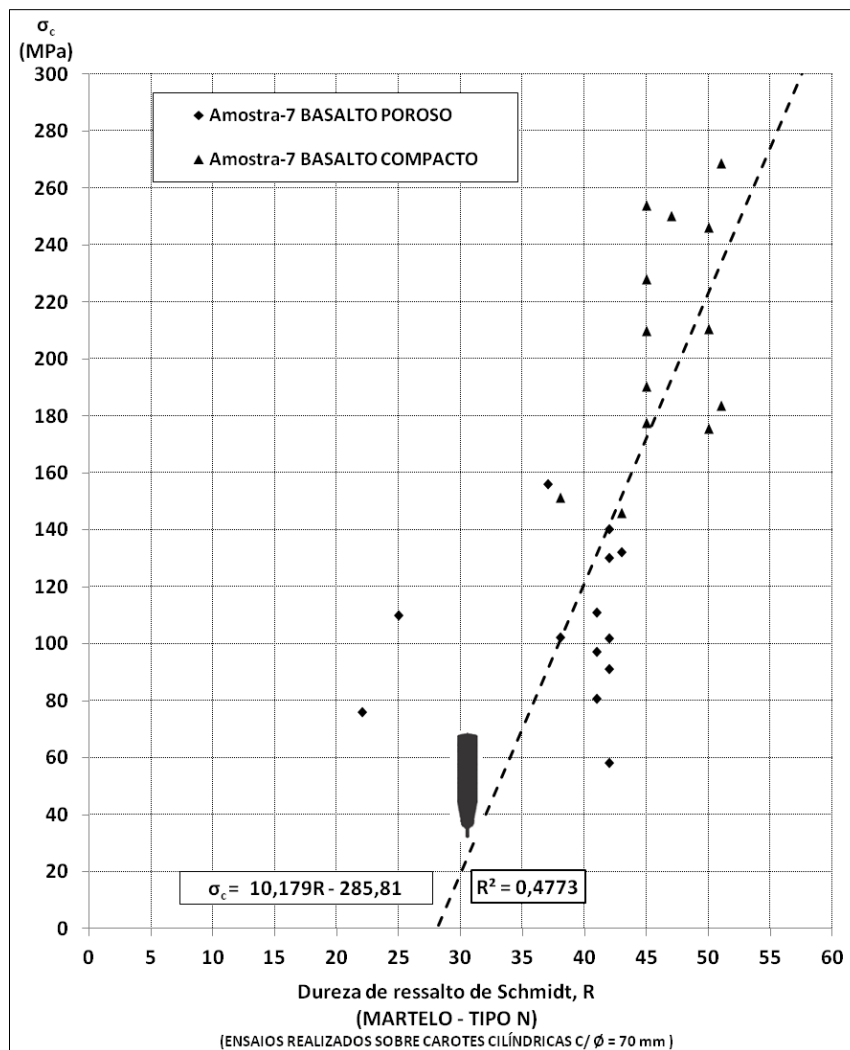


Figura 80 – Relação entre as durezas de ressalto de Schmidt e as RCU obtidas em laboratório, referentes ao basalto da amostra n.º 7.

Esta correlação da Figura 80 foi elaborada a partir dos resultados da RCU da cada provete basáltico e dos valores da dureza de ressalto das carotes que deram origem aos provetes, sendo que não foi possível elaborar a correlação para as amostras n.ºs 5 e 6 (mugarito e tufo), pois o ensaio esclerométrico para estas foi efectuado aos respectivos blocos de rocha, não havendo lugar para um elo de ligação com os provetes caroteados das mesmas amostras.

Sendo o ensaio esclerométrico com o martelo de Schmidt um teste rápido e menos dispendioso quando comparado com o ensaio laboratorial à RCU, procurou-se estabelecer relações entre esses dois parâmetros, de modo a avaliar a credibilidade no uso do martelo de Schmidt para o fim a que se destina, sendo que este é já considerado por inúmeros autores como um método expedito válido e credível. Sendo assim, na Figura 81 apresenta-se a correlação efectuada entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através dos resultados do ensaio esclerométrico, respeitante às amostras rochosas de mugarito e de tufo.

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

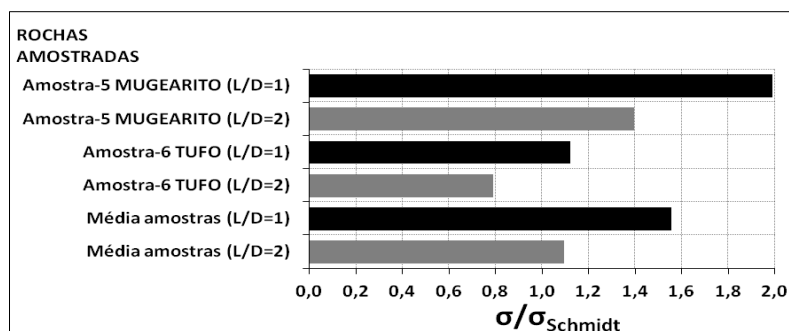


Figura 81 – Relação entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, para as amostras n.ºs 5 e 6.

Ao observar a figura acima, pode-se constatar que a razão resultante dos provetes com L/D=1 é sempre superior à razão resultante dos provetes com L/D=2, apenas devido ao facto de os valores de RCU para os provetes com L/D=2 serem menores devido à esbelteza dos mesmos. No Quadro 47, estabelece-se valores médios para as relações em questão, quer para provetes com L/D=1, quer para provetes com L/D=2.

Quadro 47 – Médias das relações entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, das amostras n.ºs 5 e 6, para provetes com L/D=1 e L/D=2.

Média das amostras n.ºs 5 e 6 (L/D=1)	$\sigma = 1,55 \sigma_{Schmidt}$
Média das amostras n.ºs 5 e 6 (L/D=2)	$\sigma = 1,09 \sigma_{Schmidt}$

Na Figura 82 representam-se as correlações efectuadas por outros autores (já referidos anteriormente), entre os mesmos parâmetros. Note-se que os valores retirados de RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), foram obtidos a partir de valores de RCU respeitantes a amostras com L/D=2.

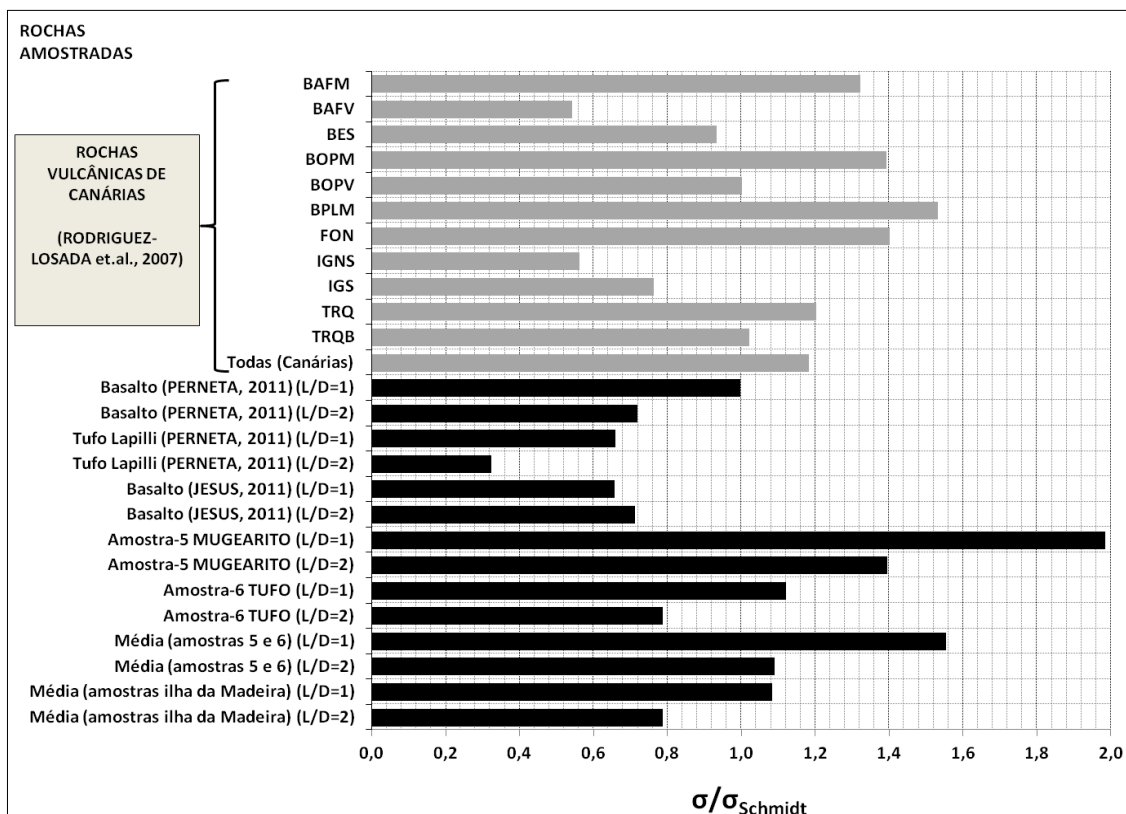


Figura 82 – Relação entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, para amostras rochosas retiradas de várias referências bibliográficas.

Da análise da Figura 82, pode-se constatar, de um modo geral, as menores razões para provetes com $L/D=2$, devido ao mesmo factor referido para a Figura 81. Nesta correlação procurou-se confrontar a equação $\sigma = 1,18\sigma_{schmidt}$, proposta por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), cujo valor pode ser confirmado pela barra de nome “Todas (Canárias)” da Figura 82. Para tal, utilizaram-se os valores apresentados no Quadro 47 e calcularam-se também, do mesmo modo, os valores médios das relações de todas as amostras rochosas da ilha da Madeira apresentadas na Figura 82 (com $L/D=1$ e $L/D=2$).

Quadro 48 - Médias das relações entre a RCU e a resistência à compressão deduzida através do martelo de Schmidt, das amostras rochosas da ilha da Madeira, para provetes com $L/D=1$ e $L/D=2$.

Média das amostras n.ºs 5 e 6 ($L/D=1$)	$\sigma = 1,55 \sigma_{Schmidt}$
Média das amostras n.ºs 5 e 6 ($L/D=2$)	$\sigma = 1,09 \sigma_{Schmidt}$
Média das amostras da ilha da Madeira ($L/D=1$)	$\sigma = 1,08 \sigma_{Schmidt}$
Média das amostras da ilha da Madeira ($L/D=2$)	$\sigma = 0,78 \sigma_{Schmidt}$
Relação proposta por RODRIGUEZ-LOSADA <i>et. al.</i> (2007) ($L/D=2$)	$\sigma = 1,18 \sigma_{Schmidt}$

Do Quadro 48 pode-se constatar que o valor respeitante às rochas de Canárias é superior a qualquer um dos valores aqui obtidos para provetes com $L/D=2$. Constata-se que o mesmo valor também é superior ao valor médio das amostras da ilha da Madeira com $L/D=1$, mas inferior ao valor médio das amostras n.ºs 5 e 6 com $L/D=1$.

Na Figura 83 apresenta-se uma outra relação entre a RCU e a massa volúmica seca das amostras n.ºs 5 e 6, juntamente com as relações dos mesmos parâmetros de rochas piroclásticas retirada de outras referências bibliográficas.

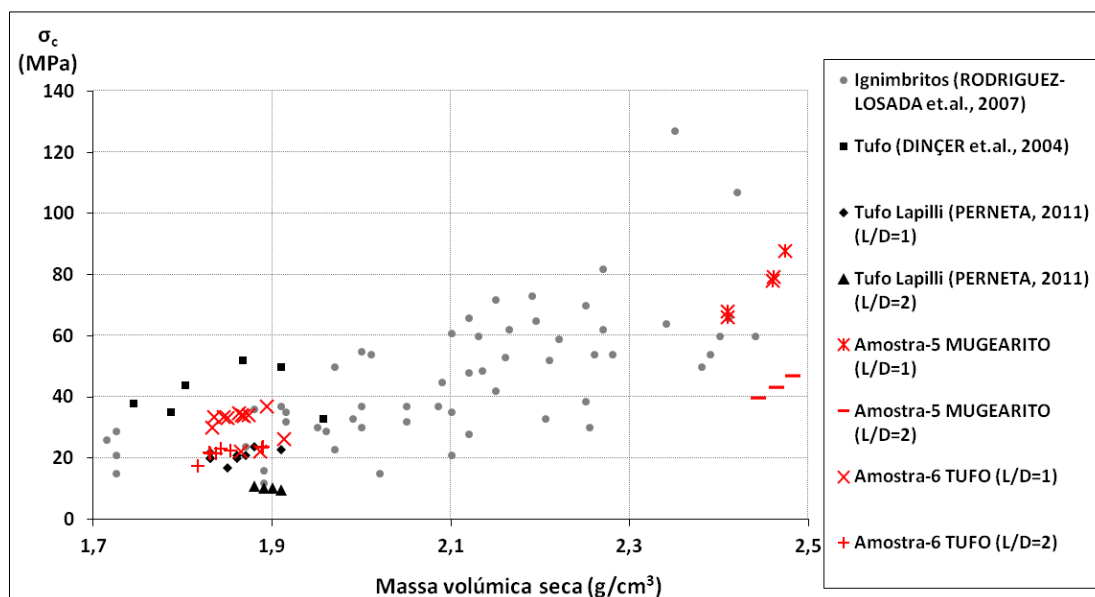


Figura 83 – Relação entre a RCU e a massa volúmica seca de materiais vulcânicos retirados de outras referências bibliográficas.

Pode-se constatar que o tufo da amostra n.º 6 assimila-se ao tufo de *lapilli* apresentado por PERNETA (2011), estando ambos um pouco desfasados dos valores do tufo apresentado por DINÇER *et. al.* (2004), que apresenta RCU mais altas, bem como dos valores dos ignimbritos apresentados por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), devido ao facto de essa rocha piroclástica ser naturalmente mais densa e mais resistente (quando consolidada) que os tufos. Na Figura 83 foram também introduzidas os valores do mugarito da amostra n.º 5, podendo constatar que, embora muito desfasados dos valores dos tufos, aproximam-se um pouco dos valores respeitantes aos ignimbritos.

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 84 representa-se a relação efectuada entre a RCU e o peso volúmico seco de várias amostras rochosas de origem vulcânica, incluindo as amostras estudadas neste trabalho. Note-se que as amostras retiradas de outras referências bibliográficas são as mesmas já apresentadas em outros gráficos neste trabalho. Esta correlação foi efectuada com base numa correlação já existente, apresentada por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), à qual se acrescentou outras referências bibliográficas.

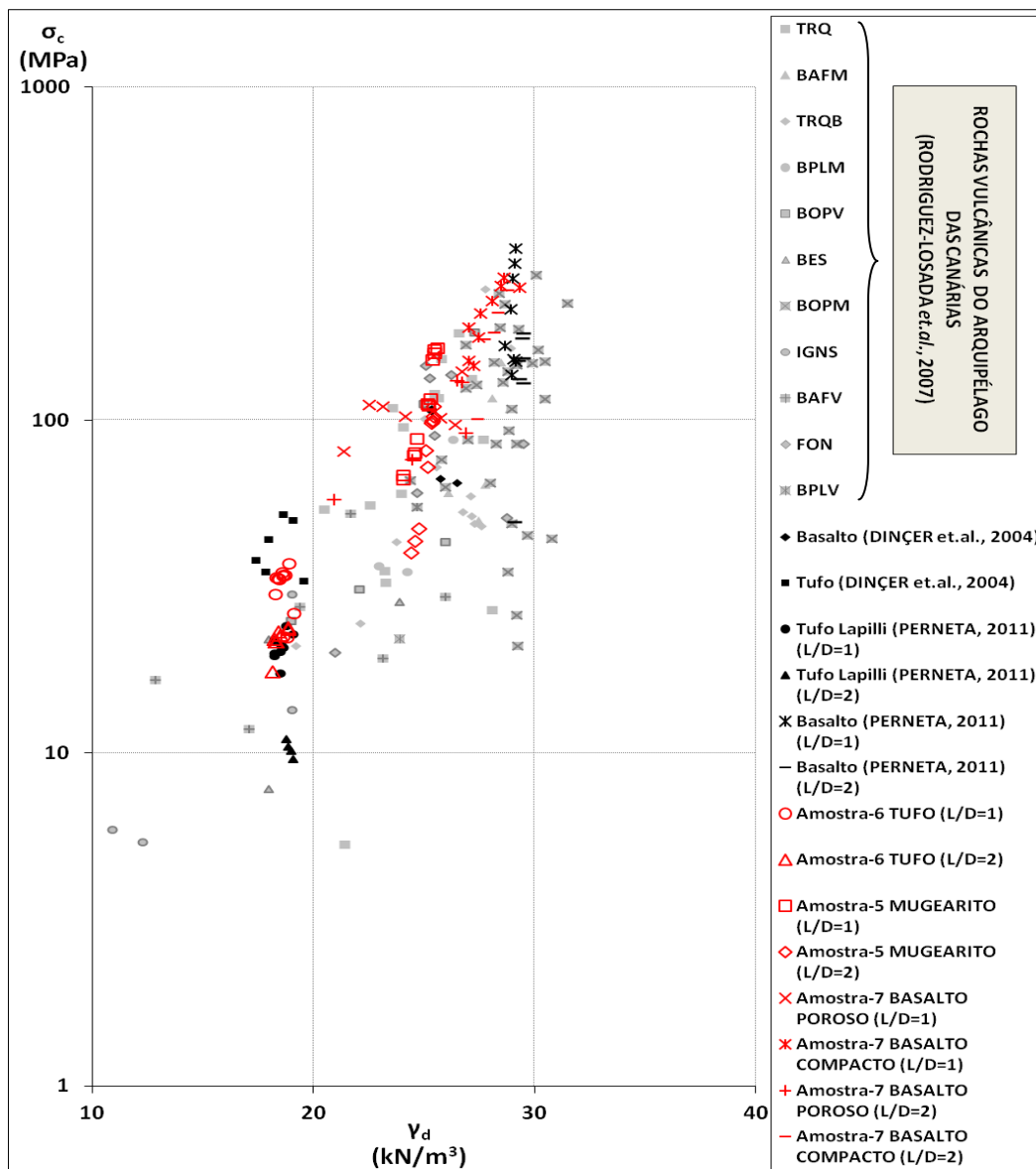


Figura 84 – Relação entre a RCU e o peso volúmico seco das amostras n.ºs 5, 6 e 7 e de rochas de outras referências bibliográficas.

