



Caracterização Geológica e Geotécnica dos Complexos Vulcânicos Antigo e Intermédio da Ilha da Madeira

João Pedro dos Santos Pernetá

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Dezembro de 2010



Caracterização Geológica e Geotécnica dos Complexos Vulcânicos Antigo e Intermédio da Ilha da Madeira

João Pedro dos Santos Pernetá

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadora:

Doutora Susana Luísa Rodrigues Nascimento Prada (Professora Auxiliar com
Agregação, UMa)

Co-Orientador:

Mestre Eng.^o José Fernando Vieira de Sousa (Director do Departamento de
Geotecnia, LREC)

Co-Orientadora:

Eng.^a Délia Maria Fernandes de Sousa (Departamento de Geotecnia, LREC)

Dezembro de 2010

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Doutora Susana Nascimento Prada, pela disponibilidade, sabedoria, ajuda, compreensão, e paciência no decurso desta dissertação.

Ao meu co-orientador, Mestre Eng.º José Fernando Vieira de Sousa, Director do Departamento de Geotecnia do LREC, pelo auxílio e orientação, tanto nos seus pareceres e conselhos como na gentil cedência dos seus elementos técnicos.

Á minha co-orientadora, Eng.ª Délia Maria Fernandes de Sousa, membro do Departamento de Geotecnia, pelo precioso auxílio, orientação, pareceres técnicos e pela sua disponibilidade constante em esclarecimentos.

Á Eng.ª Carolina Reques, estagiária no Departamento de Geotecnia, pelos seus pareceres técnicos que contribuíram para enriquecer este trabalho.

Ao Ângelo Ornelas, Odílio Freitas e Quintino Fernandes, funcionários do Departamento de Geotecnia, pela disponibilidade e paciência durante a execução dos ensaios em laboratório.

Ao Departamento de Geotecnia do LREC que me permitiu o estudo e acompanhamento dos ensaios.

Ao Eng.º Amílcar Gonçalves e aos técnicos Carlos Spínola, Humberto Volta e Fernando Nóbrega do Departamento de Estruturas, Materiais de Construção e Vias de Comunicação, pela sua disponibilidade, pareceres técnicos e equipamentos cedidos.

À Fábrica de Extracção de Pedra e Brita da Palmeira pelos serviços prestados.

À minha família, em especial aos meus pais e à Cátia, que suportou esta fase de abstracção e me deu imenso apoio, auxílio e amor.

Aos amigos que sempre me apoiaram e ajudaram.

A todos aqueles que de algum modo contribuíram para este estudo e que não foram aqui referidos, para eles deixo aqui também uma palavra de apreço e estima de igual intensidade.

O meu Muito Obrigado.

Caracterização Geológica e Geotécnica dos Complexos Vulcânicos Antigo e Intermédio da Ilha da Madeira

RESUMO

Este trabalho pretende contribuir para aprofundar o conhecimento geológico e geotécnico das formações vulcânicas da ilha da Madeira. Por razões de ordem técnica, apenas foi possível proceder à caracterização geológica e geotécnica de três dos cinco afloramentos, inicialmente previstos. As amostras estudadas pertencem aos Complexos Vulcânicos Antigo e Intermédio, definidos pela nova vulcano-estratigrafia da ilha da Madeira, cuja carta geológica se encontra em fase de publicação.

Foca-se, inicialmente, a ilha da Madeira, enquadrando-a no espaço e no tempo geológico e apresentando a sua vulcano-estratigrafia.

Seguem-se os estudos geológicos e geotécnicos, indispensáveis, para caracterizar as amostras escolhidas. Neste capítulo e numa primeira fase, é efectuada uma caracterização geológica das amostras em estudo, sendo, seguidamente, abordado o acompanhamento realizado durante a execução dos ensaios realizados *in situ* e em laboratório, bem como, os resultados obtidos, segundo as normas em vigor, com vista a caracterizar geotecnicamente as amostras escolhidas.

Na fase de discussão, faz-se uma análise aos resultados obtidos das caracterizações geológicas e geotécnicas, procurando relações existentes e comparando-as a outras já existentes na ilha da Madeira e no arquipélago das Canárias.

Por fim apresenta-se a caracterização geológica e geotécnica das três amostras.

A ter em consideração que o presente trabalho, representa apenas um pequeno contributo, pretendendo acrescentar os resultados obtidos a alguns já existentes e a outros que advirão, tendo em conta que a este nível existe pouca informação relativa a arquipélago da Madeira.

Geological and Geotechnical Characterization of the Madeira's Island Old and Intermediate Volcanic Complex

ABSTRACT

This work aims to expand the geological and geotechnical knowledge of the Madeira's island volcanic formations. For some technical reasons, it was only possible to proceed to the characterization of three, from the, initially planned, five samples. The studied samples belong to the Old and Intermediate Volcanic Complexes, defined in the new volcano-estratigraphy of the Madeira's island, which geological map is in publication phase.

This work starts fitting the Madeira's island in space and geological time, and presenting its volcano-estratigraphy.

The indispensable geological and geotechnical studies are executed, to characterize the selected samples. In this chapter and on a first stage, a geological characterization of the samples in study is done. On the next stage, for a geotechnical characterization, laboratory and *in situ* tests are executed according to the standard practices.

In the argumentation phase, an analysis of the obtained results is done, looking for existing relations and comparing them to other studies already done in the Madeira's Island and in the Canary Islands.

Finally it is presented a geological and geotechnical characterization of the three selected samples.

Having in regard that the present work represents only a small contribute, intending to add the obtained results to other already existing and to those which may be obtained in the future, because actually exists few information relative to the Madeira's archipelago.

PALAVRAS-CHAVE

Ilha da Madeira

Complexo Vulcânico Antigo

Complexo Vulcânico Intermédio

Caracterização Geológica e Geotécnica

Tufo de *Lapilli*

Basalto Compacto

Solo Vulcânico

KEY-WORDS

Madeira's Island

Old Volcanic complex

Intermediate Volcanic complex

Geological and Geotechnical Characterization

***Lapilli* Tuff**

Massive Basalt

Volcanic Soil

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos	1
1.2. Estrutura do trabalho.....	2
1.3. Enquadramento geológico da ilha da Madeira	2
1.3.1. Localização geográfica.....	2
1.3.2. Enquadramento geotectónico e evolução geocronológica	4
1.3.3. Vulcano-estratigrafia.....	6
1.4. Localização das amostras.....	7
1.4.1. Amostra nº 1	8
1.4.2. Amostra nº 2	9
1.4.3. Amostra nº 3	11
2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DOS MATERIAIS AMOSTRADOS... 13	
2.1. Introdução.....	13
2.2. Caracterização geológica	14
2.2.1. O vulcanismo e as rochas magmáticas.....	14
2.2.2. Classificação geológica	16
2.2.2.1. Classificação litológica	16
2.2.2.2. Estudo das discontinuidades	18
2.2.2.3. Classificação baseada no estado de alteração, fracturação e espessura das camadas	24
2.3. Caracterização geotécnica	27
2.3.1. Propriedades geotécnicas e parâmetros estudados.....	27
2.3.2. Ensaios realizados ao solo vulcânico de S. Vicente.....	28
2.3.2.1. Determinação do teor em água	32
2.3.2.2. Análise granulométrica.....	33
2.3.2.3. Determinação dos limites de Atterberg	37
2.3.2.3.1. Determinação do limite de liquidez.....	37

2.3.2.3.2. Determinação do limite de plasticidade.....	40
2.3.2.4. Determinação da densidade das partículas	41
2.3.3. Ensaio realizados às rochas da Encumeada (Tufo de <i>lapilli</i> e Basalto)	42
2.3.3.1. Determinação da resistência à compressão uniaxial	50
2.3.3.2. Determinação do módulo de elasticidade	54
2.3.3.3. Ensaio de determinação da Dureza de Ressalto de Schmidt	64
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	71
3.1. Amostra nº 1: Solo, Unidade do Porto da Cruz (CVA1)	71
3.1.1. Classificação da amostra	71
3.1.2. Comparação dos resultados obtidos com outras referências	72
3.2. Amostra nº 2: Tufo de <i>lapilli</i> , Unidade da Encumeada (CVI1).....	73
3.2.1. Classificação da amostra	73
3.2.2. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e a relação L/D	74
3.2.3. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade em laboratório com os valores obtidos no campo através do martelo de Schmidt.....	75
3.2.4. Comparação dos resultados obtidos com outras referências	77
3.3. Amostra nº 3: Basalto, Unidade da Encumeada (CVI1).....	81
3.3.1. Classificação da amostra	81
3.3.2. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e a relação L/D	82
3.3.3. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade em laboratório com os valores obtidos no campo através do martelo de Schmidt.....	83
3.3.4. Comparação dos resultados obtidos com outras referências	85
3.4. Relações entre a amostra nº 2, a amostra nº 3 e outras referências.....	91
3.5. Síntese das características geológicas e geotécnicas das três amostras estudadas.....	95
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Enquadramento geográfico do arquipélago da Madeira, onde se destacam também os arquipélagos dos Açores, Canárias e Cabo Verde (Ramalho, 2004).	3
Figura 2 - Batimetria dos edifícios vulcânicos Madeira/Desertas e Porto Santo (Geldmacher <i>et al.</i> , 2000).	4
Figura 3 - Mapa batimétrico com os arquipélagos da Madeira, Canárias e montes submarinos (adaptado de Swith & Sandwell, 1997; Verbitsky & Zolotarev, 1989 por Silva, 2003).	5
Figura 4 – Representação gráfica da evolução geocronológica do Hotspot Madeira (adaptado de Geldmacher <i>et al.</i> , 2000 por Silva, 2003).	5
Figura 5 - Complexos Vulcânicos da ilha da Madeira, segundo Brum da Silveira <i>et al.</i> , 2008.	6
Figura 6 – Localização das três amostras na ilha da Madeira em planta (Fonte: Google Earth).	8
Figura 7 – Localização da amostra n.º 1, vista em planta com pormenor incluído (Fonte: Google Earth).	8
Figura 8 – Afloramento do CVA1 ao qual pertence a amostra n.º 1.	9
Figura 9 – Localização da amostra n.º 2, vista em planta com pormenor incluído (Fonte: Google Earth).	10
Figura 10 – Afloramento de CVI1 ao qual pertence a amostra n.º 2.	10
Figura 11 – Localização da amostra n.º 3, vista em planta com pormenor incluído (Fonte: Google Earth).	11
Figura 12 – Afloramento de CVI1 ao qual pertence a amostra n.º 3.	12
Figura 13 – Representação esquemática da actividade havaiana (Krafft e Krafft, 1975 in Nunes, 2002).	14
Figura 14 – a) Erupção explosiva do Monte de Santa Helena; b) Erupção efusiva no arquipélago do Havai (Fonte: www.usgs.gov).	15
Figura 15 – Pormenores característicos do solo ao qual pertence a amostra n.º 1.	17
Figura 16 – Pormenores característicos do piroclasto consolidado ao qual pertence a amostra n.º 2.	18
Figura 17 – Pormenores característicos da escoada basáltica à qual pertence a amostra n.º 3.	18

Figura 18 - Descontinuidades observadas na amostra nº3 (escoada basáltica).....	20
Figura 19 - Medição da orientação da descontinuidade da família A da amostra nº 3.	20
Figura 20 - Medição do espaçamento entre duas descontinuidades da família A na escoada basáltica.....	21
Figura 21 - Continuidades das fracturas observadas.	22
Figura 22 – Rugosidades (adaptado de ISRM, 1981).....	22
Figura 23 – Rugosidades observadas na escoada basáltica.	23
Figura 24 - Medição da abertura entre duas descontinuidades da escoada basáltica..	24
Figura 25 – Enchimento observado na abertura entre duas descontinuidades da escoada basáltica.....	24
Figura 26 – Colheita das amostras.....	28
Figura 27 - Destorroamento da amostra.....	29
Figura 28 – Divisão da amostra com recurso a um repartidor.....	29
Figura 29 - Pesagem do provete.....	29
Figura 30 – Separação do material por intermédio do peneiro de 2,00 mm de abertura.	30
Figura 31 – Desagregação do material com um almofariz e pilão e posterior separação por intermédio do peneiro de 2,00 mm de abertura.....	30
Figura 32 – Pesagem e imersão do provete.	31
Figura 33 – Lavagem do provete no peneiro de 2,00 mm de abertura.	31
Figura 34 – Peneiro de 0,425 mm de abertura; Passagem de material neste peneiro; Desagregação das partículas com pilão.	31
Figura 35 – Pesagem da cápsula; Obtenção do provete; Secagem na estufa.....	32
Figura 36 – Série de peneiros utilizados para análise granulométrica do material grosso; Pesagem do provete a peneirar; Início da peneiração.	33
Figura 37 – Ebulição da mistura com antifloculante; Separação no peneiro de 0,075 mm de abertura para a peneiração dos finos; Transferência da porção passada no peneiro de 0,075 mm de abertura para a proveta de 1000 cm ³ para a sedimentação.	34
Figura 38 – Transferência do material retido, destinado à peneiração dos finos, para a cápsula para posterior secagem na estufa; Série de peneiros utilizados na peneiração do provete.	34
Figura 39 – Proveta com material para a sedimentação; Agitação da proveta; Proveta com densímetro introduzido.....	35

Figura 40 – Remoção do densímetro; Colocação deste numa proveta com água destilada; Medição da temperatura.....	35
Figura 41 - Curvas granulométricas referentes às três amostras.	36
Figura 42 – Toma de material; Mistura do material com água destilada; Colocação da pasta na concha de Casagrande.	38
Figura 43 – Divisão do provete na perpendicular ao eixo da manivela formando um sulco por uso de um riscador; Sulco formado no provete; Accionamento da manivela.	38
Figura 44 – Representação gráfica da relação do nº de pancadas com o teor em água da amostra 070/10 - A.....	39
Figura 45 – Representação gráfica da relação do nº de pancadas com o teor em água da amostra 070/10 - B.	39
Figura 46 – Representação gráfica da relação do nº de pancadas com o teor em água da amostra 070/10 - C.	40
Figura 47 - Mistura do material com água destilada; Moldagem de quatro pequenas esferas; Rolagem dos provetes entre a palma da mão e uma placa de vidro.	41
Figura 48 – Provette de solo utilizado; Introdução dos provetes nos picnómetros; Dispersão do provete no agitador.....	42
Figura 49 – Pesagem; Determinação da temperatura da mistura solo-água no picnómetro; Colocação na estufa.....	42
Figura 50 – a) Blocos de material piroclástico; b) Blocos de basalto.	43
Figura 51 - Máquina caroteadora utilizada.	44
Figura 52 – À esquerda, um provete retirado a seco, à direita com água.....	44
Figura 53 - Processo de caroteamento das amostras.	45
Figura 54 – Carotes destinadas aos ensaios de módulo de elasticidade e resistência à compressão uniaxial.	46
Figura 55 – a) Medição de um provete para marcação da altura; b) Corte de um provete.	46
Figura 56 – Colocação dos provetes na estufa; Arrefecimento no exsiccador.	48
Figura 57 – Máquina utilizada para o ensaio dos tufos de <i>lapilli</i> ; Dispositivo para comando e controlo da taxa de compressão e valores de carga.....	51
Figura 58 - Máquina utilizada para o ensaio dos provetes de basalto; Dispositivo para comando e controlo da taxa de compressão e valores de carga.....	52

Figura 59 - Centragem do provete 9 (tufo de <i>lapilli</i>) antes da aplicação da carga; Estado do mesmo provete após rotura.....	52
Figura 60 - Centragem do provete 8 (basalto) antes da aplicação da carga.....	52
Figura 61 - Provete 7 de piroclasto e provete 8 de basalto após rotura.....	53
Figura 62 - Provetes de basalto antes do ensaio.....	56
Figura 63 - Imagens de um provete de basalto, captadas pelo video-extensómetro, antes e após rotura.....	56
Figura 64 – a) Máquina utilizada na primeira fase; b) Máquina utilizada na segunda fase.	57
Figura 65 – Medidas para montagem dos dispositivos de medição de deformações (NP EN 14580, 2007).	57
Figura 66 - Montagem dos extensómetros.	57
Figura 67 - Centragem dos provetes na máquina;	58
Figura 68 – Centragem dos provetes na máquina.	58
Figura 69 - Rotura do provete 078/10 – 1.....	59
Figura 70 - Carregamento e rotura do provete 089/10 – 3.....	59
Figura 71 - Diagrama Tensão – Tempo, para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de tufo de <i>lapilli</i>	60
Figura 72 - Diagrama Tensão - Tempo para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de basalto.	60
Figura 73 - Diagrama Tensão – Extensão para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de tufo de <i>lapilli</i>	61
Figura 74 - Diagrama Tensão – Extensão para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de basalto.	61
Figura 75 – Superfície de rotura do provete 089/10 – 2.....	64
Figura 76 – Pormenor do martelo de Schmidt utilizado e exemplo de utilização.	65
Figura 77 - Ábaco para determinação da resistência à compressão uniaxial da amostra nº 2 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Hoek, 1998).....	66
Figura 78 - Ábaco para determinação do módulo de elasticidade da amostra nº 2 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Miller, 1965 in Stacey e Page, 1986).	67
Figura 79 - Ábaco para determinação da resistência à compressão uniaxial da amostra nº 3 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Hoek, 1998).....	67
Figura 80 - Ábaco para determinação do módulo de elasticidade da amostra nº 3 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Miller, 1965 in Stacey e Page, 1986).	68

Figura 81 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de tufo de <i>lapilli</i>	75
Figura 82 – Pesos volúmicos secos dos piroclastos de Canárias e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano <i>et al.</i> , 2007).	78
Figura 83 – Resistência à compressão simples dos materiais de Canárias e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano <i>et al.</i> , 2007).	79
Figura 84 – Módulo de elasticidade dos piroclastos de Canárias e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano <i>et al.</i> , 2007).	79
Figura 85 - Relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco dos piroclastos de Canárias, e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano <i>et al.</i> , 2007).	80
Figura 86 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial com enquadramento do tufo de <i>lapilli</i> da Encumeada (adaptado de Mateus de Brito <i>et al.</i> , 2008).	81
Figura 87 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de basalto. 83	
Figura 88 - Pesos volúmicos das rochas vulcânicas de Canárias e da amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada <i>et al.</i> , (2007).	86
Figura 89 – Resistência à compressão uniaxial das rochas vulcânicas de Canárias e da amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada <i>et al.</i> , (2007).	87
Figura 90 – Resistência à compressão uniaxial determinada pelo martelo de Schmidt dos materiais de Canárias com enquadramento da amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada <i>et al.</i> , (2007).	88
Figura 91 – Módulo de elasticidade estático dos materiais de Canárias com enquadramento da amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada <i>et al.</i> , (2007).	89
Figura 92 - Relação entre a resistência à compressão uniaxial determinada em laboratório e <i>in situ</i> para as rochas vulcânicas de Canárias e para o basalto da Encumeada (adaptado de Rodríguez-Losada <i>et al.</i> , (2007).	90
Figura 93 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial com enquadramento da amostra nº 3 (adaptado de Mateus de Brito <i>et al.</i> , 2008).	91
Figura 94 - Relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco de 213 amostras do arquipélago das Canárias, com o enquadramento das amostras nº 2 e nº 3 (adaptado de Serrano <i>et al.</i> , 2007).	92
Figura 95 - Relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco de 213 amostras do arquipélago das Canárias, com o enquadramento das amostras nº 2 e nº 3 (adaptado de Serrano <i>et al.</i> , 2007).	94

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Espaçamento entre fracturas (adaptado de ISRM, 1981).....	21
Quadro 2 - Descrição da continuidade (adaptado de ISRM, 1981).....	22
Quadro 3 - Designação de aberturas (adaptado de ISRM, 1981).....	23
Quadro 4 – Grau de alteração de maciços rochosos (adaptado de ISRM, 1981).	25
Quadro 5 – Grau de fracturação de maciços rochosos (adaptado de ISRM, 1981).....	26
Quadro 6 – Espessura das camadas em maciços rochosos (adaptado de ISRM, 1981). 26	
Quadro 7 – Teores em água das três amostras.....	33
Quadro 8 – Resultados das análises granulométricas referentes às três amostras.	35
Quadro 9 - Fracções granulométricas para cada tipo de solo (adaptado de LNEC E 196, 1966).....	36
Quadro 10 – Limite de Liquidez referente às três amostras.	40
Quadro 11 – Limite de Plasticidade referente às três amostras.	41
Quadro 12 - Densidade das partículas.	42
Quadro 13 – Provetes obtidos de cada amostra para cada ensaio.....	45
Quadro 14 – Dimensões dos provetes das amostras nº 2 e 3.	47
Quadro 15 - Massas volúmicas e pesos volúmicos secos da amostra nº 2 (078/10).....	49
Quadro 16 - Massas volúmicas e pesos volúmicos secos da amostra nº 3 (089/10).....	50
Quadro 17 - Resistência à compressão uniaxial da amostra nº 2 (078/10).....	53
Quadro 18 - Resistência à compressão uniaxial da amostra nº 3 (089/10).....	54
Quadro 19 - Módulo de Elasticidade.....	62
Quadro 20 - Resistência à compressão uniaxial do tufo de <i>lapilli</i>	63
Quadro 21 - Resistência à compressão uniaxial do basalto.	63
Quadro 22 – Parâmetros determinados a partir da Dureza de Ressonância de Schmidt do tufo de <i>lapilli</i>	69
Quadro 23 - Parâmetros determinados a partir da Dureza de Ressonância de Schmidt do basalto.	69
Quadro 24 – Resultados obtidos na análise granulométrica.	71
Quadro 25 – Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade.....	72

Quadro 26 – Percentagens utilizadas na classificação rodoviária.....	72
Quadro 27 – Comparação entre a amostra nº 1 e os solos vulcânicos de Tenerife.	73
Quadro 28 – Classificação de rochas com base na resistência à compressão uniaxial (Gonzalez Vallejo <i>et al.</i> , 2002)	73
Quadro 29 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de tufo de <i>lapilli</i>	74
Quadro 30 - Resultados obtidos em laboratório e com o martelo de Schmidt da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade, para o tufo de <i>lapilli</i> . 76	
Quadro 31 – Comparação de resultados com outras fontes. (adaptado de González de Vallejo <i>et al.</i> , 2007).	77
Quadro 32 – Litologias dos diferentes piroclastos do arquipélago das Canárias. (adaptado de Serrano <i>et al.</i> , 2007).	78
Quadro 33 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de basalto.	82
Quadro 34 - Resultados obtidos em laboratório e com o martelo de Schmidt da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade, para o basalto.	84
Quadro 35 – Resultados obtidos para o basalto da Encumeada e para os basaltos de Tenerife (adaptado de González de Vallejo <i>et al.</i> , 2007).	85
Quadro 36 – Litologias das diferentes rochas vulcânicas do arquipélago das Canárias. (adaptado de Rodríguez-Losada <i>et al.</i> , (2007).	86
Quadro 37 - Quadro resumo das características geológicas e geotécnicas das três amostras estudadas.....	96

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Alfabeto Latino

<i>A</i>	Área do provete
<i>D</i>	Diâmetro do provete
<i>E</i>	Módulo de Elasticidade
<i>IP</i>	Índice de Plasticidade
<i>L</i>	Altura do provete
<i>LL</i>	Limite de liquidez
<i>LP</i>	Limite de plasticidade
<i>Ma</i>	Milhões de anos
<i>R</i>	Resistência à compressão uniaxial
<i>W</i>	Teor em água

Alfabeto Grego

γ	Peso volúmico
γ_s	Peso volúmico seco

Siglas

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>EN</i>	Norma Europeia
<i>IAEG</i>	Associação Internacional de Geologia de Engenharia
<i>ISRM</i>	International Society of Rocks Mechanics
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LREC Laboratório Regional de Engenharia Civil

NP Norma Portuguesa

UMa Universidade da Madeira

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objectivos

O tema escolhido para Dissertação do Curso de Engenharia Civil, com vista à obtenção do grau de Mestre, compreende a área da Geologia e Geotecnia, estando estas duas áreas parcialmente ligadas entre si através de um outro conceito denominado Geologia de Engenharia, que é por sua vez, o elo entre a Geologia e a Engenharia Civil.

A grande finalidade deste tema é a de contribuir para o conhecimento geológico e geotécnico dos complexos vulcânicos, definidos pela nova vulcano-estratigrafia da ilha da Madeira, cuja carta geológica se encontra actualmente em fase de publicação.

A caracterização de um determinado complexo vulcânico, exige o conhecimento da formação geológica dos locais de afloramento dos materiais constituintes desse complexo vulcânico. Para isso, recorrem-se normalmente a caracterizações geológicas por meio de trabalhos de campo, seguidas da recolha de amostras e consecutivos ensaios laboratoriais e *in situ* com vista a classificar, geotecnicamente, os materiais. Estes dois processos em conjunto, viabilizam a caracterização geológica e geotécnica do material constituinte e conseqüentemente, dum afloramento pertencente a um determinado complexo vulcânico numa dada parte da ilha da Madeira.

Por forma, a evidenciar o que se fez, em termos de caracterização geológica e geotécnica das formações escolhidas, apresentam-se, separadamente, três amostras com características muito diferentes, recolhidas em afloramentos distintos, pertencentes aos complexos vulcânicos a analisar na presente investigação. Por razões de ordem técnica, apenas foi possível proceder à caracterização geológica e geotécnica das amostras recolhidas em três dos cinco afloramentos, inicialmente previstos.

De referir que, no decorrer desta dissertação, do ponto de vista geotécnico, recorreram-se a ensaios normalizados e publicados em Normas Portuguesas, Europeias e especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. Neste contexto, de referir também que, os ensaios em laboratório, foram inteiramente efectuados no Laboratório Regional de Engenharia Civil da Madeira, LREC, IP-RAM, sendo estes, os ensaios utilizados correntemente.

1.2. Estrutura do trabalho

De forma a transmitir mais facilmente o trabalho que foi efectuado, esta dissertação, foi dividida nos seguintes capítulos:

No capítulo 1, *Introdução*, são apresentados os objectivos e estrutura da presente dissertação; é feito um enquadramento geológico da ilha da Madeira e faz-se também referência à localização das três amostras escolhidas.

No capítulo 2, denominado *Caracterização geológica e geotécnica das formações*, são abordados alguns, dos métodos existentes, para classificar geológica e geotecnicamente os materiais em estudo, mediante trabalho de campo e ensaios laboratoriais e *in situ*, com o objectivo de fornecer a informação necessária à caracterização desses materiais.

No capítulo 3, *Análise e discussão de resultados*, é efectuada uma análise aos resultados obtidos no capítulo anterior remetendo-os para uma discussão, em que se compara estes resultados, aos obtidos a partir de outras fontes.

Finalmente, no capítulo 4, *Considerações Finais*, é apresentada a conclusão de todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação e perspectivas e sugestões para continuidade deste trabalho no futuro.

1.3. Enquadramento geológico da ilha da Madeira

1.3.1. Localização geográfica

O Arquipélago da Madeira fica situado no Atlântico Norte, ocupando uma posição central, no Atlântico Oriental, entre as costas de Portugal e Marrocos e os Arquipélagos dos Açores e das Canárias, entre as latitudes 30° 01' e 33° 08' e as longitudes 15° 51' e 17° 16'. Tendo uma área total de 796,8 km², é formado pela Madeira, maior e principal ilha do arquipélago, com uma área de 736,8 km², pelo Porto Santo, com 42,2 km² e por dois grupos de ilhas desabitadas, que são reservas naturais: as Desertas (Deserta Grande, Bugio e Ilhéu Chão), com 14,2 km² de área total, e as Selvagens (Selvagem Grande e Selvagem Pequena), que são as mais pequenas ilhas do arquipélago, com 3,6 km² (Prada, 2000).

De acordo com Silva (2003), este arquipélago constitui ainda, em conjunto com os arquipélagos dos Açores, Canárias e Cabo Verde, a região biogeográfica da Macaronésia, sendo de referir também, a grande proximidade entre a ilha da Madeira

e as ilhas do Porto Santo e Desertas, sendo possível avistar cada uma das ilhas, a partir de outra. Na Figura 1 é possível visualizar o enquadramento geográfico do arquipélago da Madeira, onde se podem ver também os arquipélagos dos Açores, Canárias e Cabo Verde.

