

CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS PIROCLASTOS TRAQUÍTICOS (PEDRA POMES)

CONTRIBUTION FOR GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF TRAQUITE PIROCLASTICS (PUMICES)

Marques, Filipe; Laboratório Regional de Engenharia Civil, Ponta Delgada, Portugal, *Filipe.MP.Marques@azores.gov.pt*
Amaral, Paulo; Laboratório Regional de Engenharia Civil, Ponta Delgada, Portugal, *Paulo.AP.Amaral@azores.gov.pt*
Malheiro, Ana; Laboratório Regional de Engenharia Civil, Ponta Delgada, Portugal, *Ana.MM.Malheiro@azores.gov.pt*
Amaral, Catarina; Laboratório Regional de Engenharia Civil, Ponta Delgada, Portugal, *Catarina.SE.Amaral@azores.gov.pt*

RESUMO

Com este trabalho pretende-se contribuir para a caracterização geotécnica dos piroclastos de natureza traquítica (e.g. pedra-pomes), com dimensões do silte ao cascalho, um dos materiais mais abundantes na ilha de S. Miguel (arquipélago dos Açores). Para tal, procedeu-se à realização de um extenso programa de ensaios laboratoriais e de campo para caracterizar depósitos vulcânicos pomíticos de três maciços vulcânicos poligenéticos da ilha de S. Miguel (e.g. Sete Cidades, Fogo e Furnas). Por outro lado, foi feita uma recolha, interpretação e tratamento da informação relativa aos ensaios realizados pelo LREC sobre este tipo de material ao longo de 30 anos de atividade, de modo a caracterizar geotecnicamente aquela formação geológica. Analisa-se a informação recolhida nos ensaios realizados e a compilada, e tecem-se algumas considerações sobre as potenciais utilizações destes materiais, bem como os problemas relacionados com a sua aplicação em obras de engenharia civil.

ABSTRACT

This paper aims to contribute for the geotechnical characterization of trachyte pyroclastic soils deposits (e.g. pumice), with dimensions of silt to gravel, one of the most abundant materials on S. Miguel island (Azores archipelago). An extensive program of laboratory and field tests was conducted to characterize pyroclastic deposits from three distinctive polygenetic volcanos (e.g. Sete Cidades, Fogo and Furnas). Moreover, it was done a collection, interpretation and data processing from information relating to the tests carried out by the LREC over 30 years of activity, in order to characterize this geological formation from the geotechnical point of view. All the information obtained in laboratory tests and *in situ* tests, complemented with compiled information were analysed. Some considerations are done to the potential uses of these materials as well the problems related to their application in civil engineering.

1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento das condições geológico-geotécnicas e hidrológicas constituem um elemento essencial e de extrema importância no desenvolvimento sustentável de projetos de engenharia civil/geotécnica, pelo aumento da segurança e redução dos custos inerentes a grandes obras. Por outro lado, permite o auxílio ao planeamento e ordenamento do território, no sentido de reconhecer, controlar e prevenir fenómenos geológicos, nomeadamente os de instabilidade geomorfológica.

A atividade construtiva nas ilhas que constituem o arquipélago dos Açores é condicionada, de forma significativa, pelo comportamento dos materiais geológicos, essencialmente de natureza vulcânica. Dada a especificidade genética destes materiais, é essencial o conhecimento das suas propriedades físicas, mecânicas, hidrológicas e químicas para poder determinar o seu comportamento tanto no entendimento dos processos geomorfológicos (e.g. movimentos de vertente) tanto em obra, ou para equacionar novas utilizações, enquanto solo de fundação para estruturas, como material de aterro, na estrutura de pavimentos rodoviários, ou ainda como matéria-prima (agregado leve) para incorporar em produtos cimentícios na construção civil.

O presente estudo faz parte de um projeto de âmbito mais vasto em curso no Laboratório Regional de Engenharia Civil – Açores (LREC), que visa a caracterização de diversos produtos vulcânicos, nomeadamente os depósitos piroclastos, rochas de natureza traquítica (s.l.) e basáltica (s.l.) e rochas piroclásticas (e.g. ignimbritos soldados). Neste sentido, pretendeu-se, com o desenvolvimento do Projeto - Caracterização Geotécnica de Piroclastos traquíticos, com a duração de 3 anos, contribuir para esse

conhecimento sobre as principais características geotécnicas dos piroclastos de natureza traquítica (e.g. pedra-pomes), com dimensões do silte ao cascalho, um dos materiais mais abundantes na ilha de S. Miguel, particularmente nos grandes maciços vulcânicos.

Procedeu-se à recolha de amostras em cada um dos referidos maciços vulcânicos poligenéticos da ilha de São Miguel (e.g., Sete Cidades, Fogo e Furnas) com vista à realização de um conjunto de ensaios laboratoriais e à execução de ensaios de campo de forma a caracterizar do ponto de vista físico, geométrico, químico, mecânico e hidrológico os referidos materiais, assim como avaliar algumas características de deformabilidade do material *in situ*. Para além disso, este estudo incluiu a recolha de informação existente em relatórios geotécnicos realizados pelo LREC.

Neste documento analisa-se a informação recolhida e obtida nos ensaios realizados visando ser um contributo para a caracterização deste tipo de material vulcânico para a Região Autónoma dos Açores e para outros locais de natureza vulcânica.

2 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho desenvolveu-se na ilha de São Miguel, uma das nove ilhas de origem vulcânica do arquipélago dos Açores. A ilha de S. Miguel situa-se entre as latitudes 37° 42' e 37° 54' N e as longitudes 25° 51' e 25° 08' W, exibe um formato retangular e alongado segundo a direção E-W (Fig.1). Apresenta uma superfície com cerca de 746 km² e o número de habitantes ronda os 138 mil, correspondendo, deste modo, à maior ilha do arquipélago, sendo também a mais populosa e desenvolvida em termos de estruturas de engenharia do arquipélago dos Açores.

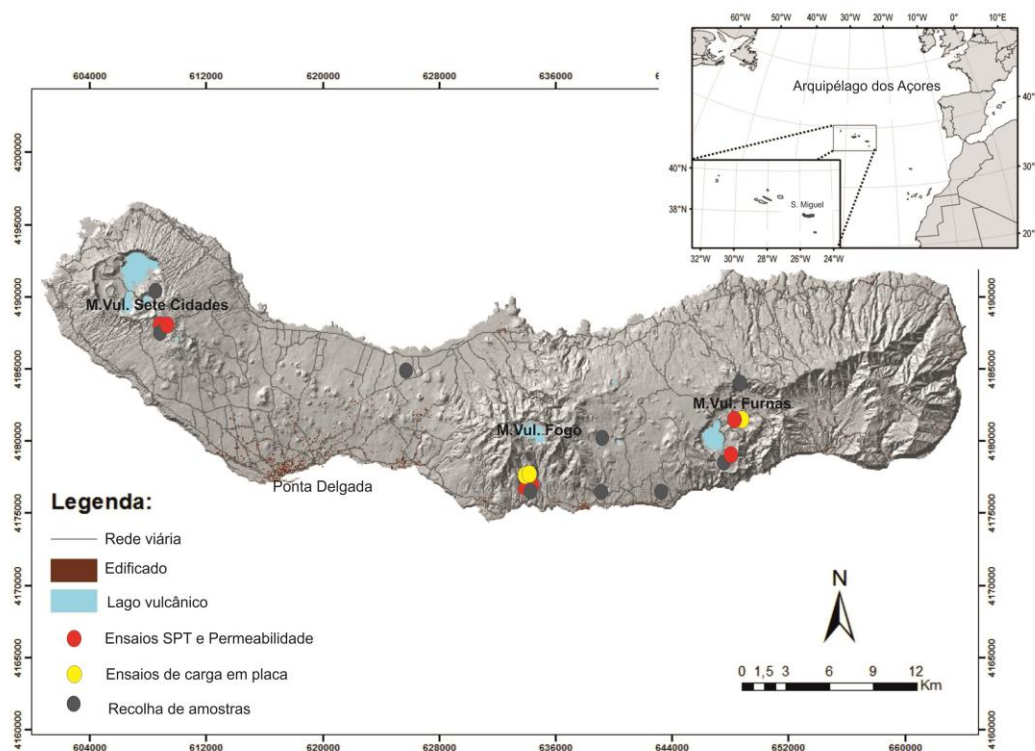


Figura 1 – Localização geográfica da ilha de São Miguel, no arquipélago dos Açores. Identificação dos locais onde foram efetuados os ensaios *in situ* e realizadas as colheitas das amostras.