De um modo geral, pode-se verificar que no caso dos tufos da amostra n.º 6 não existe uma proporcionalidade entre os dois parâmetros relacionados, pois a variação na RCU pouco ou nada implica na variação do seu peso volúmico seco. No caso do mugearito da amostra n.º 5 e do basalto da amostra n.º 7, verifica-se uma pequena proporcionalidade, pois à medida que aumenta ligeiramente o peso volúmico seco das amostras, maior revela ser a respectiva RCU, exceptuando o caso basalto poroso com L/D=1 da amostra n.º 7 cuja tendência não é garantida.

Confrontando com os restantes valores presentes na Figura 84, pode-se constatar que as razões do basalto da amostra n.º 7 assimilam-se, regra geral, às dos restantes basaltos apresentados pelos outros autores, não obstante haver alguma dispersão no que toca a valores de alguns basaltos apresentados

por RODRIGUEZ-LOSADA et.al (2007). Note-se também que a relação efectuada para as amostras de mugarito é curiosamente similar às relações do basalto poroso da amostra n.º 7, bem como se aproximam às relações dos basaltos vesiculares, traquitos e fonólitos apresentados por RODRIGUEZ-LOSADA et. al. (2007). No que toca às rochas vulcânicas de origem piroclástica, os tufos da amostra n.º 6 apresentam, claramente, valores inferiores quando comparados com os basaltos compactos, mas aproximam-se das relações dos tufos de *lapilli* de PERNETA (2011), bem como dos ignimbritos e dos basaltos menos resistentes apresentados por RODRIGUEZ-LOSADA et. al. (2007).

Na Figura 85 representa-se a relação efectuada entre o módulo de deformabilidade e o peso volúmico seco das amostras estudadas neste trabalho, juntamente com um outro conjunto de amostras apresentadas por outros autores já referidos anteriormente. Esta correlação foi adaptada de uma outra já existente e apresentada por RODRIGUEZ-LOSADA et. al. (2007).

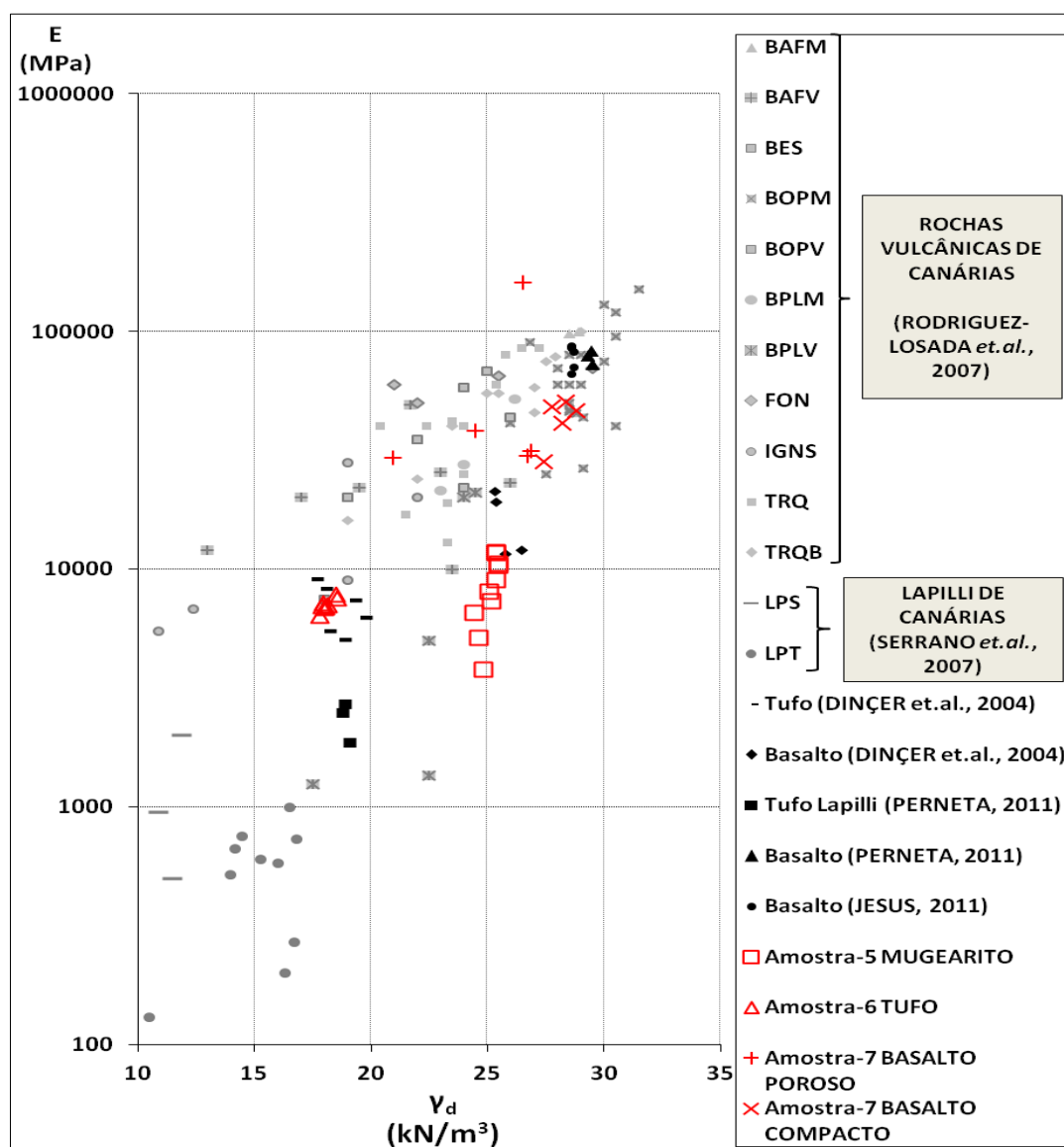


Figura 85 - Relação entre o módulo de deformabilidade e o peso volúmico seco das amostras n.ºs 5, 6 e 7 e de rochas de outras referências bibliográficas.

Observando apenas as amostras n.ºs 5, 6 e 7, constata-se que no caso dos tufos há pouca dispersão na relação de parâmetros, sendo que no caso dos mugaritos verifica-se uma maior dispersão e pode-se afirmar que, regra geral, à medida que aumenta ligeiramente o peso volúmico, há um aumento

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

considerável do módulo de deformabilidade. No caso dos basaltos, verifica-se também essa tendência, mas é menos acentuada por haver uma maior dispersão no gráfico.

Comparando os resultados das amostras deste trabalho com as outras referências, constata-se à partida que existe uma grande semelhança entre o tufo da amostra n.º 6 e o tufo apresentado por DINÇER *et. al.* (2004), sendo estes superiores aos *lapilli* de PERNETA (2011) e SERRANO *et. al.* (2007). No que toca aos valores do mugearito da amostra n.º 5, estes aproximam-se a alguns valores de basalto apresentados por DINÇER *et. al.* (2004). Já quanto aos valores do basalto compacto da amostra n.º 7, estes apresentam-se na mesma gama de módulos de deformabilidade, mas com maiores pesos volúmicos quando comparados com grande parte das rochas apresentadas por RODRIGUEZ-LOSADA *et. al.* (2007), exceptuando os valores dos basaltos apresentados por PERNETA (2011) e JESUS (2011) que revelam pesos volúmicos ligeiramente maiores.

Na Figura 86 passa-se a apresentar uma relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU para materiais piroclásticos consolidados, retirada de LOURENÇO *et. al.* (2010), a qual foi adaptada com amostras retiradas de outras referências bibliográficas e com a amostra n.º 6 (tufo) deste trabalho.

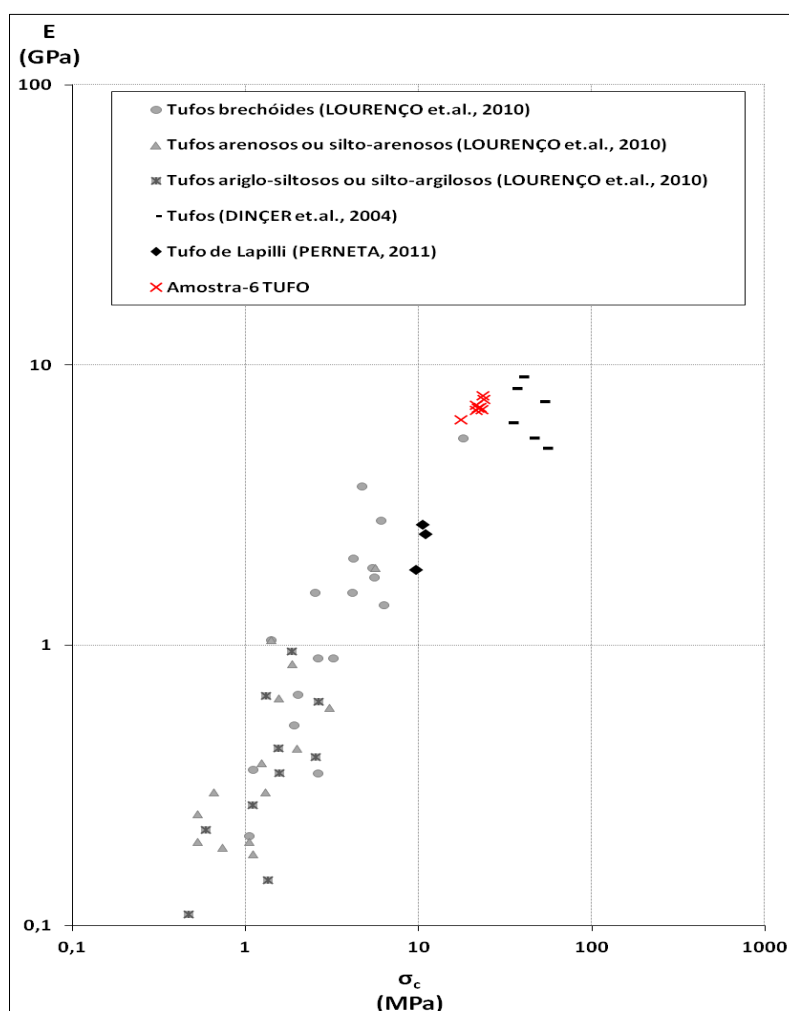


Figura 86 - Relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU da amostra n.º 6 e de rochas piroclásticas de outras referências bibliográficas.

Observando a relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU de todas as amostras, pode-se constatar que existe uma proporcionalidade directa, pois à medida que a RCU aumenta, o módulo de deformabilidade das rochas piroclásticas também aumenta, excepto o caso do tufo apresentado por

DINÇER *et. al.* (2004). Especificamente, o tufo da amostra n.º 6 apresenta-se afastado da maioria dos valores dos tufos apresentados por LOURENÇO *et. al.* (2010) e dos tufos de *lapilli* de PERNETA (2011), mas aproxima-se dos valores de tufos apresentados DINÇER *et. al.* (2004). Apesar disso, e embora menos evidente, a amostra n.º 6 apresenta também uma proporcionalidade directa entre parâmetros.

Na Figura 87 apresenta-se uma relação entre os mesmos parâmetros geotécnicos, também retirada de LOURENÇO *et. al.* (2010), só que neste caso é referente a dados de rochas basálticas apresentadas pelos autores, juntamente com outros basaltos de outras referências bibliográficas e as amostras n.ºs 5 e 7 estudadas neste trabalho.

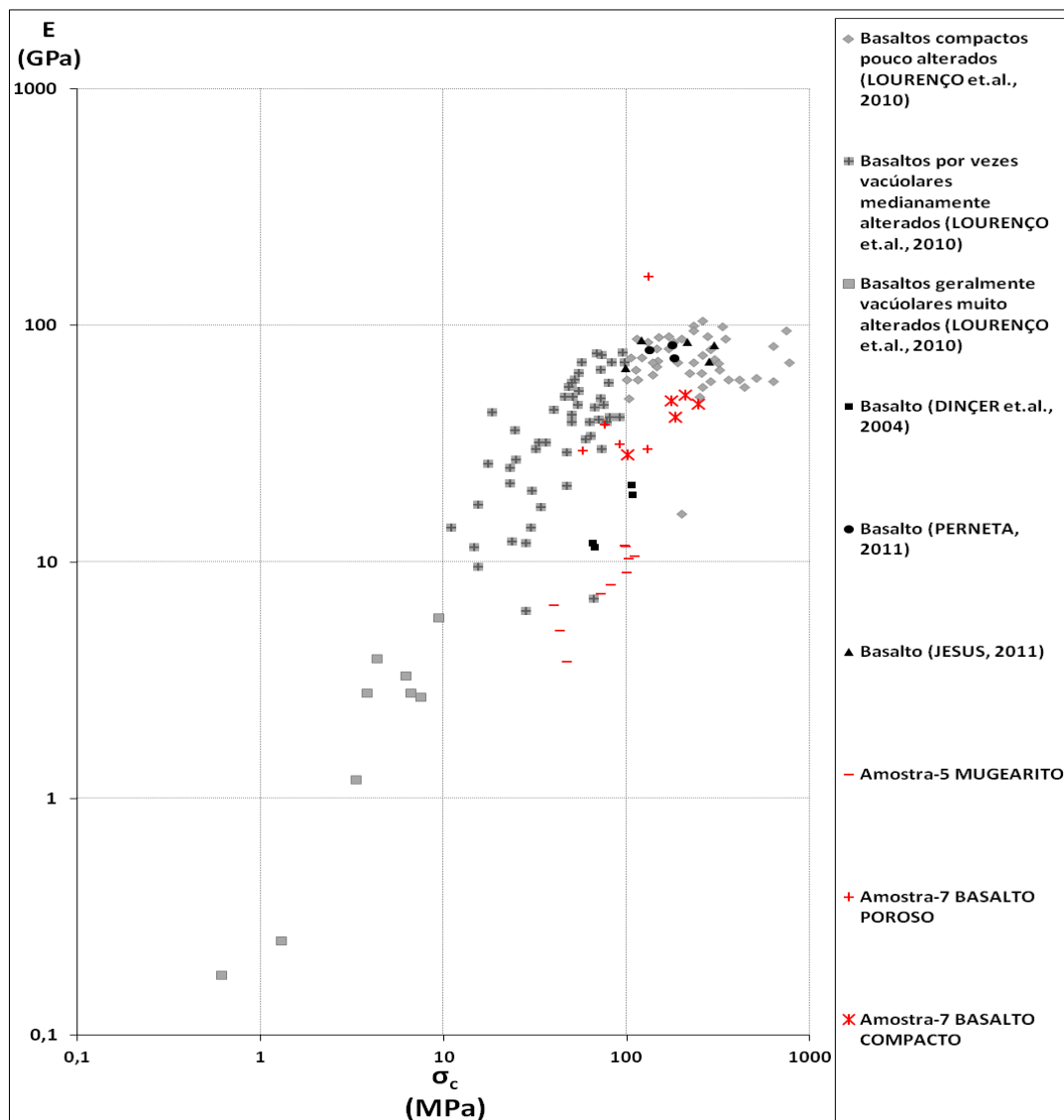


Figura 87 - Relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU das amostras n.ºs 5 e 7 e de rochas basálticas de outras referências bibliográficas.

Tal como se constatou para a Figura 86, esta relação evidencia a mesma proporcionalidade directa entre os parâmetros geotécnicos das rochas apresentadas pelos diversos autores. Já quanto às rochas amostradas neste trabalho, constata-se também uma proporcionalidade directa referente ao mugearito (amostra n.º 5) e, menos evidente, ao basalto compacto da amostra n.º 7, deixando como excepção o basalto poroso da mesma amostra, dada a sua tendência para um aumento da RCU sem aumentar o respectivo módulo de deformabilidade.

ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

Na próxima figura, optou-se por fazer uma junção de dados das duas últimas figuras (Figura 86 e 87), de modo a obter uma perspectiva entre dois tipos de rochas vulcânicas: as de origem basáltica e as de origem piroclástica.

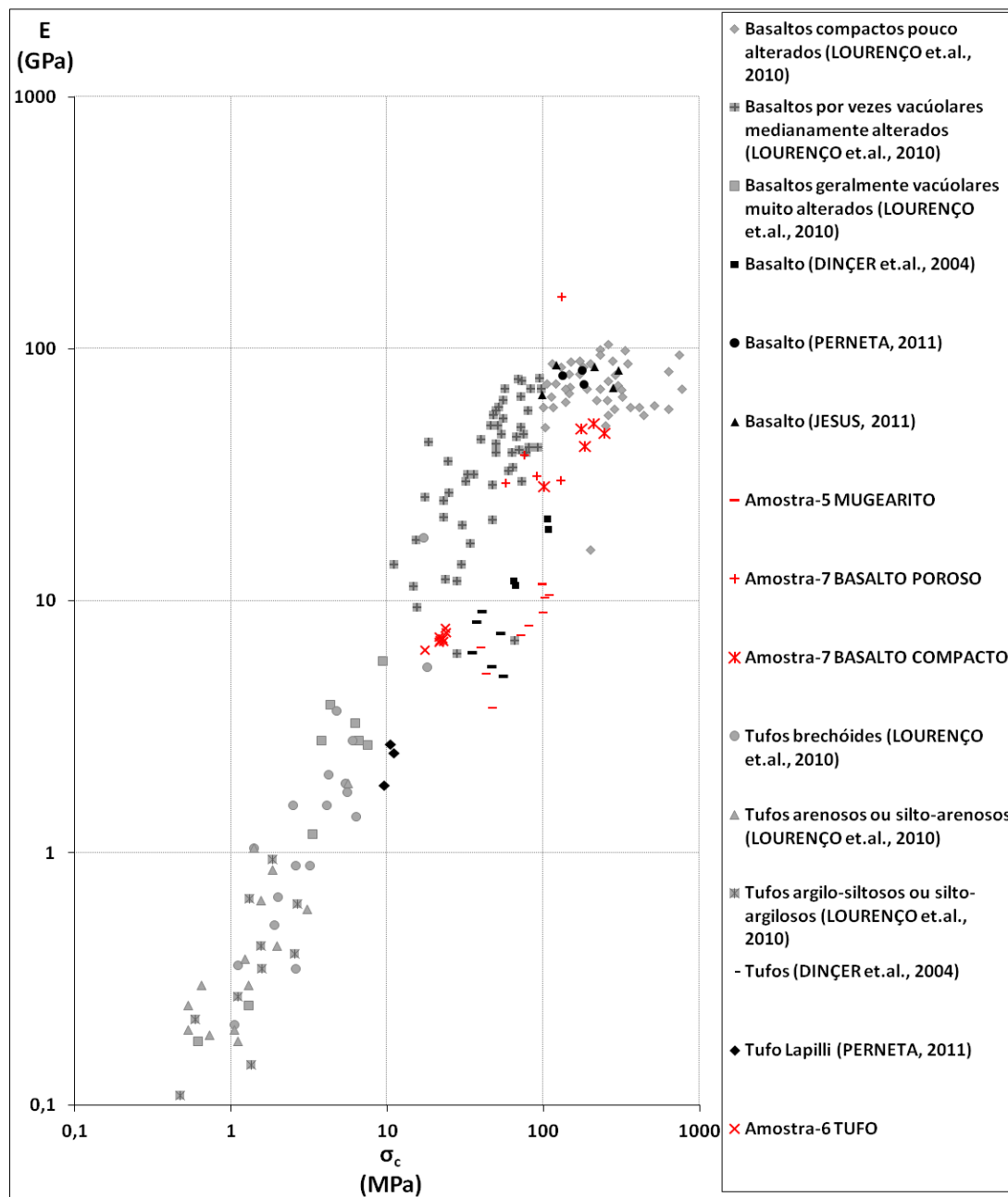


Figura 88 - Relação entre o módulo de deformabilidade e a RCU das amostras n.ºs 5, 6 e 7 e de rochas de origem vulcânica de outras referências bibliográficas.