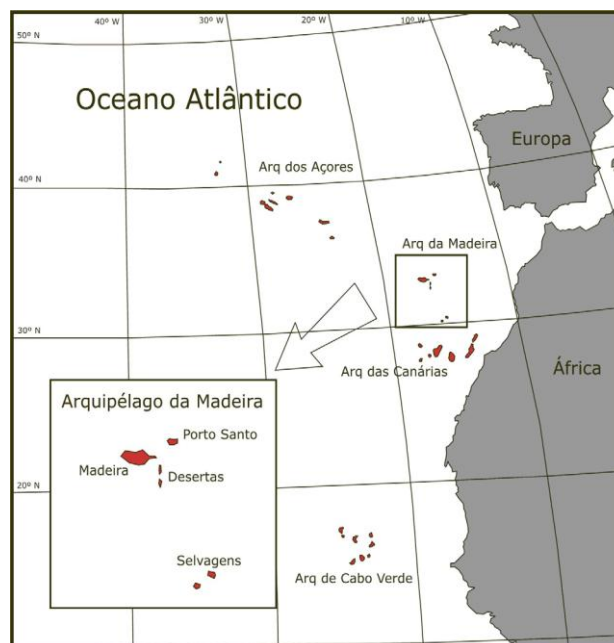


Figura 1 - Enquadramento geográfico do arquipélago da Madeira, onde se destacam também os arquipélagos dos Açores, Canárias e Cabo Verde (Ramalho, 2004).

Do ponto de vista geológico, o conjunto de ilhas que constituem o arquipélago da Madeira é, preferivelmente, separado em três grupos distintos (Prada, 2000):

- ✓ O grupo Madeira - Desertas, uma vez que a isóбата¹ dos 200 m une a Madeira às Desertas; estas consideram-se um prolongamento natural da ilha da Madeira, além de que existe, ainda, semelhança geológica entre elas;
- ✓ O Porto Santo, que apesar de se situar em pleno domínio oceânico, próximo da Madeira, encontra-se separado desta por um canal onde as isóbatas descem a mais de 2000 m, o que indica constituírem edifícios vulcânicos distintos, apresentando, ainda, litologia muito mais diversificada e idades mais antigas das formações aflorantes, às encontradas na Madeira;
- ✓ O grupo das Selvagens, situado a 290 km a SSE da extremidade leste da Madeira, já no domínio oceânico - marginal, tal como o arquipélago de Canárias, de que apenas dista 130 km, possuindo mesmo grandes afinidades com aquela província vulcânica.

¹ Num mapa batimétrico ou mapa hidrográfico que representa o relevo de zonas submersas, é a linha que une os pontos de igual profundidade dessas zonas.

No mapa batimétrico da Figura 2 destacam-se os dois edifícios vulcânicos Madeira - Desertas e Porto Santo separados por mais de 2000 m de profundidade.

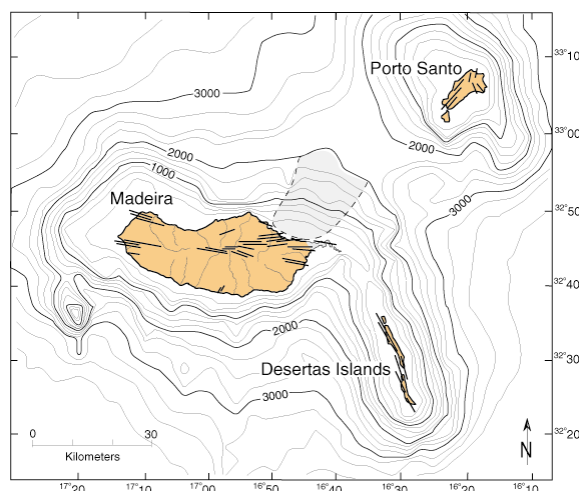


Figura 2 - Batimetria dos edifícios vulcânicos Madeira/Desertas e Porto Santo (Geldmacher *et al.*, 2000).

1.3.2. Enquadramento geotectónico e evolução geocronológica

A ilha da Madeira está situada na placa Africana, mais concretamente na região intraplaca, limitada, a nordeste, pelos Açores, junto da crista média Atlântica, a norte, pela complexa estrutura Açores – Gibraltar, e, a sudeste, pelas Canárias, cujas ilhas orientais estão situadas no talude continental Africano onde a litosfera apresenta características entre os tipos oceânico e continental (Prada, 2000).

A ilha da Madeira ergue-se, assim, acima de uma vasta planície submarina, no interior da placa africana, numa zona onde a crosta oceânica tem 130 Ma, formando um maciço vulcânico com mais de 5 km de altura, do qual, apenas, cerca de 1/3 se encontra emerso. A instalação das ilhas do arquipélago da Madeira processou-se em dois domínios morfo - estruturais distintos, separados por ampla fossa abissal:

- ✓ a Elevação Oceânica Madeira - Tore, com expressão subaérea nas ilhas da Madeira, Porto Santo e Desertas, situadas em pleno domínio oceânico;
- ✓ a Margem Atlântica, definida pela transição entre o domínio oceânico e continental africano, com representação nas ilhas Selvagens.

Segundo Mata (1996), a Crista Madeira-Tore que engloba, além da Madeira, Desertas e Porto Santo, os montes submarinos de Dragon, Lion, Josephine, Ashton e Tore, não se trata, de uma estrutura resultante da actuação de um *hot spot*. Apenas a extremidade sul daquele alinhamento, ou seja Porto Santo, Madeira e, eventualmente, Dragon são de origem vulcânica. Na Figura 3 apresenta-se um mapa batimétrico em que se podem observar os arquipélagos da Madeira, Açores e Canárias, sendo que se

podem também observar os montes submarinos que constituem a denominada Crista Madeira-Tore.

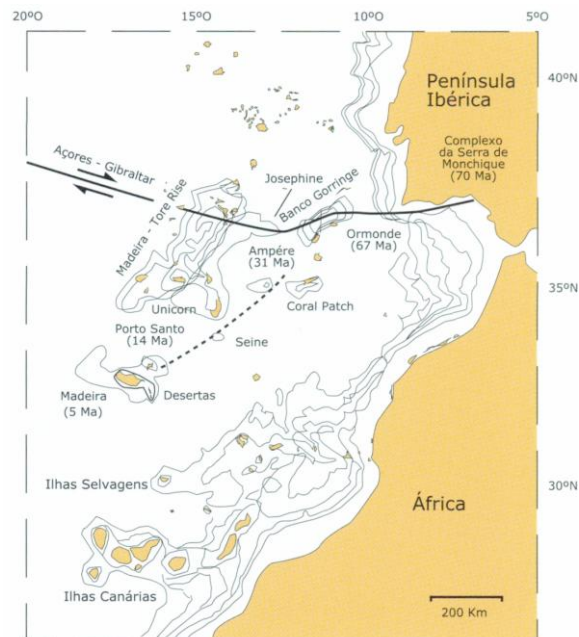


Figura 3 - Mapa batimétrico com os arquipélagos da Madeira, Canárias e montes submarinos (adaptado de Swith & Sandwell, 1997; Verhbitsky & Zolotarev, 1989 por Silva, 2003).

De acordo com Prada (2000), a Madeira é um exemplo de magmatismo oceânico intraplaca, sendo consensualmente considerada como um exemplo de um ponto quente ("hot-spot"), ou seja, uma zona pontual caracterizada por um fluxo de calor anômalo, cuja consequência mais evidente é a ocorrência de vulcanismo.

Segundo S. Prada, (informação oral), a emersão das ilhas da Madeira/Desertas terá ocorrido há mais de 5,6 Ma, a ilha do Porto Santo há aproximadamente 14 Ma e as ilhas Selvagens há 27 Ma. Mostra-se, na Figura 4, que o Hotspot Madeira (do qual não fazem parte as ilhas Selvagens) deslocou-se 700 km em 70 Ma.

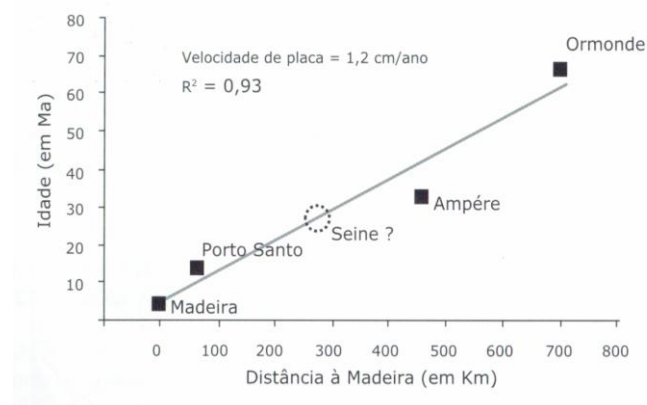


Figura 4 – Representação gráfica da evolução geocronológica do Hotspot Madeira (adaptado de Geldmacher et al., 2000 por Silva, 2003).

Assim, por ordem crescente de idade e de acordo com a escala dos tempos geológicos, as ilhas da Madeira e Desertas enquadram-se desde Miocénico superior até ao Quaternário; a ilha do Porto Santo, desde o Miocénico médio ao superior, enquanto as ilhas Selvagens, as mais antigas do arquipélago, situam-se desde o Oligocénico até ao Pliocénico.

1.3.3. Vulcano-estratigrafia

Os mais recentes estudos sobre a vulcano-estratigrafia da ilha da Madeira, Brum da Silveira *et al.*, 2008, dão conta de três complexos vulcânicos distintos cujas marcas permanecem bem presentes, hoje em dia, em certos pontos da ilha, e representam os vários ciclos da evolução do edifício vulcânico Madeira/Desertas. Tais complexos vulcânicos são por sua vez subdivididos em unidades conforme se esquematiza na Figura 5.

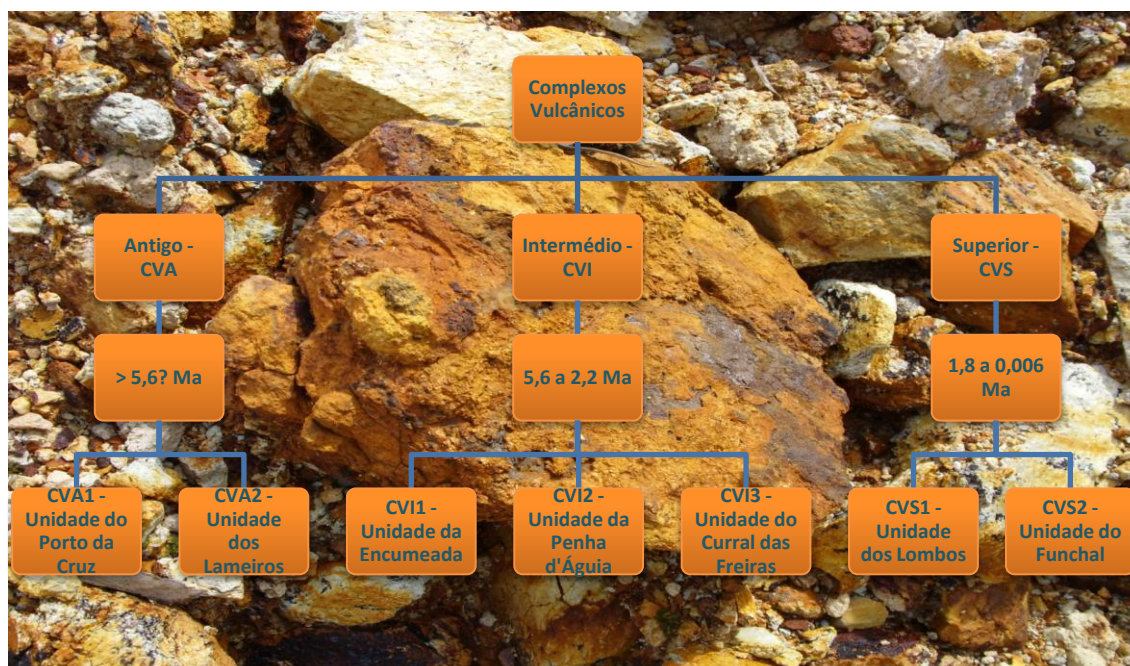


Figura 5 - Complexos Vulcânicos da ilha da Madeira, segundo Brum da Silveira *et al.*, 2008.

A única Carta Geológica da ilha da Madeira foi publicada pelos Serviços Geológicos de Portugal em 1974 (Zbyszewski *et al.*, 1974) na escala 1:50000. Actualmente, encontra-se *in press*, a nova Carta Geológica da Madeira, na escala 1:50000, da autoria de Brum da Silveira *et al.*, publicada pela Universidade da Madeira e Secretaria Regional do Ambiente e dos Recursos Naturais, RAM.

Assim, de acordo com Brum da Silveira *et al.* (2008), «na ilha da Madeira foram identificados, da base para o topo, o Complexo Vulcânico Antigo (CVA) (> 5,57 Ma?), Complexo Vulcânico intermédio CVI) (5,57 — 2,2 Ma) e Complexo Vulcânico Superior

(CVS) (1,8 — 0,006 Ma?). (...) Para além destas, identificaram-se depósitos recentes não vulcânicos, tais como, depósitos de movimentos de massa, leques aluviais, aluviões e terraços fluviais, areias e cascalheiras de praia, areias eólicas, depósitos de vertente, etc».

O Complexo Vulcânico Antigo (CVA) é o complexo vulcânico que inclui os materiais, que remontam ao período histórico mais antigo da geologia da Ilha da Madeira. Estes materiais representam o edifício vulcânico submarino que antecedeu a emersão plena da ilha da Madeira.

O Complexo Vulcânico Intermédio (CVI), com uma idade geológica entre o CVA e o CVS, foi separado em três fases distintas de actividade vulcânica, intercaladas por fases de actividade vulcânica nula ou reduzida, em que o edifício vulcânico foi muito afectado pela erosão.

O Complexo Vulcânico Superior (CVS) é o complexo vulcânico mais recente e vem, numa primeira fase, colmatar as formas erosivas adquiridas pelo edifício vulcânico no período anterior e por fim, gerar a forma vulcânica em que a ilha da Madeira se encontra actualmente.

1.4. Localização das amostras

No seguimento desta investigação, escolheram-se três materiais com características completamente diferentes, de sítios distintos, na ilha da Madeira.

Uma vez que se trata da primeira caracterização geológica e geotécnica, de acordo com a nova vulcano-estratigrafia da ilha da Madeira, qualquer um dos afloramentos era passível de ser amostrado. A opção escolhida foi pelos afloramentos de mais fácil acesso.

Cada um destes materiais é referenciado no texto, de acordo com o seu número ou com a sua litologia. Neste contexto e como ver-se-á seguidamente, a amostra nº 1, foi retirada de um afloramento de uma rocha vulcânica alterada; a amostra nº 2, de um afloramento de piroclastos consolidados; e a amostra nº 3, de um afloramento de uma escoada basáltica. Assim, neste subcapítulo, descreve-se o primeiro contacto directo com esses locais. Na Figura 6, é possível visualizar a localização e proximidade relativa das três amostras escolhidas, numa vista em planta sobre toda a ilha da Madeira.



Figura 6 – Localização das três amostras na ilha da Madeira em planta (Fonte: Google Earth).

1.4.1. Amostra nº 1

A amostra nº 1 foi recolhida no concelho de São Vicente, Madeira, num dos mais admiráveis vales da ilha, na encosta virada a Norte, a cerca de 100 m a Oeste da Estrada Regional 104, no Sítio do Loural, Rosário. Na Figura 7, apresenta-se, em pormenor, o local de origem desta amostra.



Figura 7 – Localização da amostra nº1, vista em planta com pormenor incluído (Fonte: Google Earth).

Identificação da amostra *in situ*:

- ✓ Referência atribuída pelo LREC: 070/10
- ✓ Tipo de material: Rocha vulcânica profundamente alterada
- ✓ Enquadramento vulcano-estratigráfico: Complexo Vulcânico Antigo – Unidade do Porto da Cruz (CVA1)
- ✓ Localização: Sítio do Loural, Rosário, São Vicente
- ✓ Coordenadas: N 32°46'30", W 17°02'00"

Na Figura 8 observa-se o local de afloramento da amostra nº 1.



Figura 8 – Afloramento do CVA1 ao qual pertence a amostra nº 1.

1.4.2. Amostra nº 2

A amostra nº 2 foi recolhida na Estrada Regional 228, antiga estrada de ligação entre São Vicente e Ribeira Brava, na vertente inclinada para Sul, do Vale da Serra de Água, na freguesia homónima, do concelho da Ribeira Brava, mais concretamente, a cerca de 700 m abaixo da Estalagem Encumeada. Na Figura 9, apresenta-se em pormenor, o local original desta amostra.



Figura 9 – Localização da amostra nº 2, vista em planta com pormenor incluído (Fonte: Google Earth).

Identificação da amostra *in situ*:

- ✓ Referência atribuída pelo LREC: 078/10
- ✓ Tipo de material: Piroclastos de diferentes dimensões, consolidados
- ✓ Enquadramento vulcano-estratigráfico: Complexo Vulcânico Intermédio – Unidade da Encumeada (CVI1)
- ✓ Localização: Estrada Regional 228, Serra de Água, Ribeira Brava (Encumeada)
- ✓ Coordenadas: N 32°44'37", W 17°01'30"

Na Figura 10 observa-se o local de afloramento da amostra nº 2.



Figura 10 – Afloramento de CVI1 ao qual pertence a amostra nº 2.

1.4.3. Amostra nº 3

A amostra nº 3 foi recolhida na Estrada Regional 228, a cerca de 800 metros a sul da amostra nº 2, próximo da Pousada dos Vinháticos. Na Figura 11, apresenta-se em pormenor, o local original desta amostra.

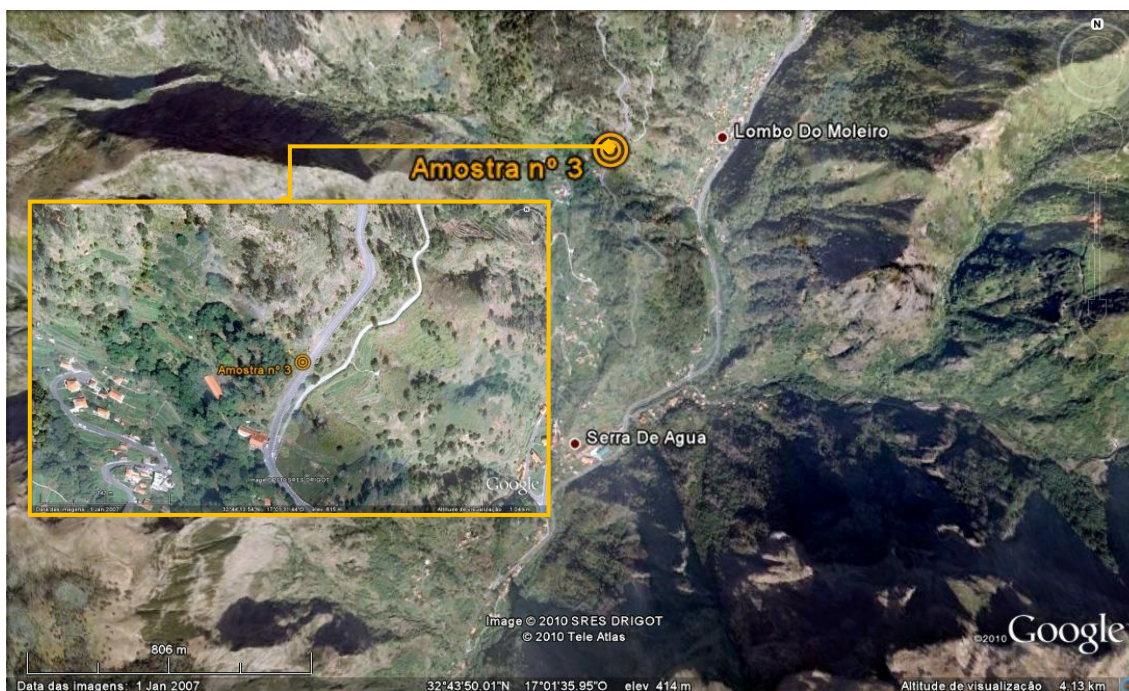


Figura 11 – Localização da amostra nº 3, vista em planta com pormenor incluído (Fonte: Google Earth).

Identificação da amostra *in situ*:

- ✓ Referência atribuída pelo LREC: 089/10
- ✓ Tipo de material: Escoda basáltica
- ✓ Enquadramento vulcano-estratigráfico: Complexo Vulcânico Intermédio – Unidade da Encumeada (CVI1)
- ✓ Localização: Estrada Regional 228, Serra de Água, Ribeira Brava (Encumeada)
- ✓ Coordenadas: N 32°44'13", W 17°01'30"

Na Figura 12 observa-se o local de afloramento da amostra nº 3.



Figura 12 – Afloramento de CVI1 ao qual pertence a amostra nº 3.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DOS MATERIAIS AMOSTRADOS

2.1. Introdução

Este capítulo aborda dois ramos da ciência designados por Geologia e Geotecnia. Por seu turno a geotecnia, aborda três importantes domínios de actividade que têm como objecto de estudo os materiais geológicos da camada superficial da crosta terrestre, nomeadamente, a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas.

De certa forma, contudo inclinada para o lado da Engenharia Civil, a Geologia de Engenharia assimila as propriedades físico-químicas e mecânicas da crosta terrestre estudadas pela Geologia no seu estado puro. Por esta razão, e pelo facto desta dissertação decorrer do ponto de vista da Engenharia Civil, optou-se por uma caracterização geológica baseada na Geologia da Engenharia e numa caracterização geotécnica seguindo os padrões normais da Mecânica dos Solos e da Mecânica das rochas.

Na caracterização geológica, efectua-se, inicialmente, uma breve introdução aos tipos de erupção e respectivos produtos emitidos que deram origem à ilha da Madeira, pelo facto de ser essencial para compreender a origem das três amostras. Define-se, seguidamente, a litologia das formações geológicas estudadas e define-se, também, tendo em conta o estudo das discontinuidades, o comportamento mecânico dos maciços rochosos, procedendo às respectivas classificações.

Na caracterização geotécnica procede-se aos ensaios *in situ* e em laboratório, visando o estudo das condições de cada amostra, recorrendo para isso a trabalho de campo efectuado pelo próprio e ao LREC, IP-RAM, de modo a acompanhar de perto todo o processo dos ensaios efectuados, em laboratório, às três amostras em estudo.

2.2. Caracterização geológica

2.2.1. O vulcanismo e as rochas magmáticas

Numa primeira instância, em termos de caracterização geológica, há a necessidade de conhecer o processo vulcânico que deu origem à ilha da Madeira e os materiais típicos deste tipo de vulcanismo.

A evolução, por fases, do edifício vulcânico da ilha da Madeira, descrita no capítulo anterior, é característica dos vulcões-escudo oceânicos, como é o caso do Mauna Loa, no Havai, o maior edifício vulcânico da Terra, sendo que, só a montanha emersa tem 4168 m de altura (SCHMINKE, 2004).

De acordo com Nunes (2002), este tipo de vulcão é gerado por erupções do tipo Havaianas, que expelem enormes quantidades de lava sob a forma de extensas escoadas lávicas basálticas, normalmente a partir de fissuras eruptivas, que gradualmente constroem uma montanha larga com o perfil em forma de escudo. Conforme se esquematiza na Figura 13, na fase inicial destes vulcões está também presente a extrusão de pequenos volumes de depósitos piroclásticos, sob a forma de “repuxos lávicos” e de acumulações de “salpicos de lava”.

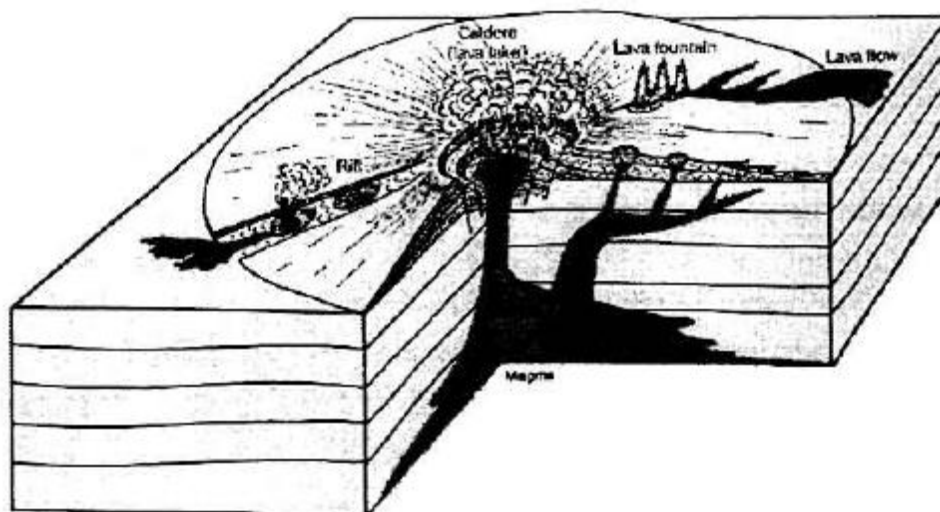


Figura 13 – Representação esquemática da actividade havaiana (Krafft e Krafft, 1975 in Nunes, 2002).

De forma a identificar a composição das rochas provindas directamente do magma como é o caso das amostras recolhidas, há que regredir um pouco até à sua origem, ou seja, até à fonte de ignição que as colocou na superfície da crosta terrestre.

Os vulcões, estruturas geológicas constituídas pelas condutas, que permitem a ascensão de magma até à superfície terrestre e pela acumulação dos produtos extruídos, caracterizam-se por dois tipos de erupção:

- ✓ Erupção explosiva, em que há emissão violenta de material sob a forma de piroclastos (Figura 14 a));
- ✓ Erupção efusiva em que a emissão de material é calma sob a forma de um líquido que escorre, originando derrames ou escoadas lávicas (Figura 14 b)).



Figura 14 – a) Erupção explosiva do Monte de Santa Helena; b) Erupção efusiva no arquipélago do Havai (Fonte: www.usgs.gov).

Da consolidação do magma, que é basicamente, uma mistura de rocha fundida, gases e cristais, a temperaturas superiores a 600 °C e pressões variáveis em função da profundidade, resultam as rochas magmáticas. Estas classificam-se, essencialmente, como rochas extrusivas e intrusivas, em função do local onde arrefecem, ou seja, se é um processo rápido ou lento, à superfície ou em profundidade, respectivamente. De acordo com Nunes (2002), os produtos vulcânicos podem assim agrupar-se em função do seu modo de emissão:

- ✓ Escoadas lávicas, ou seja, material em fusão, associado a fases efusivas, que se movimenta ao longo das vertentes;
- ✓ Piroclastos, ou seja, fragmentos projectados como partículas discretas, na dependência de explosões vulcânicas.

De acordo com SCHMINCKE (2004) e NUNES (2002), os piroclastos de queda, caso dos piroclastos em estudo, classificam-se, segundo a dimensão das partículas piroclásticas em:

- ✓ Cinzas: se apresentam dimensões inferiores a 2 mm. Quando consolidadas, designam-se por tufos;
- ✓ Lapilli: quando os clastos têm dimensões compreendidos entre 2 a 64 mm. Quando consolidados, designam-se por tufos de lapilli;
- ✓ Bombas e blocos: se têm dimensões superiores a 64 mm e apresentam, respectivamente, uma forma arredondada, ou angulosa. Quando consolidados, designam-se por aglomerados e brechas, respectivamente.

2.2.2. Classificação geológica

Do ponto de vista da Geologia de Engenharia, a classificação dos terrenos tem por base critérios geológicos e parâmetros para aplicações práticas do domínio da engenharia civil. Definem-se, assim, os parâmetros que melhor caracterizam uma formação.

Às formações constituídas por solos é atribuída a designação genérica de maciços terrosos, enquanto as que são essencialmente constituídas por material rocha se designam por maciços rochosos. Ao primeiro grupo, pertencem os terrenos que se desagregam facilmente, quando agitados dentro de água e que se classificam segundo critérios de classificação universalmente aceites, praticados pela Mecânica dos Solos. Quanto aos maciços rochosos, não há ainda nenhuma classificação universal, ainda que existam sistemas de classificação aceites internacionalmente da autoria de dois grupos de trabalho, nomeadamente, da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, ISRM, criada em 1972 e da Associação Internacional de Geologia de Engenharia, IAEG, criada em 1975.

Os critérios de classificação apresentados seguidamente baseiam-se sobretudo no ISRM, e partiram de análises macroscópicas a amostras e observação e descrição de afloramentos.

Procede-se, assim, à classificação geológica dos locais de afloramento das amostras, tendo em conta, os seguintes aspectos:

- ✓ Classificação litológica;
- ✓ Descontinuidades presentes nos maciços;
- ✓ Classificação baseada no estado de alteração, estado de fracturação e espessura das camadas.