Fruto do seu enquadramento geoestrutural, a ilha de S. Miguel é naturalmente afetada pelos importantes sistemas de fraturas que dominam o Rift da Terceira (s.l.). O Graben dos Mosteiros, observado na vertente NW do Vulcão das Sete Cidades, e o Graben da Ribeira Grande, situado no maciço de Água de Pau, de direção aproximada NW-SE (Wallenstein, 1999), denunciam tal facto. Paralelamente, importa sublinhar a existência de falhas e de alinhamentos vulcânicos de direção geral WNW-ESE a E-W (Gaspar et al., 1995), cuja interseção com o sistema dominante NW-SE se admite que possa determinar a localização dos principais vulcões poligenéticos (Queiroz, 1997).

Esta ilha apresenta três vulcões centrais materializados com caldeira, o vulcão das Sete Cidades, Fogo e Furnas, conectados por zonas de vulcanismo fissural (Sistema vulcânico dos Picos e do Congro). Os sistemas vulcânicos com caldeira foram responsáveis pela emissão de produtos vulcânicos de composição traquítica. Tipicamente são materiais incoerentes e a espessura dos depósitos diminui à medida que aumenta a distância à fonte vulcânica. O tamanho dos clastos pode ser muito variável, desde a dimensão

da cinza à do bloco. Em cortes de taludes é frequente observar-se o aparecimento de várias sequências deste tipo de material com variação lateral e vertical. A estratificação deve-se à existência de diversas fases eruptivas. As pedra-pomes ("pumice" na literatura inglesa) têm, geralmente, na sua composição uma quantidade superior a 65% de sílica, incluindo-se por este facto, nas rochas ácidas. No entanto, embora raras, também existem pedra-pomes de composição basáltica (s.l.).

De um modo geral, este tipo de material caracteriza-se pela sua cor branca a parda ou acastanhada, pela sua elevada porosidade e permeabilidade, e ainda por apresentarem densidades inferiores à da água (o que leva a que flutuem na água).

No presente artigo, são apresentados os resultados dos ensaios de campo e de laboratório efetuados, assim como a informação existente em relatórios geotécnicos no LREC, que incidiram na caracterização da pedra-pomes. Procedeu-se ao armazenamento da informação numa base de dados construída para o efeito, de modo a que a sua consulta, exploração e análise de dados quantitativos e qualitativos seja efetuada de uma forma fácil, rápida e eficaz.

3 - ATIVIDADE DESENVOLVIDA

Os trabalhos de caracterização aos depósitos pomíticos foram executados em diferentes períodos temporais e espaciais, fruto de condicionalismos existentes e de aspetos logísticos associados à execução de ensaios de campo. Incluíram a execução de sondagens mecânicas à rotação para a realização de ensaios do tipo SPT (*Standart Penetration Test*) e de permeabilidade (do tipo Lefranc), ensaios de carga em placa, e a colheita de amostras para ensaios laboratoriais por forma a determinar-se as características físicas, mecânicas e químicas dos referidos produtos vulcânicos. A figura 1 ilustra a localização espacial dos locais onde foram realizadas as sondagens geotécnicas para a execução de ensaios SPT e de permeabilidade, os ensaios de carga com placa, e os locais de colheita de amostras para ensaios laboratoriais.

Os pontos de amostragem foram definidos em função das características litoestratigráficas dos locais e das acessibilidades, procurando fazer-se pelo menos duas recolhas representativas em cada um dos referidos maciços vulcânicos. Por vezes, a localização da colheita de amostras não foi a mesma da realização de ensaios *in situ*, fruto de condicionalismos existentes no terreno.

Para além disso, foi realizado um levantamento da informação disponível em relatórios geotécnicos no LREC, desde o início da sua atividade, sobre o material geológico em análise, por forma a definir a gama de variação das características mensuradas.

3.1 - Ensaios de campo

Os trabalhos conducentes à caracterização geotécnica *in situ* incluíram: (1) ensaios de carga com placa; (2) ensaios de penetração dinâmica - *Standart Penetration Test* (SPT); e (3) ensaios de permeabilidade pelo método de Lefranc, com carga constante.

Os ensaios de carga com placa foram efetuados de acordo com o estabelecido na norma BS 1377-9:1990 e visaram, fundamentalmente, a caracterização *in situ* da deformabilidade do solo. Nos ensaios efetuados foram aplicados dois ciclos de carga e descarga, registando-se as deformações em cada patamar de tensão. O cálculo do módulo de deformabilidade secante foi calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$E_{\text{sec}} = \frac{\pi \cdot \Delta T \cdot \phi \cdot (1 - \nu^2)}{4 \cdot \Delta d \cdot 1000} \quad [1]$$

Onde ΔT corresponde ao acréscimo de tensão, em kPa; ϕ representa o diâmetro da placa, em mm; ν o coeficiente de Poisson, admitindo-se 0,35 para agregados e 0,40 para solos; e Δd corresponde à variação de deformação, em mm, ocorrida durante o acréscimo de tensão ΔT .

Com base no valor do módulo de reação, utilizando correlações empíricas estabelecidas por Casagrande (RRL, 1952), foi determinado o valor de CBR e, a partir deste, a capacidade de carga do terreno de fundação.

No decorrer da execução de sondagens à rotação foram executados ensaios de penetração padronizados, SPT (*Standard Penetration Test*), para a obtenção de índices de resistência à penetração do solo. Para a caracterização geotécnica dos depósitos pomíticos mediante a obtenção de valores de N_{SPT} , realizaram-se 2 abordagens distintas:

- (1) A primeira consistiu na realização de ensaios SPT onde afloram depósitos piroclásticos pomíticos, com dimensões granulométricas desde as areias aos cascalhos;
- (2) A segunda consistiu na recolha da informação, análise e tratamento de dados obtidos e presentes em relatórios geotécnicos elaborados pelo LREC ao longo de mais de 30 anos de atividade.

Neste trabalho, foram aplicadas correções apenas aos ensaios realizados na primeira abordagem, estando em curso o desenvolvimento de trabalhos para a correção dos valores de N_{SPT} existentes em documentos escritos. Neste sentido, o valor de N normalizado (N_{60}) é obtido por:

$$N_{60} = \frac{E_r}{60} \cdot \lambda \cdot CN \cdot N \quad [2]$$

Onde: λ é o fator de correção em função do comprimento das varas, CN é o fator de correção da profundidade, E_r é a energia transmitida ao sistema de varas. Em função do comprimento das varas aplicaram-se os fatores de correção de 0,75, 0,85, 0,95 e 1 consoante as profundidades de ensaio respetivamente inferiores a 4 m, de 4 m a 6 m, de 6 m a 10 m e superiores a 10 m. No que respeita à energia transmitida ao sistema de varas utilizou-se uma eficiência de 60% uma vez que o sistema de disparo do equipamento é automático (Folque, 1987). Tendo em consideração que estas formações geológicas apresentam-se normalmente consolidadas, o fator de correção CN foi determinado com base nas expressões de Skempton (1986).