Analisando a Figura 88, constata-se uma proporcionalidade directa entre a RCU e o módulo de deformabilidade das rochas, observando todo um trecho de crescimento proporcional de ambos os parâmetros geotécnicos.

Quanto à comparação dos vários tipos de rocha presentes no gráfico da Figura 88, pode-se constatar que o tufo da amostra n.º 6, juntamente com o tufo de DINÇER *et. al.* (2004) e o tufo de *lapilli* de PERNETA (2011), situa-se numa zona de transição entre as rochas piroclásticas e as rochas ígneas propriamente ditas, evidenciando uma clara resistência mecânica elevada para um piroclasto rochoso consolidado. É curioso notar que os valores do mugarito (amostra n.º 5) situam-se próximo dos valores do tufo de

DINÇER *et. al.* (2004), mas também dos valores de alguns basaltos, o que leva a crer que a rocha mugarítica pode ter um comportamento mecânico aproximado ao dos basaltos porosos/vesiculares.

Por último, na Figura 89, apresenta-se uma correlação interessante entre a RCU e a absorção de água de materiais rochosos oriundos do Japão, retirada de ITO *et. al.* (2007), na qual se inclui os valores correspondentes às amostras estudadas neste trabalho.

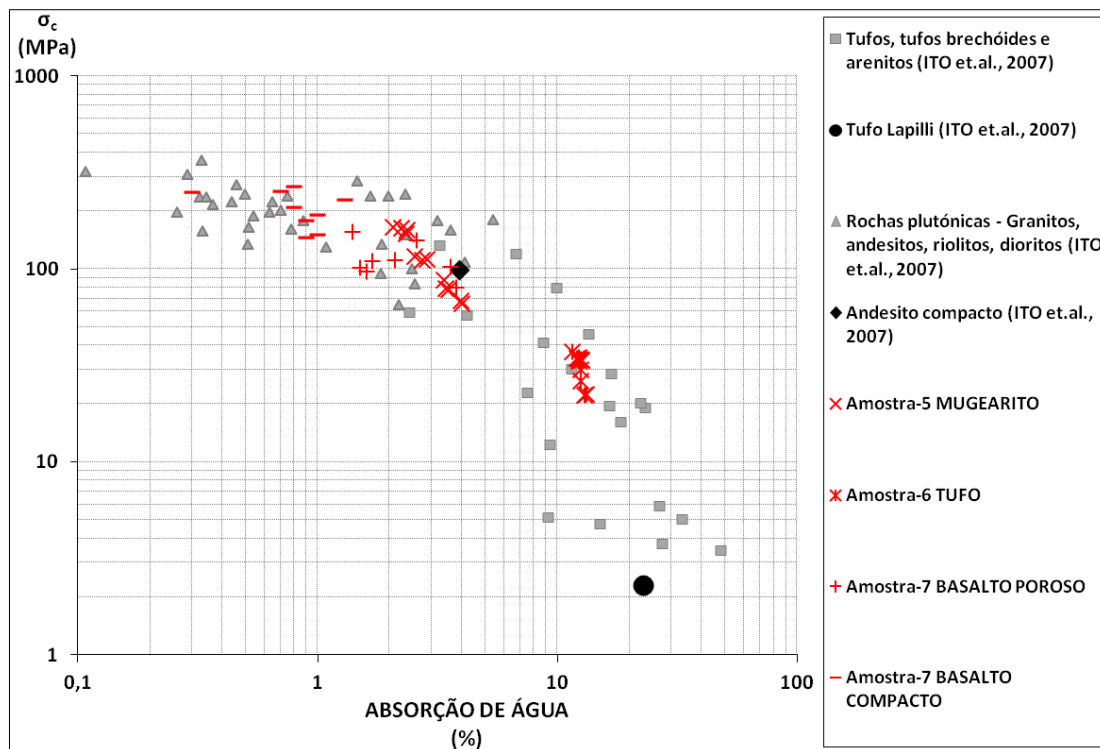


Figura 89 – Relação entre a RCU e a absorção de água [adaptado de ITO *et. al.* (2007)].

Na Figura 89 pode-se constatar que existe uma ligação entre a resistência à compressão de uma rocha e a sua capacidade de absorção de água à pressão atmosférica. A relação entre estes dois parâmetros referente ao basalto compacto da amostra n.º 7 é equiparada às razões apresentadas por ITO *et. al.* (2007) para as rochas plutónicas daquela área geográfica japonesa. Também se pode dizer que as razões do basalto poroso da amostra n.º 7 e do mugarito (amostra n.º 5) são assimiláveis às das rochas plutónicas, porém tendendo para uma zona de transição entre essas e os tufos, tufos brechóides e arenitos apresentados pelos autores. Já quanto aos valores do tufo da amostra n.º 6, estes enquadram-se perfeitamente, e com menos dispersão, nos valores dos tufos apresentados pelos autores. ITO *et. al.* (2007) apresenta ainda uma relação para um tufo de *lapilli* amostrado, o qual não se enquadra com os valores dos restantes tufos presentes no gráfico. Os autores apresentam também uma relação de valores médios para um andesito compacto, o qual se enquadra na zona de transição entre as rochas plutónicas e os tufos japoneses, bem como nos valores das amostras de mugarito e de basalto poroso estudadas neste trabalho.

Por fim, pode-se constatar que à medida que a percentagem de absorção de água cresce para os 10%, existe de facto uma diminuição gradual da RCU, sendo que para valores de absorção de água maiores que 10% é verificada uma diminuição mais brusca da RCU da rocha. Por isso, e de um modo geral, o gráfico da Figura 89 demonstra uma proporcionalidade indirecta entre os dois parâmetros geotécnicos representados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização geológica-geotécnica de qualquer que seja o material geológico em estudo é sempre um marco importante para a obtenção de informações e parâmetros que se consideram relevantes para projectos geotécnicos ou para qualquer componente geotécnica de um projecto de engenharia civil.

O objectivo fulcral desta dissertação é contribuir para a caracterização geológica-geotécnica de um conjunto de materiais geológicos, sendo os materiais amostrados pertencentes a 4 das 7 unidades vulcano-estratigráficas que constituem a ilha da Madeira. O trabalho efectuado integra-se também na intenção de criar uma fonte de informação geológica e geotécnica acerca das formações vulcânicas da ilha da Madeira, e respectivos materiais terrosos e rochosos, sendo que fica em aberto a continuidade de estudos nesta temática.

No decorrer das caracterizações geológicas e geotécnicas efectuadas, e sendo este trabalho, na sua maioria, de carácter prático – tendo em conta que todo o seu conteúdo gira à volta de estudos macroscópicos de maciços geológicos e de resultados de ensaios laboratoriais – é normal a possibilidade de ocorrer situações inesperadas que alteram a linha traçada para o processo de caracterização. Assim, e de modo a ressaltar considerações para trabalhos futuros nesta temática, achou-se importante referir alguns aspectos recorrentes do trabalho efectuado.

No que toca à caracterização geológica, importa referir algumas limitações sentidas aquando do estudo das descontinuidades em maciços rochosos, nomeadamente na determinação da extensão das descontinuidades. Uma vez que as dimensões dos maciços rochosos são de uma escala megascópica, torna-se difícil obter o parâmetro supracitado. O estudo das descontinuidades é efectuado em função dos afloramentos rochosos existentes, nos quais é comum encontrarem-se zonas cobertas por vegetação, por infra-estruturas ou por outros materiais geológicos diferentes. Sendo assim, e no caso deste trabalho, o parâmetro extensão das descontinuidades foi sempre difícil de determinar, pois a área visível dos afloramentos rochosos é insuficiente para que se consiga medir a persistência das fracturas. Trata-se de um estudo que requer a existência de condições geológicas fortuitas, como também de uma vasta experiência na observação de maciços rochosos.

Quanto à caracterização geotécnica, importa ressaltar alguns aspectos relacionados com resultados dos ensaios, bem como com a análise dos parâmetros geotécnicos obtidos.

Dada a possibilidade de, numa amostra do mesmo tipo de rocha, resultar provetes diferentes quanto ao seu volume de vazios, conclui-se que foi boa opção ter separado os provetes da amostra n.º 7 (basalto) em dois grupos distintos: basalto poroso e basalto compacto. A caracterização geotécnica efectuada aos dois grupos de provetes distintos quanto à sua porosidade, e conseqüente peso volúmico, resultou mais esclarecedora quanto à análise e comparação dos parâmetros geotécnicos obtidos.

Os resultados obtidos do ensaio esclerométrico com o martelo de Schmidt (tipo N), para a amostra n.º 7 (basalto), nomeadamente a resistência à compressão estimada através da dureza de ressalto, revelaram-se muito baixos quando comparados com os valores da resistência à compressão uniaxial obtida em laboratório e, por isso, houve a curiosidade de descobrir o porquê de tais valores. Os ábacos utilizados, disponíveis no manual de instruções do martelo, destinam-se a provetes cilíndricos com diâmetro de 150 mm e os provetes ensaiados possuíam diâmetros de 70 mm, o que resultou em uma menor área

CONSIDERAÇÕES FINAIS

disponível na superfície lateral curva do provete para o embate do êmbolo do martelo, podendo ser a causa dos valores reduzidos de dureza de ressalto. Refira-se também que as escalas do ábaco são relativamente pequenas, pois o eixo da dureza de ressalto apresenta um valor máximo de 55 e o eixo da resistência à compressão apresenta um valor máximo de 60 N/mm² (MPa), levantando algumas suspeitas quanto à credibilidade do gráfico, visto que as rochas mais resistentes (basalto, por exemplo) apresentam normalmente valores superiores a 60 MPa de resistência à compressão uniaxial. Por isso, optou-se por fazer uma pesquisa bibliográfica para encontrar outro ábaco que relacionasse os mesmos parâmetros, tendo encontrado apenas ábacos destinados a valores de martelos de Schmidt do tipo L. A pesquisa por ábacos destinados a valores de martelos de tipo N resultou infrutífera, concluindo que é difícil provar a existência de ábacos que relacionem a resistência à compressão com a dureza de ressalto obtida através de martelo de Schmidt do tipo N.

Ainda no âmbito da caracterização geotécnica, e ao contrário do que foi feito com os resultados da caracterização às amostras rochosas, refira-se que os resultados das amostras terrosas foram particularmente difíceis de comparar com resultados de outras referências bibliográficas. Deve-se ao facto de ser difícil encontrar solos estudados por outros autores, que sejam considerados como idênticos ou semelhantes aos solos estudados neste trabalho, pois cada solo sofre o seu processo exclusivo de formação, que depende de vários factores, e caso não sejam solos amostrados de um mesmo maciço ou de uma mesma área geológica, é pouco coerente compará-los entre si. No caso deste trabalho, tentou-se comparar os solos estudados com solos de outras referências com a maior coerência possível, tendo em conta factores como a vulcano-estratigrafia (no caso dos solos de uma mesma região) e os processos de formação, se são de origem vulcânica ou de origem sedimentar (caso de aluviões/enxurradas).

Consideram-se, deste modo, que as disposições supracitadas podem vir a ser úteis para os trabalhos que venham a ser efectuados no âmbito de caracterizações geológicas e geotécnicas de formações vulcânicas da ilha da Madeira, que visem a obtenção dos mesmos parâmetros.

Para concluir, considera-se que os objectivos traçados para a caracterização geológica-geotécnica de formações vulcânicas da ilha da Madeira foram atingidos, deixando em aberto a continuação de estudos nesta temática, de modo a contribuir para a existência de um banco de dados geológico-geotécnicos, para a complementação da informação geológica existente, bem como para a elaboração de uma carta geotécnica respeitante aos materiais oriundos das formações vulcânicas da ilha da Madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D 2487 – 00. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).

ASTM D 2974 – 07a. Standard methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils.

ASTM D 7012 – 04. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures.

BRUM DA SILVERA, A., MADEIRA, J., RAMALHO, R., FONSECA, P. E., PRADA, S. 2010. Carta geológica (folhas A e B) e notícia explicativa da Carta Geológica da Madeira à escala 1:50000. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais. Governo da Região Autónoma da Madeira e Universidade da Madeira. Funchal.

CANHA, E. R. 2007. Património Natural da Ilha da Madeira. Estudo de um local de interesse geológico: Cone de Piroclastos da N.^a Sr.^a da Piedade. Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para a obtenção do grau de mestre em Ciências da Terra e da Vida. Universidade da Madeira.

COSTA, C. N. 2006. Sebenta da disciplina de Fundamentos de Geotecnia. Capítulo 3 – Introdução à descrição e classificação das rochas. Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. 2006/2007.

DINÇER, I., ACAR, A., ÇOBANOĞLU, I., URAS, Y. 2004. Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63(2): 141-148.

GELDMACHER, J., VAN DEN BOGGARD, P., HOERNLE, K., SCHMINCKE, H.-U. 2000. The 40 Ar/ 39 Ar age dating of the Madeira Archipelago and hotspot track (eastern North Atlantic). *Geochemistry, Geophysics, geosystems*, vol. 1.

GONZALEZ DE VALLEJO, L. I., HIJAZO, T., FERRER, M., SEISDEDOS, J. 2007. Geomechanical characterization of volcanic materials in Tenerife. In *Volcanic Rocks - MALHEIRO & NUNES (Eds)*. Londres, Taylor & Francis Group.

ISRM. 1977. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on standardization of laboratory and field tests. International [10] Society for Rock Mechanics. *Internacional Journal of Rock Mechanics. Mining Science & Geomechanics. Abstr. Vol. 15*, pp. 319 – 368. Pergamon Press, Ltd. Great Britain. 1978.

ISRM. 1978. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks (Part 3 - Suggested method for determination of the Schmidt rebound hardness). Commission on standardization of laboratory and field tests. International Society for Rock Mechanics. *Internacional Journal of Rock Mechanics. Mining Science & Geomechanics. Abstr. Vol. 15*, pp. 89 – 97. Pergamon Press, Ltd. Great Britain. 1978

ISRM. 1980. Basic Geotechnical Description of rock masses. Commission on classification of rocks and rock masses. International Society for Rock Mechanics. *Internacional Journal of Rock Mechanics. Mining Science & Geomechanics. Abstr. Vol. 18*, pp 85 - 110. Pergamon Press, Ltd. Great Britain. 1981

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ITO, Y., AGUI, K., KUSAKABE, Y., SAKAMOTO, T. 2007. Rock failures in volcanic rock area in Hokkaido. In *Volcanic Rocks* - MALHEIRO & NUNES (Eds). Londres, Taylor & Francis Group.
- JESUS, F. A. F. 2011. Caracterização geológica e geotécnica das formações do Complexo Vulcânico Superior da ilha da Madeira – Unidade do Funchal. Tese de Mestrado. Centro de Competências e Ciências Exactas e Engenharias. Universidade da Madeira.
- LADEIRA, F. L. 1986. Conceitos em Mecânica das Rochas e caracterização mecânica de rochas (Módulo 1). Departamento de Geociências. Universidade de Aveiro.
- LIMA, C. & MENEZES, J. 2008. Texto de apoio da disciplina de Geologia de Engenharia da Faculdade de Engenharias da Universidade do Porto (documentos PDF). FEUP
- LNEC E 195-1966. SOLOS. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. Especificação do LNEC. Documentação normativa. MOP – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- LNEC E 196-1966. SOLOS. Análise granulométrica. Especificação do LNEC. Documentação normativa. MOP – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- LNEC E 199-1967. SOLOS. Ensaio de equivalente de areia. Especificação do LNEC. Documentação normativa. MOP – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- LOURENÇO, J. C., BRITO, J. M., SANTOS, J., ROSA, S. P. P., RODRIGUES V. C., OLIVA, R. 2010. Geotechnical characterization of volcanic rocks and soils of Madeira Island. In *Volcanic Rock Mechanics* - OLALLA et. al. (Eds). Londres, Taylor & Francis Group.
- MADEIRA, J., BRUM DA SILVEIRA, A., RAMALHO, R., FONSECA, P., PRADA, S. 2007. Relatório técnico da carta geológica da ilha da Madeira. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais. Governo Regional da Região Autónoma da Madeira. Dezembro de 2007.
- MALHEIRO, A. M., NUNES, J. C. 2007. Volcanostratigraphic profiles for the Azores region: A contribution for the EC8 Regulations and the characterization of volcanic rocks geomechanical behavior. In *Volcanic Rocks* - MALHEIRO & NUNES (Eds). Londres, Taylor & Francis Group.
- MOURA, F., RIBEIRO E SOUSA, L. 2007. Road tunnels at Madeira Island, Portugal. In *Volcanic Rocks* - MALHEIRO & NUNES (Eds). Londres, Taylor & Francis Group.
- NP – 143. 1969. SOLOS. Determinação dos limites de consistência. Norma portuguesa definitiva.
- NP – 83. 1965. SOLOS. Determinação de densidade das partículas. Norma portuguesa definitiva.
- NP – 84. 1965. SOLOS. Determinação do teor em água. Norma portuguesa definitiva.
- NP – EN – 13755. 2008. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da absorção de água à pressão atmosférica. Norma Portuguesa. Versão portuguesa da EN 13755:2008. 2ª Edição. Novembro de 2008.
- NP - EN 1926. 2008. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão uniaxial. Norma Portuguesa. Versão portuguesa da EN 1926:2006. 2ª Edição. Setembro de 2008.
- NP – EN 1936. 2001. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Norma Portuguesa. Versão portuguesa da EN 1936:1999. Julho de 2005.