2.2.2.1. Classificação litológica

Do ponto de vista geológico, a amostra nº 1, está enquadrada no Complexo Vulcânico Antigo – Unidade do Porto da Cruz (CVA1). É, portanto, um afloramento de materiais

antigos, pertencentes, muito provavelmente, à fase inicial de construção do edifício vulcânico da ilha. Por se apresentarem num estado profundamente alterado, estes materiais foram considerados, do ponto de vista geotécnico como solo, no entanto, pensa-se que poderão ter sido, no passado, rochas vulcânicas pois os grãos ainda apresentam algumas características originais da rocha. Assim, apesar de não ser possível determinar com rigor a sua natureza, devido à sua idade e conseqüente grau de alteração, estamos em presença de rochas magmáticas, de origem vulcânica. Quanto ao tipo de material, explosivo ou efusivo, dadas as características do afloramento, julga-se estar em presença de escoadas.

Na Figura 15 apresentam-se, em pormenor, algumas características deste solo.



Figura 15 – Pormenores característicos do solo ao qual pertence a amostra nº 1.

Quanto à amostra nº 2 e à amostra nº 3, ambas, pertencem ao Complexo Vulcânico Intermédio – Unidade da Encumeada (CVI1). A zona em que se encontram, é predominantemente constituída por uma alternância, de escoadas basálticas e tufos, podendo ainda ser encontrados depósitos conglomerático-brechoides.

A amostra nº 2, do ponto de vista litológico, trata-se de uma rocha magmática de origem vulcânica, explosiva, consolidada. Trata-se de um tufo de *lapilli*, uma vez que apesar de conter partículas das dimensões das cinzas e bombas, predominam claramente os *lapilli*.

A amostra nº 3 é também de origem magmática, vulcânica, efusiva e trata-se duma escoada subaérea de natureza basáltica.

Na Figura 16 apresentam-se, em pormenor, algumas características da amostra nº 2, constituída por materiais piroclásticos consolidados.



Figura 16 – Pormenores característicos do piroclasto consolidado ao qual pertence a amostra nº 2.

Na Figura 17 apresentam-se, em pormenor, algumas características da escoada basáltica (amostra nº 3).



Figura 17 – Pormenores característicos da escoada basáltica à qual pertence a amostra nº 3.

2.2.2.2. Estudo das descontinuidades

A descrição da qualidade de um maciço, especialmente de um maciço rochoso, inclui por sistema, a análise das características das descontinuidades ocorrentes nesses locais.

As propriedades geotécnicas dos maciços rochosos são muito condicionadas pelas suas descontinuidades, conferindo-lhes um comportamento, em termos de, deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade substancialmente diferente do material rocha que constitui esses maciços.

Em termos práticos uma descontinuidade é qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de uma dada formação, em que a resistência é nula ou muito baixa. As descontinuidades podem ser agrupadas por famílias, em que cada

família é um conjunto de descontinuidades com a mesma orientação e gênese (Maurício *et al.*, 2002).

Os tipos de descontinuidades mais frequentes nas regiões vulcânicas são (informação oral de S. Prada):

- ✓ **Falhas**, que são superfícies de fractura com movimento relativo dos blocos;
- ✓ **Diaclases**, que são superfícies de fractura num maciço rochoso na quais não existe movimento apreciável;
- ✓ **Superfícies de estratificação**, que são os planos que, nas rochas sedimentares, separam ou limitam os sucessivos estratos;
- ✓ **Superfícies de contacto entre diferentes litologias ou formações**, ou seja, entre diferentes tipos de rocha ou entre filões e o encaixante.

A ISRM, Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, publicou um documento em 1981 que indica os métodos de estudo das descontinuidades. De acordo com este documento, devem ter-se em conta, a atitude; o espaçamento; a continuidade; a rugosidade; a abertura e o enchimento.

No caso da amostra nº 2, um tufo de *lapilli*, este tem um comportamento de rocha devido ao seu elevado estado de consolidação, no entanto, não ocorrem descontinuidades sistemáticas, verificando-se apenas a existência de raras descontinuidades isoladas, possivelmente relacionadas com processos de alteração.

Relativamente à escoada basáltica, estamos perante um maciço rochoso claramente afectado por descontinuidades das quais se destacam as diaclases, conforme se pode constatar na Figura 18.



Figura 18 - Descontinuidades observadas na amostra nº3 (escoada basáltica).

Assim, de acordo com o Método de Estudo das Descontinuidades, determinaram-se os parâmetros indicativos, referidos anteriormente, relativos ao maciço em estudo da amostra nº 3.

Relativamente à **atitude** dos planos de descontinuidade, mediu-se, utilizando uma Bússola de Geólogo, a orientação no espaço, ou seja, direcção e inclinação das diáclases (Figura 19). Nesta escoada basáltica, observaram-se várias famílias de diáclases, sendo que as duas predominantes têm a seguinte atitude:

- ✓ Família A: NS, subvertical.
- ✓ Família B: EO, subvertical



Figura 19 - Medição da orientação da descontinuidade da família A da amostra nº 3.

Relativamente ao **espaçamento** ou a distância média medida com uma fita métrica na perpendicular, entre duas descontinuidades consecutivas da mesma família, classificou-se, a escoada basáltica, de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 - Espaçamento entre fracturas (adaptado de ISRM, 1981).

Descrição	Espaçamentos (mm)
Extremamente próximas	< 20
Muito próximas	20 – 60
Próximas	60 – 200
Moderadamente afastadas	200 – 600
Afastadas	600 – 2000
Muito afastadas	2000 – 6000
Extremamente afastadas	> 6000

Numa área extensa de descontinuidades um espaçamento demasiado pequeno pode significar uma perda de coesão do maciço rochoso e o parâmetro orientação, previamente estudado, decresce de importância quanto à sua influência em relação às características de resistência e deformabilidade dos maciços. Conforme se apresenta na Figura 20, mediram-se valores médios para cada família:

- ✓ Família A: 80 cm.
- ✓ Família B: 20 cm.



Figura 20 - Medição do espaçamento entre duas descontinuidades da família A na escoada basáltica.

Do Quadro 1, verifica-se que os espaçamentos medidos, para a escoada basáltica, são próximos a moderadamente afastados na família B e afastados na família A.

Relativamente à **continuidade** ou o comprimento do plano da descontinuidade, classificou-se a escoada basáltica de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 - Descrição da continuidade (adaptado de ISRM, 1981).

Continuidade	Comprimento (m)
Muito pouco contínua	< 1
Pouco contínua	1 – 3
Medianamente contínua	3 – 10
Contínua	10 – 20
Muito contínua	> 20

A continuidade é um dos parâmetros que maior influência tem no comportamento dos maciços rochosos. Mediram-se valores de aproximadamente cinco metros na escoada basáltica (Figura 21).



Figura 21 - Continuidades das fracturas observadas.

De acordo com o Quadro 2, considera-se, a escoada basáltica medianamente contínua.

A **rugosidade**, ou seja, as várias irregularidades observadas na escoada basáltica que a superfície das paredes das descontinuidades apresenta, classificaram-se com base na Figura 22.

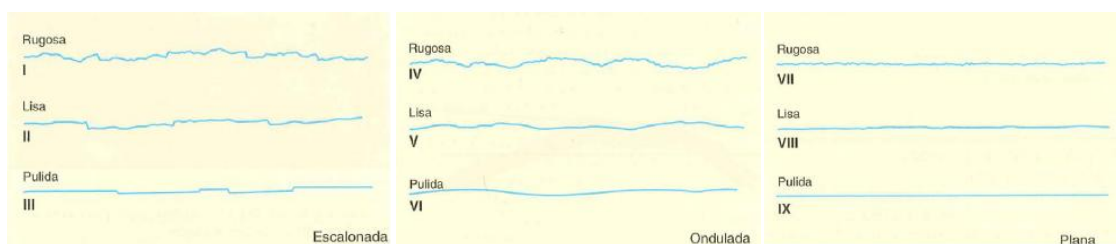


Figura 22 – Rugosidades (adaptado de ISRM, 1981).

A rugosidade é um factor com especial incidência na resistência ao escorregamento de uma descontinuidade, especialmente se esta não estiver preenchida. Na escoada basáltica e conforme se pode observar na Figura 23, consideram-se as duas famílias planas rugosas.



Figura 23 – Rugosidades observadas na escoada basáltica.

Relativamente à **abertura**, ou seja, a distância que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade, classificou-se segundo o Quadro 3.

Quadro 3 - Designação de aberturas (adaptado de ISRM, 1981).

Designação	Abertura (mm)
Muito fechadas	< 0,1
Fechadas	0,1 – 0,25
Parcialmente abertas	0,25 – 0,5
Abertas	0,5 – 2,5
Largas	2,5 – 10
Muito largas	10 – 100
Extremamente largas	100 – 1000
Cavernosas	> 1000

A abertura da descontinuidade tem influência na permeabilidade e na resistência ao deslizamento dos maciços rochosos, dado que, a uma maior abertura corresponde uma diminuição de contactos entre as paredes da descontinuidade.

A abertura foi medida com uma régua, conforme se pode observar na Figura 24, e registaram-se valores do tipo:

- ✓ Família A \approx 5 a 20mm
- ✓ Família B \approx 0,1 a 0,5mm



Figura 24 - Medição da abertura entre duas descontinuidades da escoada basáltica.

De acordo com o Quadro 3, considera-se que a abertura das descontinuidades da escoada basáltica é entre larga e muito larga na família A e entre fechadas a parcialmente abertas na família B.

Quanto ao **enchimento** observado na escoada basáltica, ou seja, o material que preenche o espaço entre as paredes da descontinuidade, consiste em vegetação e terra vegetal, o que pode ser observado na Figura 25.

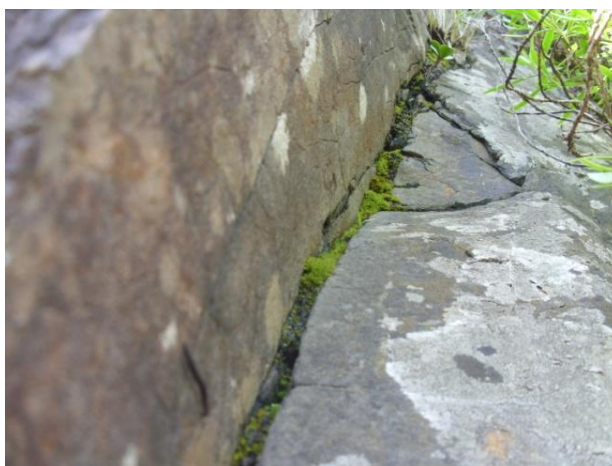


Figura 25 – Enchimento observado na abertura entre duas descontinuidades da escoada basáltica.

2.2.2.3. Classificação baseada no estado de alteração, fracturação e espessura das camadas

As características de qualidade de maciços rochosos são consequência do seu estado de alteração, fracturação e espessura da camada.

i. Estado de alteração

Do ponto de vista da engenharia, o estado de alteração define-se como o conjunto de modificações físico-químicas, a que as rochas estão sujeitas e que conduz à degradação das suas características mecânicas.

O estado de alteração é indicado, à custa de uma descrição baseada em métodos expeditos de observação. Em rochas refere-se, normalmente, à maior ou menor facilidade com que se parte o material, utilizando um martelo, ou a sua coloração e brilho como consequência da alteração de certos minerais como feldspatos e minerais ferromagnesianos. Consideram-se, tendo em conta o Quadro 4, cinco graus de alteração dos maciços rochosos.

Quadro 4 – Grau de alteração de maciços rochosos (adaptado de ISRM, 1981).

Símbolos	Designações	Características
W₁	São	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 mas a rocha não é friável
W₄	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é friável
W₅	Decomposto	Maciço completamente friável com comportamento de solo

O grau de alteração do maciço, ao qual pertence a amostra nº 1, dada a sua fragilidade e coloração amarela brilhante, resultante da alteração dos minerais, foi considerado W₅ - decomposto, o estágio mais elevado de alteração, com um comportamento próximo de um solo.

Relativamente ao maciço em que se encontra a amostra nº 2, este foi considerado um W₃, porque, apesar de a rocha não ser friável, já evidencia sinais de alteração química do ferro presente nos minerais, reflectindo-se na cor avermelhada (hematite).

Quanto ao maciço de onde foi recolhida a amostra nº 3, considerou-se que este possui um grau de alteração W₂. Isto deve-se ao facto, de se evidenciarem sinais de alteração apenas, nas imediações das descontinuidades, sendo que, a rocha matriz encontra-se alterada mas não é quebradiça.

ii. Estado de fracturação e espessura das camadas

O estado de fracturação de um maciço rochoso é, basicamente, o espaçamento médio entre as suas diaclases, enquanto que a espessura das camadas, é a distância entre a base e o topo da camada.

Segundo o ISRM, foram adoptados valores idênticos para os limites das várias classes destas duas características. As designações das classes dos espaçamentos das fracturas e as das espessuras das camadas têm, desta forma cinco classes e são, respectivamente apresentadas no Quadro 5 e no Quadro 6.

Quadro 5 – Grau de fracturação de maciços rochosos (adaptado de ISRM, 1981).

Símbolos	Intervalos entre fracturas (cm)	Designação
F ₁	> 200	Muito afastadas
F ₂	60 - 200	Afastadas
F ₃	20 - 60	Medianamente afastadas
F ₄	6 - 20	Próximas
F ₅	< 6	Muito próximas

Quadro 6 – Espessura das camadas em maciços rochosos (adaptado de ISRM, 1981).

Símbolos	Espessura da camada (cm)	Designação
L ₁	> 200	Muito espessas
L ₂	60 - 200	Espessas
L ₃	20 - 60	Espessura mediana
L ₄	6 - 20	Delgadas
L ₅	< 6	Muito delgadas

O maciço em que se encontra a amostra nº 1, apresenta um grau de fracturação F₅, uma vez que os fragmentos de rocha são maioritariamente inferiores a 6 cm. Em relação à espessura das camadas, trata-se de um L₁.

Relativamente ao maciço constituído pela amostra nº 2, considerou-se um F₁, uma vez que se trata de uma formação resultante da acumulação de piroclastos de queda, que não originam fracturas primárias, sistemáticas. As descontinuidades encontradas são aleatórias e resultam de processos secundários. Quanto à espessura das camadas, trata-se de um L₁.

Quanto ao maciço constituído pela amostra nº 3, considerou-se que este possui um grau de fracturação - F₂ / F₃, isto é, com fracturas medianamente afastadas a afastadas. Em relação à espessura das camadas, trata-se de um L₁.

2.3. Caracterização geotécnica

2.3.1. Propriedades geotécnicas e parâmetros estudados

Sob um ponto de vista da Geologia de Engenharia, focado agora sobre a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas procede-se nesta caracterização geotécnica à identificação das propriedades índice de cada amostra em estudo.

Estas propriedades foram avaliadas a partir de testes no campo e em laboratório, e possibilitam a classificação dos solos e das rochas de acordo com vários critérios técnicos.

Relativamente à amostra nº 1 (solo) foram efectuados ensaios em laboratório de identificação, tais como a análise granulométrica e os limites de Atterberg. Foram igualmente efectuados ensaios para a caracterização do estado físico do solo, também em laboratório, tais como o teor em água e a densidade das partículas.

Sendo de esperar que qualquer depósito de solos naturais evidencie variação mais ou menos significativa das suas propriedades físicas, neste afloramento foram recolhidas três amostras do mesmo material.

No que respeita às amostras nº 2 e nº 3, nomeadamente o tufo de *lapilli* e o basalto, procedeu-se de forma idêntica considerando ambas como rochas. Assim, classificou-se estes dois materiais tendo em conta o estado da matriz rochosa (rocha intacta).

Os critérios mais correntes de classificação do "material rocha" baseiam-se, na sua maioria, nos parâmetros módulo de elasticidade, resistência à compressão simples e velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, por serem, por um lado, valores que facilmente podem ser obtidos através de ensaios e, por outro, por caracterizarem de modo significativo o comportamento mecânico da rocha.

No caso das amostras nº 2 e nº 3, determinaram-se apenas os dois primeiros parâmetros, tendo os ensaios para obtenção destes parâmetros sido realizados sobre provetes cilíndricos de rocha, caroteados a partir de blocos da amostra. Assim, utilizaram-se provetes com uma relação entre a altura e o diâmetro (L/D) igual a 1 e a 2, e diâmetros com cerca de 50 e 70 mm. Foram ainda realizados ensaios *in situ* com o Martelo de Schmidt.

2.3.2. Ensaio realizados ao solo vulcânico de S. Vicente

Foram colhidas três amostras (A, B e C) do solo pertencente à unidade CVA1 com o auxílio de uma pá (Figura 26).



Figura 26 – Colheita das amostras.

A quantidade recolhida de cada amostra foi função dos ensaios planeados. As amostras foram acondicionadas e transportadas em sacos de plástico bem fechados de forma a preservar as condições do solo, em particular o seu teor em água.

Sobre cada uma das amostras, foram realizados os seguintes ensaios:

- ✓ Teor em água;
- ✓ Análise granulométrica;
- ✓ Limites de Atterberg;
- ✓ Densidade das partículas.

De forma a se separar um certo volume de solo de uma amostra nas quantidades estritamente necessárias para os ensaios a realizar, e garantir que essa porção de solo tem as características do conjunto desse volume, ou seja, que é uma amostra representativa, as amostras foram preparadas de acordo com especificação LNEC E 195-1966, “Solos. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação”.

i. Preparação geral de cada amostra

O processo de preparação de cada uma das três amostras consistiu nas actividades seguintes:

a) Cada amostra, tal como foi recebida do campo, foi seca ao ar, e destorroada sem reduzir o tamanho individual das partículas (Figura 27).



Figura 27 - Destorroamento da amostra.

b) Foi seleccionada, com recurso a um repartidor, uma amostra representativa na quantidade necessária para realizar os ensaios desejados (Figura 28).



Figura 28 – Divisão da amostra com recurso a um repartidor.

c) A porção seleccionada foi pesada (Figura 29), e o valor obtido, registado como a massa total do provete, não corrigida da humidade higroscópica.



Figura 29 - Pesagem do provete.

ii. Preparação da amostra para a análise granulométrica

Após a preparação geral das amostras, cada uma delas foi preparada para a análise granulométrica de acordo com o seguinte processo:

a) A amostra foi separada em duas porções por intermédio do peneiro ASTM nº 10 com abertura de malha de 2,00 mm; o material que passou foi utilizado na análise granulométrica dos finos e o material retido destinou-se à análise granulométrica dos grossos (Figura 30).



Figura 30 – Separação do material por intermédio do peneiro de 2,00 mm de abertura.

b) A fracção retida nesse peneiro foi desagregada por meio de um almofariz e pilão, até que as partículas fossem levadas às suas dimensões individuais, e separada novamente em duas fracções por meio do peneiro de 2,00 mm de abertura (Figura 31).

As fracções que passaram no peneiro de 2,00 mm de abertura em ambas as operações de peneiração, foram misturadas completamente e seleccionado, para a análise granulométrica dos finos, um provete com, aproximadamente, 75 g.



Figura 31 – Desagregação do material com um almofariz e pilão e posterior separação por intermédio do peneiro de 2,00 mm de abertura.

c) O material retido no peneiro de 2,00 mm de abertura, foi pesado e colocado num balde com água de modo a executar a lavagem da amostra tendo este ficado imerso, durante cerca de 24 h (Figura 32).



Figura 32 – Pesagem e imersão do provete.

h) Após este período o material foi lavado no peneiro de 2,00 mm de abertura (Figura 33), e seco na estufa a 105 – 110 °C até massa constante.



Figura 33 – Lavagem do provete no peneiro de 2,00 mm de abertura.

iii. Preparação da amostra para a determinação dos limites de Atterberg

No seguimento da preparação anterior, a porção remanescente do material que passou no peneiro de 2,00 mm de abertura foi separada em duas partes por meio do peneiro ASTM nº 40 de 0,425 mm de abertura. A fracção retida neste peneiro foi desagregada por meio do almofariz e pilão, de modo a levar as partículas ao seu tamanho individual (Figura 34).



Figura 34 – Peneiro de 0,425 mm de abertura; Passagem de material neste peneiro; Desagregação das partículas com pilão.

O solo desagregado foi separado em duas fracções através do peneiro de 0,425 mm de abertura, e o material retido nesse peneiro desagregado novamente.

As diversas fracções do material passado no peneiro de 0,425 mm de abertura, obtidas pelas operações de desagregação e peneiração, foram então completamente misturadas e guardadas para os ensaios de determinação dos limites de liquidez e de plasticidade.

2.3.2.1. Determinação do teor em água

Os teores em água das amostras foram determinados de acordo com a norma NP-84, Solos. Determinação de teor em água, 1965.

Uma vez que estes teores em água são afectados pelas condições meteorológicas no momento da recolha, a sua determinação foi efectuada imediatamente após a chegada ao laboratório.

O teor em água de um provete de solo é o quociente, expresso em percentagem, da massa de água que se evapora do provete entre 105 °C e 110 °C, pela massa do provete depois de seco.

Basicamente, o ensaio consiste em obter um provete representativo, que é pesado e depois submetido a um processo de secagem na estufa até massa constante (Figura 35).



Figura 35 – Pesagem da cápsula; Obtenção do provete; Secagem na estufa.

O teor em água é então dado pela expressão (1):

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

W – é o teor em água expresso em percentagem;

W_w – massa de água;

W_s - massa do provete seco.

i. Resultados

O Quadro 7 apresenta os resultados para este ensaio referentes às três amostras de solo, bem como a média dos três teores obtidos em cada amostra.

Quadro 7 – Teores em água das três amostras.

Nº da Amostra	Teor em água (%)
070/10 - A	31,4
070/10 - B	31,4
070/10 - C	27,5
Teor em água médio das três amostras:	30,1

2.3.2.2. Análise granulométrica

Entende-se por composição granulométrica, ou granulometria de um solo, a distribuição em percentagem do peso total das suas partículas de acordo com as suas dimensões.

Assim, a análise granulométrica de um solo tem como principal objectivo determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas que o constituem.

O ensaio foi executado de acordo com a especificação LNEC E 196-1966 – “Solos. Análise granulométrica”.

i. Análise granulométrica da fracção retida no peneiro de 2,00 mm de abertura

A análise granulométrica desta fracção consiste na separação do material grosso através de uma série de peneiros de malhas quadradas, com dimensões superiores a 2,00 mm, determinando simultaneamente as massas de cada fracção retida. Assim, peneirou-se o material grosso através de peneiros de malha quadrada com as aberturas de 25,4 mm (1”), 19,0 mm (3/4”), 9,51 mm (3/8”), 4,76 mm (nº 4), 2,00 mm (nº 10). Na Figura 36 ilustra-se de forma resumida o processo.



Figura 36 – Série de peneiros utilizados para análise granulométrica do material grosso; Pesagem do provete a peneirar; Início da peneiração.

ii. Análise granulométrica da fracção passada no peneiro de 2,00 mm de abertura

Após um pré-tratamento com água oxigenada desta fracção, foi adicionado um antifloculante para reduzir a tensão superficial das partículas, e passou-se à dispersão do solo dando início a uma sequência de passos, por forma a separar, através do peneiro ASTM nº 200 de 0,075 mm de abertura, o material para a peneiração e o material destinado à sedimentação, conforme se ilustra resumidamente na Figura 37 e na Figura 38. O material, retido no peneiro de 0,075 mm de abertura, foi seco na estufa até à massa constante e posteriormente separado através de uma série de peneiros com malhas compreendidas entre 0,850 mm e 0,075 mm.



Figura 37 – Ebulição da mistura com antifloculante; Separação no peneiro de 0,075 mm de abertura para a peneiração dos finos; Transferência da porção passada no peneiro de 0,075 mm de abertura para a proveta de 1000 cm³ para a sedimentação.



Figura 38 – Transferência do material retido, destinado à peneiração dos finos, para a cápsula para posterior secagem na estufa; Série de peneiros utilizados na peneiração do provete.

iii. Sedimentação (material passado no peneiro de 0,075 mm de abertura)

Nesta última fracção, a análise granulométrica foi determinada pelo método da sedimentação, cujo princípio se baseia na velocidade de queda das partículas de solo postas em suspensão numa proveta com água, obtida através da densidade da suspensão a diferentes intervalos de tempo conforme se ilustra na Figura 39 e na Figura 40.



Figura 39 – Proveta com material para a sedimentação; Agitação da proveta; Proveta com densímetro introduzido.



Figura 40 – Remoção do densímetro; Colocação deste numa proveta com água destilada; Medição da temperatura.

iv. Resultados

No Quadro 8, apresentam-se os resultados das análises granulométricas.

Quadro 8 – Resultados das análises granulométricas referentes às três amostras.

	Nº do peneiro	Amostra 070/10 - A		Amostra 070/10 - B		Amostra 070/10 - C	
		Diâmetro (mm)	% Passada	Diâmetro (mm)	% Passada	Diâmetro (mm)	% Passada
Peneiração: Fracção grossa	1"	25,00	100	25,00	100	25,00	100
	3/4"	19,00	99	19,00	99	19,00	99
	3/8"	9,50	97	9,50	98	9,50	96
	Nº 4	4,75	92	4,75	95	4,75	89
	Nº 10	2,00	82	2,00	90	2,00	77
Peneiração: Fracção fina	Nº 20	0,850	78	0,850	89	0,850	67
	Nº 40	0,425	73	0,425	88	0,425	58
	Nº 60	0,250	70	0,250	86	0,250	53
	Nº 140	0,106	62	0,106	80	0,106	43
	Nº 200	0,075	59	0,075	77	0,075	39
Sedimentação	-	0,0401	58	0,0371	73	0,0436	37
	-	0,0292	53	0,0275	66	0,0315	33
	-	0,0192	46	0,0185	56	0,0204	29
	-	0,0115	39	0,0115	42	0,0122	23
	-	0,0082	36	0,0084	35	0,0088	19
	-	0,0059	31	0,0062	27	0,0062	19
	-	0,0030	24	0,0031	22	0,0031	15
	-	0,0013	17	0,0013	15	0,0013	8
	-	0,0009	15	0,0009	12	0,0009	8

A partir dos resultados obtidos, traçaram-se as curvas granulométricas referentes a cada uma das três amostras. A estas curvas granulométricas adicionou-se uma legenda de acordo com o Quadro 9.

Quadro 9 - Fracções granulométricas para cada tipo de solo (adaptado de LNEC E 196, 1966)

Tipo de solo:	Fracção granulométrica a que se refere (mm):
Seixo grosso	De 60 a 20
Seixo médio	De 20 a 6
Seixo fino	De 6 a 2
Areia grossa	De 2 a 0,6
Areia média	De 0,6 a 0,2
Areia fina	De 0,2 a 0,06
Silte grosso	De 0,06 a 0,02
Silte médio	De 0,02 a 0,006
Silte fino	De 0,006 a 0,002
Argila	Menor que 0,002

Na Figura 41 apresentam-se as curvas granulométricas relativas às três amostras.

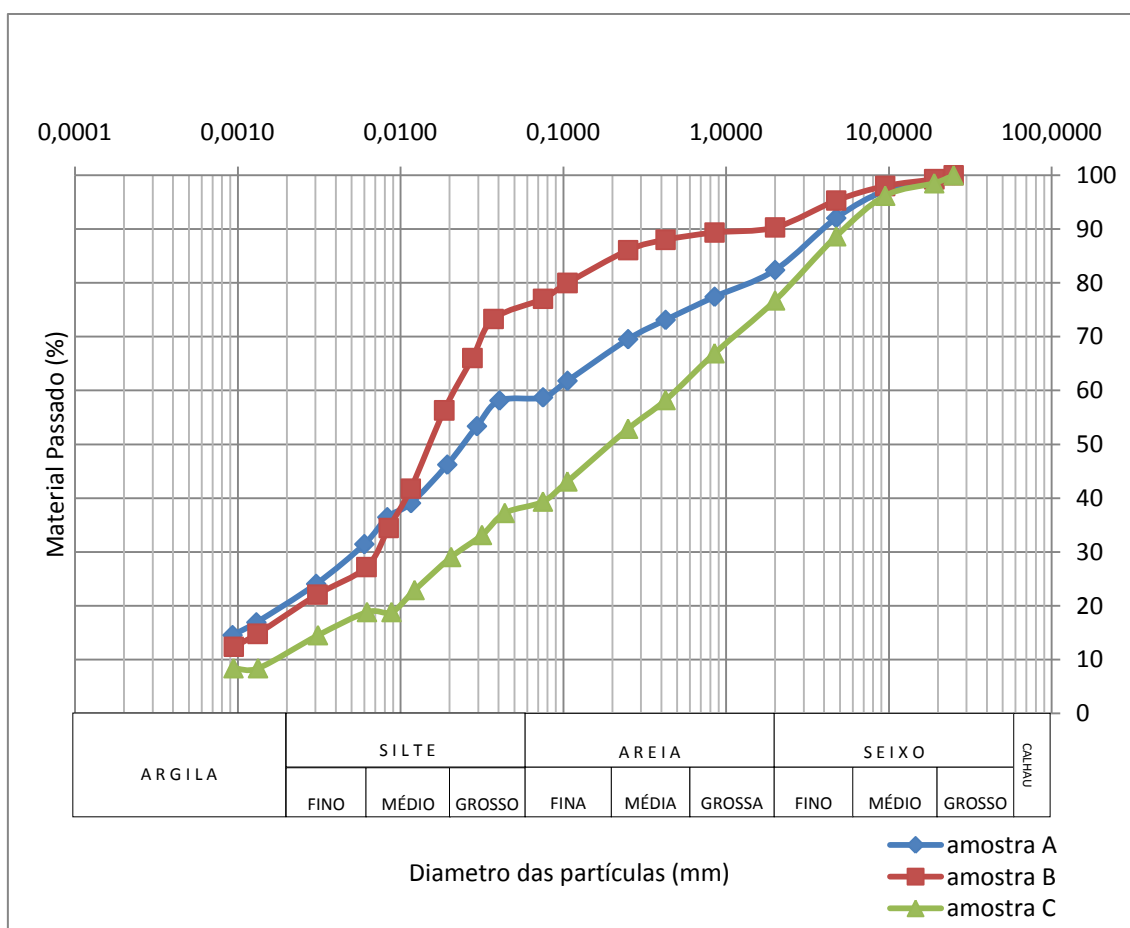


Figura 41 - Curvas granulométricas referentes às três amostras.