Complementarmente, em cada furo de sondagem e à profundidade da realização dos ensaios SPT foram efetuados ensaios de permeabilidade, recorrendo-se ao método de Lefranc. Este ensaio consistiu na injeção de água no furo de sondagem a carga constante. As leituras do volume de água consumido foram realizadas em períodos de tempos iguais de modo a permitir traçar a curva do volume injetado em função do tempo. Quando a velocidade de infiltração atingiu um regime estacionário, obteve-se o caudal correspondente, obtendo-se a condutividade hidráulica saturada de acordo com a lei de Darcy, através da seguinte expressão:

$$K_{sat} = \frac{QV}{2\pi h^2} \left[\ln \left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right) - \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{r} \right)^2}}{\frac{h}{r}} + \frac{1}{\frac{h}{r}} \right] \quad [3]$$

Em que: K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada, em cm/s; Q é o caudal em cm³/s; V é o fator de correção da viscosidade em função da temperatura; r é o raio do furo em cm; h é a altura da carga hidráulica constante, em cm.

No total foram efetuados 14 ensaios de permeabilidade, desde os 1,5 m aos 4, 5 m de profundidade. Em alguns casos não foi possível determinar a permeabilidade do maciço, uma vez que esta grandeza era superior à injeção de água no furo de sondagem. Durante a realização dos furos de sondagem para a execução dos ensaios não foi detetado nenhum nível de água, sendo efetuado na região não saturada do solo.

3.2 - Ensaios de laboratório

Os ensaios de laboratório consistiram em: (1) ensaios de identificação (caracterização das propriedades geométricas) como análises granulométricas, ensaios para determinar a forma das partículas – índice de achatamento e de forma, o equivalente de areia e o azul de metileno; (2) ensaios para determinar as propriedades físicas como a massa volúmica, o teor de água e a absorção de água, e propriedades mecânicas como a resistência ao desgaste – método micro-Deval, a resistência à fragmentação – método de Los Angeles, o ensaio de compactação e o *California Bearing Ratio* (CBR); e (3) ensaios químicos, realizados com base em algumas secções da EN 1744-1-2009. No quadro 1 apresentam-se os ensaios efetuados, bem como os respetivos métodos.

Quadro 1- Ensaios de laboratório efetuados.

Ensaios de Laboratório	Tipologia	Norma
Ensaios de identificação e propriedades geométricas	Análise granulometria	NP EN 933-1: 2000 \ EN 933-1:1997/A1:2005
	Índice de Achatamento e de forma	NP EN 933-3: 2002; NP EN 933-4: 2002
	Equivalente de areia	NP EN 933-8: 2002
	Azul Metileno	NP EN 933-9: 2002
	Massa Volúmica	NP EN 1097-6:2003 \ NP EN 1097-6:2003/A1:2010; EN 1097-7:2010
Propriedades físicas	Teor de água	NP 84 (1965)
	Absorção de água	NP EN 1097-6
	Resistência ao desgaste – método micro-Deval	NP EN 1097-1: 2002
Propriedades mecânicas	Resistência à fragmentação – método de Los Angeles,	EN 1097-2: 2010,
	Ensaio de compactação	LNEC E 197 (1966)
	<i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	LNEC E 198 (1967)

Importa referir que os ensaios de compactação foram realizados segundo a tipologia de Compactação Pesada em Molde Grande. O valor de CBR foi avaliado para 95% da baridade seca máxima, tendo-se determinado a expansibilidade dos provetes.

Para além dos referidos ensaios, foi efetuado um processo de consulta bibliográfica existente no acervo documental do LREC e em trabalhos realizados sobre as características mecânicas (e.g. Amaral, 2010) de depósitos pomíticos, permitindo balizar parâmetros de resistência ao corte para este tipo de materiais.

Os ensaios efetuados para a determinação das propriedades químicas das amostras efetuados no âmbito deste trabalho, foram realizados com base em diferentes secções da norma EN 1744-1:2009 e consistiram nas seguintes determinações: (1) sais de cloreto solúveis em água pelo método de Volhard (método de referência) - Secção 7; (2) sulfatos solúveis em água - Secção 10; (3) enxofre total por acidificação (método de referência) - Secção 11.1; (4) sulfatos solúveis em ácido - Secção 12; (5) teor em húmus - Secção 15.1; (6) Solubilidade em água, excluindo o filer - Secção 16.1; e (7) perda ao fogo - Secção 17.

Tendo como principal objetivo a caracterização química dos agregados leves, a escolha dos ensaios realizados no LREC teve como limitação o número de ensaios implementados/disponíveis neste laboratório, e não as exigências das normas de produto para agregados leves (EN 13055-1 e EN 13055-2).

Os teores químicos para agregados leves foram corrigidos antes de serem comparados com um determinado valor limite, de modo a considerar-se o baixo valor da baridade do agregado leve. Assim, para comparar os teores químicos de agregados leves determinados de acordo com a norma EN 1744-1, com valores limite, os teores químicos devem ser corrigidos de acordo com a equação [4].

$$V_c = V \cdot \frac{\rho}{1500} \quad [4]$$

Onde: V_c representa o valor comparativo do teor químico (%); o V corresponde ao valor do teor químico, determinado de acordo com a EN 1744-1 (%); ρ representa a baridade do agregado leve, em kg/m^3 (determinada de acordo com a EN 1097-3); e 1500 corresponde à baridade de um agregado de peso normal, em kg/m^3 .

4 - RESULTADOS OBTIDOS

4.1 - Dados de laboratório

4.1.1 - Ensaio de identificação e de caracterização geométrica

A figura 2 apresenta as curvas cumulativas da análise granulométrica dos materiais colhidos em cada maciço vulcânico, enquanto o quadro 2 ilustra um resumo das características texturais e dos parâmetros extraídos da curva granulométrica, como o coeficiente de curvatura (C_c) e de uniformidade (C_u).

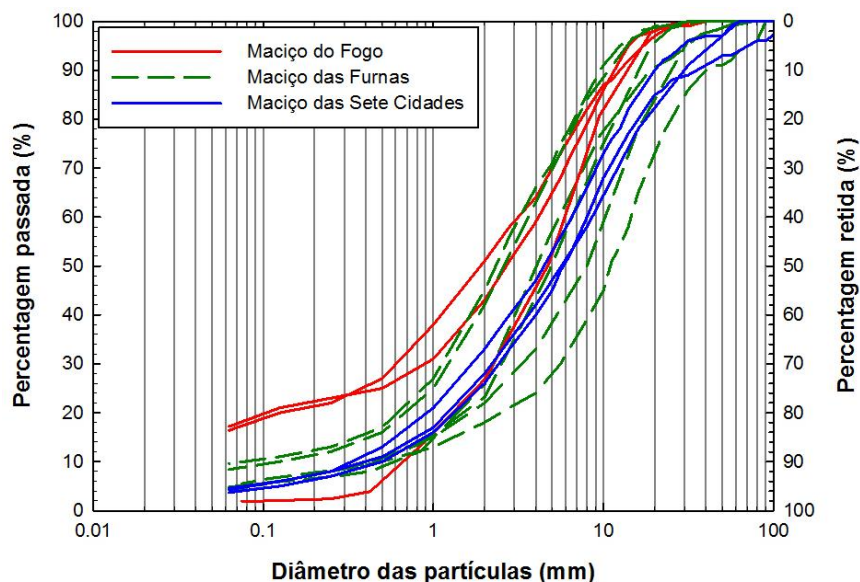


Figura 2 – Curvas granulométricas dos materiais analisados para cada maciço vulcânico.