NUNES, J. C. 2002. Novos conceitos em vulcanologia: erupções, produtos e paisagens vulcânicas. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. In *Genovas*, n.º 16, pp. 5 a 22. Associação Portuguesa de Geólogos. Ponta Delgada.

PERNETA, J. P. S. 2011. Caracterização geológica e geotécnica dos complexos vulcânicos Antigo e Intermédio da ilha da Madeira. Dissertação de Mestrado. Centro de Competências e Ciências Exactas e Engenharias. Universidade da Madeira.

POTRO, R., HÜRLIMANN, M. 2007. Strength of volcanic rock masses in edifice instability: Insights from Teide, Tenerife. In *Volcanic Rocks - MALHEIRO & NUNES (Eds)*. Londres, Taylor & Francis Group.

PRADA, S. L. R. N. 2000. Geologia e recursos hídricos subterrâneos da ilha da Madeira. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Geologia. Universidade da Madeira.

PRAM - Plano Regional da Água da Madeira. 2002. 1ª Parte – Caracterização e diagnóstico da situação actual (TOMO I – Memória descritiva). Instituto da Água. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais. Governo da Região Autónoma da Madeira. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente. República Portuguesa. Revisão 2. Agosto de 2002.

PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT. 2006. Concrete Test Hammer N/NR – L/LR. Operating Instructions. PROCEQ, S.A. SWITZERLAND. 2006.

ROCHA, M. 1981. Mecânica das Rochas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Reimpressão no sector de artes gráficas do LNEC. Lisboa. 1985.

RODRÍGUEZ-LOSADA, J. A., HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, L. E., LOMOSCHITZ MORA-FIGUEROA, A. 2007. Geotechnical features of the welded ignimbrites of the Canary islands. In *Volcanic Rocks - MALHEIRO & NUNES (Eds)*. Londres, Taylor & Francis Group.

RODRÍGUEZ-LOSADA, J. A., HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, L. E., OLALLA, C., PERUCHO, A., SERRANO, A., POTRO, R. 2007. The volcanic rocks of the Canary islands. Geotechnical properties. In *Volcanic Rocks - MALHEIRO & NUNES (Eds)*. Londres, Taylor & Francis Group.

SCHMINCKE, H.-U. 2004. *Volcanism*. 2ª Ed. Springer Berlin Heidelberg. Nova Iorque.

SERRANO, A., OLALLA, C., PERUCHO, A., HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, L. E. 2007. Strength and deformability of low density pyroclasts. In *Volcanic Rocks - MALHEIRO & NUNES (Eds)*. Londres, Taylor & Francis Group.

Sítios de internet consultados:

<http://e-geo.ineti.pt/bds/geobases/petrografia/rochas.aspx?ID=8>

http://sparkcharts.sparknotes.com/gensci/geology_earthsci/section7.php

http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Geotecnia/Fundamentos_Geotecnia/3_rochas_solos.pdf

www.usgs.gov

ANEXOS

ANEXO I

Neste anexo apresentam-se os quadros com os resultados das análises granulométricas efectuadas às amostras de solo.

Quadro 49 – Resultados da análise granulométrica realizada ao solo referente à amostra n.º 1 (sítio da Fajã de Milho, Porto da Cruz).

AMOSTRA N.º 1				
	Provete A		Provete B	
	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	Material passado, acumulado (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	Material passado, acumulado (%)
FRACÇÃO GROSSA	2,00	100,0	2,00	100,0
FRACÇÃO FINA	0,850	91,5	0,850	90,2
	0,425	79,6	0,425	77,6
	0,250	69,9	0,250	68,1
	0,106	54,2	0,106	53,4
	0,075	49,5	0,075	48,5
SEDIMENTAÇÃO	0,0417	47,6	0,0418	46,8
	0,0298	45,1	0,0303	41,8
	0,0196	37,6	0,0196	36,9
	0,0117	30,0	0,0119	27,0
	0,0085	24,6	0,0086	21,8
	0,0062	19,5	0,0062	16,7
	0,0031	14,4	0,0031	11,7
	0,0013	9,2	0,0013	9,1
	0,0009	6,8	0,0010	4,2

Quadro 50 - Resultados da análise granulométrica realizada ao solo sedimentar referente à amostra n.º 2 (solo de granulometria grosseira do cais do Porto da Cruz).

AMOSTRA N.º 2				
	Provete A		Provete B	
	Diâmetro equivalente das partículas	Material passado, acumulado	Diâmetro equivalente das partículas	Material passado, acumulado
	(mm)	(%)	(mm)	(%)
FRACÇÃO GROSSA	50,00	100,0	50,00	100,0
	37,50	97,0	37,50	97,3
	25,00	93,3	25,00	93,7
	19,00	90,3	19,00	91,2
	9,50	83,2	9,50	83,3
	4,75	77,3	4,75	77,5
	2,00	68,7	2,00	69,2
FRACÇÃO FINA	0,850	56,7	0,850	56,8
	0,425	46,5	0,425	46,5
	0,250	39,1	0,250	39,2
	0,106	28,3	0,106	28,2
	0,075	25,1	0,075	21,1
SEDIMENTAÇÃO	0,0420	18,6	0,0423	18,6
	0,0304	16,3	0,0303	17,4
	0,0199	12,8	0,0198	13,9
	0,0118	10,4	0,0119	10,3
	0,0085	8,0	0,0086	8,0
	0,0062	5,7	0,0062	5,6
	0,0031	3,2	0,0031	3,2
	0,0013	0,8	0,0013	0,8
	0,0009	0,9	0,0009	0,8

Quadro 51 - Resultados da análise granulométrica realizada ao solo sedimentar referente à amostra n.º 3 (solo de granulometria intermédia do cais do Porto da Cruz).

AMOSTRA N.º 3				
	Provete A		Provete B	
	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	Material passado, acumulado (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	Material passado, acumulado (%)
FRACÇÃO GROSSA	19,00	100,0	19,00	100,0
	9,50	100,0	9,50	99,5
	4,75	98,2	4,75	98,1
	2,00	94,8	2,00	94,1
FRACÇÃO FINA	0,850	85,1	0,850	82,8
	0,425	68,7	0,425	66,4
	0,250	55,9	0,250	53,5
	0,106	38,5	0,106	36,0
	0,075	34,5	0,075	31,8
SEDIMENTAÇÃO	0,0406	26,5	0,0426	21,9
	0,0294	23,8	0,0308	19,3
	0,0192	19,9	0,0199	16,7
	0,0116	14,6	0,0118	12,9
	0,0084	12,0	0,0085	10,3
	0,0060	10,6	0,0061	7,7
	0,0030	6,5	0,0031	5,0
	0,0013	5,0	0,0013	3,7
	0,0009	3,7	0,0009	2,3

Quadro 52 - Resultados da análise granulométrica realizada ao solo sedimentar referente à amostra n.º 4 (solo de granulometria fina do cais do Porto da Cruz).

AMOSTRA N.º 4				
	Provete A		Provete B	
	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	Material passado, acumulado (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	Material passado, acumulado (%)
FRACÇÃO GROSSA	2,00	100,0	2,00	100,0
FRACÇÃO FINA	0,850	99,6	0,850	99,7
	0,425	98,2	0,425	99,3
	0,250	96,7	0,250	98,8
	0,106	93,3	0,106	97,2
	0,075	91,7	0,075	95,8
SEDIMENTAÇÃO	0,0382	71,0	0,0334	76,8
	0,0278	65,6	0,0246	72,3
	0,0183	57,4	0,0167	63,3
	0,0114	41,0	0,0106	47,4
	0,0083	32,7	0,0081	33,8
	0,0060	27,2	0,0059	29,3
	0,0031	15,9	0,0030	20,1
	0,0013	10,4	0,0013	10,9
	0,0009	7,6	0,0009	8,6

ANEXO II

Neste anexo apresentam-se os diagramas com os parâmetros necessários para determinar os limites de liquidez das amostras de solo.

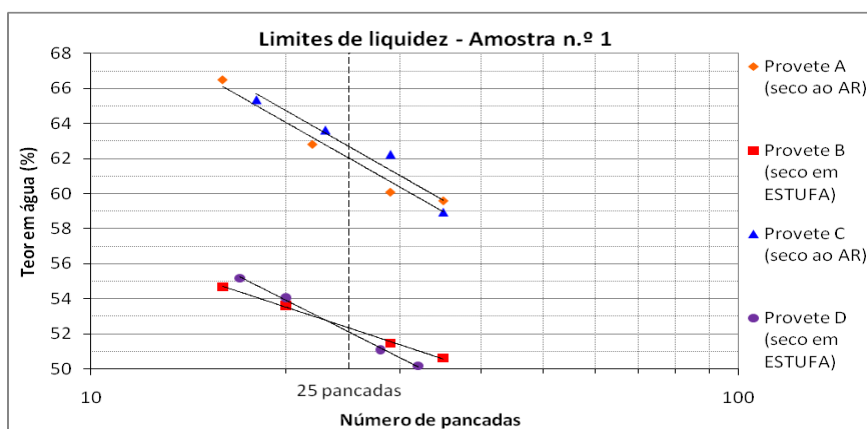


Figura 90 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 1, (solo da Fajã de Milho, Porto da Cruz).

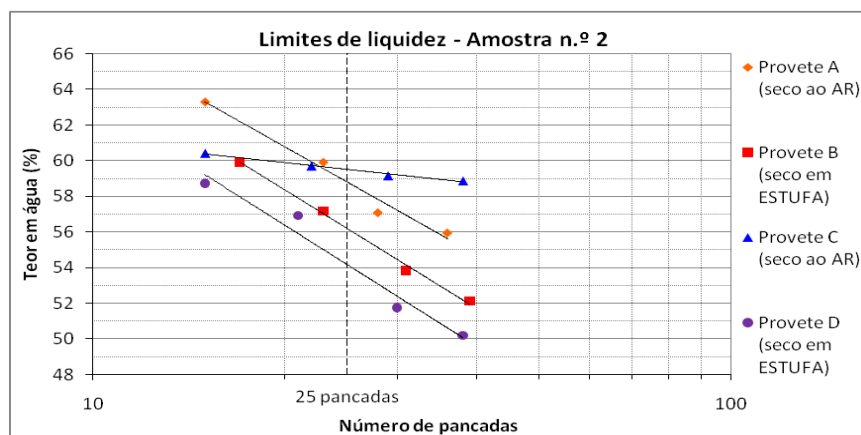


Figura 91 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 2, (solo de granulometria grosseira do cais do Porto da Cruz).

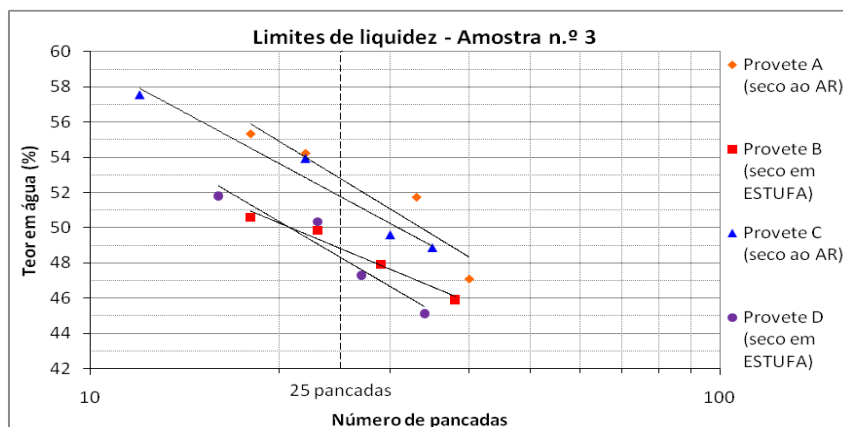


Figura 92 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 3, (solo de granulometria intermédia do cais do Porto da Cruz).

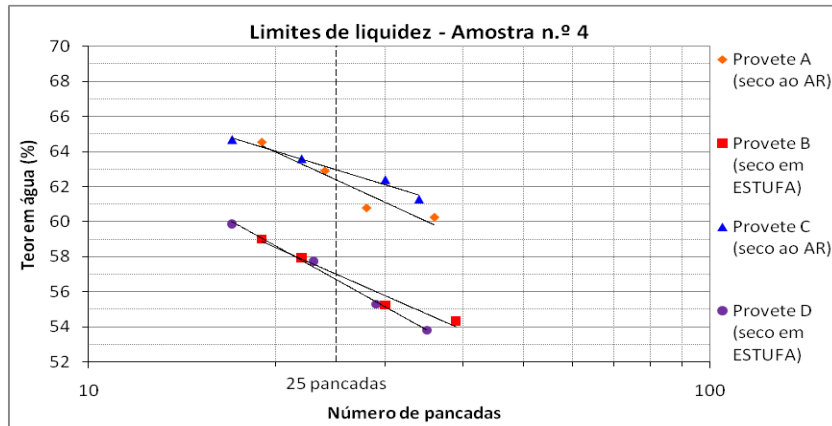


Figura 93 - Diagrama da relação do número de pancadas com o teor em água, para obtenção do limite de liquidez, referente à amostra n.º 4, (solo de granulometria fina do cais do Porto da Cruz).

ANEXO III

Neste anexo apresentam-se resultados do ensaio esclerométrico com o martelo de Schmidt (tipo N), nomeadamente os ábacos destinados a estimar a resistência à compressão através da dureza de ressalto de Schmidt obtida no ensaio.

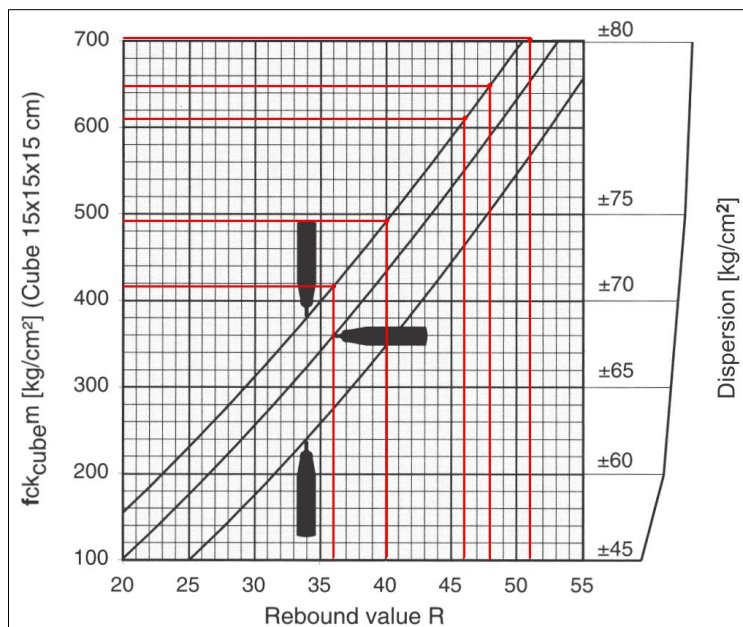


Figura 94 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 5 (blocos de mugarito), a partir dos valores médios das durezas de ressalto de Schmidt obtidas no respectivo ensaio esclerométrico [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].

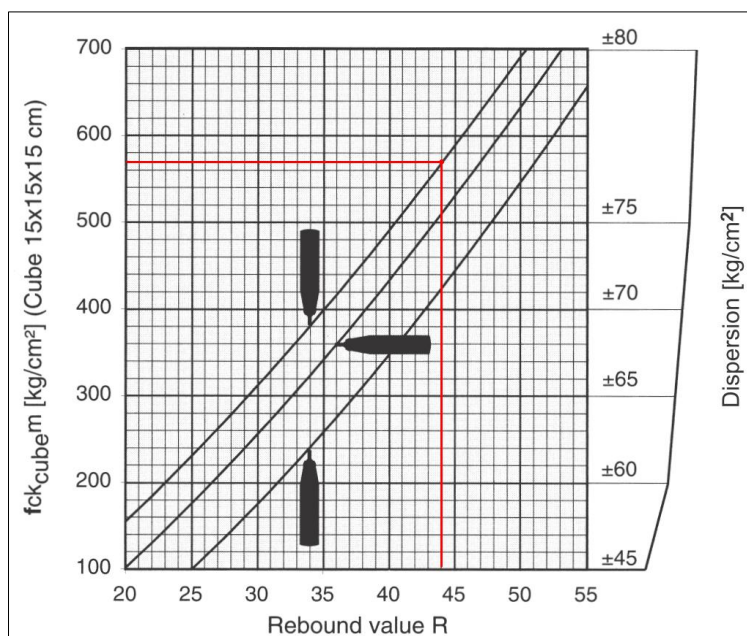


Figura 95 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 5 (blocos de mugarito), a partir do valor médio absoluto de dureza de ressalto de Schmidt obtido [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].

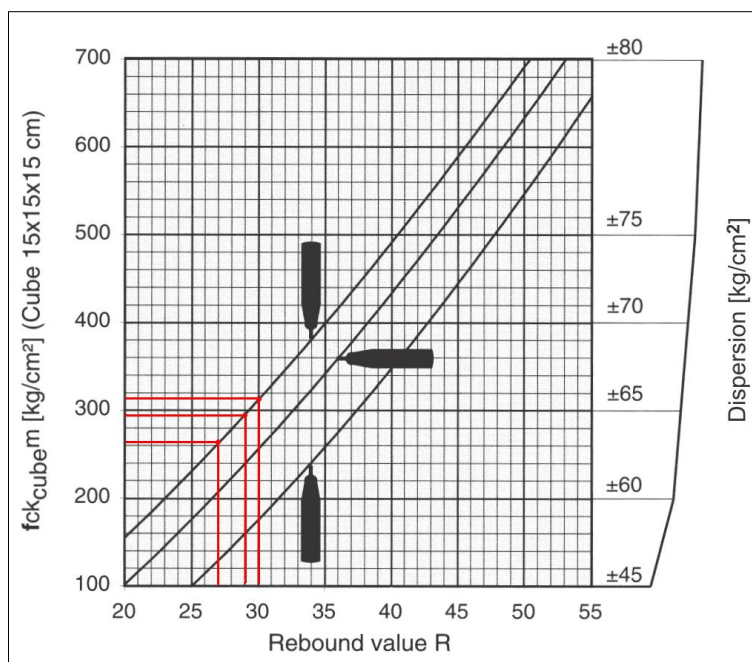


Figura 96 - Âbaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 6 (blocos de tufo), a partir dos valores médios das durezas de ressalto de Schmidt obtidas no respectivo ensaio esclerométrico [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].