2.3.2.3. Determinação dos limites de Atterberg

A variação do teor em água é determinante no caso de solos constituídos essencialmente por silte e argila (solos finos), pois se um solo argiloso tiver um baixo teor em água, este não será moldável (plástico). Se adicionarmos água, este solo passa a um estado semi-sólido em que se desfaz em fragmentos quando se tenta moldá-lo. Se voltarmos a adicionar água, o solo atingirá um estado plástico, em que será possível a moldagem, sem variação de volume e sem fragmentação. Se adicionarmos ainda mais água o solo passa a um estado líquido, ou seja, transforma-se numa pasta com o comportamento de um líquido.

Os teores em água correspondentes à transição entre os diferentes estados variam para solos com diferentes propriedades físicas, e são aproximadamente iguais para solos com propriedades físicas similares. São, por isso, muito úteis para caracterizar os solos.

Estes limites dos teores em água relativos aos diferentes estados físicos do solo, referidos anteriormente, são designados por limites de Atterberg ou limites de consistência e subdividem-se (no sentido crescente) em:

- ✓ Limite de Retracção² (LR);
- ✓ Limite de Plasticidade (LP);
- ✓ Limite de Liquidez (LL).

Sabe-se que, para teores em água compreendidos entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, o solo apresenta um comportamento plástico. Essa relação designa-se por índice de plasticidade e determina-se pela equação (2):

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Foram determinados os limites de liquidez e de plasticidade do solo, pela norma NP 143: 1969 “Solos. Determinação dos limites de consistência”. Para cada uma das amostras, os ensaios foram realizados com provetes secos ao ar e secos na estufa.

2.3.2.3.1. Determinação do limite de liquidez

Segundo a norma de ensaio, o limite de liquidez de uma amostra de solo é o teor em água correspondente a 25 pancadas, obtido por interpolação numa curva que relaciona o teor em água de cada um dos 4 provetes, com o número de pancadas para o qual os bordos inferiores de um sulco aberto num provete se unem numa extensão

² A execução deste ensaio caiu em desuso porque a utilização de mercúrio no referido ensaio tem efeitos prejudiciais à saúde.

de 1 cm, quando o ensaio é feito na concha de Casagrande. Este limite representa-se com o símbolo LL.

i. Técnica do ensaio

A técnica do ensaio consiste, basicamente, na amassadura de uma mistura de solo com água destilada, seguida da colocação desta pasta na concha de Casagrande formando uma superfície plana, na qual, se faz um sulco com recurso a um riscador. De seguida a manivela é accionada até que as duas porções do provete, devido às pancadas da concha sobre a base, entrem em contacto pela parte inferior do sulco numa extensão de cerca de 1 cm, registando-se o número de pancadas para o qual ocorre esta união. Este procedimento é repetido para mais três provetes de solo com teores em água crescentes.

Na Figura 42 e na Figura 43, ilustra-se de forma resumida este procedimento.



Figura 42 – Toma de material; Mistura do material com água destilada; Colocação da pasta na concha de Casagrande.



Figura 43 – Divisão do provete na perpendicular ao eixo da manivela formando um sulco por uso de um riscador; Sulco formado no provete; Accionamento da manivela.

ii. Resultados

A partir dos dados obtidos no ensaio (teores em água e número de pancadas) traçaram-se as curvas (Figura 44, Figura 45 e Figura 46), relacionando o teor em água de cada um dos provetes com o correspondente número de pancadas, num diagrama em que se marcou, em ordenadas, o teor em água em escala aritmética, e em abcissas o número de pancadas em escala logarítmica.

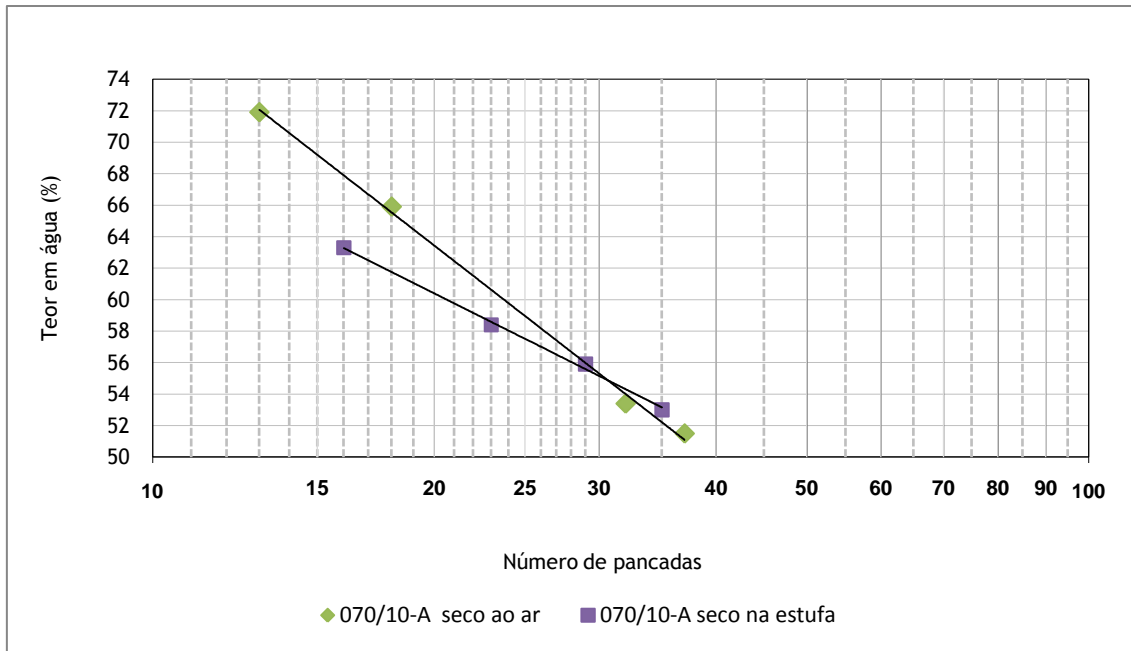


Figura 44 – Representação gráfica da relação do nº de pancadas com o teor em água da amostra 070/10 - A.

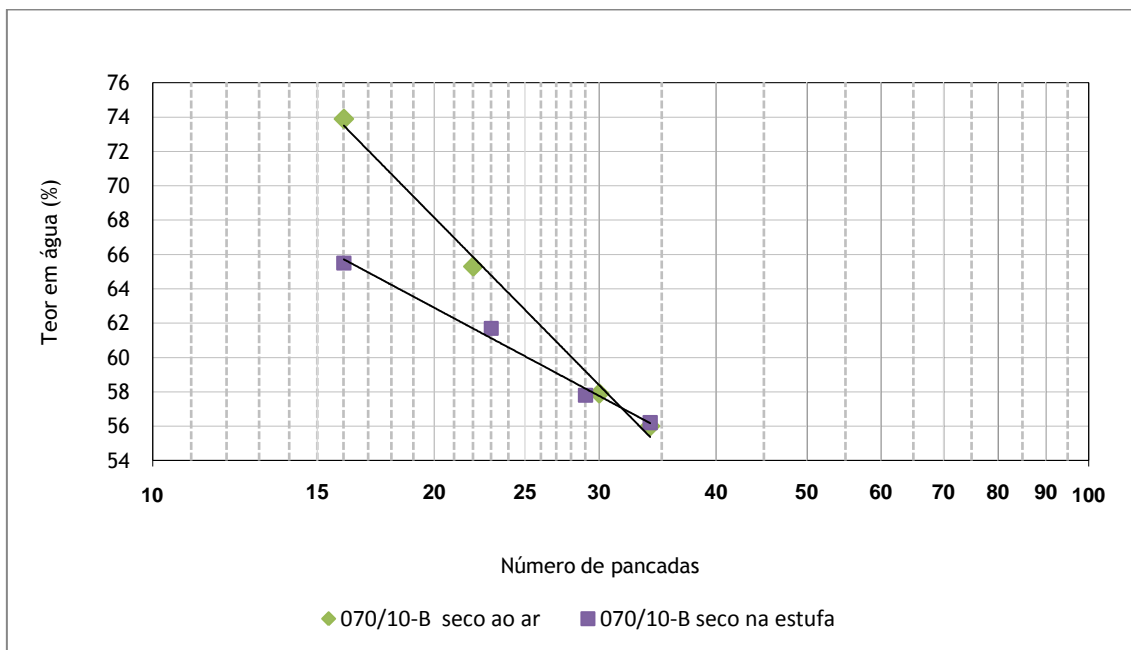


Figura 45 – Representação gráfica da relação do nº de pancadas com o teor em água da amostra 070/10 - B.

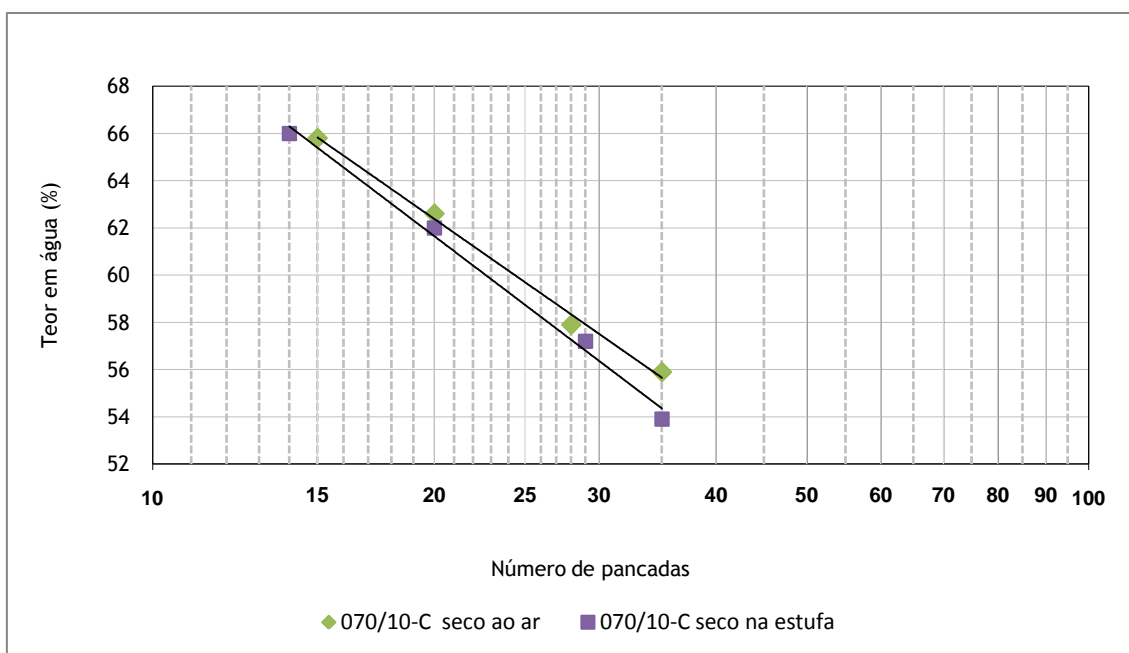


Figura 46 – Representação gráfica da relação do nº de pancadas com o teor em água da amostra 070/10 - C.

O limite de liquidez, de cada amostra ensaiada, foi obtido por interpolação, na curva, do teor em água correspondente a 25 pancadas. O Quadro 10 apresenta os resultados do limite de liquidez, seco ao ar e seco na estufa, das três amostras ensaiadas.

Quadro 10 – Limite de Liquidez referente às três amostras.

Nº da Amostra	Secagem do provete	Limite Liquidez, LL (%)
070/10 - A	Ao ar	59
	Na estufa	58
070/10 - B	Ao ar	63
	Na estufa	60
070/10 - C	Ao ar	60
	Na estufa	59

2.3.2.3.2. Determinação do limite de plasticidade

De acordo com a norma de ensaio NP 143, o limite de plasticidade, de uma amostra de solo, é a média dos teores em água de 4 provetes da amostra a ensaiar, em que, cada um dos quais é o maior teor em água com que rompe cada provete ao pretender-se transformá-lo num filamento cilíndrico com cerca de 3mm de diâmetro, por rolagem entre a palma da mão e uma placa de vidro. Representa-se pelo símbolo *LP*.

i. Técnica do ensaio

O ensaio foi realizado a partir da mesma amassadura de material com água destilada, obtida para o limite de liquidez. O procedimento consiste, sumariamente, em moldar quatro provetes com a forma de pequenas esferas com diâmetros sensivelmente iguais. A partir de cada uma delas tenta-se obter um filamento cilíndrico que rompa

quando o diâmetro atinge 3mm. Na Figura 47 ilustra-se de forma resumida este procedimento.



Figura 47 - Mistura do material com água destilada; Moldagem de quatro pequenas esferas; Rolagem dos provetes entre a palma da mão e uma placa de vidro.

ii. Resultados

O limite de plasticidade de cada amostra foi obtido pela média dos teores em água dos quatro provetes ensaiados. O Quadro 11 apresenta os resultados do limite de plasticidade, seco ao ar e seco na estufa, das três amostras.

Quadro 11 – Limite de Plasticidade referente às três amostras.

Nº da Amostra	Secagem do provete	Limite Plasticidade, LP (%)
070/10 – A	Ao ar	46
	Na estufa	45
070/10 – B	Ao ar	47
	Na estufa	46
070/10 – C	Ao ar	45
	Na estufa	44

2.3.2.4. Determinação da densidade das partículas

A densidade das partículas com dimensões inferiores a 4,75 mm foi determinada de acordo com a norma NP - 83: 1965 “Solos. Determinação da densidade das partículas”.

A densidade das partículas é o quociente da massa dum dado volume dessas partículas à temperatura do ensaio, pela massa de igual volume de água destilada à temperatura de 20 °C.

i. Técnica de ensaio

O ensaio foi realizado sobre a fracção passada no peneiro nº 4 (4,75 mm), sem secagem prévia do provete. Na Figura 48 e na Figura 49, ilustra-se de forma resumida este procedimento.



Figura 48 – Provete de solo utilizado; Introdução dos provetes nos picnómetros; Dispersão do provete no agitador.



Figura 49 – Pesagem; Determinação da temperatura da mistura solo-água no picnómetro; Colocação na estufa.

ii. Resultados

Para cada uma das amostras realizaram-se duas determinações, cujos resultados se apresentam no Quadro 12.

Quadro 12 - Densidade das partículas.

Nº da amostra:	Nº do provete:	Densidade das partículas	Densidade média
070/10 - A	1	2,77	2,76
	2	2,75	
070/10 - B	1	2,73	2,72
	2	2,72	
070/10 - C	1	2,77	2,77
	2	2,76	

2.3.3. Ensaios realizados às rochas da Encumeada (Tufo de *lapilli* e Basalto)

A colheita de amostras destes materiais consistiu na recolha de blocos que se encontravam tombados nos locais de afloramento, ambos pertencentes à unidade CVI1. De referir, que estes blocos não foram orientados em relação ao seu afloramento. Na Figura 50 a) é possível observar os blocos de material piroclástico e na Figura 50 b), blocos de basalto.



Figura 50 – a) Blocos de material piroclástico; b) Blocos de basalto.

Sobre cada uma das amostras foram realizados os seguintes ensaios de laboratório:

- ✓ Determinação do peso volúmico seco;
- ✓ Determinação da resistência à compressão uniaxial;
- ✓ Determinação do módulo de elasticidade.

Foram ainda realizados ensaios *in situ* com o martelo de Schmidt.

i. Preparação dos provetes para ensaio

Os provetes foram obtidos por caroteamento dos blocos trazidos para laboratório. As dimensões dos provetes, bem como o número de provetes obtidos foram condicionados pelo equipamento, tamanho e qualidade (existência ou não de fissuração interna) dos blocos disponíveis.

No caroteamento das amostras, utilizou-se a máquina caroteadora ilustrada na Figura 51. Esta máquina é constituída por uma coroa e um amostrador. O caroteamento foi realizado com adição de água.

Os diâmetros de coroas disponíveis no LREC, IP-RAM, eram de 50 mm e de 70 mm, pelo que, por forma a otimizar o número de blocos disponíveis foi utilizada, para os basaltos, a coroa de 50 mm já que se trata de uma rocha de grão fino, e para os materiais piroclásticos a coroa de 70 mm.



Figura 51 - Máquina caroteadora utilizada.

O procedimento consistiu, basicamente, em centrar a amostra no raio de acção da máquina, colocar seguidamente a coroa em movimento (circular), retirando do material, uma carote, a partir da qual se preparou um ou mais provetes, em função do seu comprimento, destinados aos ensaios.

Porque, visualmente, parecia se tratar de uma rocha mais friável começou por se carotear os materiais piroclásticos a seco, mas como resultado, o primeiro provete saíra danificado, tendo-se passado para o caroteamento com adição de água (Figura 52).



Figura 52 – À esquerda, um provete retirado a seco, à direita com água.

No caso do tufo de *lapilli*, o processo de caroteamento de cada um dos provetes durou cerca de 10 minutos, enquanto que no caso do basalto esse tempo foi superior a uma hora (Figura 53).



Figura 53 - Processo de caroteamento das amostras.

De acordo com as normas seguidas, para realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial são necessários pelo menos 10 provetes cilíndricos com a altura igual ao diâmetro, e para a determinação do módulo de elasticidade são necessários pelo menos 6 provetes cilíndricos com altura igual a dois diâmetros.

Devido a dificuldades de acesso ao local, e à existência de fissuração interna, no caso do basalto, e de fragmentos angulares e mais duros, no caso do tufo de *lapilli*, factos que originaram a quebra de alguns provetes durante a operação de caroteamento, estes requisitos apenas foram cumpridos no caso da determinação do módulo de elasticidade para o basalto.

No Quadro 13 apresenta-se o número de provetes obtidos para cada ensaio, referentes a cada amostra.

Quadro 13 – Provetes obtidos de cada amostra para cada ensaio.

	Resistência à compressão uniaxial	Determinação do módulo de elasticidade
Tufo de <i>lapilli</i> (078/10)	9/10	4/6
Basalto (089/10)	8/10	7/6

Ainda de acordo com as normas utilizadas, o diâmetro dos provetes deve satisfazer uma relação de 10:1 com o tamanho do maior dos cristais da pedra (NP EN 14580:2007 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade estático) e, caso tal não seja possível, deve ser ensaiado um maior número de provetes. A norma 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, refere que para rochas brandas essa relação pode ser de 6:1. Estes requisitos foram cumpridos nos provetes de basalto. No entanto, no caso dos materiais piroclásticos, devido aos factos já referidos, os requisitos nem sempre foram cumpridos.

Na Figura 54 é possível observar as carotes obtidas após caroteamento.



Figura 54 – Carotes destinadas aos ensaios de módulo de elasticidade e resistência à compressão uniaxial.

Após a operação de caroteamento os provetes foram talhados (Figura 55 a)), por forma a cumprir os requisitos das normas de ensaio relativos à relação entre a altura e o diâmetro. Para tal utilizou-se a máquina de corte ilustrada na Figura 55 b) que consiste, basicamente, numa serra circular, acoplada a um dispositivo que adiciona água ao corte dos provetes, facilitando desta forma o mesmo.



Figura 55 – a) Medição de um provete para marcação da altura; b) Corte de um provete.

Por forma a cumprir os requisitos das normas de ensaio quanto à ortogonalidade das faces sobre as quais irá ser aplicada a carga, relativamente ao eixo do provete, e à planura das mesmas, os provetes foram submetidos a um acabamento final, por rectificação, na Fábrica de Extração de Pedra e Brita da Palmeira.

No caso do tufo de *lapilli*, devido à existência de heterogeneidades na matriz rochosa, não foi possível respeitar os requisitos previstos na norma, apresentando desta forma algumas irregularidades.

O diâmetro de cada um dos provetes foi obtido pela média de quatro medidas, duas na proximidade da face superior e outras duas na face inferior do provete. A altura do provete foi obtida também pela média de quatro medidas, afastadas de 90°.

No Quadro 14, apresentam-se as dimensões dos provetes das amostras nº 2 e nº 3 destinados ao ensaio de determinação da resistência à compressão uniaxial e à determinação do módulo de elasticidade.

Quadro 14 – Dimensões dos provetes das amostras nº 2 e 3.

Provete	Dimensões dos provetes (mm)			
	Tufo de <i>lapilli</i> (078/10)		Basalto (089/10)	
	Diâmetro, D	Altura, L	Diâmetro, D	Altura, L
1	69,0	138	69,2	139
2	69,1	70	50,9	104
3	69,1	70	50,9	103
4	68,9	69	50,9	102
5	69,0	69	51,0	104
6	68,9	70	51,0	103
7	69,1	69	50,9	102
8	69,0	70	51,0	52
9	69,0	70	51,0	52
10	68,8	69	51,0	52
11	69,1	138	51,0	52
12	69,0	137	51,2	51
13	69,0	139	51,0	51
14	-	-	50,9	51
15	-	-	51,0	51

Ainda por forma a cumprir os requisitos das normas de realização dos ensaios, os provetes foram secos na estufa à temperatura de 70 °C até massa constante (Figura 56).



Figura 56 – Colocação dos provetes na estufa; Arrefecimento no exsiccador.

Seguidamente, com base nas massas secas e nas dimensões, calcularam-se os pesos volúmicos secos de cada provete.

Entende-se, por peso volúmico (γ) de uma rocha, o peso da unidade de volume dessa rocha.

Atendendo a que a quantidade de água presente numa rocha pode variar consideravelmente, dependendo das condições meteorológicas ou hidrogeológicas, é normal considerar-se o peso volúmico seco (γ_s) da rocha como um parâmetro mais representativo. Este parâmetro é dado pela equação (3):

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V} \quad (3)$$

W_s – Peso total da amostra de rocha seca na estufa;

V – Volume total da amostra de rocha.

No Quadro 15 apresentam-se os pesos volúmicos secos de cada provete da amostra nº 2.

Quadro 15 - Massas volúmicas e pesos volúnicos secos da amostra nº 2 (078/10).

Provete	Massa seca (g)	Volume (10^{-6} m^3)	Peso volúmico seco (kN/m^3)
1	989,6	514	18,9
2	499,5	260	18,8
3	496,0	262	18,5
4	478,7	257	18,3
5	478,3	257	18,3
6	482,2	259	18,3
7	491,5	260	18,6
8	507,4	261	19,1
9	495,9	262	18,6
10	486,8	256	18,7
11	1007,5	517	19,1
12	995,7	514	19,0
13	995,6	519	18,8
Valor Médio:	-	-	18,7
Desvio Padrão:	-	-	0,3
Valor Máximo:	-	-	19,1
Valor Mínimo:	-	-	18,3

O Quadro 16 apresenta os pesos volúnicos secos de cada provete da amostra nº 3.

Quadro 16 - Massas volúmicas e pesos volúnicos secos da amostra nº 3 (089/10).

Provete	Massa seca (g)	Volume (10^{-6} m^3)	Peso Volúmico (kN/m ³)
1	1572,8	523	29,5
2	626,1	211	29,1
3	633,0	210	29,5
4	622,8	209	29,3
5	637,2	212	29,5
6	633,5	211	29,5
7	620,8	208	29,3
8	317,4	107	29,1
9	314,0	106	29,0
10	315,4	106	29,2
11	314,6	106	29,1
12	308,8	106	28,7
13	308,8	104	29,0
14	307,4	104	29,0
15	309,3	104	29,1
Valor Médio:	-	-	29,2
Desvio Padrão:	-	-	0,2
Valor Máximo:	-	-	29,5
Valor Mínimo:	-	-	28,7

Após a secagem, e até à realização dos ensaios, os provetes foram armazenados no exsiccador, à temperatura de 20°C para que fosse atingido o equilíbrio térmico, tendo sido ensaiados nas 24h seguintes.

2.3.3.1. Determinação da resistência à compressão uniaxial

Não obstante as rochas que constituem os maciços se encontrarem, geralmente, submetidas a estados de tensão triaxiais, o estudo do comportamento das rochas quando submetidas à compressão uniaxial tem interesse, pois permite pôr em evidência as características mecânicas das rochas, sendo mesmo um parâmetro de alguns sistemas de classificação (por exemplo, Bieniawski, ISRM,...).

A resistência à compressão uniaxial foi determinada de acordo com a norma NP EN 1926: 2008, "Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão uniaxial".

O ensaio consiste em aplicar uma força uniformemente distribuída, incrementada continuamente até à rotura do provete.

A resistência à compressão uniaxial corresponde à razão entre a carga de rotura do provete e a área da sua secção transversal determinada antes do ensaio.

A expressão de cálculo é dada pela equação (4):

$$R = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Em que:

R - resistência à compressão uniaxial;

F – Carga de rotura do provete;

A – Área da secção transversal do provete.

Neste ensaio, foram utilizadas duas máquinas, consoante as amostras ensaiadas. Para os provetes de material piroclástico foi utilizada uma máquina com capacidade menor mas resolução melhor, enquanto que nos basaltos, por serem expectáveis resistências mais altas, foi utilizada uma máquina com capacidade maior.

Na Figura 57, apresenta-se a máquina utilizada para os piroclastos e na Figura 58 a máquina utilizada para os basaltos.



Figura 57 – Máquina utilizada para o ensaio dos tufos de *lapilli*; Dispositivo para comando e controlo da taxa de compressão e valores de carga.



Figura 58 - Máquina utilizada para o ensaio dos provetes de basalto; Dispositivo para comando e controlo da taxa de compressão e valores de carga.

i. Procedimento

Cada provete foi alinhado, cuidadosamente e sem utilizar qualquer material de acondicionamento, com o centro do prato inferior da máquina de ensaio de modo a se obter um apoio uniforme (Figura 59 e Figura 60).

A carga foi aplicada de forma contínua, a uma taxa de tensão constante de 1 MPa/s até à rotura do provete, sendo no fim registada, a carga máxima suportada pelo provete.



Figura 59 - Centragem do provete 9 (tufo de *lapilli*) antes da aplicação da carga; Estado do mesmo provete após rotura.



Figura 60 - Centragem do provete 8 (basalto) antes da aplicação da carga

A Figura 61 indica o estado de um provete de piroclasto e de um provete de basalto após a rotura.

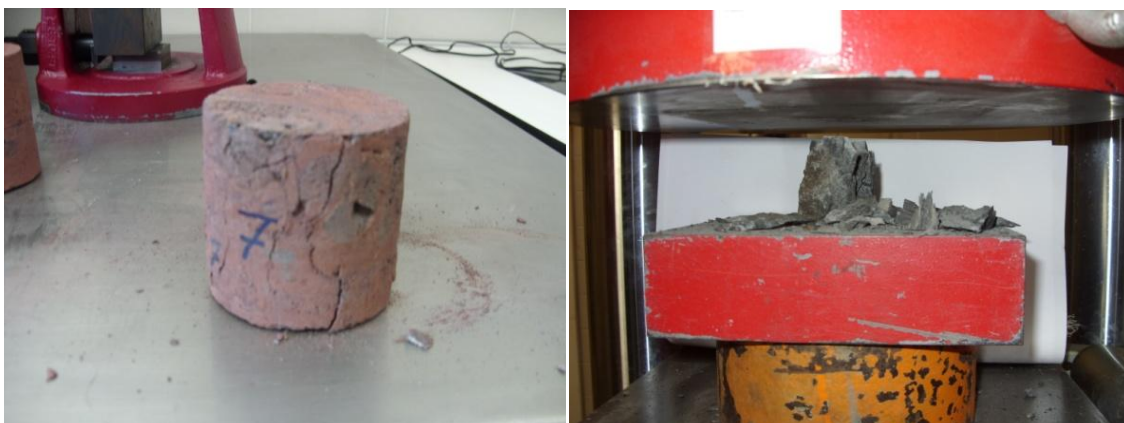


Figura 61 - Provede 7 de piroclasto e provede 8 de basalto após rotura.

ii. Resultados

No Quadro 17 e Quadro 18, apresentam-se, relativamente a cada amostra, a área, a carga de rotura e a resistência à compressão uniaxial para cada provete ensaiado. Foram também calculados o valor médio das resistências à compressão uniaxial, os seus desvios padrão e valores máximo e mínimo.