Os resultados obtidos para esta formação geológica denotam uma grande variabilidade de partículas, com um grande predomínio do cascalho (média de 44%, um mínimo e máximo de 2,4% e 68%, respetivamente). A fração de areia apresentou valores a oscilar entre os 23% e os 80%, com uma média de 48%, enquanto a fração fina manifestou um somatório médio de 8%, com um mínimo de 2% e um máximo de 18%, refletindo a baixa representatividade das frações mais finas.

Em termos de maciços vulcânicos, constatou-se que as amostras colhidas nas Sete Cidades foram as que de forma consistente apresentaram menor quantidade de finos, com um valor médio de 4,5 %. Nas amostras pertencentes ao maciço do Fogo, observou-se o inverso tendo-se encontrado as maiores percentagem de finos do estudo, com uma média de 17,5%.

O coeficiente de curvatura (C_c) variou entre os 1,3 e os 4,9 e o coeficiente de uniformidade (C_u) entre 9 e os 40. As características texturais descritas correspondem a solos com as abreviaturas do tipo GW – Areia bem graduada, SW – Cascalho bem graduado com areia e cascalho, SP-SM – Areia mal graduada com silte e cascalho, GP – Cascalho mal graduado e GW-GM – Cascalho bem graduado com silte e areia, de acordo com a Classificação Unificada Revista de Solos, demonstrando que são solos muito heterogêneos devido à estratificação granulométrica que apresentam face a alternâncias de dinâmicas eruptivas aquando da deposição subaérea.

Relativamente à forma das partículas, a fração de cascalho ($D > 4$ mm) destes materiais é maioritariamente constituída por partículas cúbicas; disso deram conta os resultados dos ensaios para avaliação do índice de achatamento e do índice de forma, respetivamente segundo as normas NP EN 933-3 e NP EN 933-4, cujos resultados se situam entre 2 e 4, no primeiro, e entre 1 e 4 no último.

Relativamente à fração fina destes materiais ($D \leq 2$ mm), efetuaram-se ensaios de equivalente de areia e de azul de metileno. Verificou-se uma grande amplitude de resultados no ensaio de equivalente de areia, tendo-se obtido uma gama de valores compreendida entre 35% e 86%. Em termos do ensaio de azul de metileno, os resultados foram baixos como seria previsível, tendo-se obtido em todas as amostras valores inferiores a 1,2 g/kg, com exceção da amostra do Salto do Cavalo (Furnas – 28753) na qual se obteve um valor de 3,4 g/kg.

Quadro 2- Resultados dos ensaios de identificação das amostras de pedra-pomes.

Refª. Amostra	D _{Max.} (mm)	Granulometria (% passada)			Parâmetros Curva Granul.		Limites de Consistência		Classificação Unificada Revista
		≤ 75	≤ 4,75	≤ 0,075	Cu	Cc	LP	LL	
Fogo 28734	40	100	68,5	17,1	-	-	NP	NP	SM - Areia siltosa com cascalho
Fogo 28735	31,5	100	63,5	17,9	-	-	NP	NP	SM - Areia siltosa com cascalho
Fogo 22044	37,5	100	50,3	1,9	9,0	1,3	NP	NP	GW - Cascalho bem graduado com areia
Furnas 28566	75	100	55,6	4,8	9,3	1,6	NP	NP	SW - Areia bem graduada com cascalho
Furnas 28567	37,5	100	48,6	5,5	14,8	2,2	NP	NP	GW-GM - Cascalho bem graduado com silte e areia
Furnas 28752	90	95,4	27	4,5	29,1	4,3	NP	NP	GP - Cascalho mal graduado com areia
Furnas 31545	63	100	36,2	5,03	25,6	2,7	NP	NP	GW-GM - Cascalho bem graduado com silte e areia
Furnas 28753	31,5	100	69,8	9,9	40,4	4,9	NP	NP	SP-SM - Areia mal graduada com silte e cascalho
Furnas 31546	31,5	100	66,9	8,7	29,0	3,3	NP	NP	SP-SM - Areia mal graduada com silte e cascalho
Sete Cidades 28785	125	100	45,9	4,1	16,1	1,6	NP	NP	GW - Cascalho bem graduado com areia e calhaus
Sete Cidades 28785(2)	63	100	45	4,9	21,4	1,4	NP	NP	GW - Cascalho bem graduado com areia e calhaus
Sete Cidades 28786	63	100	51,5	4,6	19,8	1,3	NP	NP	GW - Cascalho bem graduado com areia

Representando estes valores num mesmo gráfico (Fig. 3) e definindo os limites estabelecidos pelo Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para a utilização de solos e de agregados na estrutura de pavimentos, verifica-se que o resultado obtido para a amostra do Salto do Cavalo (Furnas- 28753) não permite a sua utilização na estrutura de pavimentos.

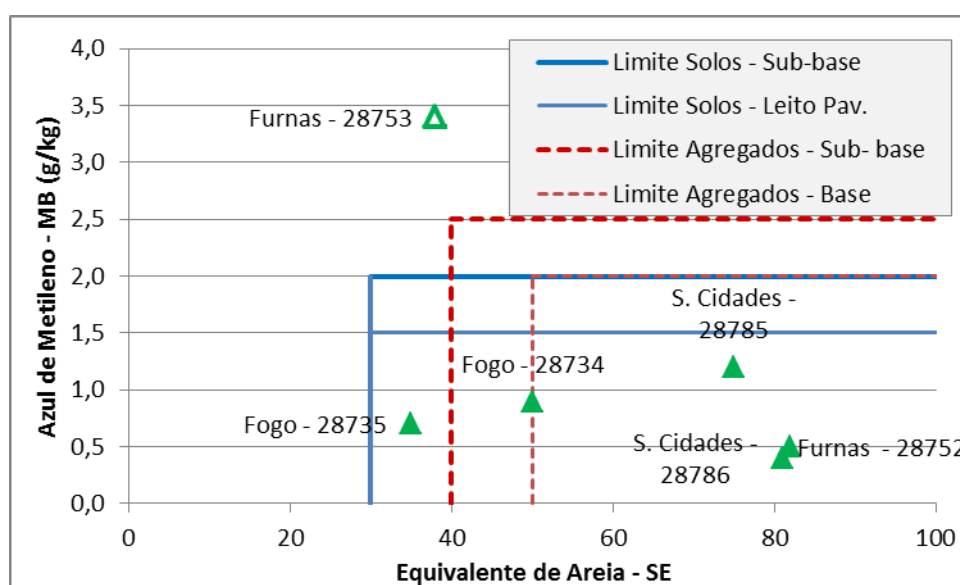


Figura 3 – Representação dos resultados do ensaio de azul de metileno e do equivalente de areia.

Representando agora apenas os resultados do equivalente de areia em função da percentagem de material inferior a 75 µm na fração de ensaio (Fig. 4), constata-se que estes valores se encontram bem correlacionados, excetuando a amostra do Salto do Cavalo (Furnas 28753). Estes valores permitem assim admitir que os resultados do ensaio de equivalente de areia que fiquem abaixo da reta deverão possuir uma maior fração de finos, o que é comprovado pelos valores elevados obtidos no ensaio de azul de metileno.