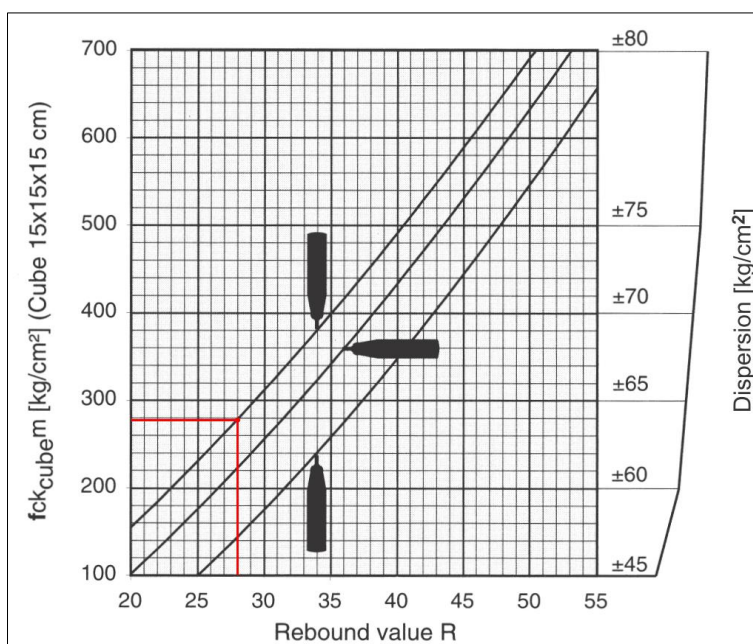


Figura 97 - Âbaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 6 (blocos de tufo), a partir do valor médio absoluto de dureza de ressalto de Schmidt obtido [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].

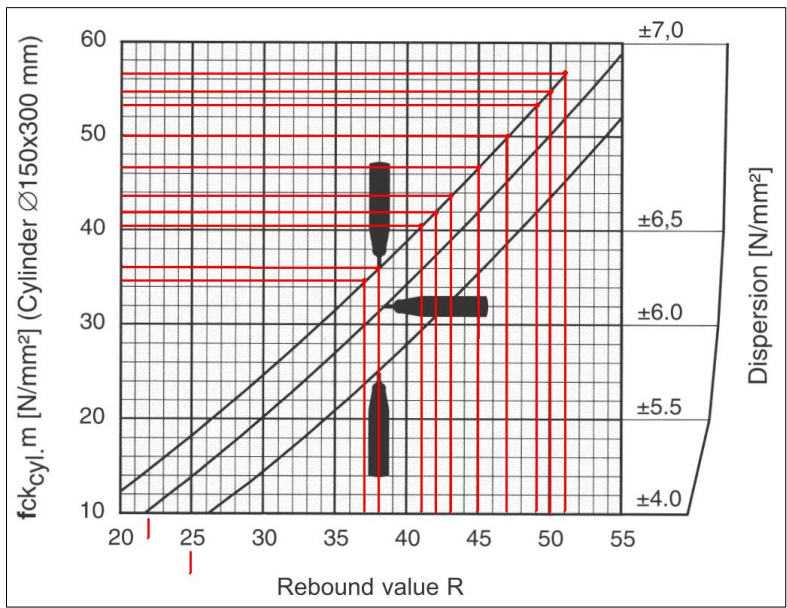


Figura 98 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 7 (carotes cilíndricos de basalto), a partir dos valores médios das durezas de ressalto de Schmidt obtidas no respectivo ensaio esclerométrico [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].

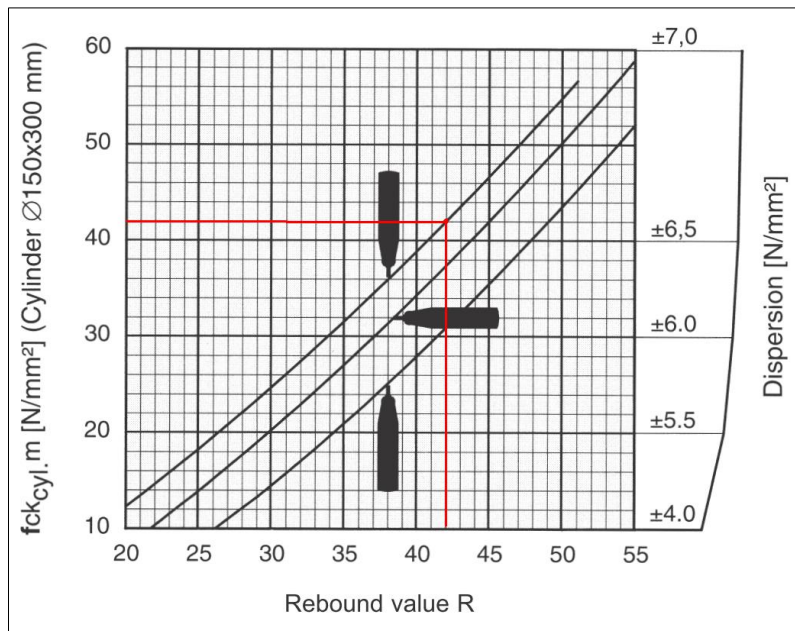


Figura 99 - Ábaco para estimar a resistência à compressão da amostra n.º 7 (carotes cilíndricos de basalto), a partir do valor médio absoluto de dureza de ressalto de Schmidt obtido [Fonte: adaptado de PROCEQ ORIGINAL SCHMIDT (2006)].

ANEXO IV

Neste anexo apresentam-se as curvas da relação tensão-extensão, obtidas durante o ensaio para a determinação do módulo de deformabilidade da amostra de mugarito (amostra n.º 5).

As curvas de tensão-extensão contidas nas Figuras 106 e 114 apresentam um comportamento anormal significativo, a partir de uma determinada tensão de carregamento, comportamento que não influenciou os cálculos para a determinação do respectivo módulo de deformabilidade. Presume-se que esse comportamento anómalo deve-se à alteração do segmento de leitura efectuado pelo vídeo-extensómetro, apenas depois da ocorrência de fissuras/fracturas localizadas, na superfície lateral do provete.

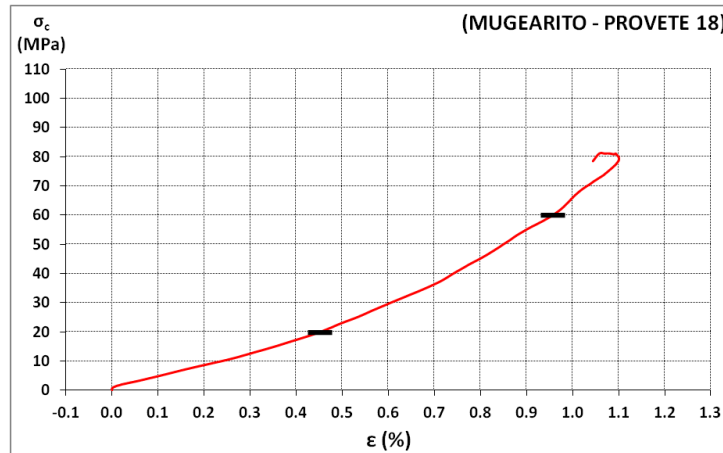


Figura 100 – Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 18 de mugarito (amostra n.º 5).

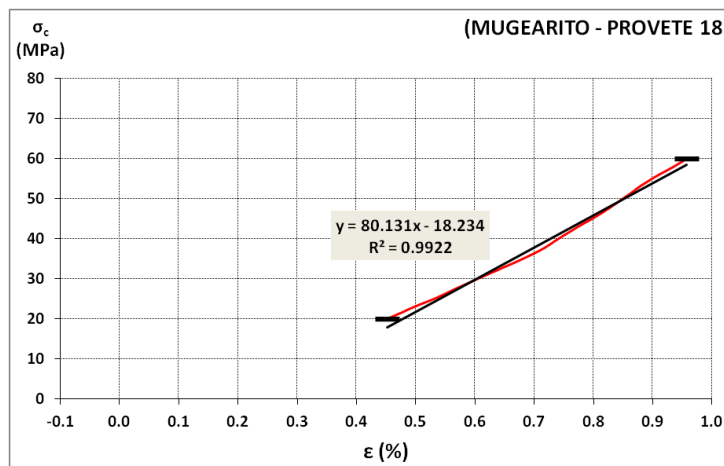


Figura 101 – Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 18 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

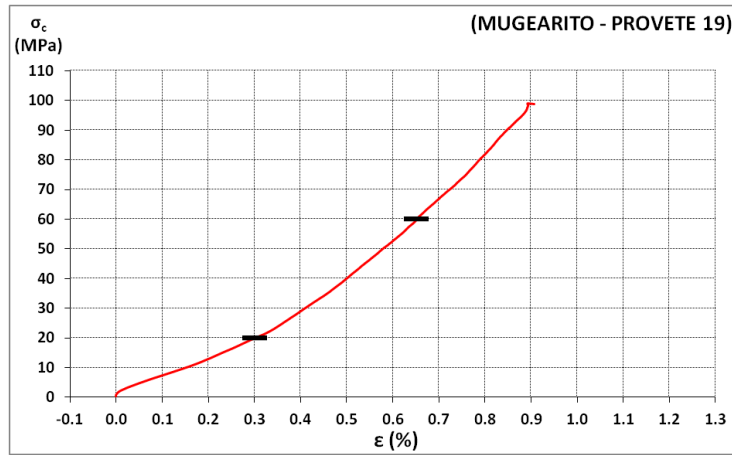


Figura 102 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 19 de mugarito (amostra n.º 5).

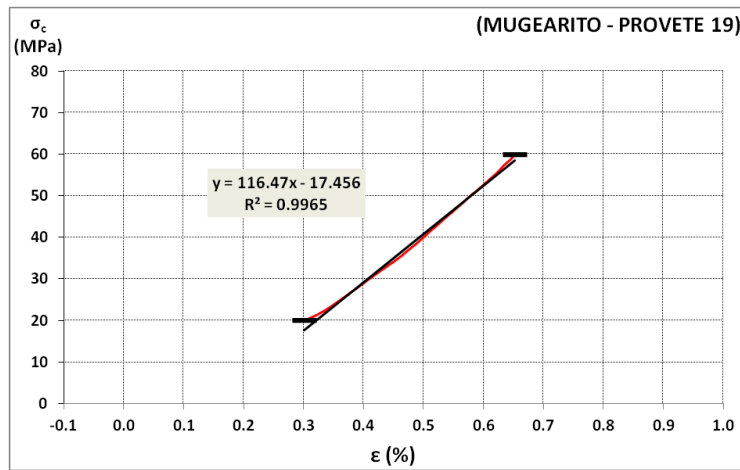


Figura 103 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 19 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

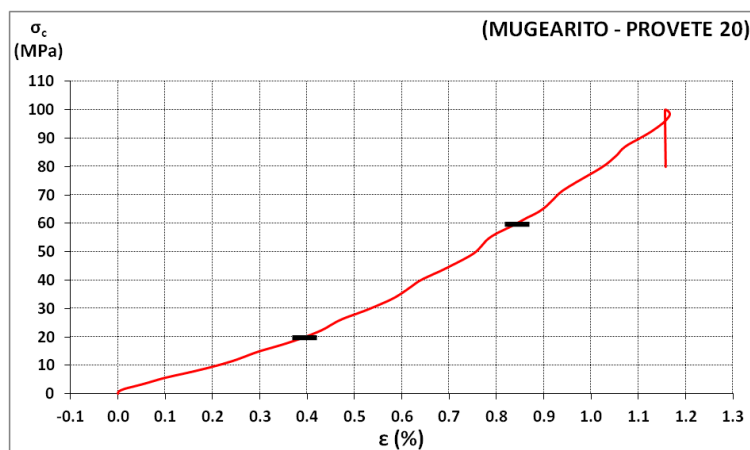


Figura 104 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 20 de mugarito (amostra n.º 5).

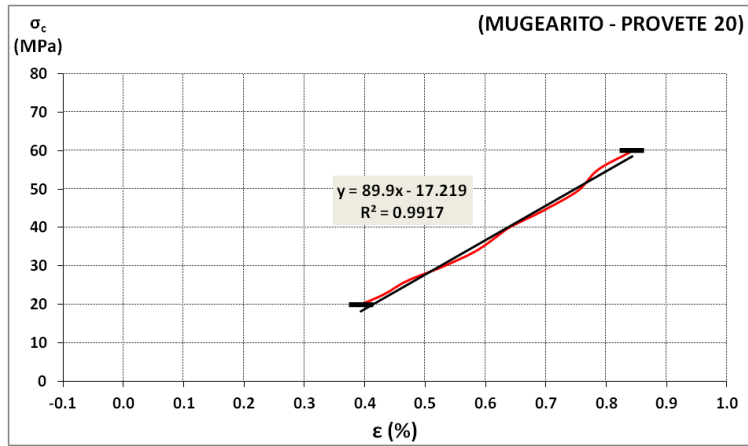


Figura 105 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 20 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

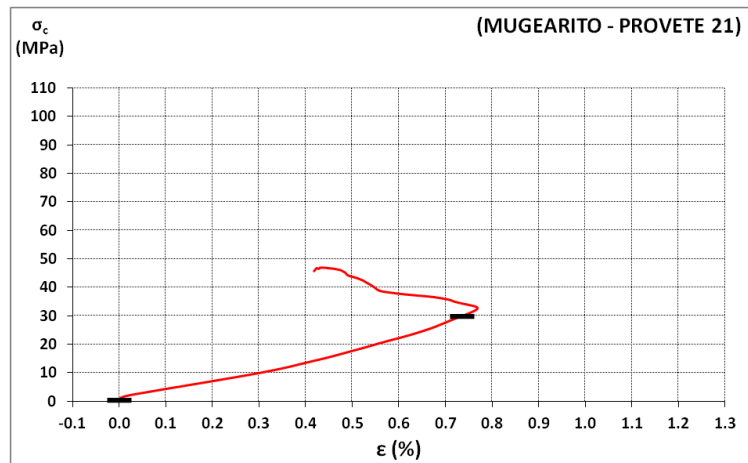


Figura 106 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 21 de mugarito (amostra n.º 5).

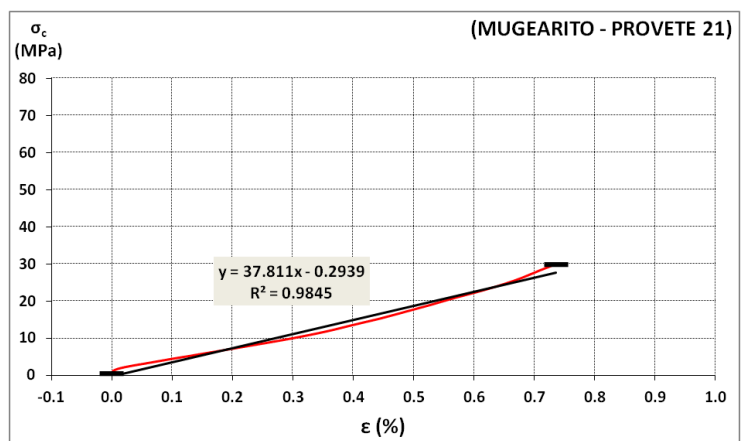


Figura 107 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 21 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

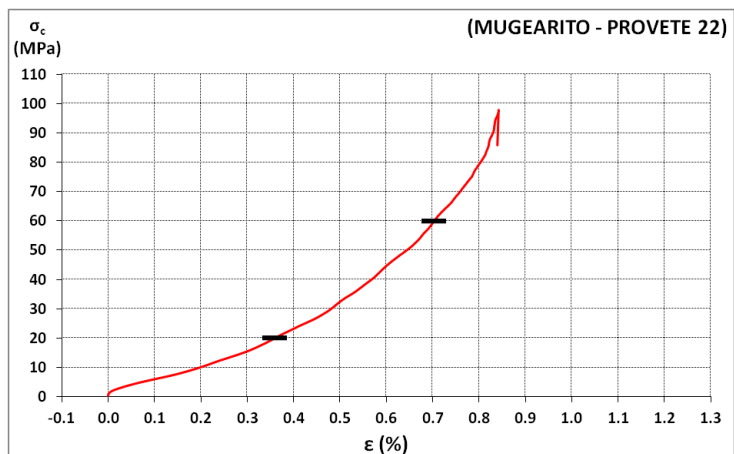


Figura 108 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 22 de mugarito (amostra n.º 5).

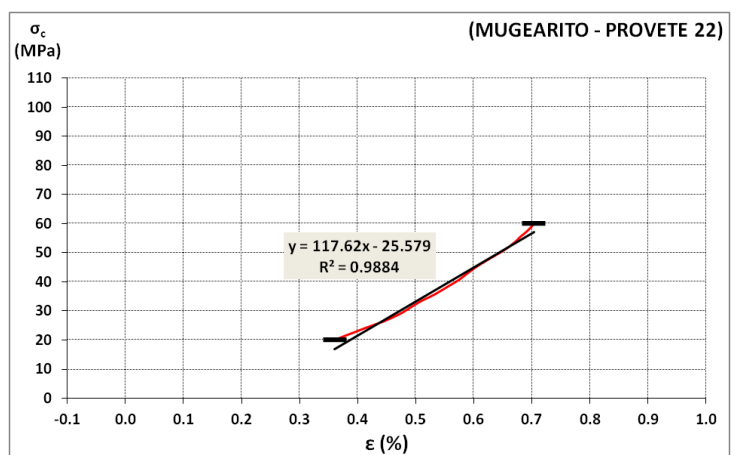


Figura 109 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 22 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

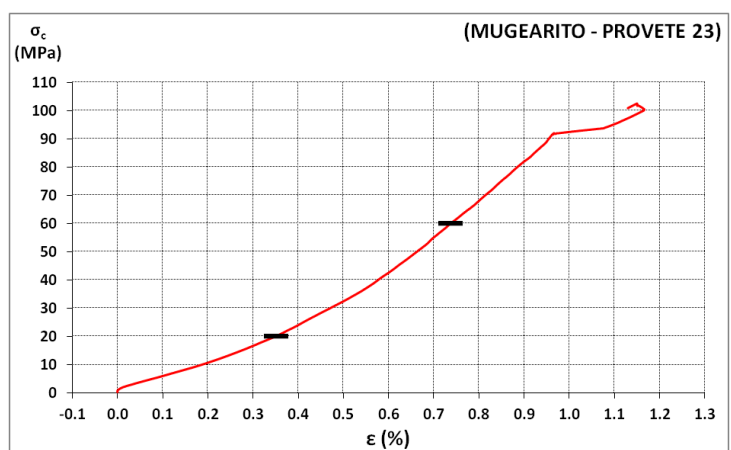


Figura 110 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 23 de mugarito (amostra n.º 5).