Quadro 17 - Resistência à compressão uniaxial da amostra nº 2 (078/10).

Provetes com L = D			
Provede	Área, A	Carga de rotura, F	Resistência à compressão uniaxial, R
	(mm ²)	(kN)	(MPa)
2	3745	90,2	24
3	3753	65,1	17
4	3726	73,1	20
5	3734	74,5	20
6	3728	81,4	22
7	3745	75,3	20
8	3737	85,3	23
9	3737	79,1	21
10	3718	77,1	21
Valor Médio:	-	-	21
Desvio Padrão:	-	-	2
Valor Máximo:	-	-	24
Valor Mínimo:	-	-	17
Nº total de provetes ensaiados: 9			

Quadro 18 - Resistência à compressão uniaxial da amostra nº 3 (089/10).

Provetes com L = D			
Provete	Área, A	Carga de rotura, F	Resistência à compressão uniaxial, R
	(mm ²)	(kN)	(MPa)
8	2045	306,6	150
9	2041	543,2	266
10	2045	670,8	328
11	2043	312,4	153
12	2061	345,5	168
13	2043	278,9	137
14	2035	439,1	216
15	2045	604,7	296
Valor Médio:	-	-	214
Desvio Padrão:	-	-	74
Valor Máximo:	-	-	328
Valor Mínimo:	-	-	137
Nº total de provetes ensaiados: 8			

2.3.3.2. Determinação do módulo de elasticidade

O comportamento de uma rocha, sob uma compressão uniaxial, não é normalmente reversível, o que significa que a deformação sofrida pela amostra nunca poderá ser recuperada na totalidade mesmo que haja uma descarga, pelo facto de que as fissuras iniciais presentes em qualquer rocha fecham no início da compressão levando a uma diminuição da compressibilidade da amostra. A relação entre a carga aplicada e a deformação sofrida pela rocha é o parâmetro que se pretende determinar com este ensaio.

Assim, teve-se como objectivo determinar o módulo de elasticidade da amostra quando sujeita a uma compressão uniaxial, tendo-se como referência as seguintes normas:

- ✓ NP EN 14580: 2007 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade estático;
- ✓ 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;
- ✓ ASTM D 4543 – 04 Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances.

A determinação do módulo de elasticidade consiste, na medição das deformações longitudinais de um provete submetido a tensões compressivas uniaxiais.

Assim, o módulo de elasticidade em compressão é calculado através da equação (5):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_s - \sigma_i}{\varepsilon_s - \varepsilon_i} \quad (5)$$

Em que:

- ✓ E - módulo de elasticidade;
- ✓ σ_i - tensão inferior;
- ✓ σ_s - tensão superior;
- ✓ ε_i - extensão, quando aplicada a tensão inferior;
- ✓ ε_s - extensão, quando aplicada a tensão superior.

i. Procedimento

Os ensaios começaram por ser realizados de acordo com a norma ASTM 7012, tendo-se utilizado 4 provetes de basalto.

Recorreu-se a uma máquina, com capacidade de 1000 kN e resolução de 0,01 kN, em que inicialmente tinha sido previsto, registar os valores da deformação através de um vídeo-extensómetro acoplado à máquina.

Nos provetes, foram seleccionadas duas geratrizes, diametralmente opostas, nas quais foram coladas marcas, de modo a que o afastamento a cada um dos topos fosse superior a meio diâmetro do provete.

Com o auxílio de um vídeo-extensómetro, fixavam-se dois pontos, mais exactamente dois pixéis, em cada uma das geratrizes (um em cada marca), sendo registadas, as distâncias iniciais entre cada dois pontos de cada geratriz. Ao longo da fase de carregamento essa distância ia encurtando, e ia sendo lida e registada através do vídeo-extensómetro. Com base nesses registos determinar-se-iam as deformações sofridas pelo provete, e as correspondentes extensões.

Ao analisar os ficheiros com os resultados dessas leituras, foram detectados problemas nas leituras referentes às distâncias entre marcas, pelo que apenas se aproveitaram as leituras referentes às cargas (obtidas através de outro ficheiro).

Na Figura 62 podem ver-se os provetes de basalto, antes do ensaio, com os marcas coladas, diametralmente opostas, que serviram de referência ao vídeo-extensómetro.



Figura 62 - Provetes de basalto antes do ensaio.

Na Figura 63 podem ver-se algumas imagens captadas pelo vídeo-extensómetro.

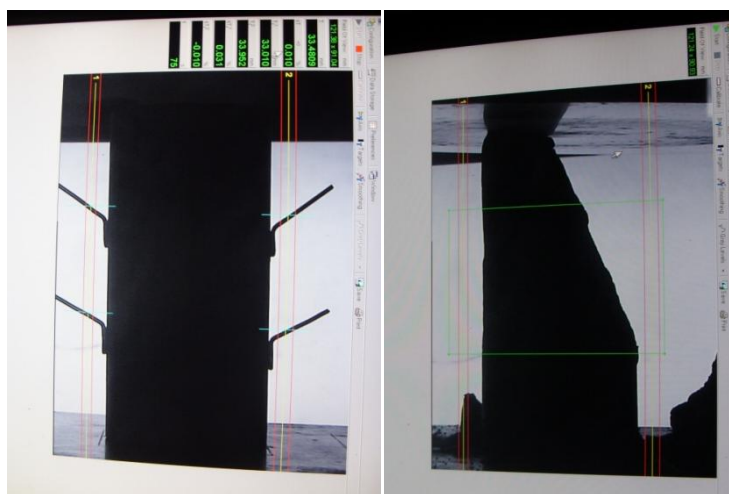


Figura 63 - Imagens de um provete de basalto, captadas pelo video-extensómetro, antes e após rotura.

Face às dificuldades surgidas passou-se a utilizar um procedimento baseado na norma ASTM D7012 e a norma NP EN 14580, e que consiste sumariamente no seguinte:

- ✓ Primeiro o provete é submetido a um ciclo de carga e descarga até uma tensão de aproximadamente $1/3$ da resistência à compressão uniaxial determinada anteriormente, medindo-se as deformações axiais através de extensómetros acoplados ao provete (Figura 64 a));
- ✓ Numa segunda fase, após a desmontagem dos extensómetros o provete foi submetido a uma carga até à rotura (Figura 64 b)).



Figura 64 – a) Máquina utilizada na primeira fase; b) Máquina utilizada na segunda fase.

Sobre o provete, foram montados dois dispositivos de medição de deformações (extensómetros), em duas geratrizes opostas, cujos pontos de fixação foram afastados de uma distância igual ao diâmetro do provete, (Figura 65 e Figura 66). A distância entre os pontos de fixação dos extensómetros no provete e as suas extremidades era igual a metade do respectivo diâmetro.

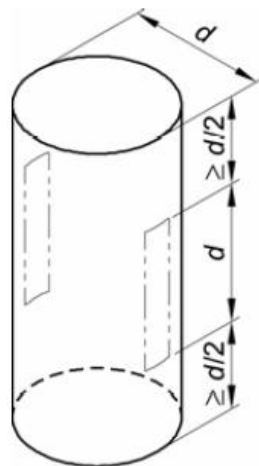


Figura 65 – Medidas para montagem dos dispositivos de medição de deformações (NP EN 14580, 2007).

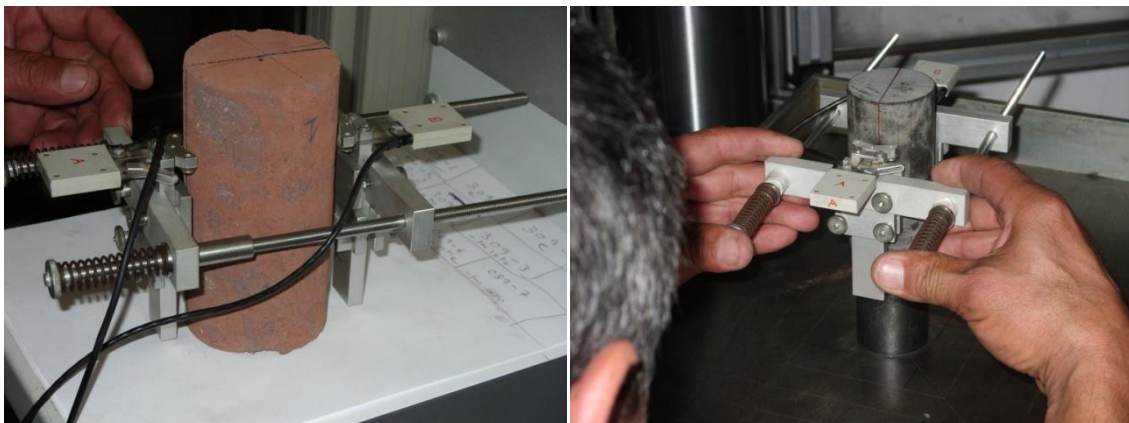


Figura 66 - Montagem dos extensómetros.

Os provetes foram centrados na máquina de ensaio e o prato superior da máquina, ajustado, de modo a ficar em contacto perfeito com o provete (Figura 67).



Figura 67 - Centragem dos provetes na máquina;

Aplicou-se uma pré-carga de 6 kN para ajuste. Seguidamente os provetes foram submetidos a um ciclo de carga e descarga até uma tensão de aproximadamente 1/3 da resistência à compressão uniaxial, a uma taxa de carga constante igual a 0,13 MPa/s nos provetes de piroclasto, e de 0,49 MPa/s nos provetes de basalto.

Seguidamente passou-se à segunda fase, levando os provetes à rotura.

Assim, tal como na primeira fase de ensaio, os provetes foram centrados na máquina de ensaio e o prato superior da máquina. No caso dos piroclastos os provetes foram ajustados por intermédio de um rectângulo de borracha com cerca de 2 mm de espessura, colocado entre o topo do provete e o prato superior da máquina, para evitar excentricidades na aplicação da força (Figura 68).

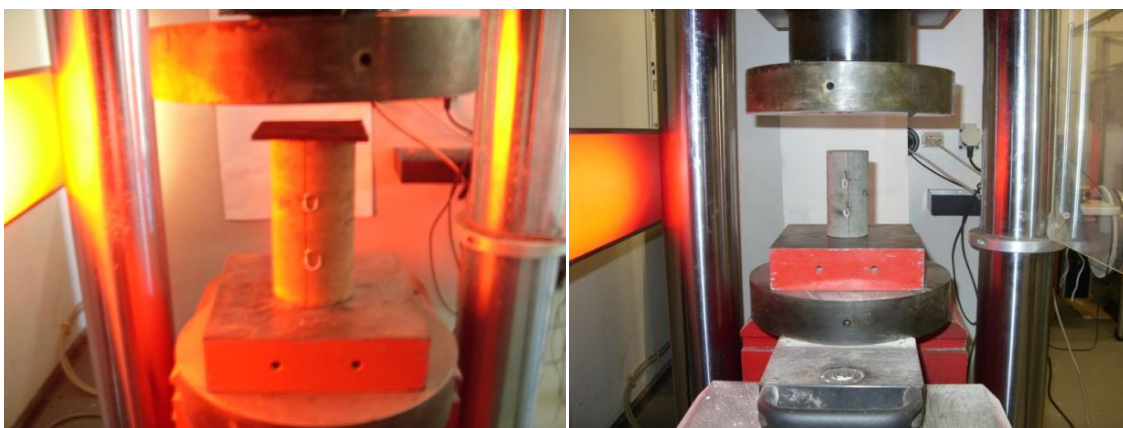


Figura 68 – Centragem dos provetes na máquina.

Na Figura 69, pode observar-se o estado após rotura de um provete de tufo de *lapilli*.

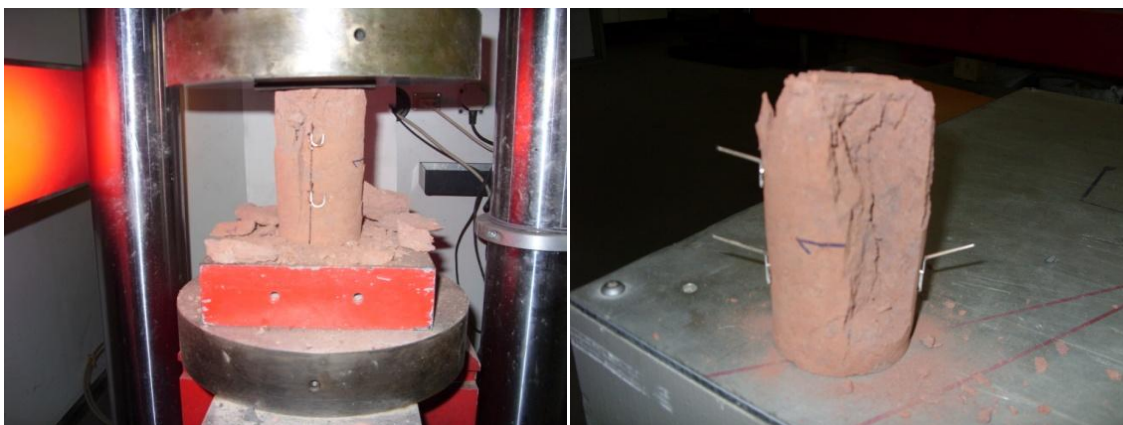


Figura 69 - Rotura do provete 078/10 – 1.

Nas Figura 70 pode ver-se o carregamento e estado após rotura de um provete de basalto.



Figura 70 - Carregamento e rotura do provete 089/10 – 3.

ii. Resultados

A partir dos dados dos ensaios efectuados, traçaram-se os gráficos Tensão – Tempo, (Figura 71 e Figura 72) para cada provete, em que, no eixo dos X, representou-se o tempo do ciclo, em segundos, e no eixo dos Y, a tensão em MPa, para os diferentes provetes, de cada uma das amostras.

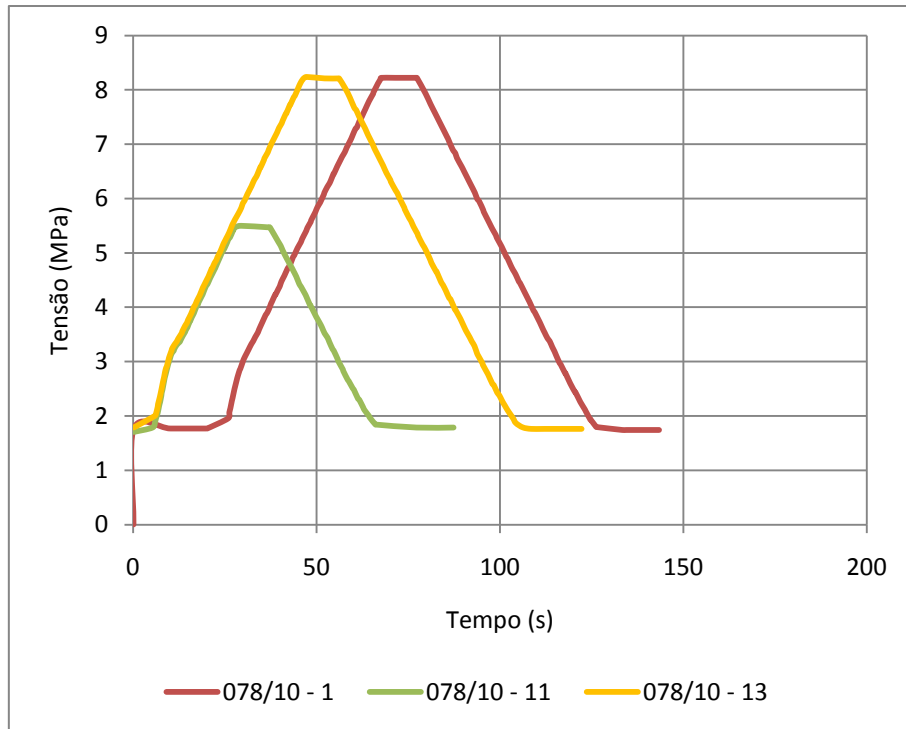


Figura 71 - Diagrama Tensão – Tempo, para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de tufo de lapilli.

Como se pode observar na Figura 71, no caso do provete com a designação 078/10 - 1, o intervalo inicial de tempo de aplicação da tensão de pré-carga, foi superior aos outros dois provetes.

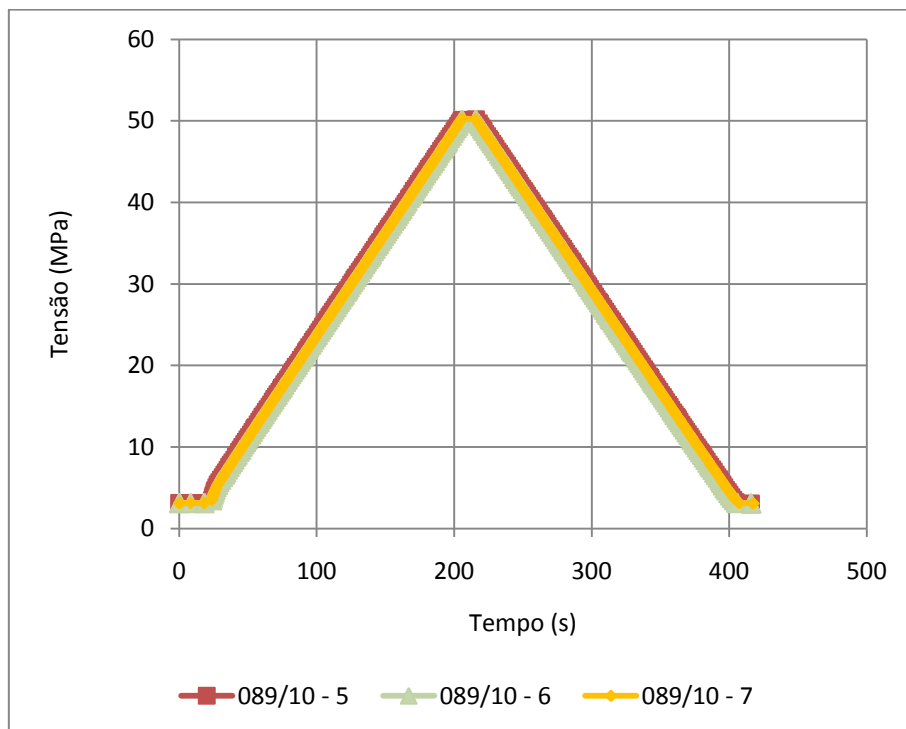


Figura 72 - Diagrama Tensão - Tempo para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de basalto.

Para calcular o módulo de elasticidade, criaram-se gráficos Tensão – Extensão, para fase de carga, conforme se pode observar na Figura 73 e na Figura 74.

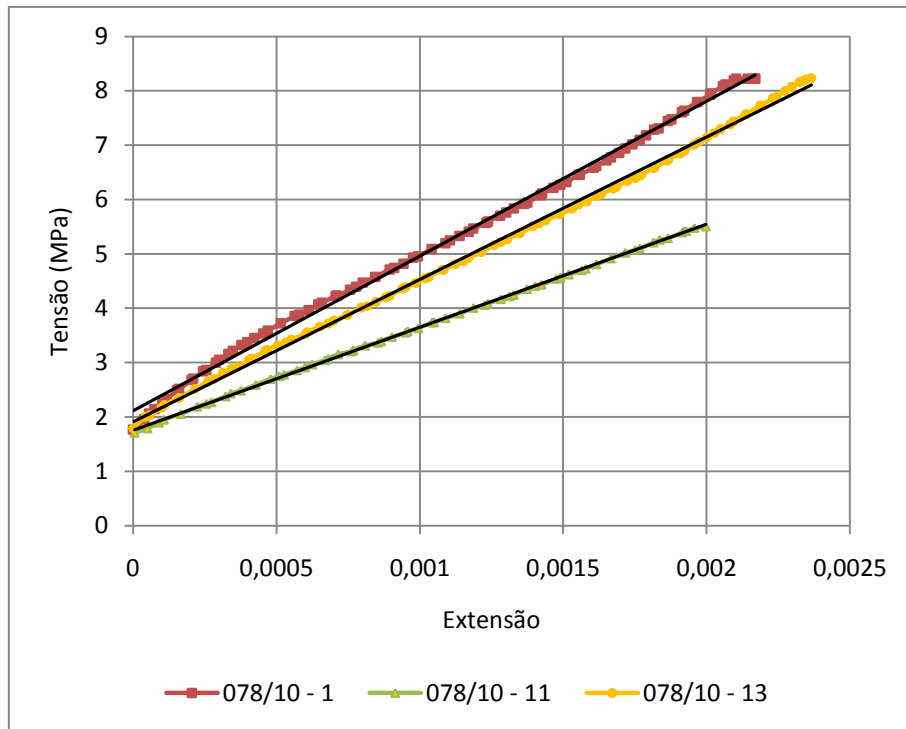


Figura 73 - Diagrama Tensão – Extensão para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de tufo de lapilli.

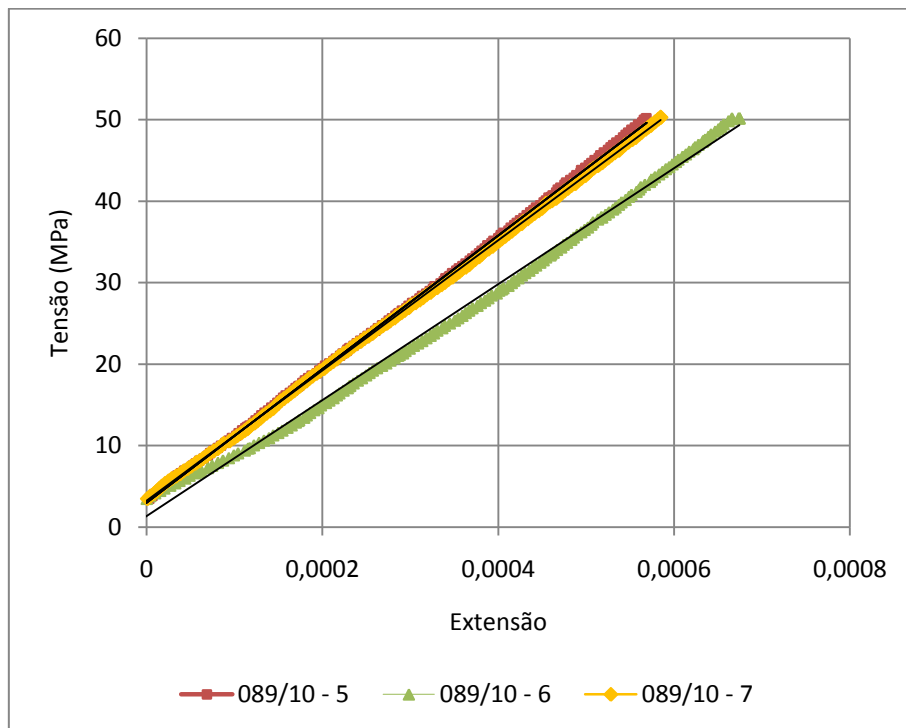


Figura 74 - Diagrama Tensão – Extensão para determinação do módulo de elasticidade dos três provetes de basalto.

O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a equação (5).

No Quadro 19, apresentam-se, os valores obtidos para o módulo de elasticidade, para o tufo de *lapilli* e para o basalto.

Em relação ao provete nº 12 de tufo de *lapilli*, devido a um problema informático, não foi possível registar os dados e, conseqüentemente, calcular o módulo de elasticidade.

Apresentam-se também o valor médio do módulo de elasticidade, o desvio padrão, e os valores máximo e mínimo.

Quadro 19 - Módulo de Elasticidade.

Provetes com L = 2D			
Tufo de <i>lapilli</i> (078/10)		Basalto (089/10)	
Provete	Módulo de Elasticidade, E (MPa)	Provete	Módulo de Elasticidade, E (MPa)
1	2705	5	82796
11	1861	6	72871
12	-	7	78821
13	2495	-	-
Valor Médio:	2353	Valor Médio:	78163
Desvio Padrão:	439	Desvio Padrão:	4995
Valor Máximo:	2705	Valor Máximo:	82796
Valor Mínimo:	1861	Valor Mínimo:	72871
Nº total de provetes ensaiados: 4		Nº total de provetes ensaiados: 3	

Após a descarga e desmontagem dos extensómetros, os provetes foram novamente submetidos a uma carga até à rotura, à taxa de 0,08 MPa/s no caso dos tufo de *lapilli*, e de cerca 0,25 MPa/s no caso dos basaltos. Estas taxas foram seleccionadas por forma a que a rotura dos provetes ocorresse no intervalo de tempo entre 2 e 15 minutos, como recomendado pela norma ASTM D 7012.

No Quadro 20, apresentam-se, para os provetes de tufo de *lapilli*, os valores da área, a carga de rotura e a resistência à compressão uniaxial para cada provete ensaiado, bem como, o valor médio da resistência à compressão uniaxial, desvio padrão, e valores máximo e mínimo. No Quadro 21, apresentam-se os mesmos elementos para os basaltos.

Quadro 20 - Resistência à compressão uniaxial do tufo de *lapilli*.

Provetes com L=2D			
Provete	Área, A	Carga de Rotura, F	Resistência à compressão uniaxial, R
	(mm ²)	(kN)	(MPa)
1	3734	39	10,5
11	3745	36	9,6
12	3742	38	10,2
13	3739	41	11,0
Valor Médio:	-	-	10,3
Desvio Padrão:	-	-	0,6
Valor Máximo:	-	-	11,0
Valor Mínimo:	-	-	9,6
Nº total de provetes ensaiados: 4			

Quadro 21 - Resistência à compressão uniaxial do basalto.

Provetes com L=2D			
Provete	Área, A	Carga de Rotura, F	Resistência à compressão uniaxial, R
	(mm ²)	(kN)	(MPa)
1	3761	485	129
2	2037	101	49
3	2037	314	154
4	2037	308	151
5	2041	361	177
6	2039	372	182
7	2037	270	133
Valor Médio:	-	-	154
Desvio Padrão:	-	-	22
Valor Máximo:	-	-	182
Valor Mínimo:	-	-	129
Nº total de provetes ensaiados: 7			

Como se pode verificar no Quadro 21, a resistência à compressão uniaxial do provete nº 2 da amostra de basalto é muito inferior à dos restantes provetes. Este facto deve-se, muito provavelmente, à existência de uma descontinuidade interna, natural, pela qual ocorreu a rotura. Na Figura 75 apresenta-se o provete em questão, onde se pode observar a superfície de rotura.



Figura 75 – Superfície de rotura do provete 089/10 – 2.

O valor obtido para a resistência à compressão uniaxial deste provete não foi utilizado no cálculo do valor médio.

2.3.3.3. Ensaio de determinação da Dureza de Ressalto de Schmidt

Com o objectivo de determinar a resistência da rocha *in situ*, foram realizados ensaios para a determinação da Dureza de Ressalto de Schmidt, tendo-se seguido o método sugerido pelo ISRM, “Suggested Method for Determination of the Schmidt Rebound Hardness”, 1978.

O martelo de Schmidt é um equipamento portátil que permite a medição do ressalto por aplicação de uma determinada energia à superfície do material a ensaiar. O êmbolo do martelo é colocado contra a superfície a ensaiar e pressionado. A energia é armazenada numa mola que se liberta automaticamente originando o ressalto no martelo. Este ressalto é medido instantaneamente numa escala existente no martelo, que pode ir de 10 a 100 e é tida como a medida da dureza.

Foi utilizado um martelo da Eurosit, modelo Ectha 1000, o qual pode ser observado na Figura 76.



Figura 76 – Pormenor do martelo de Schmidt utilizado e exemplo de utilização.

i. Procedimento

A superfície ensaiada, foi escolhida, dentro do possível, por forma a ser lisa, plana e limpa. Verificou-se se esta área, até uma profundidade de cerca de 6 cm, estava livre de fendas, ou de qualquer descontinuidade do maciço rochoso. Nos casos em que isto não se verificou, foi escolhido outro ponto, pois os resultados obtidos são influenciados por estas condições.

Em cada afloramento rochoso em estudo foram ensaiados 10 pontos diferentes, sendo que, em cada um deles foram efectuados 20 ensaios individuais, distribuídos numa área, quadrada ou rectangular, previamente seleccionada, em que as posições do êmbolo, em cada ensaio, foram separadas de uma distância sensivelmente igual ao seu próprio diâmetro. Uma vez que o valor da dureza obtida é afectado pela orientação do martelo, esta foi registada juntamente com os valores obtidos.