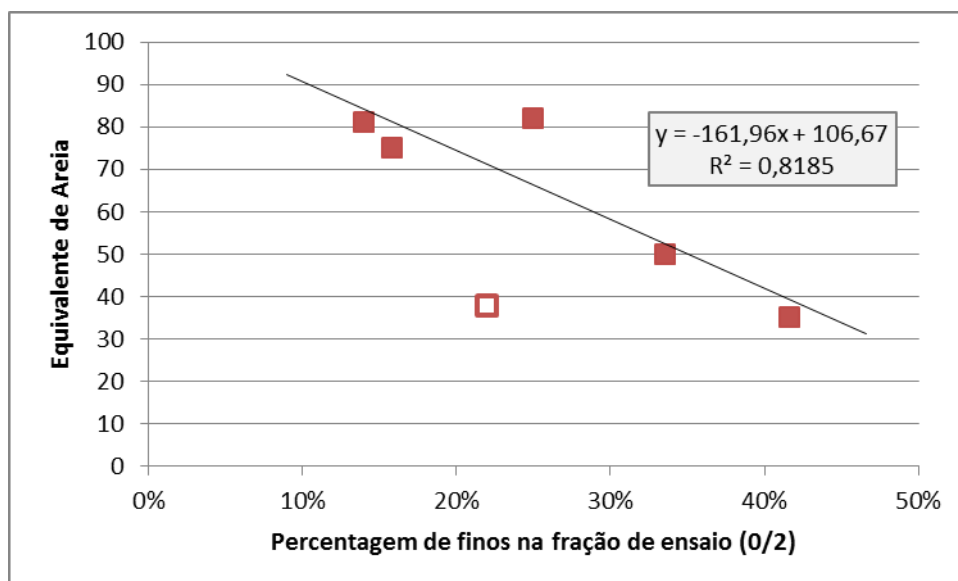


Figura 4 – Dependência do resultado do ensaio de equivalente de areia no valor da percentagem de material presente na fração de ensaio (0/2). O símbolo sem preenchimento corresponde à amostra do maciço das furnas (28753).

4.1.2 - Ensaio físicos e mecânicos

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas são apresentados no quadro 3 e no quadro 4, sendo que no primeiro se exibem os dados relativos aos ensaios de micro-Deval, Los Angeles e da baridade, enquanto no segundo são apresentados os dados referentes à massa volúmica das partículas secas em estufa e à absorção de água em 24 horas.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas das amostras de pedra-pomes ensaiadas.

Ref.ªAmostra	Micro-Deval	Los Angeles	Baridade	
			ρ_0 (Mg/m³)	v (%)
Fogo 28734	21	40	0,634	46,7
Fogo 28735	20	35	0,593	44,5
Furnas 28752	20	-	-	-
Furnas 31545	-	39	0,450	39,0
Furnas 28753	32	38	-	-
Furnas 31546	-	-	0,691	48,0
Sete Cidades 28785	47	43	-	-
Sete Cidades 28786	33	35	-	-

Constata-se, em termos do ensaio de resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles, que o comportamento de todas as pedra-pomes ensaiadas é semelhante, com valores compreendidos entre 35

e 43, pertencendo o resultado mais elevado à amostra colhida na Vista do Rei (Sete Cidades – 28785).

Em termos de resistência ao desgaste segundo o ensaio de micro-Deval observa-se uma maior variedade de resultados, podendo dividir-se em dois grupos: o primeiro com valores compreendidos entre 20 e 21, e o segundo com valores situados entre 32 e 47. Enquanto no primeiro grupo os valores são cerca de metade do valor obtido no ensaio de Los Angeles, no segundo grupo os resultados são muito idênticos aos obtidos no ensaio de Los Angeles.

No primeiro grupo incluem-se as amostras pertencentes ao maciço do Fogo e a uma amostra das Furnas. No segundo grupo incluem-se as amostras do maciço vulcânico das Sete Cidades e à amostra do Salto do Cavalo, pertencente ao maciço das Furnas.

No que concerne aos valores da baridade obtiveram-se valores numa gama entre os 450 kg/m³ e os 700 kg/m³, tendo-se encontrado valores do volume de vazios compreendidos entre 39% e 48%. Os resultados obtidos estão representados na figura 5, tendo-se acrescentado a estes, os valores da massa volúmica das partículas secas em estufa, determinados para cada amostra, com base nos quais se calcularam os valores do volume de vazios.

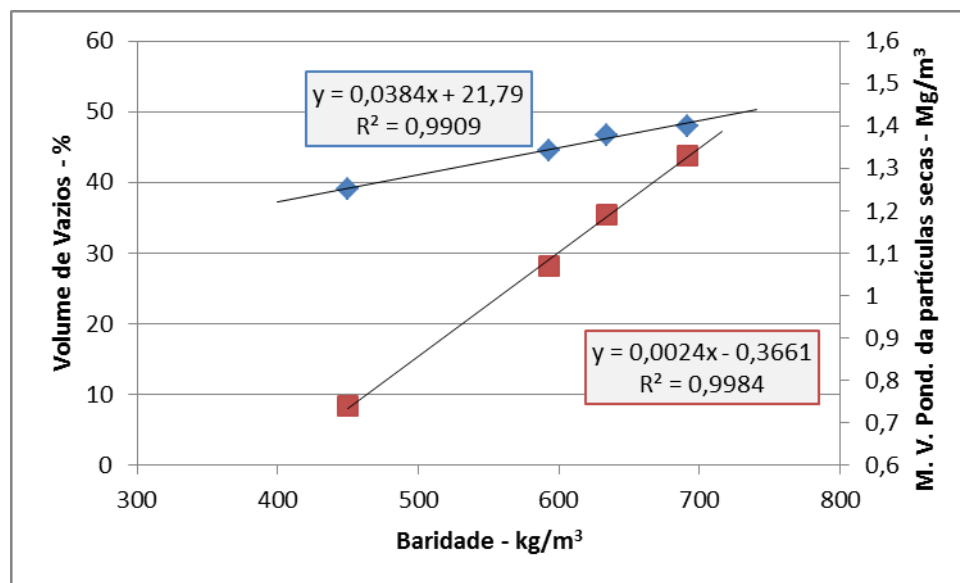


Figura 5 – Representação dos resultados do ensaio de determinação da baridade e do volume de vazios, segundo a NP EN 1097-3. Relação entre a baridade e a massa volúmica das partículas secas em estufa determinadas segundo a NP EN 1097-6 e EN 1097-7.

Da observação destes resultados ressalta a proporcionalidade encontrada entre o valor da baridade e o volume de vazios do material, verificando-se que quanto maior a baridade, maior é o volume de vazios encontrado. Mais expectável é a relação observada entre a baridade e a massa volúmica das partículas secas em estufa, verificando-se o incremento da baridade com o aumento da massa volúmica das partículas. Deste modo, resulta que o volume de vazios do provete aumenta com a massa volúmica das partículas, configurando, no entanto, que aquele tende para um limite não superior a 55%.

Da observação dos resultados da determinação da massa volúmica e da absorção de água (Quadro 4) verifica-se que em termos de média ponderada os valores da massa volúmica das partículas secas variam do simples para o dobro com valores entre 0,74 Mg/m³ e 1,55 Mg/m³; em termos da absorção de água essa variação vai de 14,2% a 36,6%.

Observando os dados por frações (Quadro 5) constata-se que, em termos gerais, quanto maior é dimensão das partículas menor é a massa volúmica, verificando-se que a amplitude dos valores das massas volúmicas das frações tende a crescer à medida que a dimensão das frações aumenta. Em termos de absorção de água, as tendências são semelhantes com a diferença de que a magnitude dos valores evoluir de forma inversa, isto é, quando a massa volúmica aumenta a absorção diminui.