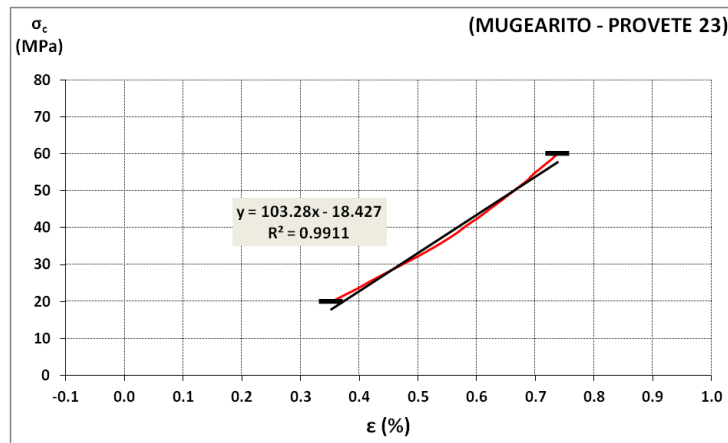


Figura 111 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 23 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

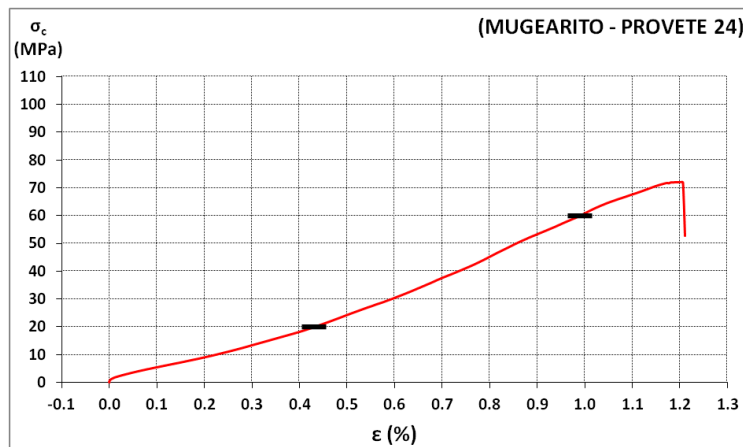


Figura 112 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 24 de mugarito (amostra n.º 5).

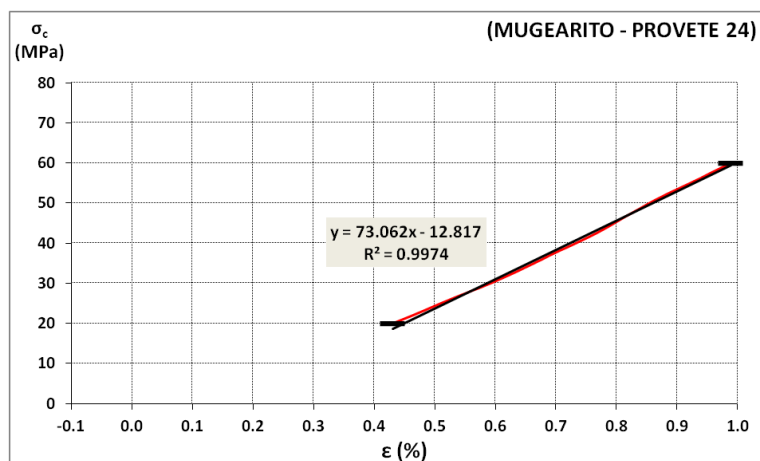


Figura 113 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 24 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

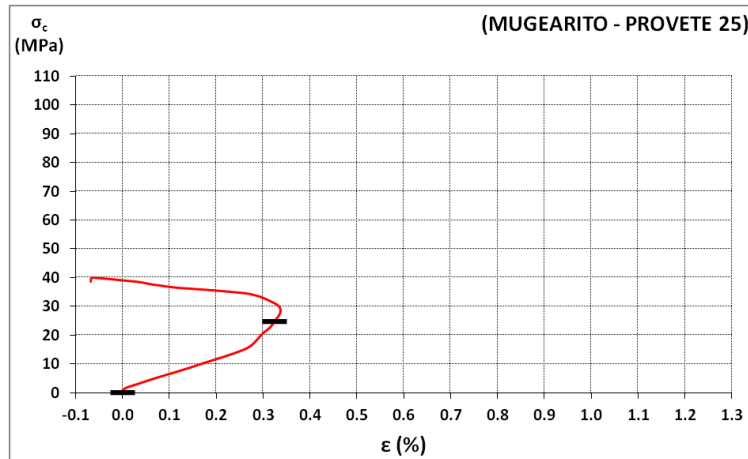


Figura 114 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 25 de mugarito (amostra n.º 5).

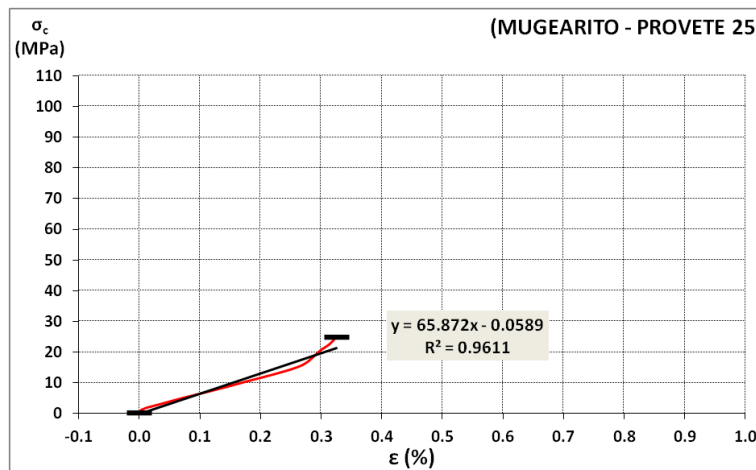


Figura 115 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 25 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

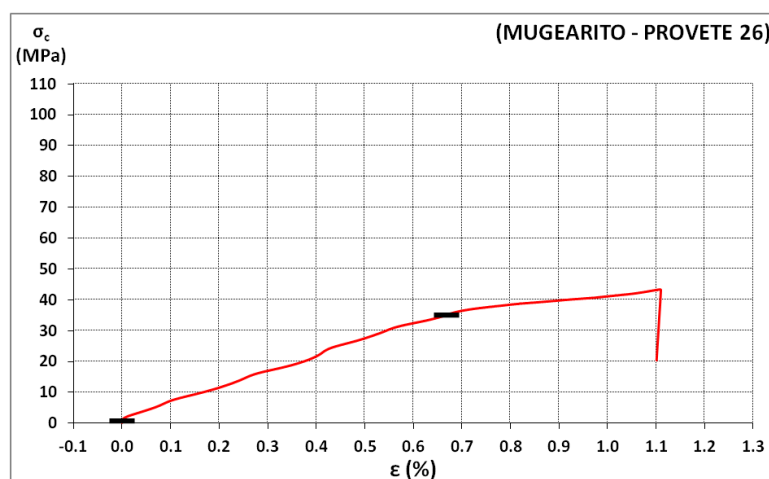


Figura 116 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 26 de mugarito (amostra n.º 5).

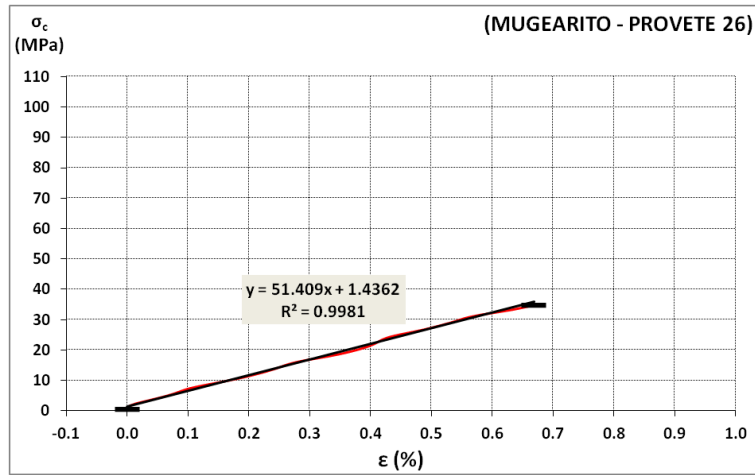


Figura 117 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 26 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

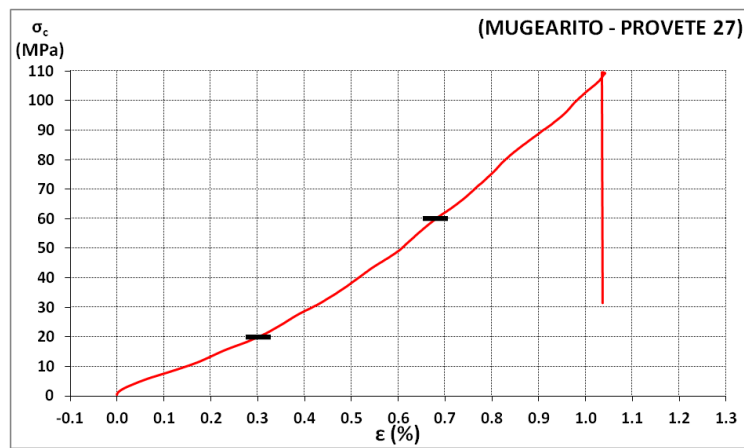


Figura 118 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 27 de mugarito (amostra n.º 5).

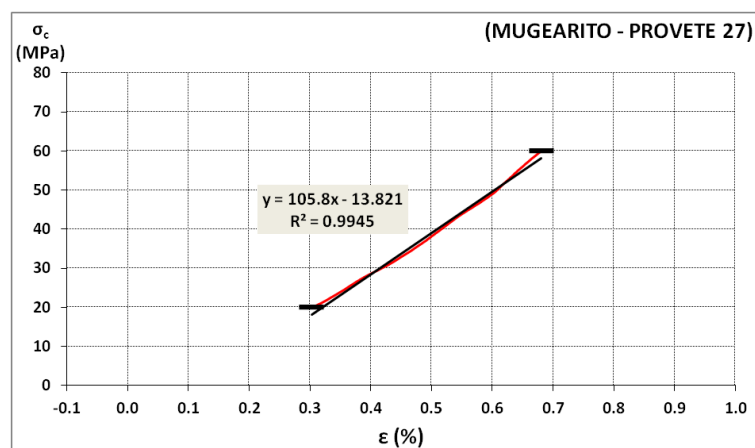


Figura 119 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 27 de mugarito (amostra n.º 5), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

ANEXO V

Neste anexo apresentam-se as curvas da relação tensão-extensão, obtidas durante o ensaio para a determinação do módulo de deformabilidade da amostra de tufo (amostra n.º 6).

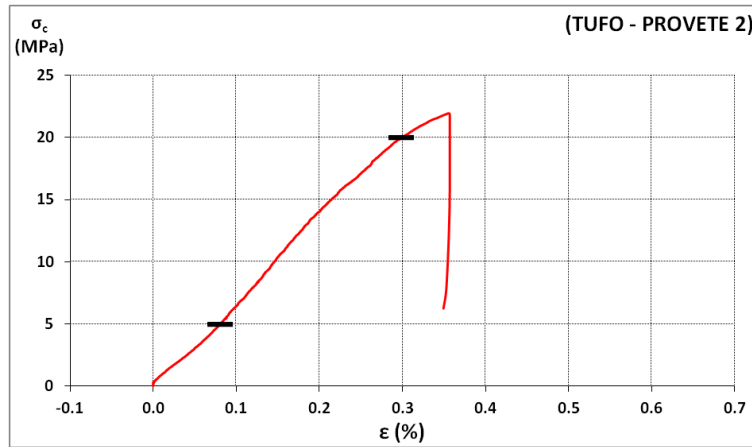


Figura 120 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 2 de tufo (amostra n.º 6).

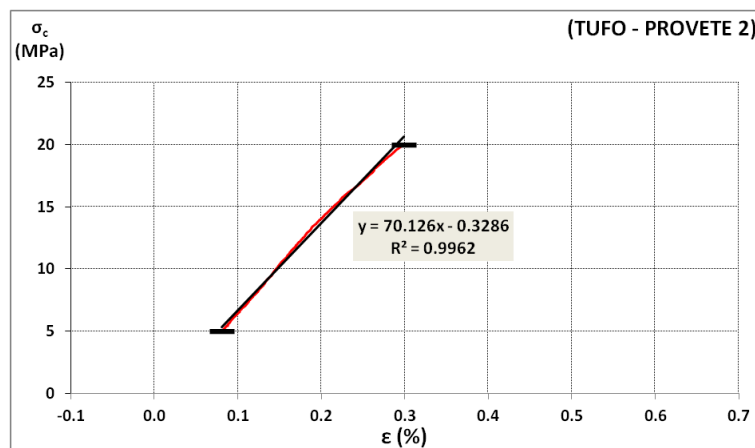


Figura 121 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 2 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

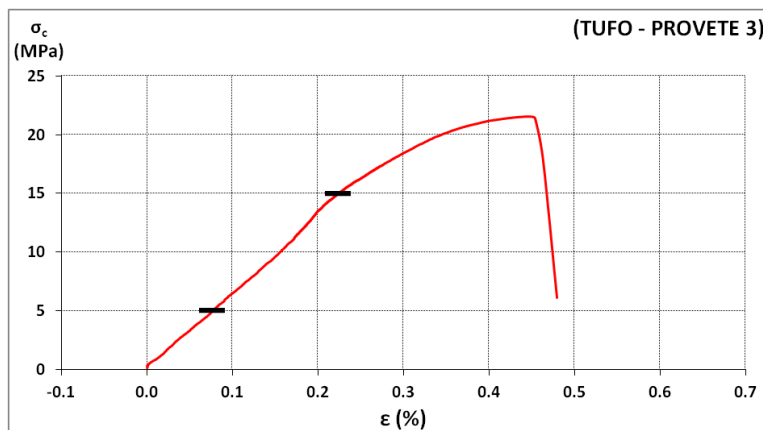


Figura 122 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 3 de tufo (amostra n.º 6).

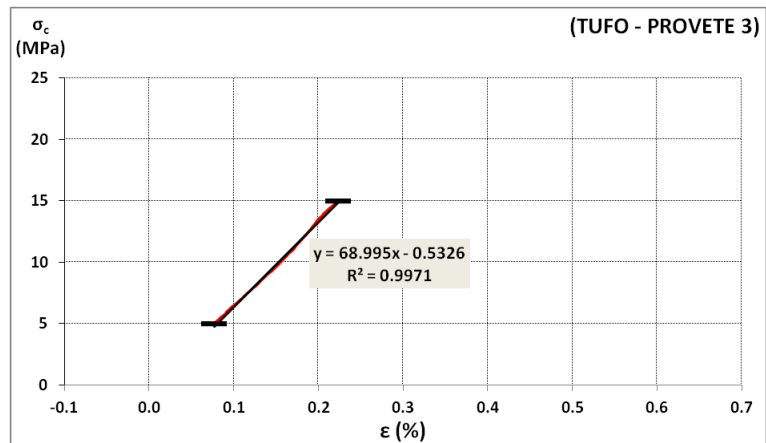


Figura 123 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 3 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

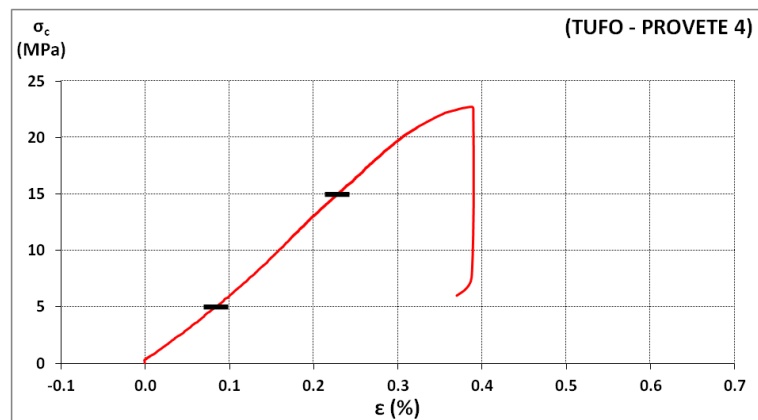


Figura 124 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 4 de tufo (amostra n.º 6).

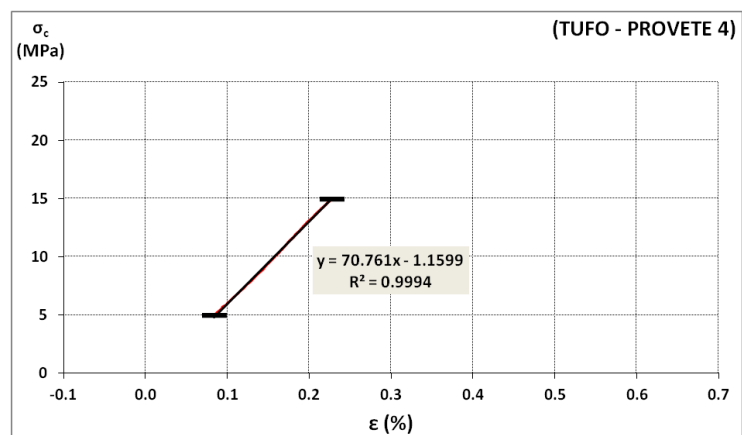


Figura 125 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 4 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

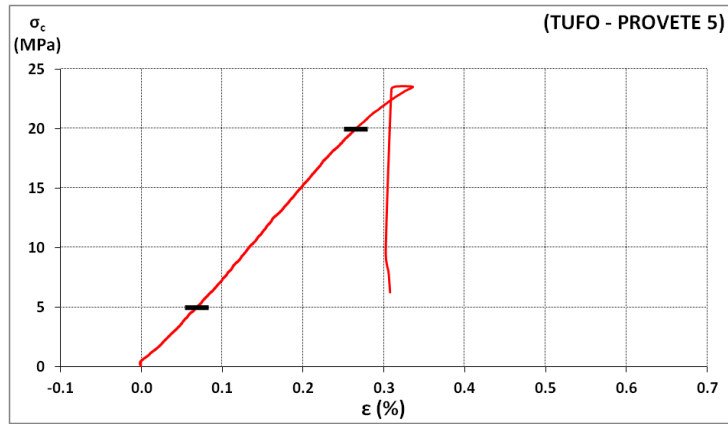


Figura 126 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 5 de tufo (amostra n.º 6).