Os resultados foram rejeitados sempre que a pressão do êmbolo originou fendas ou outros tipos de falhas visíveis.

Os valores obtidos no ensaio são ordenados por ordem decrescente, rejeitando-se a metade dos valores mais baixos. É determinada a média com os restantes valores. Esta média é multiplicada pelo factor de correcção para obter a dureza de ressalto de Schmidt, R.

O factor de correcção é dado pela expressão (6):

$$Factor\ de\ correcção = \frac{Valor\ normalizado\ da\ bigorna}{Média\ de\ 10\ leituras\ na\ bigorna\ de\ calibração} \quad (6)$$

Pelo facto de não se possuir a bigorna de calibração do martelo, fizeram-se alguns ensaios de verificação com um martelo pertencente ao LREC, IP-RAM, que se encontra calibrado. Os valores destes ensaios de verificação foram idênticos, pelo que se considerou para factor de correcção o valor de 1.

ii. Resultados

A Dureza de Ressalto de Schmidt, R, determinada *in situ* é correlacionável com a resistência à compressão uniaxial e com o módulo de elasticidade determinados em laboratório sobre a rocha matriz da amostra.

Assim, com base no valor obtido com o martelo de Schmidt e no peso volúmico da rocha, podem obter-se, a partir dos ábacos que se apresentam seguidamente, a resistência à compressão uniaxial, R, e o módulo de elasticidade, E.

Nos ábacos apresentados na Figura 77 e na Figura 78 foram marcados os valores obtidos para o tufo de *lapilli* da Encumeada.

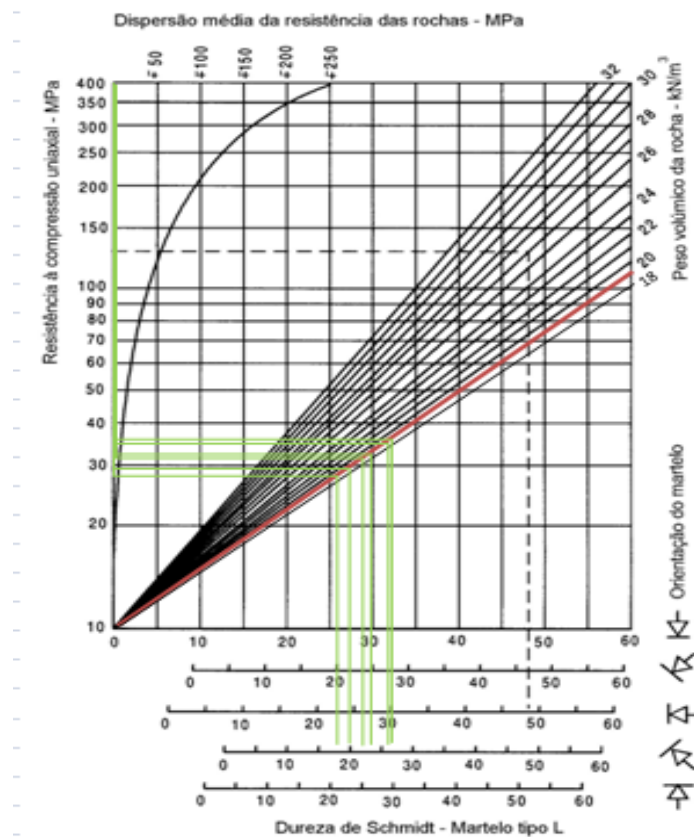


Figura 77 - Ábaco para determinação da resistência à compressão uniaxial da amostra nº 2 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Hoek, 1998).

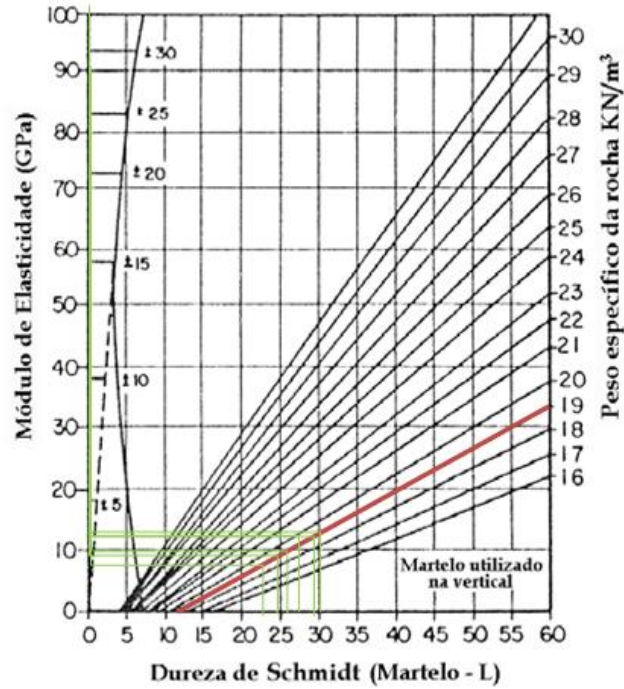


Figura 78 - Ábaco para determinação do módulo de elasticidade da amostra nº 2 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Miller, 1965 in Stacey e Page, 1986).

Nos ábacos apresentados na Figura 79 e na Figura 80, foram marcados os valores obtidos para o basalto da Encumeada.

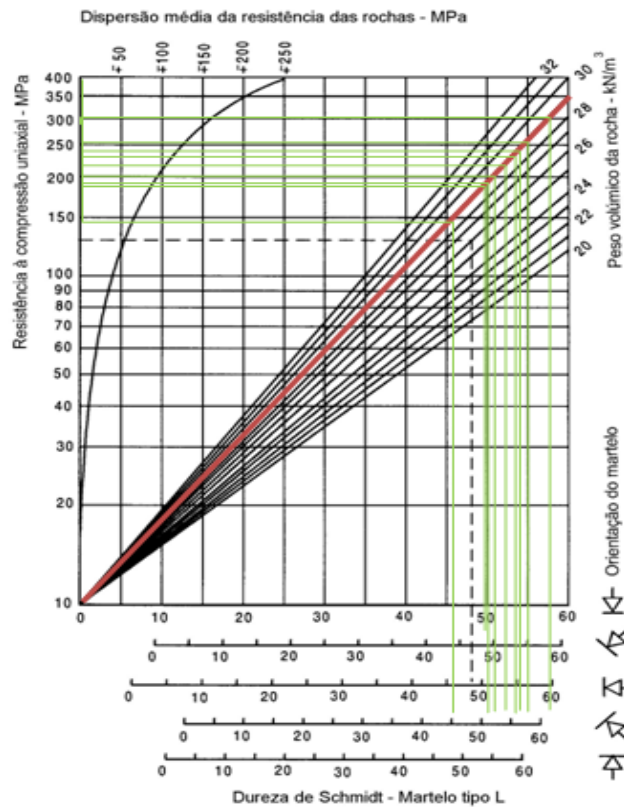


Figura 79 - Ábaco para determinação da resistência à compressão uniaxial da amostra nº 3 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Hoek, 1998).

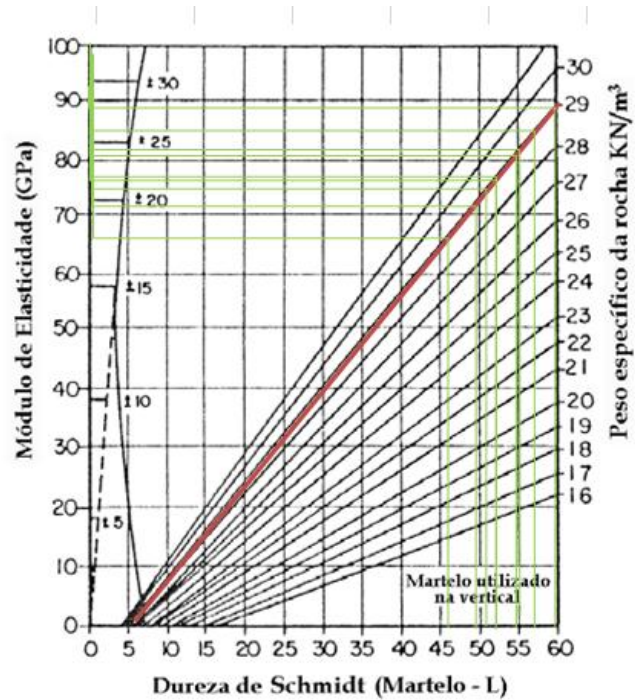


Figura 80 - Ábaco para determinação do módulo de elasticidade da amostra nº 3 (adaptado de Guerreiro, 2000, através de Miller, 1965 in Stacey e Page, 1986).

No Quadro 22 e no Quadro 23, são apresentados, para cada ponto ensaiado, a orientação do eixo do martelo no ensaio e a Dureza de Ressalto de Schmidt, relativas à amostra nº 2 e nº 3 respectivamente.

São igualmente apresentados, a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade correspondentes, bem como, o valores médios, desvios padrão, e valores máximo e mínimo.

Quadro 22 – Parâmetros determinados a partir da Dureza de Ressalto de Schmidt do tufo de *lapilli*.

Local de ensaio: Afloramento da amostra nº 2 (078/10)				
Ensaio	Direcção	Dureza de Ressalto de Schmidt, R	Resistência à compressão uniaxial, R (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)
1	→	30	36	13
2	→	24	30	9
3	→	27	32	11
4	→	27	32	11
5	→	26	31	10
6	→	23	28	7
7	→	23	28	7
8	→	26	31	10
9	→	29	35	12
10	→	27	32	11
Valor Médio:	-	26	32	10
Desvio Padrão:	-	2	3	2
Valor Máximo:	-	30	36	13
Valor Mínimo:	-	23	28	7

Quadro 23 - Parâmetros determinados a partir da Dureza de Ressalto de Schmidt do basalto.

Local de ensaio: Afloramento da amostra nº 3 (089/10)				
Ensaio	Direcção	Dureza de Ressalto de Schmidt, R	Resistência à compressão uniaxial, R (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)
1	→	57	255	85
2	→	52	200	76
3	→	55	240	82
4	↓	49	180	72
5	→	59	300	89
6	→	53	225	77
7	→	46	149	66
8	→	51	190	75
9	→	49	180	72
10	→	54	230	81
Valor Médio:	-	52	215	78
Desvio Padrão:	-	4	44	7
Valor Máximo:	-	59	300	89
Valor Mínimo:	-	46	149	66

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Amostra nº 1: Solo, Unidade do Porto da Cruz (CVA1)

3.1.1. Classificação da amostra

Com base nos resultados obtidos nos ensaios procedeu-se à Classificação Unificada, segundo a ASTM D 2487 – 00, “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)” e à classificação para fins rodoviários de acordo com a especificação do LNEC E 240: 1971, “Solos. Classificação para fins rodoviários”.

De referir que estes dois sistemas de classificação utilizam diferentes valores para os limites das fracções que constituem os solos, as quais constam no Quadro 24 e no Quadro 26.

Para a classificação foram utilizados os valores médios das percentagens passadas em cada um dos peneiros das três amostras ensaiadas.

A classificação unificada de solos baseia-se nas percentagens de cascalho, areia e finos presentes no solo, e nos limites de Atterberg.

No Quadro 24 apresentam-se as percentagens médias de cada uma destas fracções para a amostra nº 1.

Quadro 24 – Resultados obtidos na análise granulométrica.

Fracções granulométricas (ASTM D 2487)			
Fracções	Cascalho	Areia	Silte e argila
Dimensões (mm)	75 – 4,75	4,75 – 0,075	< 0,075
% presente	8	34	58

No Quadro 25 apresentam-se os valores médios do limite de liquidez, do limite de plasticidade e do índice de plasticidade, calculado pela equação (2), da amostra nº 1.

Quadro 25 – Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade.

Limite de Liquidez, LL (%)		Limite de Plasticidade, LP (%)		Índice de Plasticidade, IP (%)	
Ar	Estufa	Ar	Estufa	Ar	Estufa
61	59	46	45	15	14

De acordo com os elementos apresentados o solo é classificado como MH - Silte Elástico Arenoso (Classificação Unificada, ASTM).

A classificação para fins rodoviários utiliza, além dos valores dos limites de Atterberg e do Índice de Plasticidade, as percentagens passadas nos peneiros indicados no Quadro 26.

Quadro 26 – Percentagens utilizadas na classificação rodoviária.

Análise Granulométrica LNEC E 196			
Nº do peneiro	10	40	200
Malha (mm)	2,00	0,425	0,075
% passada	83	73	58

De acordo com os dados obtidos, o solo é classificado como A-7-5 (15).

3.1.2. Comparação dos resultados obtidos com outras referências

Os valores obtidos, nomeadamente para a fracção predominante, limites de Atterberg e peso volúmico das partículas, situam-se dentro do intervalo de valores apresentados por Gonzalez Vallejo *et al.* (2007) para os solos residuais de Tenerife.

No Quadro 27 apresentam-se os valores obtidos para a amostra estudada, da Madeira, e os valores que se referem aos solos de Tenerife.

Quadro 27 – Comparação entre a amostra nº 1 e os solos vulcânicos de Tenerife.

Propriedades Geotécnicas	Fracção predominante	Peso Vol. partículas secas	LL	LP	IP
		kN/m ³	%	%	%
Solos vulcânicos residuais de Tenerife	Silte arenoso	22 - 30	25 - 115	15 - 95	< 35
Amostra nº 1: Solos vulcânicos de S. Vicente	Silte arenoso	27	58 - 63	44 - 47	13 - 16

3.2. Amostra nº 2: Tufo de *lapilli*, Unidade da Encumeada (CVI1)

3.2.1. Classificação da amostra

Tendo em conta a classificação proposta pela ISRM (1981), descrita em Gonzalez Vallejo *et al.* (2002), (Quadro 28), em que se atribui um grau de qualidade da rocha com base nos valores obtidos de resistência à compressão uniaxial, classificou-se esta rocha.

Quadro 28 – Classificação de rochas com base na resistência à compressão uniaxial (Gonzalez Vallejo *et al.*, 2002)

Resistência à Compressão Uniaxial, R (MPa)	Classificação
< 1	Solos
1 - 5	Rocha muito branda
5 – 25	Rocha branda
25 - 50	Rocha moderadamente dura
50 – 100	Rocha dura
100 – 250	Rocha muito dura
> 250	Rocha extremamente dura

Assim, segundo o Quadro 28 e tendo em conta que se obteve um valor médio de 21 MPa para a resistência à compressão uniaxial, o tufo de *lapilli* da Encumeada é classificado como uma rocha branda.

3.2.2. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e a relação L/D

Sendo a relação entre a altura e o diâmetro dos provetes, L/D, um factor que influencia a resistência à compressão uniaxial das rochas, procurou-se estabelecer uma relação entre a resistência determinada em provetes com L/D = 1 e a resistência dos provetes com L/D = 2.

No Quadro 29 apresentam-se os valores da resistência à compressão uniaxial para todos os provetes de material piroclástico ensaiados e a respectiva relação L/D.

A relação altura-diâmetro é um factor com grande influência na resistência à compressão uniaxial dos provetes de tufo de *lapilli*. No Quadro 29 apresenta-se a essa relação, comparativamente aos valores encontrados para a resistência à compressão uniaxial de cada provete e o valor médio dessa resistência referente aos dois tipos de relação.

Quadro 29 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de tufo de *lapilli*.

Provete	Diâmetro, D (mm)	Altura, L (mm)	L/D	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão média para relação L/D = 1 (MPa)
1	69	138	2	10	21
2	69	70	1	24	
3	69	70	1	17	
4	69	69	1	20	
5	69	69	1	20	Resistência à compressão média para relação L/D = 2 (MPa)
6	69	70	1	22	
7	69	69	1	20	
8	69	70	1	23	
9	69	70	1	21	
10	69	69	1	21	10
11	69	138	2	10	
12	69	137	2	10	
13	69	139	2	11	

Na Figura 81 apresenta-se essa mesma relação através de uma representação gráfica.

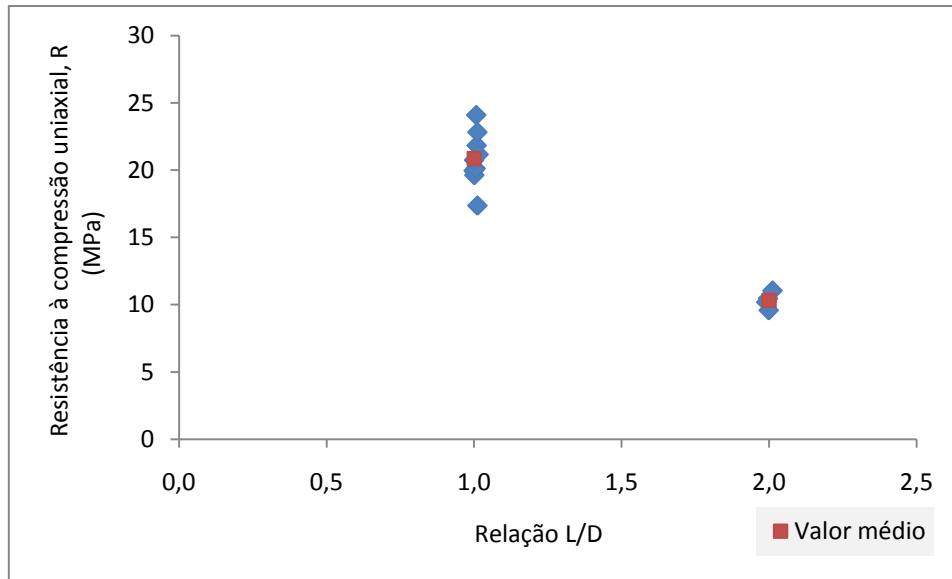


Figura 81 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de tufo de *lapilli*.

A análise dos resultados obtidos, permite concluir que, no caso da amostra de piroclasto, a relação L/D influenciou claramente a resistência à compressão uniaxial, verificando-se a seguinte relação (7):

$$\frac{R_{1:2}}{R_{1:1}} = 0,5 \quad (7)$$

Em que:

$R_{1:2}$ – Resistência à compressão uniaxial dos provetes com um relação L/D igual a 2;

$R_{1:1}$ – Resistência à compressão uniaxial dos provetes com um relação L/D igual a 1;

Apesar de na bibliografia (p.e., Gonzalez Vallejo *et al.*, 2002) se referir que a resistência à compressão uniaxial decresce com a esbelteza dos provetes, considera-se que o valor encontrado é baixo.

3.2.3. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade em laboratório com os valores obtidos no campo através do martelo de Schmidt

No Quadro 30, apresentam-se, para o tufo de *lapilli* da Encumeada, os valores médios para a resistência à compressão uniaxial e para o módulo de elasticidade, deduzidos a partir do martelo de Schmidt e obtidos em laboratório, e ainda o valor médio obtido para o peso volúmico seco.

Quadro 30 - Resultados obtidos em laboratório e com o martelo de Schmidt da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade, para o tufo de *lapilli*.

	Valores obtidos em Laboratório		Valores obtidos com o martelo de Schmidt
	L/D = 2	L/D = 1	
Resistência à compressão uniaxial, R (MPa)	10	21	32
Módulo de Elasticidade, E (GPa)	2	-	10

Não obstante a escassez de resultados disponíveis para esta amostra, mas tendo em conta que o ensaio com o martelo de Schmidt é um método expedito, menos dispendioso e moroso quando comparado com o ensaio de resistência à compressão uniaxial, em laboratório, procurou-se estabelecer uma relação entre as resistências e os módulos de elasticidade determinados com o martelo e os valores obtidos em laboratório, tendo-se obtido as seguintes relações:

$$\frac{R_{1:1}}{R_{Schmidt}} = 0,7 \quad (8)$$

$$\frac{R_{1:2}}{R_{Schmidt}} = 0.3 \quad (9)$$

Em que:

$R_{1:1}$ – Resistência à compressão uniaxial determinada em laboratório dos provetes com L/D = 1

$R_{1:2}$ – Resistência à compressão uniaxial determinada em laboratório dos provetes com L/D = 2

$R_{Schmidt}$ - Resistência à compressão uniaxial determinada com o martelo de Schmidt

$$\frac{E}{E_{Schmidt}} = 0,2 \quad (10)$$

Em que:

E – Módulo de elasticidade determinado em laboratório

$E_{Schmidt}$ - Módulo de elasticidade determinado com o martelo de Schmidt

As relações obtidas para a resistência à compressão uniaxial são muito inferiores ao valor médio apresentado ($R = 1,18 R_{Schmidt}$) por Rodriguez-Losada et al., (2007). Contudo, quando se considera os valores para os ignimbritos, aquela relação, deduzida a partir dos gráficos apresentados, desce para aproximadamente 0,5.

3.2.4. Comparação dos resultados obtidos com outras referências

No Quadro 31 apresentam-se os valores obtidos para as diferentes propriedades geotécnicas do tufo de *lapilli* da Encumeada e os valores apresentados por González de Vallejo et al., (2007), para os tufos da ilha de Tenerife, Canárias.

Quadro 31 – Comparação de resultados com outras fontes. (adaptado de González de Vallejo et al., 2007).

Propriedades Geotécnicas		Peso Volúmico seco, γ_s (kN/m ³)	Resistência à compressão uniaxial, R (MPa)		Módulo de Elasticidade, E (GPa)	
			Em laboratório	Martelo de Schmidt	Em laboratório	Martelo de Schmidt
Tufos de Tenerife		8 - >25	1 - 10	15 - 20	0,1 - 22	
Amostra nº 2: Tufo de <i>lapilli</i> da Encumeada	1:1	19	21	32	-	10
	1:2		10		2	

A análise do Quadro 31 permite concluir que o peso volúmico seco da amostra nº 2 se enquadra nos intervalos de valores obtidos para os tufos da ilha de Tenerife.

Relativamente à resistência à compressão uniaxial da amostra nº 2, conclui-se que apenas o valor da resistência à compressão uniaxial dos provetes com relação L/D igual a 2, se situa dentro do intervalo definido para os tufos de Tenerife. Desconhece-se a relação L/D utilizada pelos autores do artigo.

No que se refere aos valores obtidos para o módulo de elasticidade, constata-se que, quer os resultados obtidos em laboratório, quer os obtidos através do ensaio de Schmidt, situam-se dentro no intervalo referido para os tufos de Tenerife.

Também, Serrano et al., (2007), apresentam valores relativos ao peso volúmico seco, à resistência à compressão uniaxial e ao módulo de elasticidade de piroclastos pouco consolidados, correspondentes a cinco diferentes litologias previamente definidas, nomeadamente, LPS, LPT, EST, PZT e CST. Estas litologias são descritas no Quadro 32.

Quadro 32 – Litologias dos diferentes piroclastos do arquipélago das Canárias. (adaptado de Serrano *et al.*, 2007)

Basaltic Piroclastics	Lapilli (LP)	Loose (S)	LPS
		Welded (T)	LPT
	Slag (ES)	Loose (S)	ESS
		Welded (T)	EST
	Basaltic Ashes (CB)	Loose (S)	CBS
		Welded (T)	CBT
Salic Piroclasts	Pumice (PZ)	Loose (S)	PZS
		Welded (T)	PZT
	Salic Ashes (CS)	Loose (S)	CSS
		Welded (T)	CST

Procurou-se comparar graficamente os valores da amostra nº 2 com os piroclastos, apresentados por Serrano *et al.*, (2007).

Assim, na Figura 82, apresenta-se a comparação da amostra nº 2 com os piroclastos de Canárias, relativamente ao peso volúmico seco.

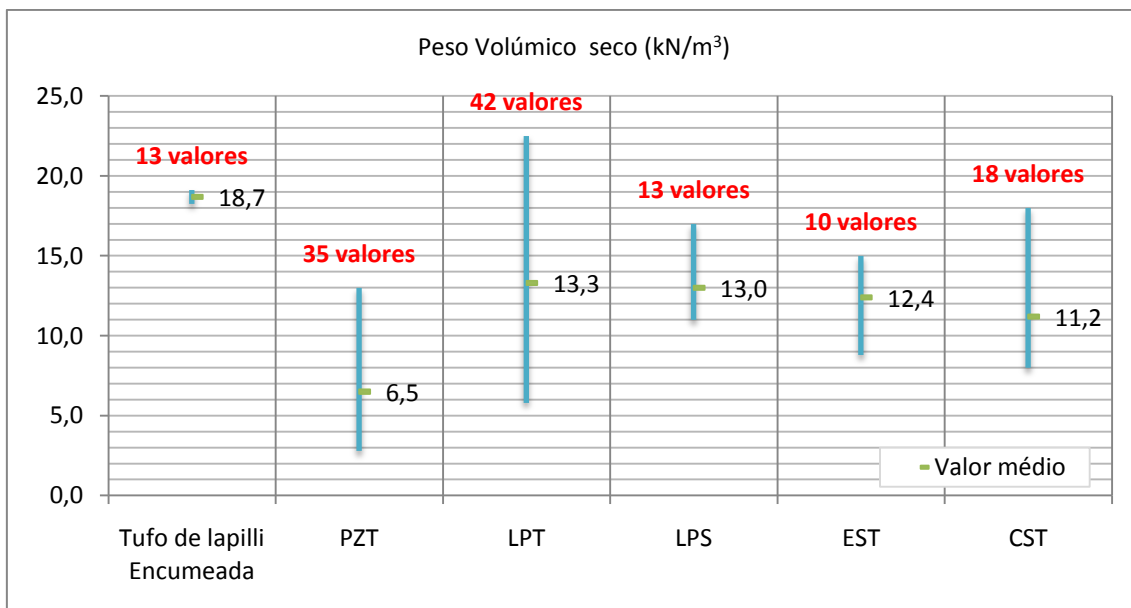


Figura 82 – Pesos volúmicos secos dos piroclastos de Canárias e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano *et al.*, 2007).

Da análise da Figura 82, constata-se que, os valores do tufo de *lapilli* da Encumeada apresentam uma dispersão muito menor, e o seu valor médio é superior aos valores médios apresentados para os piroclastos de Canárias.

Na Figura 83, apresenta-se a comparação da amostra nº 2 com os piroclastos de Canárias, relativamente à resistência à compressão uniaxial.

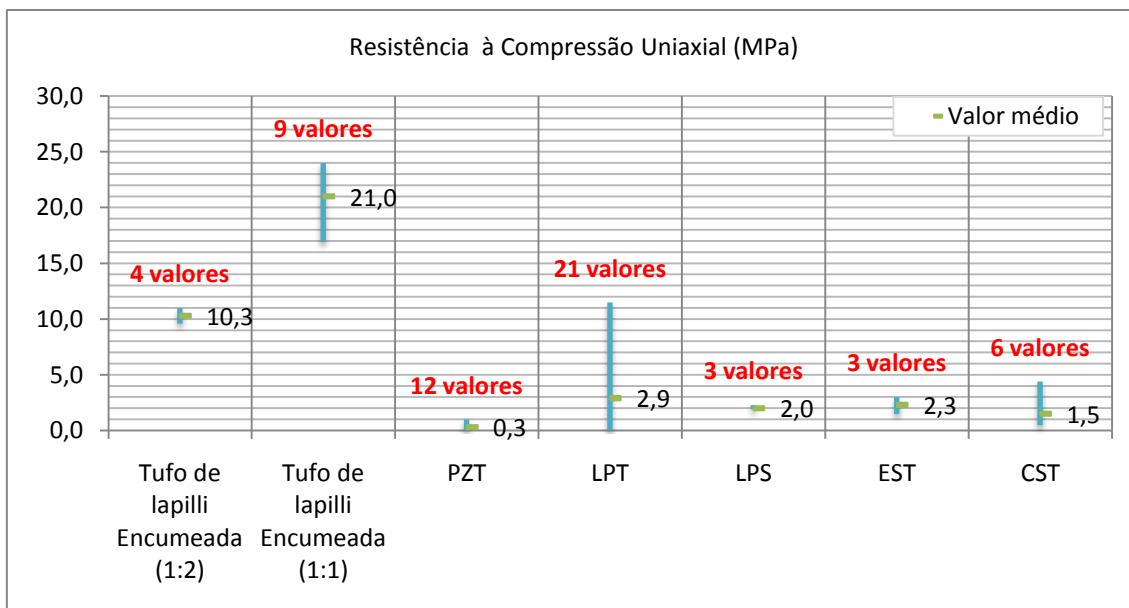


Figura 83 – Resistência à compressão simples dos materiais de Canárias e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano *et al.*, 2007).

De um modo geral, constata-se que, o valor médio da amostra nº 2 é superior aos valores médios apresentados para os piroclastos de Canárias.

Na Figura 84, apresenta-se a comparação da amostra nº 2 com os piroclastos de Canárias, relativamente ao módulo de elasticidade.