Para além dessas variações genéricas, verifica-se que a massa volúmica das partículas no maciço vulcânico das Sete Cidades e na zona do Salto do Cavalo (Furnas 28753) (Fig. 6) são superiores. Este facto é justificado pela presença de uma maior concentração de elementos líticos de natureza basáltica (s.l.) no depósito.

Quadro 4 – Resultados do ensaio de determinação da massa volúmica e da absorção de água.

Amostra	Massa Volúmica das Partículas secas em estufa (Mg/m ³)				
	Absorção de água (%)				
	Média Ponderada	≤ 0,063 mm	] 0,063 – 4] mm	] 4 – 63] mm	≥ 63 mm
Fogo 28734	1,19	2,45	1,89	0,69	-
	19,9%	0% *	6,4%	46,7%	-
Fogo 28735	1,07	2,41	1,63	0,68	-
	22,9%	0% *	8,7%	47,0%	-
Fogo 22044	0,93	1,74 **		0,63 ***	
	36,6%	11,9% **		61,6% ***	
Furnas 28752	0,74	2,44	1,66	0,64	0,51
	39,0%	0% *	8,7%	47,6%	66,5%
Furnas 28753	1,33	2,48	1,92	0,81	-
	18,4%	0% *	6,5%	43,3%	
Sete Cidades 28785	1,07	2,44	1,99	0,79	1,07
	34,7%	0% *	8,6%	55,1%	30,1%
Sete Cidades 28786	1,55	2,50	2,03	1,27	-
	14,2%	0% *	7,6 %	20,6 %	-

* Valor admitido para a absorção de água das partículas inferiores a 0,063 mm para se poder calcular o valor da média ponderada.

** Valores obtidos do ensaio segundo a norma NP 954 para a fração ≤ 4,75 mm

*** Valores obtidos do ensaio segundo a norma NP 851 para a fração > 4,75 mm

Quadro 5 – Gama de valores por fração granulométrica da massa volúmica das partículas secas e de absorção de água.

	Mg/m ³	%
≤ 0,063 mm	2,41 a 2,50	0
] 0,063 - 4] mm	1,63 a 2,03	6,4 a 8,7
] 4 - 63] mm	0,63 a 1,27	20,6 a 61,6
> 63 mm	0,51 a 1,07	30,1 a 66,5

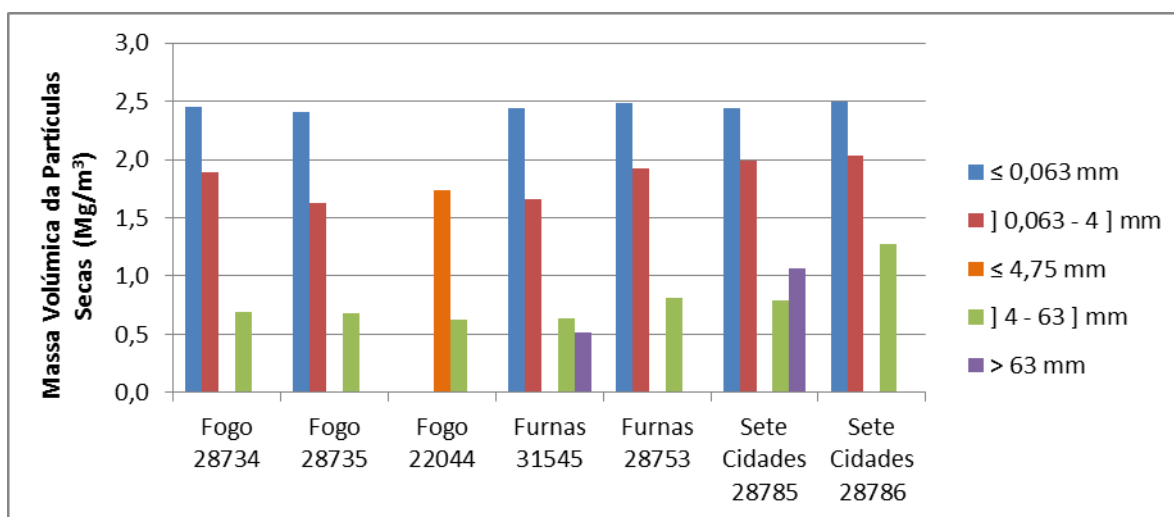


Figura 6 – Valores da massa volúmica das partículas secas em estufa por fração.

Na figura 7 apresenta-se a relação encontrada entre a massa volúmica das partículas secas e a absorção em água.

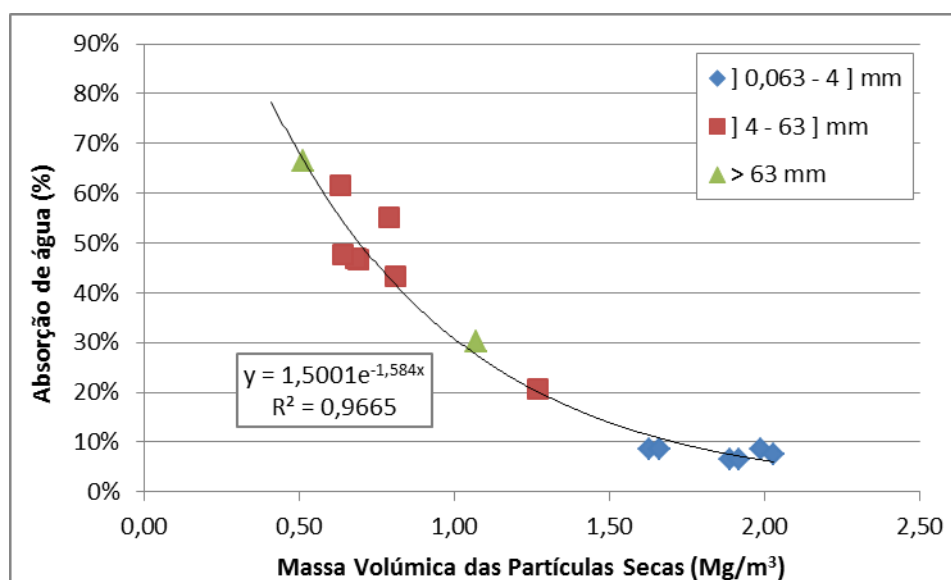


Figura 7 – Relação entre a massa volúmica das partículas secas e a absorção em água, por fração.

Os resultados dos parâmetros de compactação obtidos pelo ensaio do tipo Proctor são apresentados no quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros de compactação obtidos pelo ensaio do tipo Proctor para a pedra-pomes.

Amostra	Teor em Água Natural	Compactação		CBR	
		$\gamma_{d,max, PM}$	$W_{opt, PM}$	95% $\gamma_{d,max, PM}$	Expansão
Fogo 28734	51,5	0,93	15%	13	0,03%
Fogo 28735	60,5	0,91	27%	43	0,02%
Fogo 22044	76,7	0,80	28%	21	0,00%
		0,83	48%	-	-
Furnas 28752	78,1	-	-	-	-
Furnas 31545	-	0,75	42%	51	0,01%
Furnas 28753	42,1	1,15	13%	48	0,00%
Furnas 31546	-	1,24	27,4%	74	0,01%
Furnas 28785	55,1	1,10	16%	-	-
Sete Cidades 28785(2)	-	1,06	17%	23	0,00%
Sete Cidades 28786	22,8	1,20	15%	32	0,04%

Estes depósitos apresentam-se normalmente com elevados teores em água. O peso específico seco para o teor em água ótimo apresentou valores a oscilar entre os 1,24 e os 0,75 g/cm³, o que revela que *in situ* possam apresentar valores muito baixos, alcançando mesmo os 0,5 g/cm³ (Amaral, 2010). Estas características, conjuntamente com a presença de porosidades elevadas, atingindo valores muito próximos dos 80%, e índices de vazios que podem alcançar os 4, conferem a estes materiais singularidades a ter em consideração no planeamento e ordenamento do território, com implicações ao nível da construção civil.