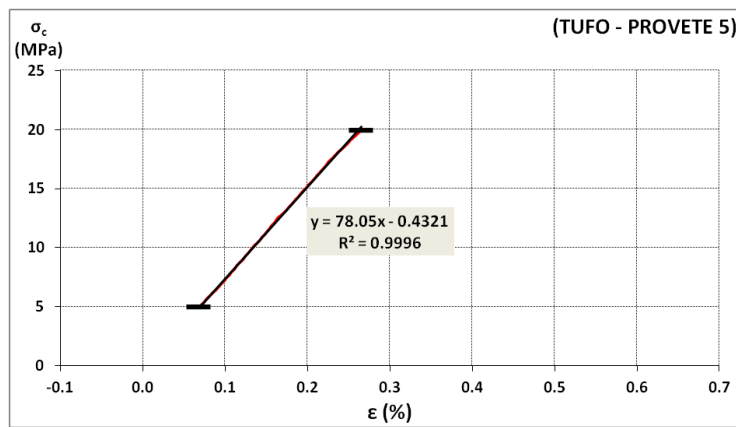


Figura 127 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 5 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

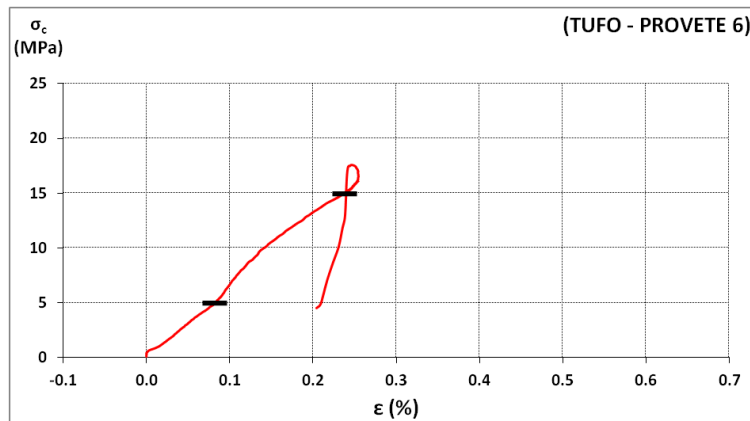


Figura 128 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 6 de tufo (amostra n.º 6).

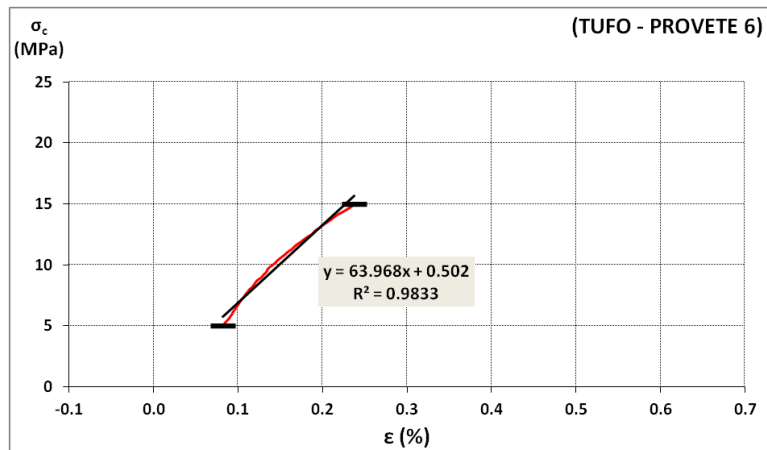


Figura 129 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 6 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

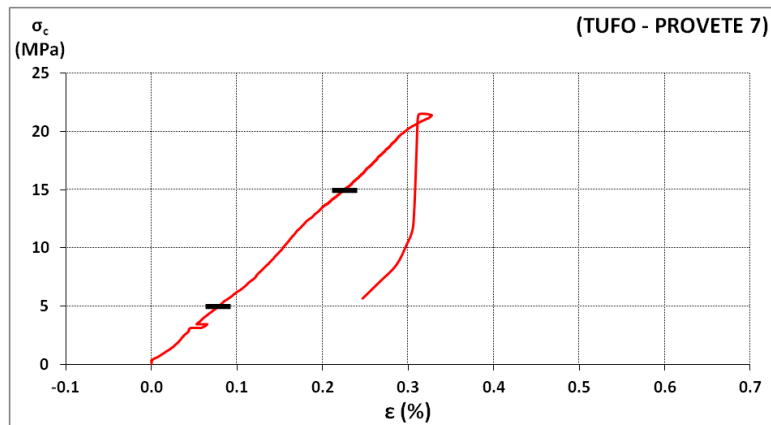


Figura 130 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 7 de tufo (amostra n.º 6).

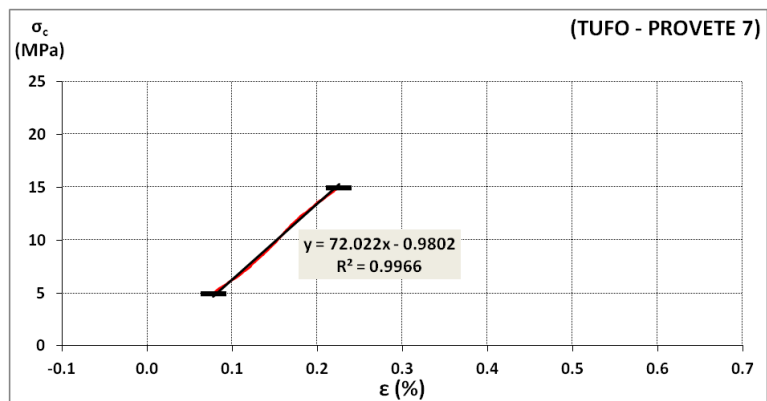


Figura 131 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 7 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

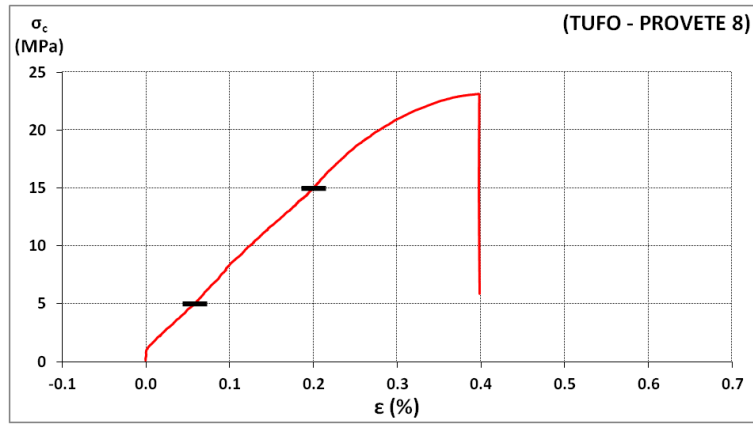


Figura 132 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 8 de tufo (amostra n.º 6).

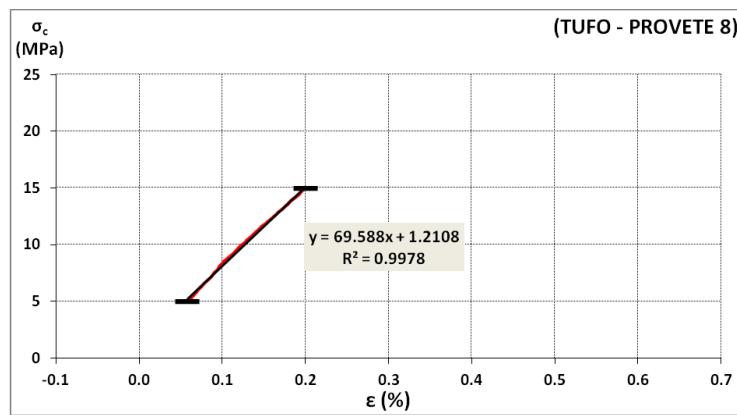


Figura 133 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 8 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

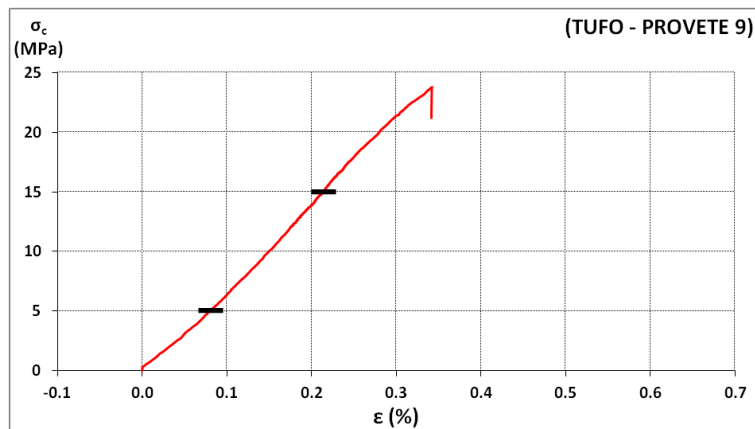


Figura 134 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 9 de tufo (amostra n.º 6).

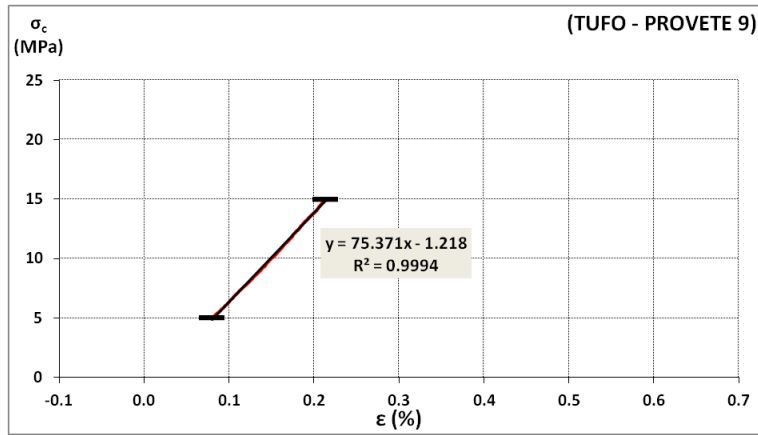


Figura 135 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 9 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

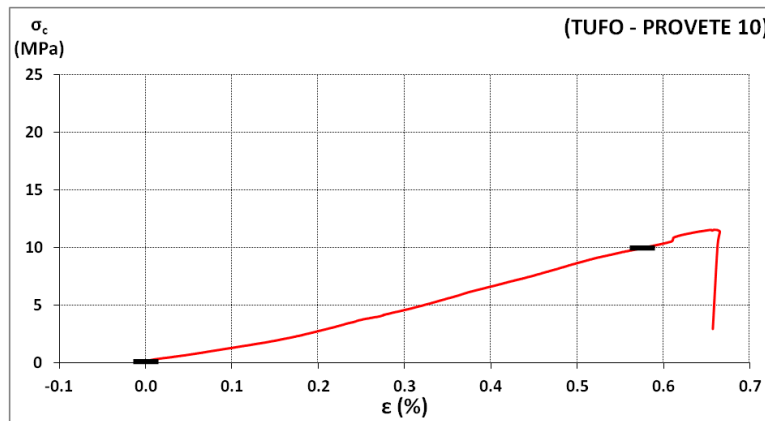


Figura 136 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 10 de tufo (amostra n.º 6).

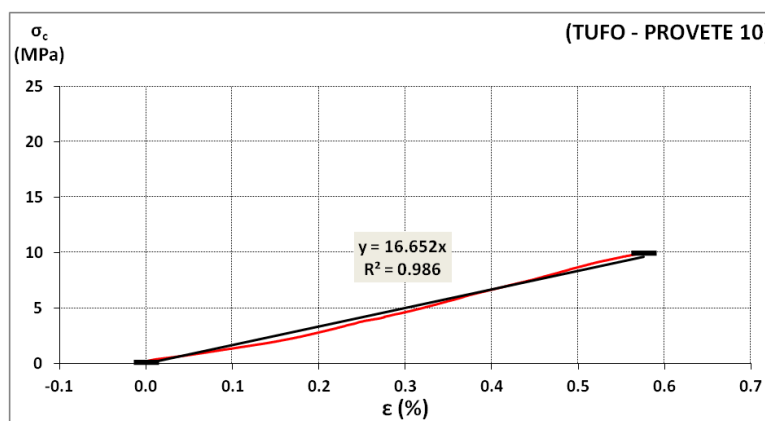


Figura 137 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 10 de tufo (amostra n.º 6), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

ANEXO VI

Neste anexo apresentam-se as curvas da relação tensão-extensão, obtidas durante o ensaio para a determinação do módulo de deformabilidade do basalto poroso da amostra n.º 7.

As curvas de tensão-extensão contidas nas Figuras 140 e 146 apresentam um comportamento anormal significativo, a partir de uma determinada tensão de carregamento, comportamento que não influenciou os cálculos para a determinação do respectivo módulo de deformabilidade. Presume-se que esse comportamento anómalo deve-se ao mesmo factor explicado no Anexo IV.

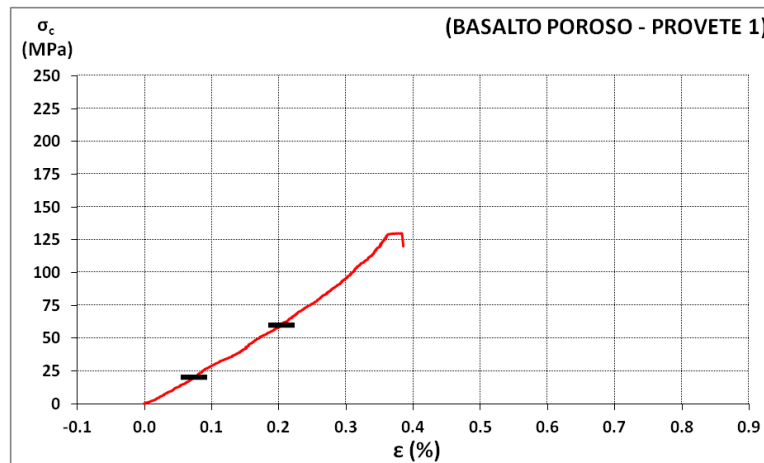


Figura 138 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 1 de basalto poroso (amostra n.º 7).

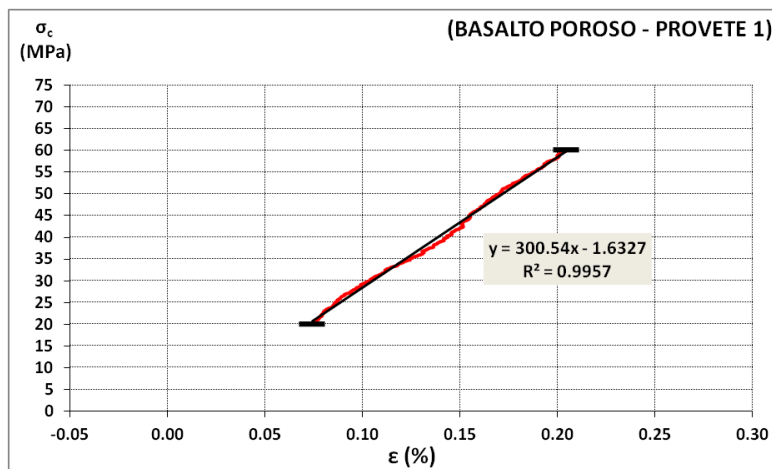


Figura 139 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 1 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

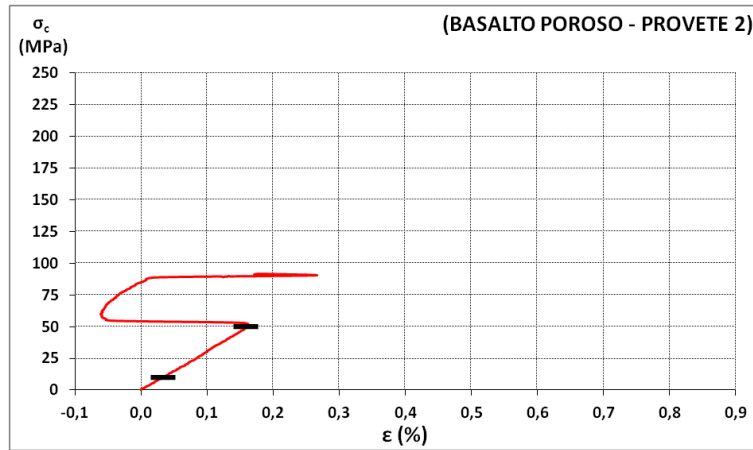


Figura 140 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 2 de basalto poroso (amostra n.º 7).

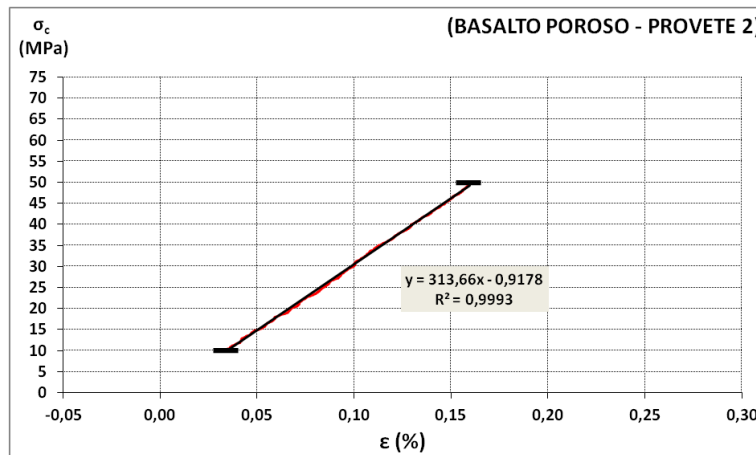


Figura 141 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 2 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

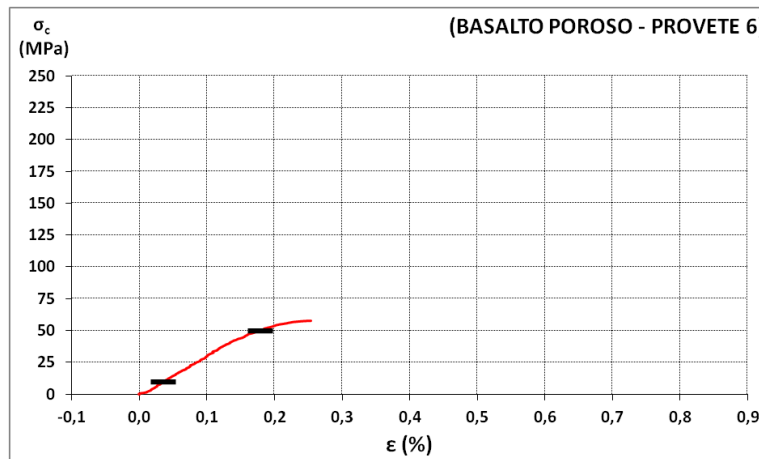


Figura 142 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 6 de basalto poroso (amostra n.º 7).