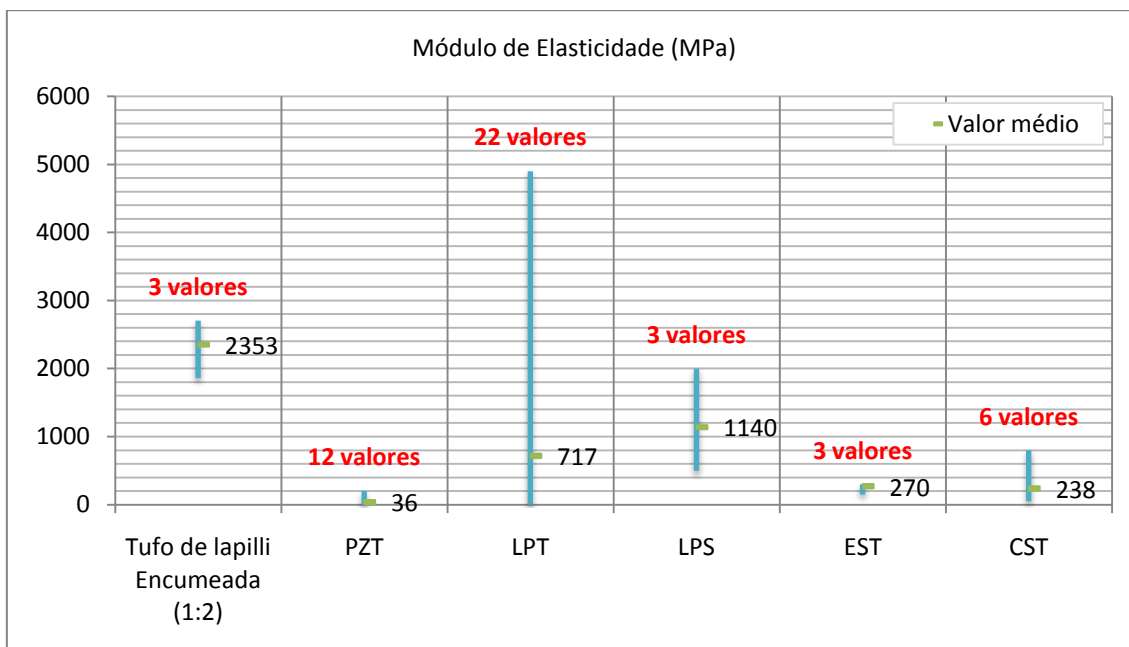


Figura 84 – Módulo de elasticidade dos piroclastos de Canárias e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano *et al.*, 2007).

Não obstante a escassez de resultados relativos ao tufo de *lapilli* da Encumeada, a análise da Figura 84, permite concluir que, os valores do módulo de elasticidade da

amostra nº 2 enquadram-se nos valores da amostra LPT (welded lapilli) de Canárias, embora com um valor médio superior.

Na Figura 85 apresenta-se o enquadramento da amostra nº 2 com os materiais de Canárias, relativamente à relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco, podendo-se constatar que os valores obtidos para o tufo de *lapilli* da Encumeada se enquadram nos valores apresentados por Serrano *et al.*, (2007)

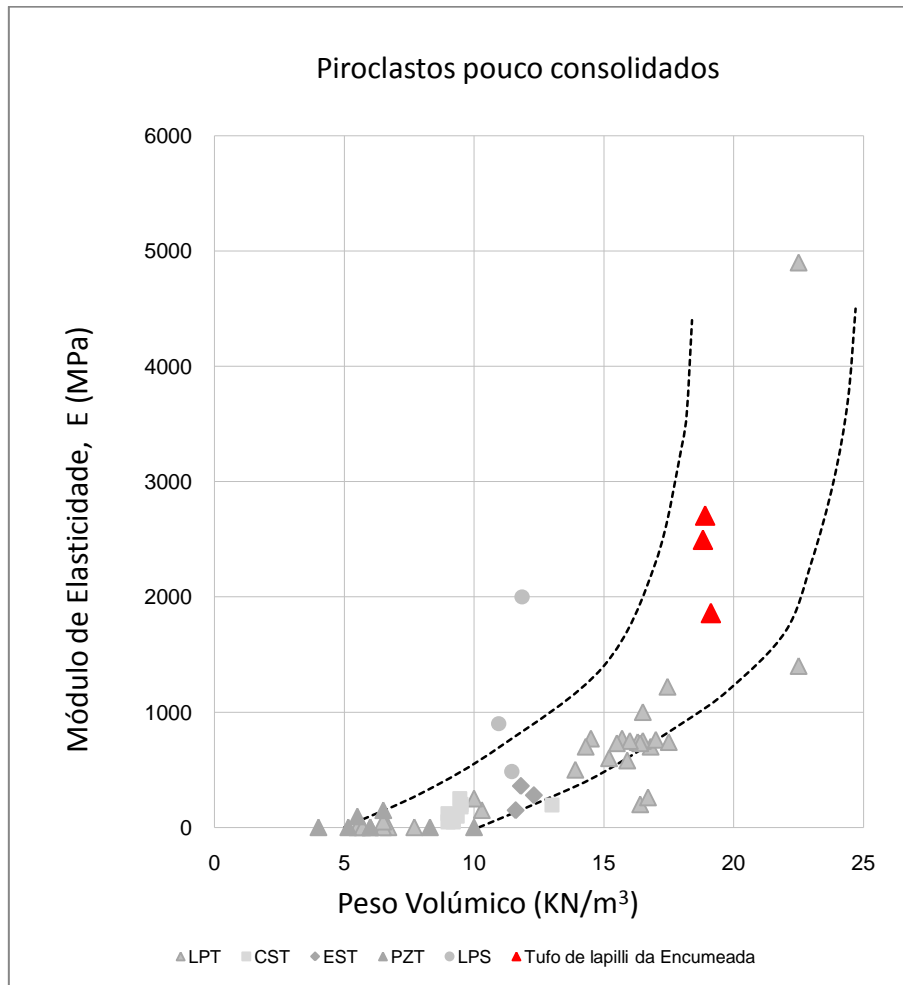


Figura 85 - Relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco dos piroclastos de Canárias, e da amostra nº 2 (adaptado de Serrano *et al.*, 2007).

Na Figura 86 apresenta-se um gráfico que mostra a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial de tufos e brechas da Madeira, adaptado de Mateus de Brito *et al.* (2008), e no qual se inseriram os resultados obtidos para o tufo de *lapilli* da Encumeada.

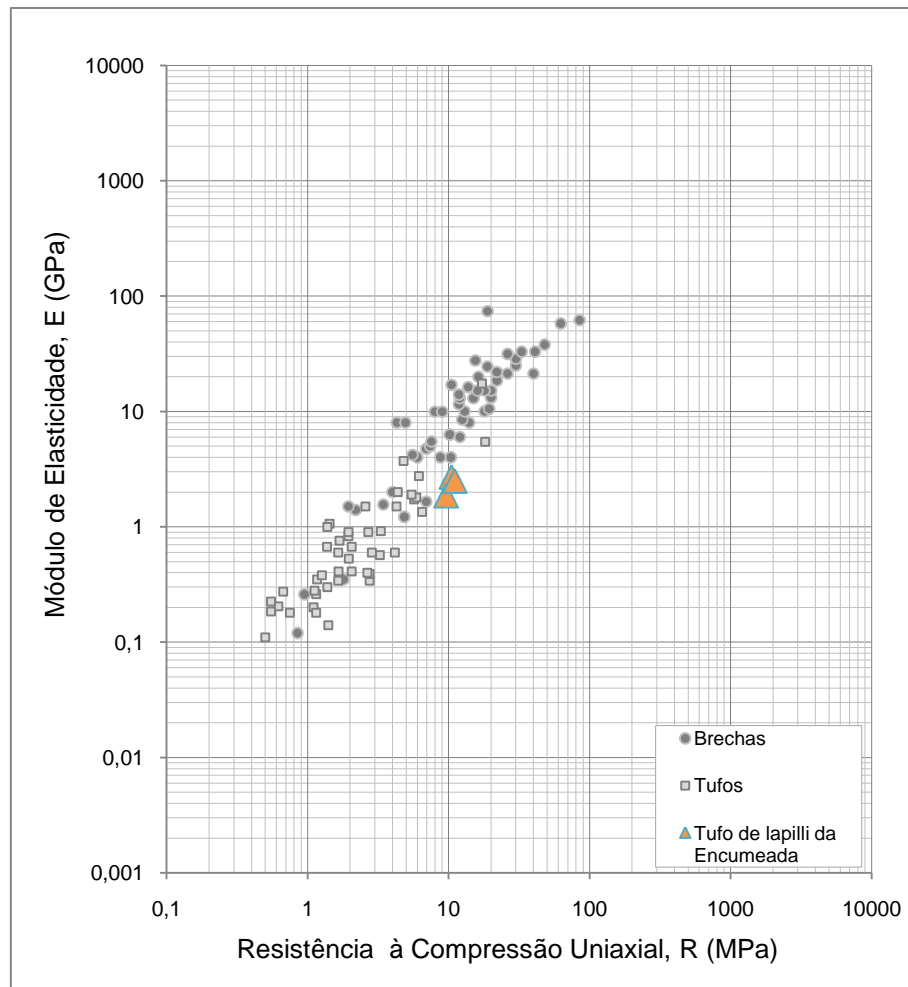


Figura 86 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial com enquadramento do tufo de *lapilli* da Encumeada (adaptado de Mateus de Brito *et al.*, 2008).

A análise da Figura 86, permite constatar que os valores do tufo de *lapilli* da Encumeada, se situam na zona de transição entre as brechas e os tufos.

3.3. Amostra nº 3: Basalto, Unidade da Encumeada (CVI1)

3.3.1. Classificação da amostra

De acordo com a classificação proposta pela ISRM (1981), descrita em Gonzalez Vallejo *et al.* (2002), no Quadro 28, referido anteriormente, e tendo em conta que se obteve um valor médio de 214 MPa para a resistência à compressão uniaxial, o basalto da Encumeada é classificado como uma rocha muito dura.

3.3.2. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e a relação L/D

Tal como para o tufo de *lapilli* da Encumeada, procurou-se estabelecer uma relação entre a resistência determinada em provetes com uma relação L/D = 1 e a resistência dos provetes com uma relação L/D = 2.

No Quadro 33 apresentam-se os valores da resistência à compressão uniaxial para todos os provetes do basalto da Encumeada, e a respectiva relação L/D.

Quadro 33 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de basalto.

Provete	Diâmetro, D (mm)	Altura, L (mm)	L/D	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão média para relação L/D = 2
1	69	139	2	129	154
3	51	103	2	154	
4	51	102	2	151	
5	51	104	2	177	154
6	51	103	2	182	
7	51	102	2	133	
8	51	52	1	150	
9	51	52	1	266	
10	51	52	1	328	Resistência à compressão média para relação L/D = 1
11	51	52	1	153	
12	51	51	1	168	
13	51	51	1	137	
14	51	51	1	216	
15	51	51	1	296	
					214

Na Figura 87 apresenta-se graficamente os valores da resistência à compressão uniaxial em função da relação L/D.

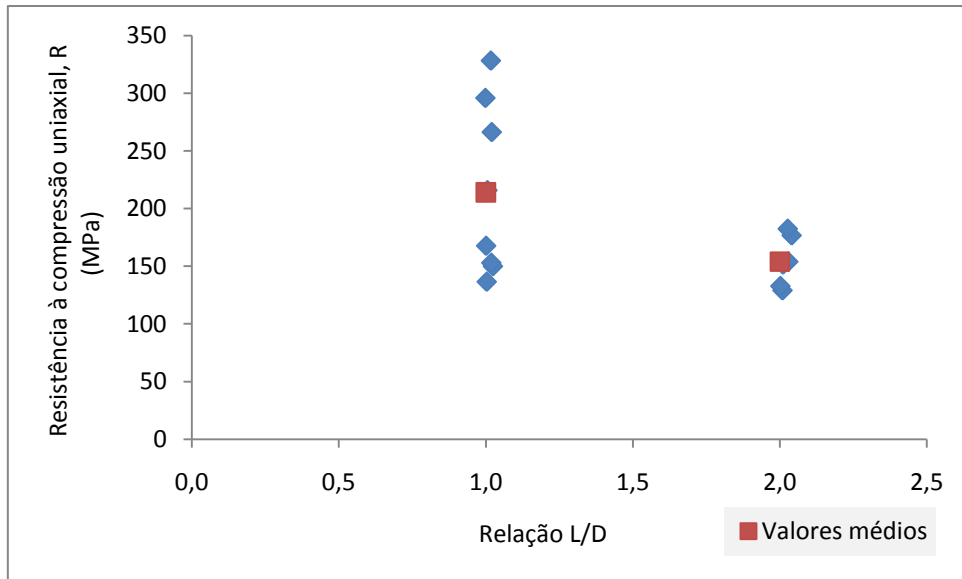


Figura 87 - Resistência à compressão uniaxial e relação L/D dos provetes de basalto.

A análise do gráfico representado na Figura 87, permite constatar que a relação L/D afecta, ligeiramente, a resistência à compressão uniaxial, tendo-se obtido a seguinte relação:

$$\frac{R_{1:2}}{R_{1:1}} = 0,7 \quad (11)$$

3.3.3. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade em laboratório com os valores obtidos no campo através do martelo de Schmidt

No Quadro 34, apresentam-se, para o basalto da Encumeada, os valores médios para a resistência à compressão uniaxial e para o módulo de elasticidade, deduzidos a partir do martelo de Schmidt e obtidos em laboratório, e ainda o valor médio obtido para o peso volúmico seco.

Quadro 34 - Resultados obtidos em laboratório e com o martelo de Schmidt da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade, para o basalto.

	Valores obtidos em Laboratório		Valores obtidos com o martelo de Schmidt
	L/D = 2	L/D = 1	
Resistência à compressão uniaxial, R (MPa)	154	214	215
Módulo de Elasticidade, E (GPa)	78	-	78

A análise dos resultados obtidos no Quadro 34, permite concluir que, para este material, o ensaio com o martelo de Schmidt, permitiu estimar a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade de forma rápida, apesar de este ser um método pouco preciso fora da gama 20-150 MPa.

Assim, apresentam-se valores sensivelmente iguais nos ensaios de campo, quando comparados aos valores obtidos em laboratório, sendo que, foi uma forma vantajosa de determinar estes dois parâmetros, tendo em conta que, o ensaio de Schmidt é um ensaio não destrutivo e, principalmente, muito menos moroso e, conseqüentemente, dispendioso.

Estabeleceu-se, da mesma forma que para a amostra nº 2, a relação entre as resistências e os módulos de elasticidade determinados com o martelo e os valores obtidos em laboratório, tendo-se obtido as seguintes relações:

$$\frac{R_{1:1}}{R_{Schmidt}} = 1 \quad (12)$$

$$\frac{R_{1:2}}{R_{Schmidt}} = 0,7 \quad (13)$$

$$\frac{E}{E_{Schmidt}} = 1 \quad (14)$$

Apesar de neste caso se obter uma relação melhor, os resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial a partir do martelo de Schmidt encontram-se fora da gama de valores (20 a 150 MPa) para a qual o método é considerado preciso.

3.3.4. Comparação dos resultados obtidos com outras referências

No Quadro 35 apresentam-se, de forma resumida, os valores obtidos para as diferentes propriedades geotécnicas do basalto da Encumeada e valores apresentados por González de Vallejo *et al.*, (2007), para basaltos compactos de Tenerife.

Quadro 35 – Resultados obtidos para o basalto da Encumeada e para os basaltos de Tenerife (adaptado de González de Vallejo *et al.*, 2007).

Propriedades Geotécnicas		Peso Volúmico seco, γ_s (kN/m ³)	Resistência à compressão uniaxial, R (Mpa)		Módulo de Elasticidade, E (GPa)	
			Em laboratório	Martelo de Schmidt	Em laboratório	Martelo de Schmidt
Basaltos de Tenerife		15 - 31	25 - 160	150 - 180	-	-
Amostra nº 3: Basalto da Encumeada	1:1	29	214	215	-	78
	1:2		154		78	

Da análise do Quadro 35 conclui-se que o peso volúmico seco da amostra de basalto situa-se no intervalo de valores apresentados para os basaltos de Tenerife.

Quanto à resistência à compressão uniaxial da amostra nº 3, verifica-se que apenas o valor da resistência à compressão uniaxial dos provetes com relação L/D igual a 2, se situa dentro do intervalo apresentado para os basaltos de Tenerife. Desconhece-se a relação L/D utilizada pelos autores do artigo.

Rodríguez-Losada *et al.*, (2007), apresentam valores relativos ao peso volúmico, à resistência à compressão uniaxial, à resistência à compressão uniaxial deduzida do martelo de Schmidt e ao módulo de elasticidade de rochas vulcânicas, correspondentes a onze litologias diferentes previamente definidas, e que se apresentam no Quadro 36.

Quadro 36 – Litologias das diferentes rochas vulcânicas do arquipélago das Canárias. (adaptado de Rodríguez-Losada *et al.*, (2007).

Massive aphanitic basalts	BAFM
Vesicular aphanitic basalts	BAFV
Scoriaceous basalts	BES
Olivine pyroxene massive basalts	BOPM
Olivine pyroxene vesicular basalts	BOPV
Plagioclase massive basalts	BPLM
Plagioclase vesicular basalts	BPLV
Non welded ignimbrites	FON
Welded ignimbrites	IGNS
Trachytes	TRQ
Trachytbasalts	TRQB

Procurou-se comparar graficamente os valores da amostra nº 3 com os valores apresentados para as rochas vulcânicas de Canárias.

Na Figura 88 apresenta-se a comparação da amostra de basalto da Encumeada com as rochas vulcânicas de Canárias.

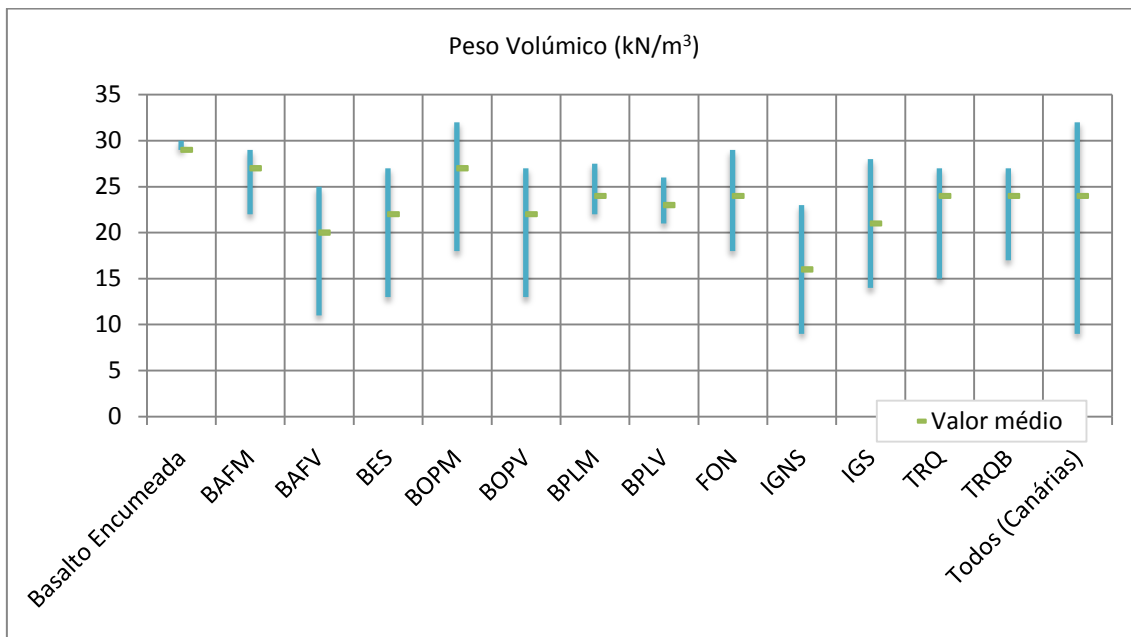


Figura 88 - Pesos volúnicos das rochas vulcânicas de Canárias e da amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada *et al.*, (2007).

Da Figura 88, constata-se que o valor médio do peso volúmico do basalto da Encumeada é superior aos valores apresentados para as rochas vulcânicas de Canárias.

Na Figura 89 apresenta-se a comparação da amostra nº 3 (basalto da Encumeada) com as rochas vulcânicas de Canárias, relativamente à resistência à compressão uniaxial.

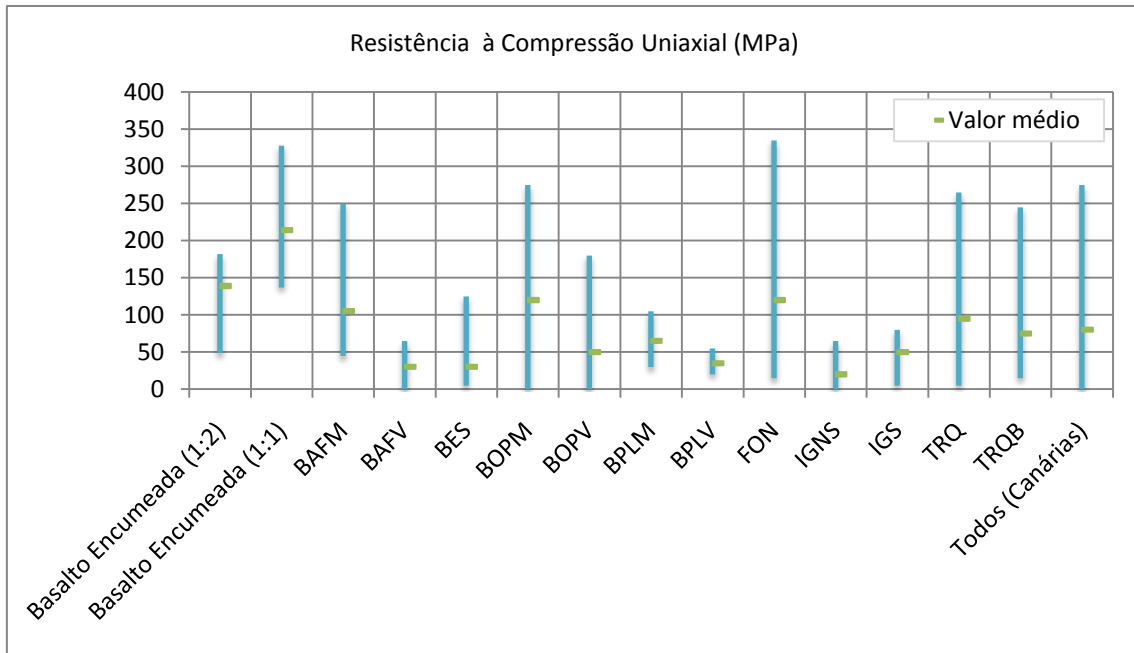


Figura 89 – Resistência à compressão uniaxial das rochas vulcânicas de Canárias eda amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada *et al.*, (2007).

Da Figura 89, constata-se que, o valor médio da amostra nº 3 é superior aos valores apresentados para as rochas vulcânicas de Canárias, independentemente da relação L/D. No entanto, para a relação igual a 2, o valor médio aproxima-se dos de Canárias.

Na Figura 90 apresenta-se a comparação da amostra de basalto da Encumeada com as rochas vulcânicas de Canárias, relativamente à resistência à compressão uniaxial, deduzida do martelo de Schmidt.

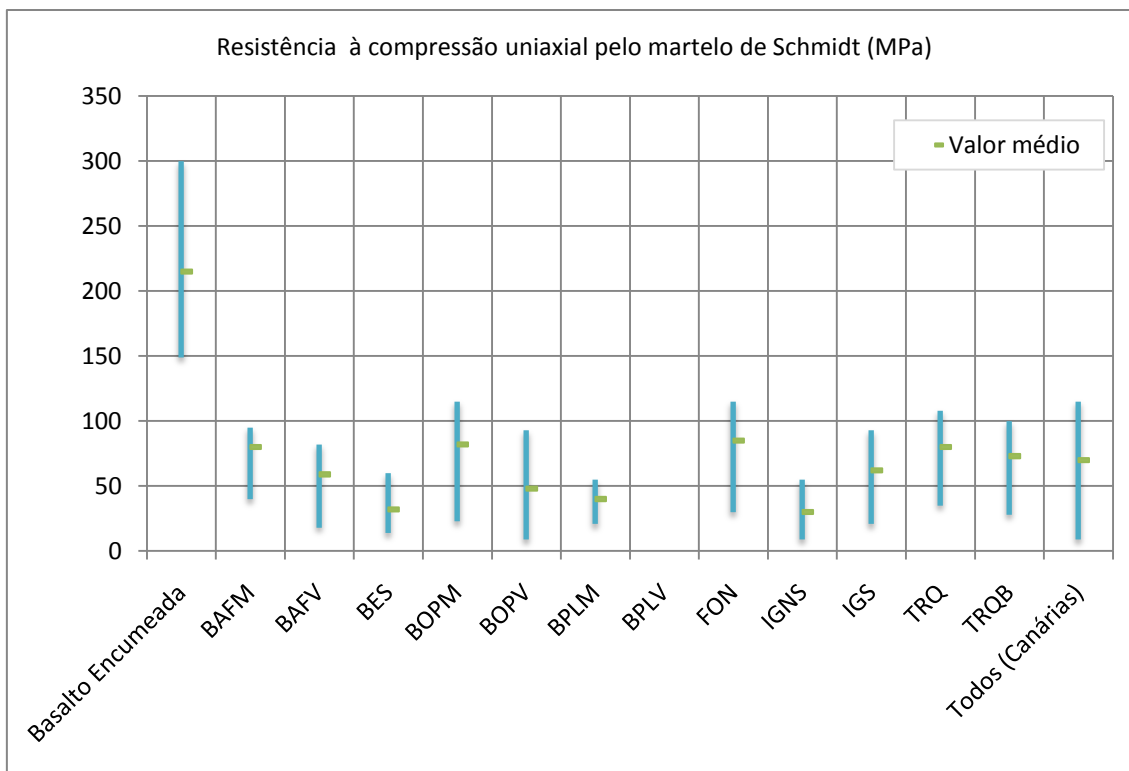


Figura 90 – Resistência à compressão uniaxial determinada pelo martelo de Schmidt dos materiais de Canárias com enquadramento da amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada *et al.*, (2007)).

Da Figura 90, verifica-se que os valores do basalto da Encumeada, determinados *in situ*, são muito superiores aos valores apresentados para as rochas vulcânicas de Canárias. No entanto, como já foi referido, os resultados situam-se fora da gama para a qual o ensaio é considerado preciso.

Na Figura 91 apresenta-se a comparação da amostra de basalto da Encumeada com as rochas vulcânicas de Canárias, relativamente ao módulo de elasticidade estático.

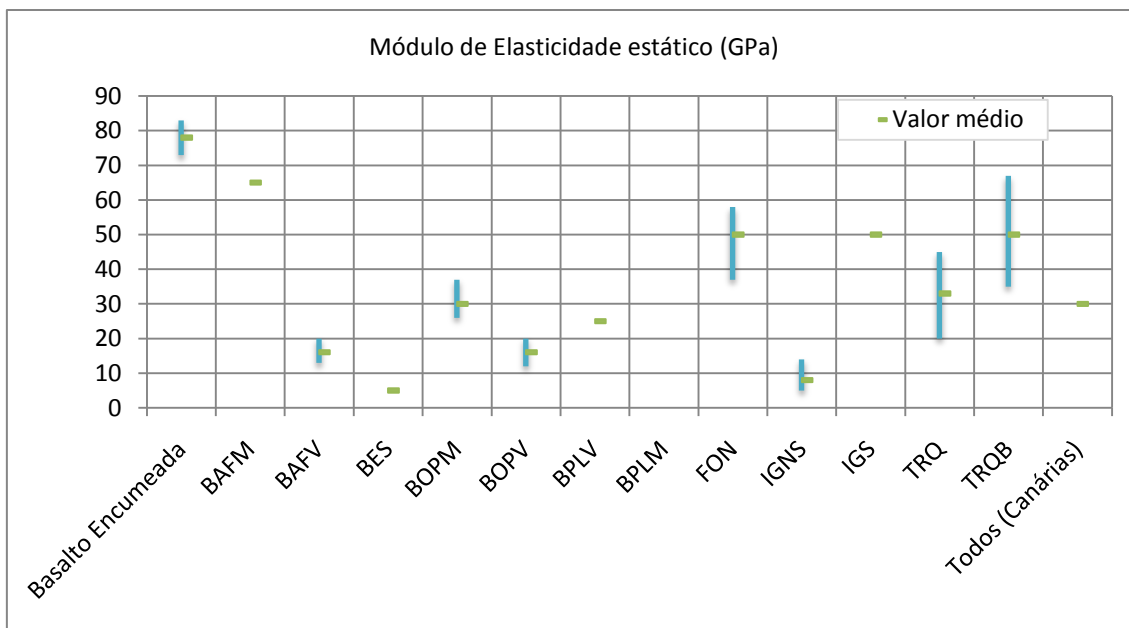


Figura 91 – Módulo de elasticidade estático dos materiais de Canárias com enquadramento da amostra nº 3 (adaptado de Rodríguez-Losada *et al.*, (2007).