Nestes ensaios constatou-se que estes materiais são relativamente insensíveis à água verificando-se nalguns casos que para variações de teor em água de 20% a baridade seca se mantém praticamente inalterada. Contrapondo os resultados obtidos com as respetivas curvas de saturação constata-se que

muitos dos pontos estão afastados daquela curva, pelo que se supõe que haja outro par de pontos com um teor em água mais elevado.

Em termos de valores de CBR, verifica-se que nestes materiais é possível alcançar excelentes resultados, estando toda a gama de valores compreendida entre 13 e 74. Apesar dos bons resultados, a maior parte destes materiais *in situ* encontram-se com teores em água muito acima dos respetivos teores ótimos. Em termos de maciços (Fig. 8) verifica-se que os melhores resultados do ensaio de CBR foram obtidos nas amostras do maciço vulcânico das Furnas.

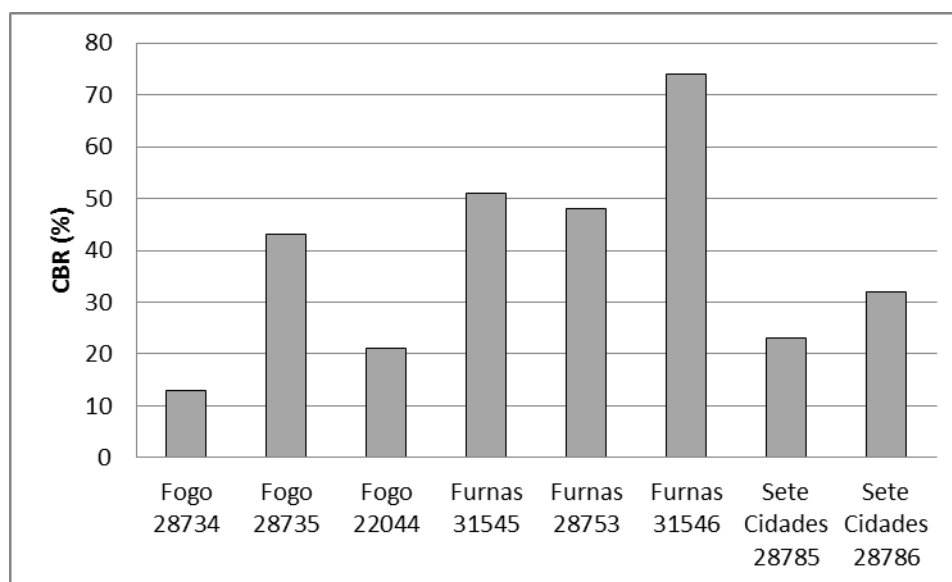


Figura 8 – Resultados do ensaio de CBR.

No que respeita a parâmetros de resistência ao corte, Amaral (2010) obteve duas famílias distintas no que se refere ao ângulo de atrito interno efetivo, ϕ' , para diferentes litologias (e.g. cinzas e cascalhos pomíticos, escoadas lávicas completamente alteradas, depósitos de vertente e paleosolos) por meio de ensaios de corte direto do tipo consolidado, drenado (CD), com velocidade de corte de 0,016 mm/min., e por ensaios de compressão triaxial, na condição de consolidado, drenado (CID). A separação das duas famílias foi suportada pelos parâmetros físicos analisados (e.g. pesos volúmicos secos, índice de vazios) e índices granulométricos (e.g. média gráfica). A família A apresentou valores entre 30° e 35° e a família B, valores entre 35° e 43°. Relativamente à coesão efetiva, c' , a família A variou entre 0 e 9 kPa, enquanto a família B apresentou valores nulos. Pela análise global dos resultados, os valores de ϕ' apresentaram uma média de 35° ($\pm 3^\circ$). Os cascalhos e as areias de natureza pomítica enquadram-se na família B.

Dados obtidos em relatórios geotécnicos realizados pelo LREC, por intermédio de ensaios de corte direto, na condição de consolidado, drenado, e por análise inversa, forneceram um quadro de valores semelhantes aos obtidos por Amaral (2010), com uma média de 35° (máximo de 40° e um mínimo de 26°) em termos de ângulos de atrito interno efetivos. No que toca à coesão efetiva, c' , os solos pomíticos apresentam um quantitativo médio de 10 kPa, com um máximo de 25 kPa. A diferença existente nos valores de coesão obtidos nos ensaios realizados pelo LREC e Amaral (2010) resultou da existência de um maior número de solos pomíticos alterados nas amostras ensaiadas pelo LREC.

4.1.3 - Ensaio químicos

Na figura 9 apresentam-se os resultados dos ensaios obtidos para as amostras de pedra-pomes. Tal como se pode verificar pela análise da referida figura, a variação das propriedades químicas dos agregados leves em função do maciço vulcânico é um pouco aleatória. No entanto, é possível constatar que, de um modo geral, os valores mais elevados foram determinados para as amostras provenientes do maciço vulcânico das Furnas, em especial para o teor total de enxofre (S). Este facto pode ser explicado pelas descargas fumarólicas existentes no maciço vulcânico das Furnas, que contribuem para a libertação concentrada e/ou difusa de enxofre associado a outros elementos existentes (e.g. sulfito de hidrogénio).

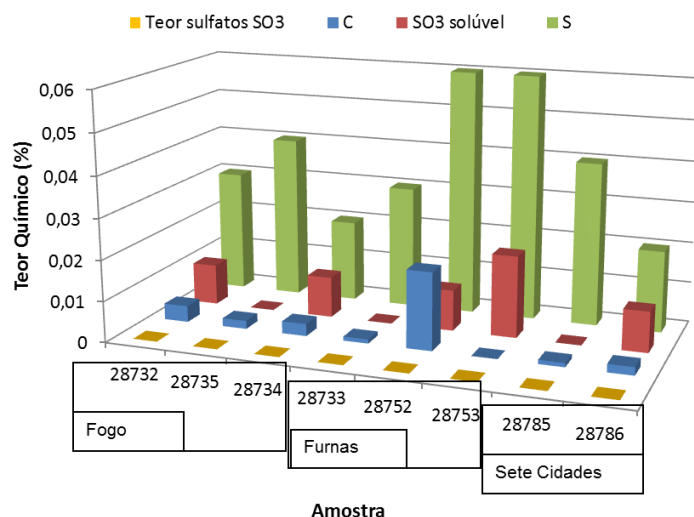


Figura 9 – Teores químicos determinados de acordo com a norma EN 1744-1:2009 para as amostras de agregado leve. As amostras estão agrupadas por maciço vulcânico. Teor sulfatos SO₃ – Sulfatos solúveis em ácido; C – Sais de cloretos; SO₃ solúvel – Sulfatos solúveis em água; S – Enxofre total.

A solubilidade em água (Ws) e a perda ao fogo (PF) (Fig. 10) apresenta uma correlação positiva de 88 %, sendo a segunda estimada indiretamente pela seguinte expressão:

$$PF(%) = 0,5137Ws + 1,7884 \quad [5]$$

Onde PF é a perda ao fogo e Ws a solubilidade em água.