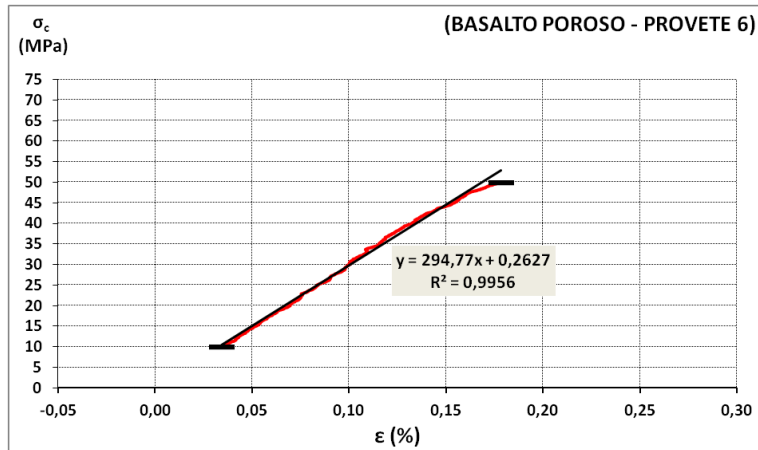


Figura 143 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 6 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

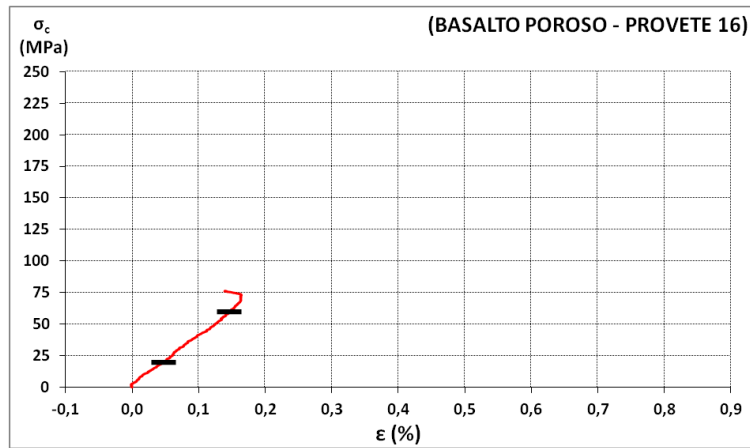


Figura 144 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 16 de basalto poroso (amostra n.º 7).

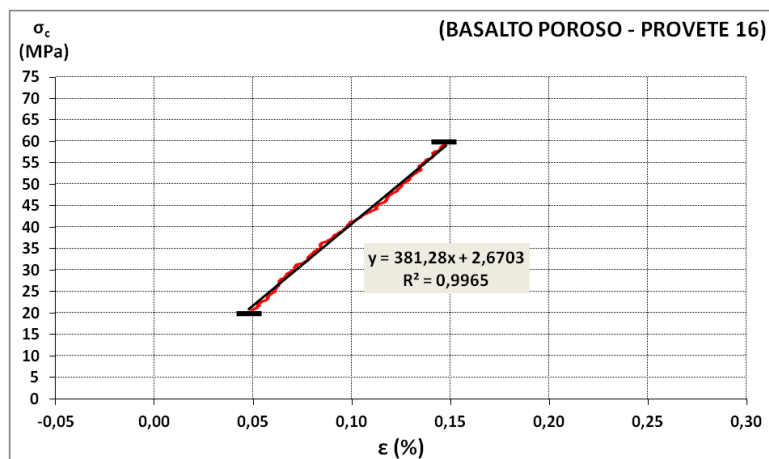


Figura 145 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 16 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

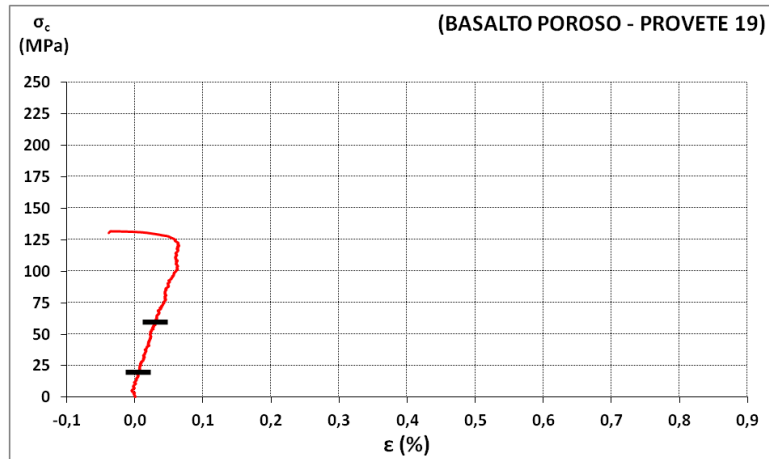


Figura 146 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 19 de basalto poroso (amostra n.º 7).

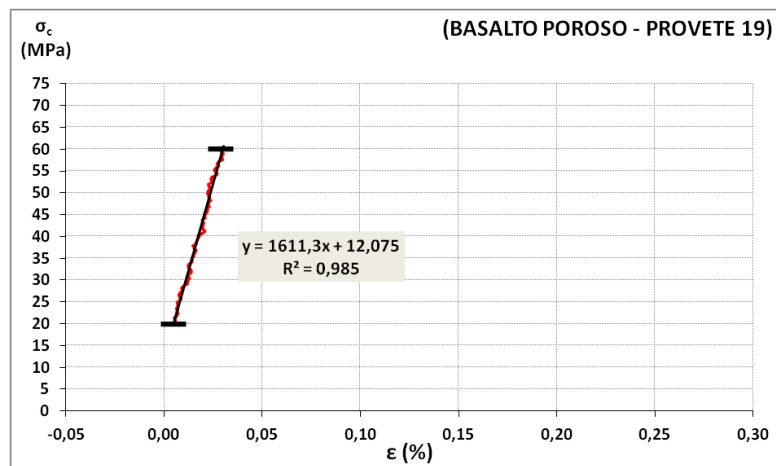


Figura 147 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 19 de basalto poroso (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

ANEXO VII

Neste anexo apresentam-se as curvas da relação tensão-extensão, obtidas durante o ensaio para a determinação do módulo de deformabilidade do basalto compacto da amostra n.º 7.

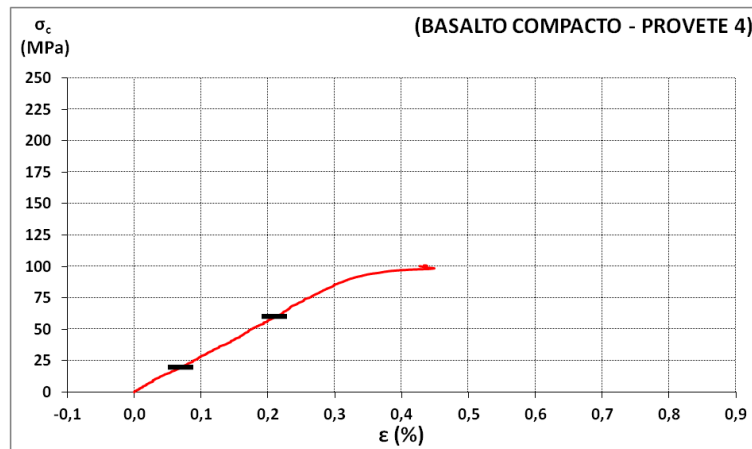


Figura 148 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 4 de basalto compacto (amostra n.º 7).

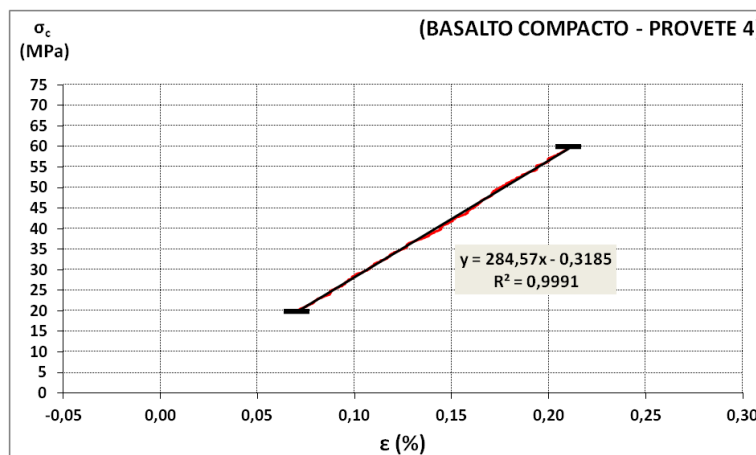


Figura 149 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 4 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

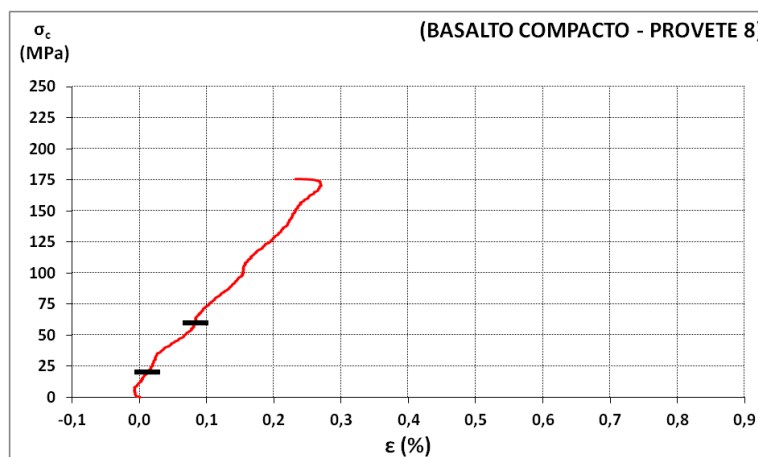


Figura 150 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 8 de basalto compacto (amostra n.º 7).

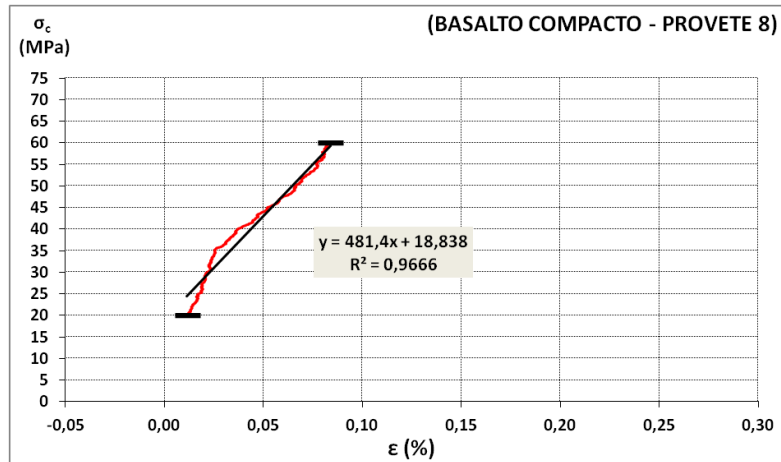


Figura 151 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 8 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

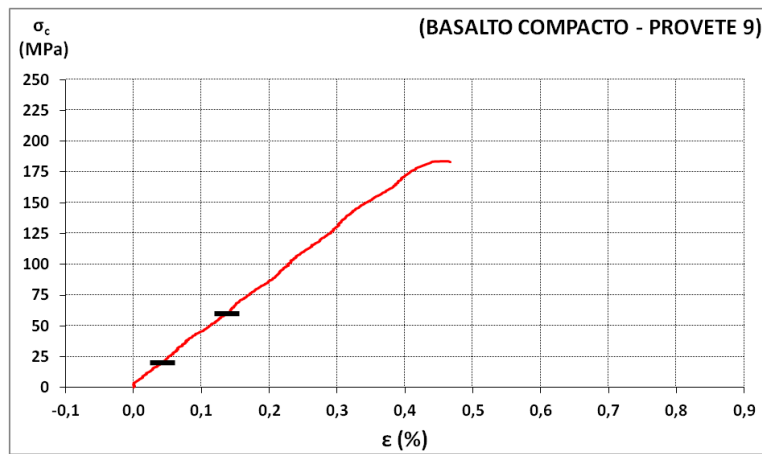


Figura 152 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 9 de basalto compacto (amostra n.º 7).

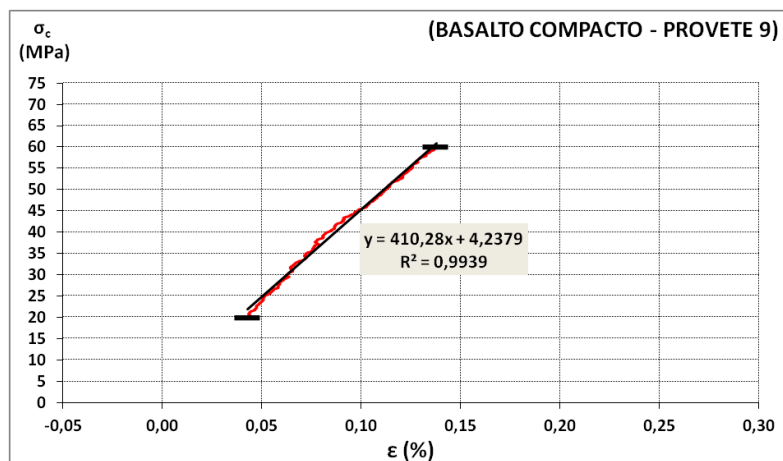


Figura 153 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 9 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

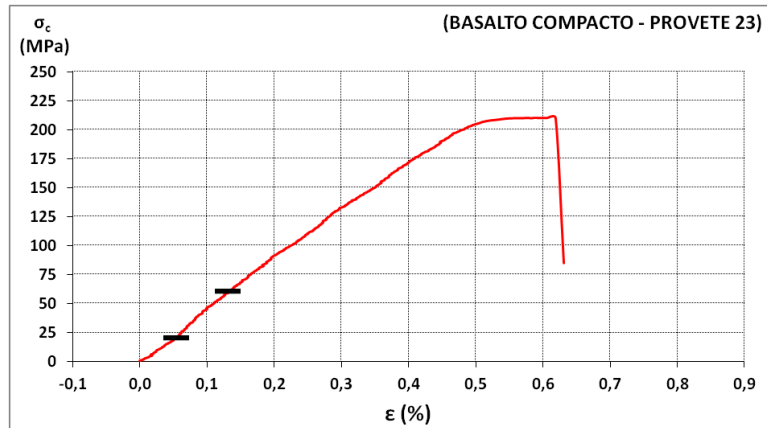


Figura 154 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 23 de basalto compacto (amostra n.º 7).

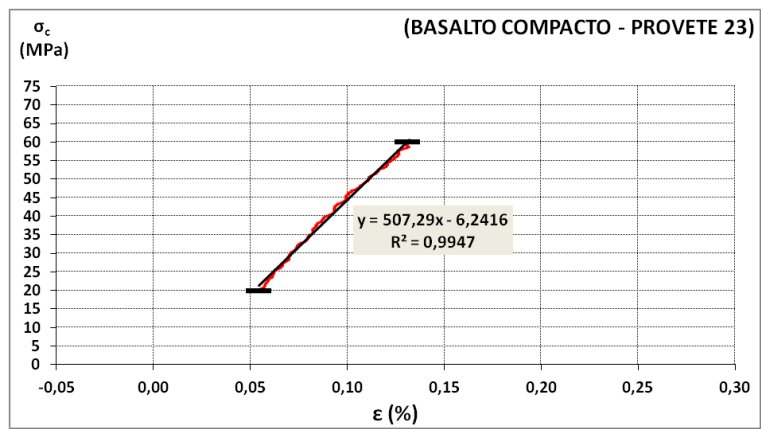


Figura 155 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 23 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.

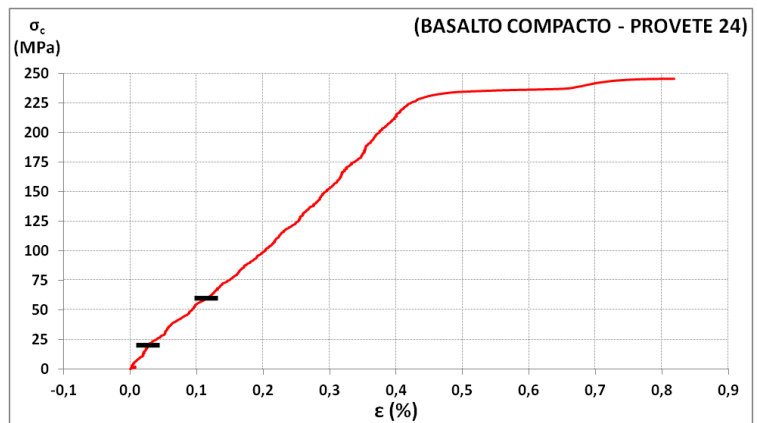


Figura 156 - Curva da relação tensão-extensão referente ao provete n.º 24 de basalto compacto (amostra n.º 7).

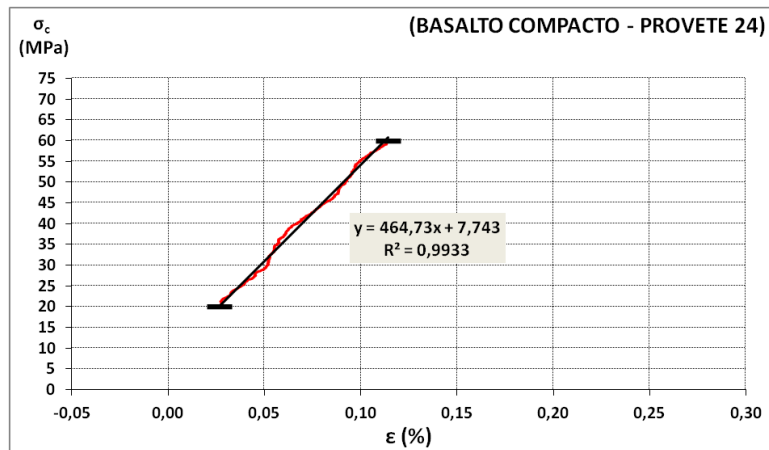


Figura 157 - Trecho da curva da relação tensão-extensão, referente ao provete n.º 24 de basalto compacto (amostra n.º 7), com linha de tendência para obtenção do respectivo módulo de deformabilidade.