Da Figura 91, conclui-se que, o módulo de elasticidade do basalto da Encumeada é relativamente alto quando comparado à maioria dos valores de Canárias, no entanto, o seu valor médio está relativamente próximo dos BAFM (Massive aphanitic basalts).

Rodríguez-Losada *et al.*, (2007) refere ainda que, a partir da análise dos resultados das rochas vulcânicas de Canárias, estabeleceram-se interessantes correlações de forma a estimar certos parâmetros de forma rápida e mais fácil. A relação entre a resistência à compressão uniaxial determinada em laboratório e este mesmo parâmetro determinado *in situ*, com o martelo de Schmidt, é um exemplo dessas correlações.

Na Figura 92, compara-se a amostra nº 3 com as rochas vulcânicas de Canárias.

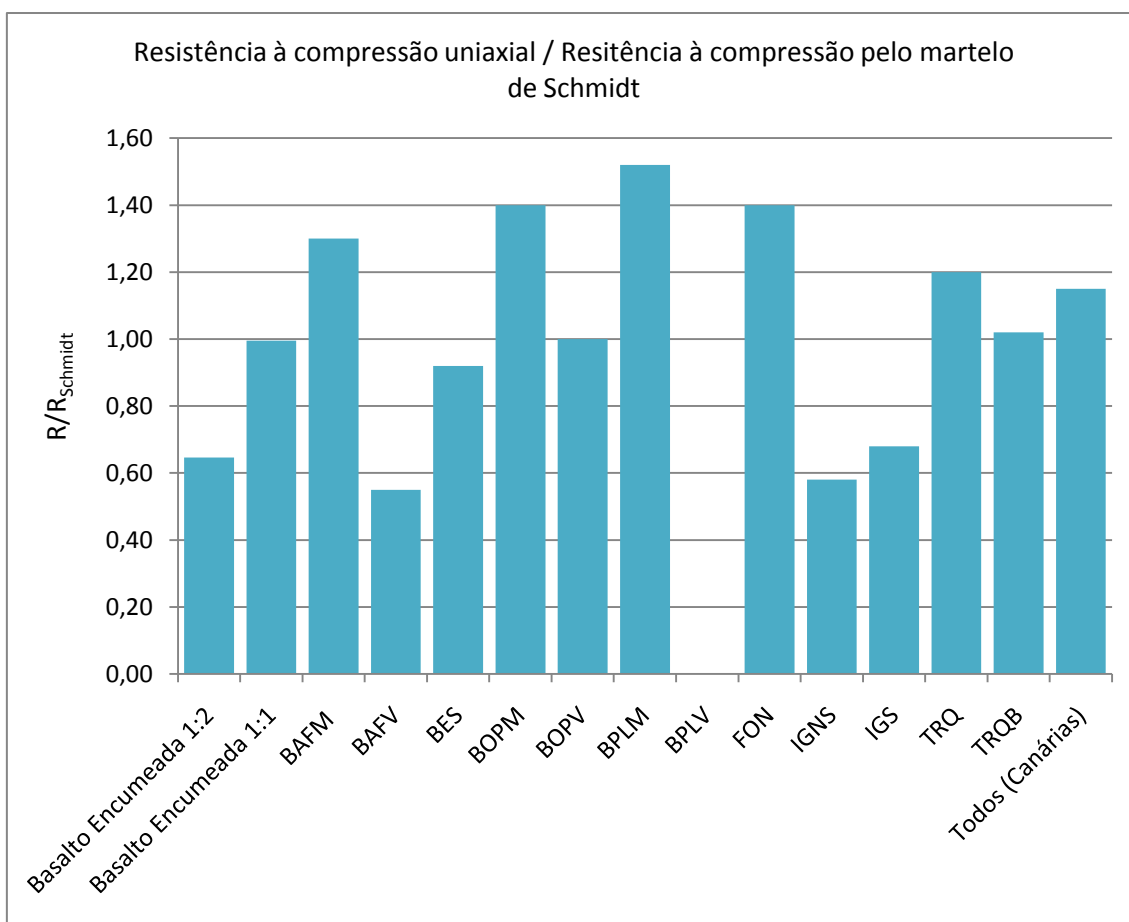


Figura 92 - Relação entre a resistência à compressão uniaxial determinada em laboratório e *in situ* para as rochas vulcânicas de Canárias e para o basalto da Encumeada (adaptado de Rodríguez-Losada *et al.*, (2007).

Da análise da Figura 92, conclui-se que, os valores do basalto da Encumeada encontram-se no intervalo de valores obtidos para as rochas vulcânicas de Canárias.

Na Figura 93 apresenta-se um gráfico, adaptado de Mateus de Brito *et al.* (2008), que mostra a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial de basaltos compactos pouco alterados a sãos, basaltos por vezes vacuolares medianamente alterados e basaltos geralmente vacuolares muito alterados da Madeira, e no qual se representaram os resultados obtidos para o basalto da Encumeada.

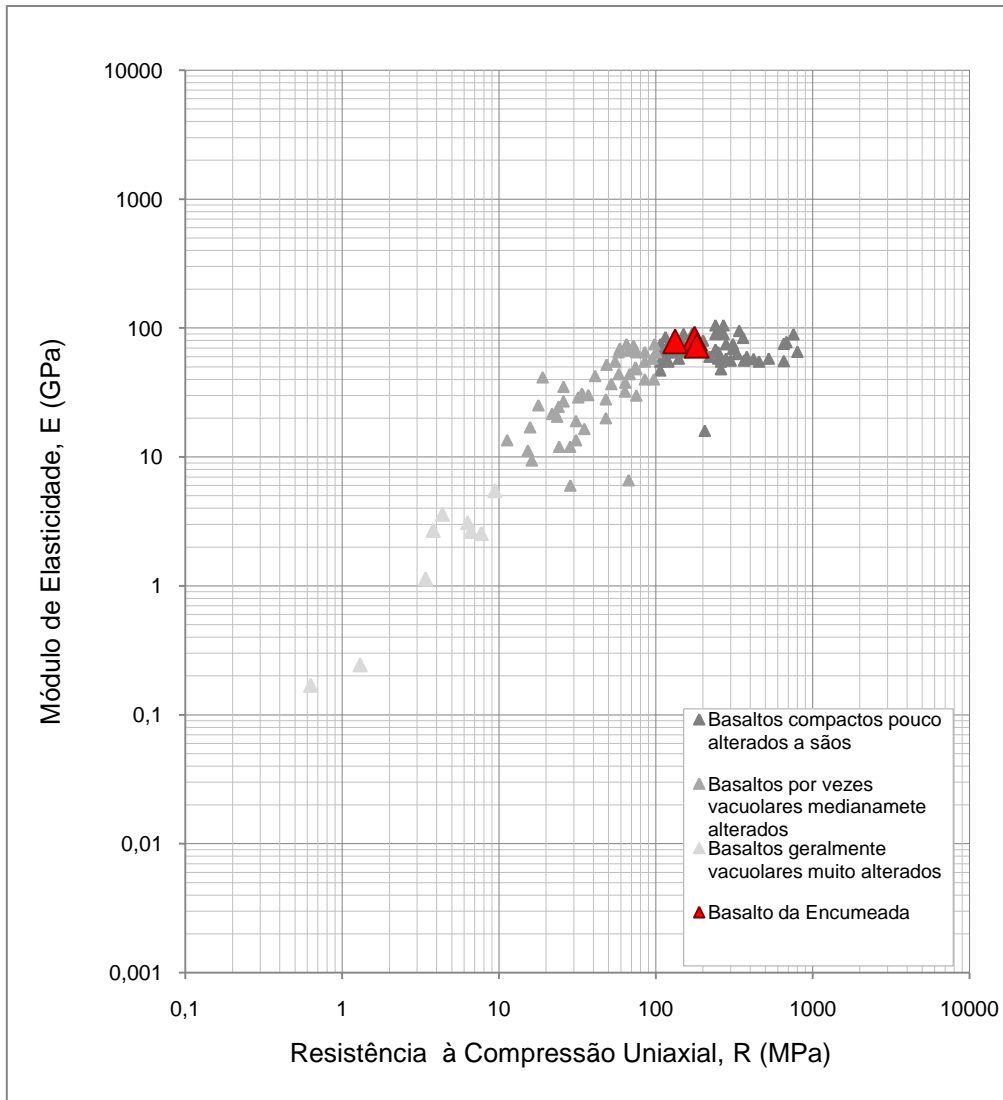


Figura 93 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial com enquadramento da amostra nº 3 (adaptado de Mateus de Brito *et al.*, 2008).

Da análise da Figura 93, verifica-se que os valores referentes ao basalto da Encumeada, se situam entre os basaltos compactos pouco alterados a sãos.

3.4. Relações entre a amostra nº 2, a amostra nº 3 e outras referências

De acordo com Rodríguez *et al.*, (2007), a relação entre a compressão uniaxial e o peso volúmico seco é evidente, particularmente nas rochas vulcânicas. Os resultados dessa relação são apresentados num gráfico semi-logarítmico na Figura 94, no qual se representaram os resultados obtidos para o tufo de *lapilli* e para o basalto da Encumeada.

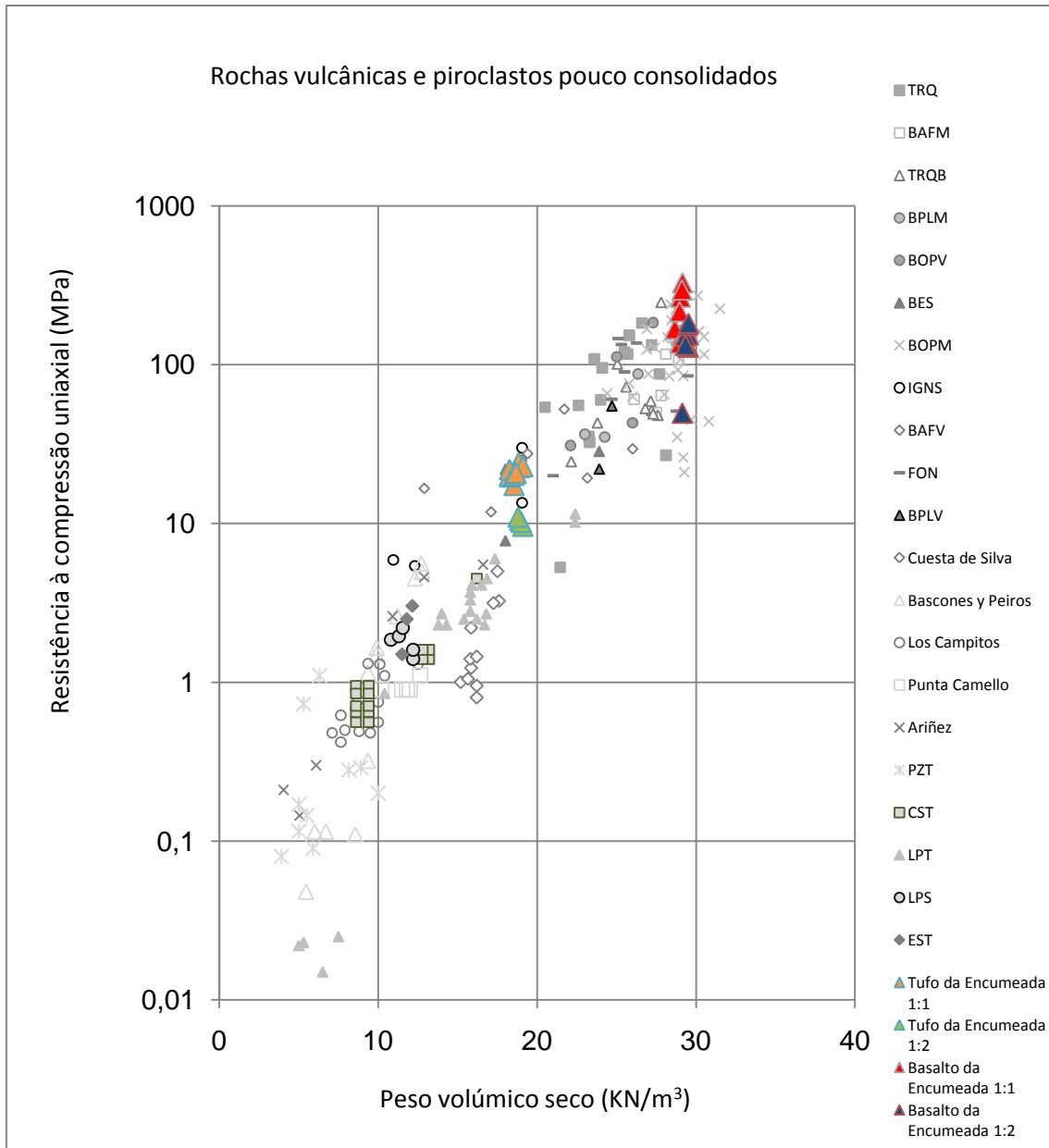


Figura 94 - Relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco de 213 amostras do arquipélago das Canárias, com o enquadramento das amostras nº 2 e nº 3 (adaptado de Serrano *et al.*, 2007).

Da observação do gráfico representado na Figura 94 e de acordo com Serrano *et al.*, (2007), distinguem-se dois grupos diferentes de amostras:

- ✓ As amostras com o peso volúmico superior a 10 kN/m^3 , que apresentam uma tendência exponencial entre a resistência à compressão uniaxial e o peso volúmico seco;
- ✓ As amostras com o peso volúmico inferior a 10 kN/m^3 , que não apresentam nenhuma tendência aparente entre a resistência à compressão uniaxial e o peso volúmico seco;

De referir também que os materiais piroclásticos da Encumeada, situam-se numa zona intermédia, entre os piroclastos pouco consolidados e as rochas vulcânicas mais resistentes.

Quanto à localização gráfica, quando comparada com os outros materiais, o basalto da Encumeada situa-se na zona mais extrema do gráfico e entre as rochas vulcânicas mais resistentes do arquipélago de Canárias.

A relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco foi, também, abordada pelo mesmo autor, e encontra-se representada na Figura 95 para os mesmos materiais da Figura 94.

De igual modo, procedeu-se ao enquadramento da amostra nº 2 e da amostra nº 3, no gráfico representado na Figura 95.

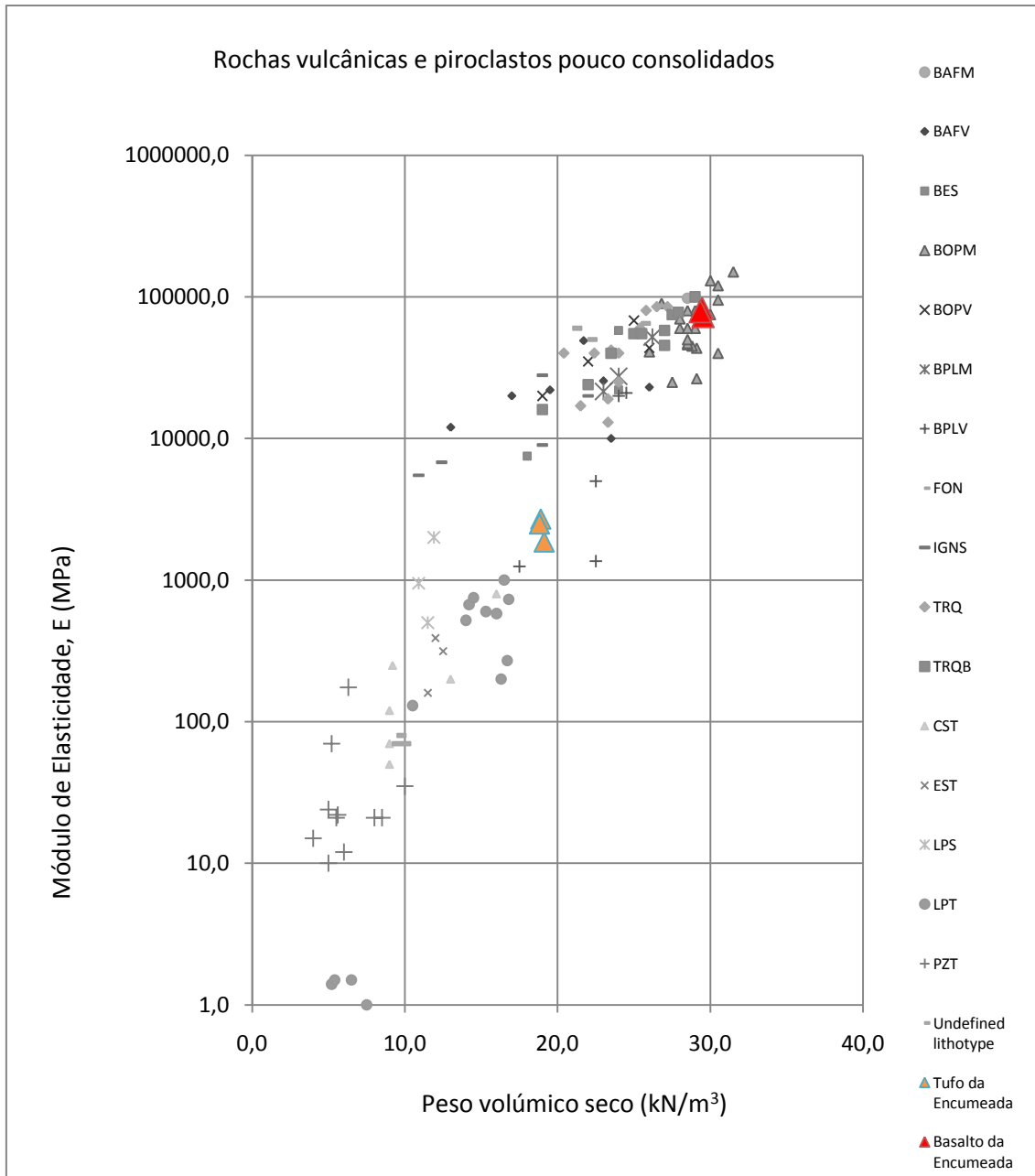


Figura 95 - Relação entre o módulo de elasticidade e o peso volúmico seco de 213 amostras do arquipélago das Canárias, com o enquadramento das amostras nº 2 e nº3 (adaptado de Serrano *et al.*, 2007).

Segundo Serrano *et al.*, (2007), observa-se uma mesma tendência exponencial. No entanto, esta tendência não é tão clara, como a apresentada para a resistência à compressão uniaxial, pois para pesos volúmcicos secos inferiores a 10 kN/m³ os valores apresentam uma dispersão maior.

De referir que, tal como na relação com a resistência à compressão uniaxial, o tufo de *lapilli* da Encumeada, situa-se numa zona intermédia, entre os piroclastos pouco consolidados e as rochas vulcânicas mais resistentes.

Quanto ao basalto da Encumeada, este situa-se, como no caso da resistência à compressão uniaxial, na zona mais extrema do gráfico e entre as rochas vulcânicas com módulo de elasticidade mais elevado do arquipélago de Canárias.

3.5. Síntese das características geológicas e geotécnicas das três amostras estudadas

Tendo presente que o objectivo principal do presente trabalho é a caracterização geológica e geotécnica do Complexo Vulcânico Antigo e do Complexo Vulcânico Intermédio, apresentam-se no Quadro 37 as características geológicas e geotécnicas das unidades estudadas.

Quadro 37 - Quadro resumo das características geológicas e geotécnicas das três amostras estudadas.

Referência da amostra		Amostra nº 1		Amostra nº 2		Amostra nº 3	
Caracterização Geológica	Unidade Vulcano-Estratigráfica	CVA 1 - Unidade do Porto da Cruz		CVI 1 - Unidade da Encumeada		CVI 1 - Unidade da Encumeada	
	Litologia	Rocha vulcânica profundamente alterada, com comportamento de solo		Rocha vulcânica, explosiva, consolidada. Tufo de <i>lapilli</i>		Rocha vulcânica, efusiva. Escoda subaérea de natureza basáltica	
	Grau de Alteração, W	W5		W3		W2	
	Grau de Fracturação, F	F5		F1		F2 / F3	
	Espessura da Camada, L	L1		L1		L1	
Caracterização Geotécnica	Limite de Liquidez, LL (%)	Ar	Estufa	-		-	
		61	59				
	Limite de Plasticidade, LP (%)	Ar	Estufa	-		-	
		46	45				
	Índice de Plasticidade, IP (%)	Ar	Estufa	-		-	
		15	14				
	Densidade das partículas (kN/m ³)	27		-		-	
	Peso Volúmico seco, γ_s (kN/m ³)	-		19		29	
	Classificação unificada	MH - Silte Elástico Arenoso.		-		-	
	Classificação para fins rodoviários	A-7-5 (15)					
	Grau de classificação por ISRM (1981)	-		Rocha branda		Rocha muito dura	
Resistência à compressão uniaxial. R (MPa)	-		L/D = 1	L/D = 2	L/D = 1	L/D = 2	
			21	10	214	154	
Resistência à compressão uniaxial pelo martelo de Schmidt, R (MPa)	-		32		215		
Módulo de Elasticidade, E (GPa)	-		2		78		
Módulo de Elasticidade pelo martelo de Schmidt, E (GPa)	-		10		78		

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho pretendeu-se dar início ao estudo de caracterização geológica e geotécnica do Complexo Vulcânico Antigo – Unidade do Porto da Cruz, e do Complexo Intermédio – Unidade da Encumeada.

Para tal, desenvolveu-se um programa experimental de recolha e ensaios de um conjunto de amostras provenientes das unidades em causa. A realização destas tarefas envolveu entidades externas à Universidade da Madeira, pelo que esteve sujeita à disponibilidade de equipamentos e recursos humanos dessas instituições.

Apesar de o número de ensaios e amostras ser reduzido considera-se que os resultados obtidos permitem dar início à caracterização geológica e geotécnica dos complexos vulcânicos em questão. A comparação, dos valores obtidos, com outros resultados existentes em bibliografia, referente à ilha da Madeira e ao arquipélago das Canárias, revela a existência de grande compatibilidade entre os materiais geológicos destas ilhas de origem vulcânica.

Com os resultados obtidos neste trabalho será possível dar continuidade, no futuro, mediante mais caracterizações geológicas e geotécnicas de outras amostras pertencentes aos diferentes complexos vulcânicos existentes na ilha da Madeira. Isto de forma a viabilizar no final a caracterização geológica e geotécnica dos três Complexos Vulcânicos da Ilha da Madeira.

De salientar que os resultados obtidos, são um primeiro passo, no sentido de caracterizar os complexos vulcânicos da ilha da Madeira, o que pode, eventualmente, contribuir, para a elaboração de uma futura carta geotécnica.

Atingidos os principais objectivos desta dissertação, propõe-se a continuidade deste trabalho no futuro.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D2487 - 00 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

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 SILVEIRA, A., MADEIRA, J., RAMALHO, R., FONSECA, P., PRADA, S. & RODRIGUES, C.F. (2008) - A new Geological Map of Madeira Island, Portugal. Abstracts of the 2008 IAVCEI General Assembly, Reykjavík, in CD-Rom (Monday, Aug. 18th, oral presentations): 80.

GELDMACHER, J., VAN DEN BOGAARD P., HOERNLE K., AND SCHMINCKE, H.U., (2000) - Ar age dating of the Madeira Archipelago and hotspot track (eastern North Atlantic), *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol. 1, Paper number 1999GC000018 [9621 words, 10 figures, 4 tables]. February 23, 2000.

GOMES CORREIA, A., (1987) - Revisão da Classificação de Solos para Propósitos de Engenharia.

GOMES CORREIA, A., (1980) - Ensaio para controlo de terraplanagens. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO L., OTEO C., (2002) - Ingeniería geológica. Edição de Prentice-Hall. Pearson education. Madrid. 2002.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I.; HIJAZO, T.; FERRER, M.; SEISDEDOS, J., (2007) - Geomechanical characterization of volcanic materials in Tenerife. In A. Malheiro & J.Nunes (eds), *Volcanic Rocks*: 21-28. London, Taylor & Francis/Balkema.

GUERREIRO H. J. P., (2000) - Exploração subterrânea de mármore - Aspectos Geotécnicos. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Georrecursos – Área da Geotecnia pelo IST. Universidade Técnica de Lisboa: 193 pp.

ISRM (1978) - Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials.

ISRM (1978) - Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics. Mining Science & Geomechanics. Abstr. Vol. 15*, pp. 89 – 97. Pergamon Press Ltd. 1978. Printed in Great Britain.

ISRM (1981) - Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. Basic Geotechnical Description of Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics. Mining Science & Geomechanics. Abstr. Vol. 18, pp. 85 – 110. Pergamon Press Ltd. 1981. Printed in Great Britain.

LIMA, C. e MENEZES, J., Elementos de apoio à cadeira de Geologia de Engenharia da Universidade do Porto para o ano lectivo 2009/2010.

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 239: 1970, “Solos. Análise granulométrica”. Especificação do LNEC. Documentação normativa. MOP – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Portugal.

LNEC E 240: 1971, “Solos. Classificação para fins rodoviários”. Especificação do LNEC. Documentação normativa. MOP - Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Portugal.

MALHEIRO A. M., SOUSA, J. F. V., MARQUES, F.M., SOUSA D. M., (2009) – Contribution to Geotechnical Characterization of Basaltic Pyroclasts.

MAURÍCIO A., MARQUES J., FIGUEIREDO P., (2002) - Sebenta de Geologia de Engenharia. Instituto Superior Técnico.

MATA, J. (1996) - Petrologia e geoquímica das lavas da ilha da Madeira: implicações para os modelos de evolução mantélica. Tese de doutoramento. Universidade de Lisboa. Lisboa. 1996.

MATEUS DE BRITO, J. A., ROSA, S. P., ALBERTO DOS SANTOS, J., BAIÃO, C. O., (2008) - Seminário “Fundações em formações geológicas da Ilha da Madeira”. Funchal. Dezembro de 2008.

NP - 83: 1965 “Solos. Determinação da densidade das partículas.” Norma Portuguesa.

NP - 84: 1965 “Solos. Determinação do teor em água”. Norma Portuguesa.

NP - 143: 1969 “Solos. Determinação dos limites de consistência”. Norma Portuguesa.

NP EN 14580 - 2007 «Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade estático.

NP EN 1926 - 2008 «Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão uniaxial.

NUNES, J. C. (2002) - Novos Conceitos em Vulcanologia: Erupções, Produtos e paisagens Vulcânicas. Universidade dos Açores – Departamento de Geociências, Ponta Delgada. In *Genovas*, nº 16, pp. 5 a 22. Associação Portuguesa de Geólogos.

PRADA, S. L. R. N. (2000) – Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para obtenção do Grau de Doutor em Geologia, Universidade da Madeira: 351 pp.

RAMALHO, R.A.S. (2004) - Cartografia Geológica da Madeira - Estratigrafia e tectónica do sector a leste de Machico. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Geologia Dinâmica pela FCUL. Universidade de Lisboa: 146 pp.

RODRÍGUEZ - LOSADA, J.A.; HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, L.E.; OLALLA, C. ; PERUCHO, A. ; SERRANO, A.; RODRIGO DEL POTRO, (2007) - The volcanic rocks of the Canary Islands. Geotechnical properties. In A. Malheiro & J.Nunes (eds), *Volcanic Rocks*: 53-57. London, Taylor & Francis/Balkema.

SERRANO, A.; OLALLA, C.; PERUCHO, A.; HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, L.E. (2007) - Strength and deformability of low density pyroclasts. In A. Malheiro & J.Nunes (eds), *Volcanic Rocks*: 35-43. London, Taylor & Francis/Balkema.

SILVA, J., (2003) - Areia de Praia da Ilha do Porto Santo: Geologia, Génese, Dinâmica e Propriedades Justificativas do seu Interesse Medicinal. Edição da Madeira Rochas – Divulgações Científicas e Culturais. 344 pp.

SCHMINCKE, H., (2004) - *Volcanism*. Springer Berlin Heidelberg New York. 1st ed. 2004. 324 pp.

ZBYSZEWSKI, G.; MEDEIROS, A.C.; FERREIRA, O.V. (1974) - Carta Geológica de Portugal, folha A e B, na escala 1/50 000. Serv. Geol. Portugal.

Sites consultados

<http://www.usgs.gov>, acessado em Setembro, 2010.