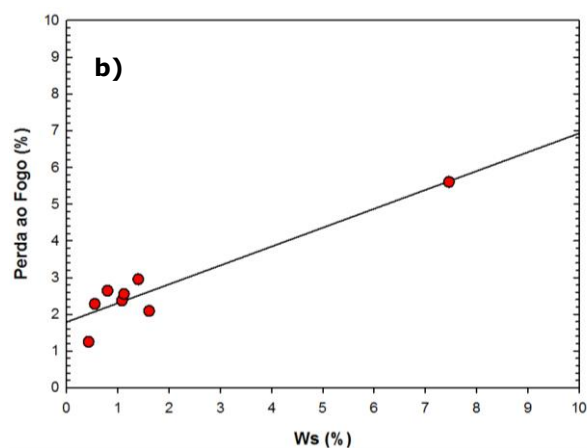
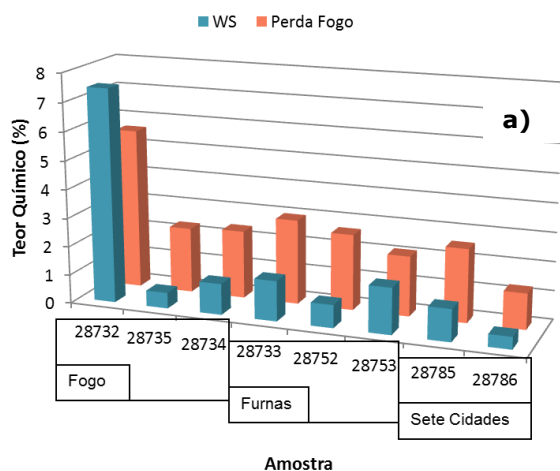


Figura 10 – a) Teores químicos determinados de acordo com a norma EN 1744-1:2009 para as amostras de agregado leve. As amostras estão agrupadas por maciço vulcânico. WS – Solubilidade em água; e b) Regressão linear simples para a perda de fogo e a solubilidade em água.

No que concerne ao ensaio da determinação da presença potencial de húmus, de acordo com a secção 15.1 da norma EN 1744-1:2009, cuja execução prática consiste na comparação de cor da solução da amostra ensaiada com uma cor padrão, os ensaios realizados forneceram resultados negativos.

4.2 - Dados de campo

4.2.1 - Ensaio de carga com placa

Foram efetuados ensaios de carga com placa em dois locais do maciço vulcânico do Fogo e das Furnas. Os resultados destes ensaios encontram-se resumidos no Quadro 7.

Num dos ensaios realizados no maciço vulcânico do Fogo, com a referência 28732, devido às elevadas deformações diferenciais que se registaram no primeiro ciclo de carga, foi necessário efetuar descargas em patamares intermédios da trajetória de carga, de modo a permitir reposicionar os comparadores. Esta situação impediu a determinação dos módulos de deformabilidade secante para o primeiro ciclo de carga.

Quadro 7- Resultados dos ensaios de carga com placa efetuados em pedra-pomes.

Amostra	Teor de água	Módulo de deformabilidade				Correlações	
		1º Ciclo (MS1- Traj.Carga)	2º Ciclo (MS2- Traj.Carga)	2º Ciclo (traj.Desc.)	MS2/MS1 (traj.Carga)	CBR	Cap. Carga (kPa)
Fogo	60,4	-	-	25,8	-	1,2	38,7
28734	61,7	34	47,1	52,4	1,4	10,4	139,6
Furnas	-	16,7	58,9	71,7	3,5	1,7	45,3
32048	-	22	39,2	42	1,8	2,3	52,2

De um modo geral, tanto no 1º ciclo como no 2º ciclo de carga, os valores obtidos para os módulos de deformabilidade foram baixos, fornecendo maioritariamente capacidades de carga manifestamente precárias. Os valores de CBR e da capacidade de carga obtidos por correlação denotam um comportamento relativamente modesto para estes materiais *in situ*, particularmente quando comparados com os valores de CBR obtidos em laboratório.

Esta situação explica-se facilmente com a reduzida compacidade com que estes materiais se apresentam na natureza. A título de exemplo refere-se a amostra do maciço das Furnas, na qual foi determinada a baridade seca pelo da garrafa de areia, tendo-se obtido um quantitativo de 780 kg/m³, valor que é similar ao determinado no ensaio para determinação da baridade e do volume de vazios em laboratório, o qual foi apenas 10% inferior (691 kg/m³).

4.2.2 - Standard Penetration Test (SPT)

Os valores de N_{SPT} obtidos pelos ensaios de campo realizados nos maciços vulcânicos das Furnas, Fogo e Sete Cidades apontaram para uma média de 15 (± 8) pancadas. A correção efetuada aos resultados dos quantitativos de N_{SPT} , tendo em conta o comprimento das varas, a energia transmitida às varas (assumindo um fator de correção de 1) e a tensão efetiva de recobrimento (CN), aponta para um quadro de valores superiores para a resistência à penetração quando aplicada, apresentando uma média de 19 (± 10) pancadas com correção $N_{(60)}$. A figura 11 apresenta, em forma gráfica, os principais parâmetros estatísticos da referida comparação.

Quando analisados os resultados no seu conjunto, tanto os obtidos pelos ensaios realizados nos três maciços vulcânicos como os provenientes do levantamento documental, no cômputo geral, os valores de N_{SPT} apresentaram um quantitativo médio de 10,1 (± 7 pancadas), com um mínimo de 2 e um máximo de 45 pancadas. Os valores mais elevados têm de ser analisados com cautela, uma vez que podem não expressar a compacidade do terreno, mas sim o aparecimento de fragmentos líticos inseridos na matriz do nível de pedra-pomes, por vezes com diâmetros superiores ao da boquilha do amostrador normalizado, o que cria atrito levando, deste modo, ao incremento dos valores obtidos.

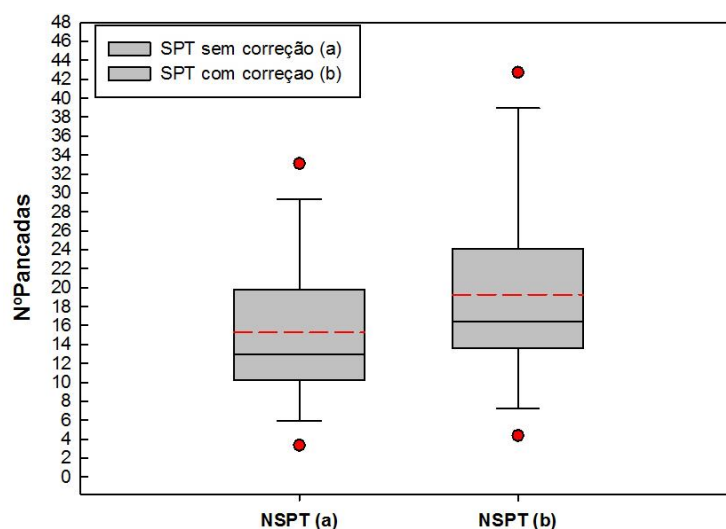


Figura 11 – Caixa de bigodes da distribuição do número de pancadas com e sem correção.

No global, os valores de N_{SPT} apresentaram uma grande dispersão relativamente ao número de pancadas, não sendo possível definir um padrão sistemático em função da profundidade. Na figura 12 apresenta-se um histograma de frequências absolutas apoiado pelas frequências relativas e acumuladas dos valores de N_{SPT} .

A dispersão encontrada aponta para a existência de heterogeneidades texturais que estes depósitos patenteiam, fruto da dinâmica eruptiva aquando da sua deposição (e.g. alternâncias de explosividade devidas à interação água/magma, etc.), constituídos por uma matriz essencialmente de cascalho e areia, de material juvenil (pedra-pomes), conjuntamente com o material lítico (fragmentos basálticos, *s.l.*) da mesma dimensão granulométrica.

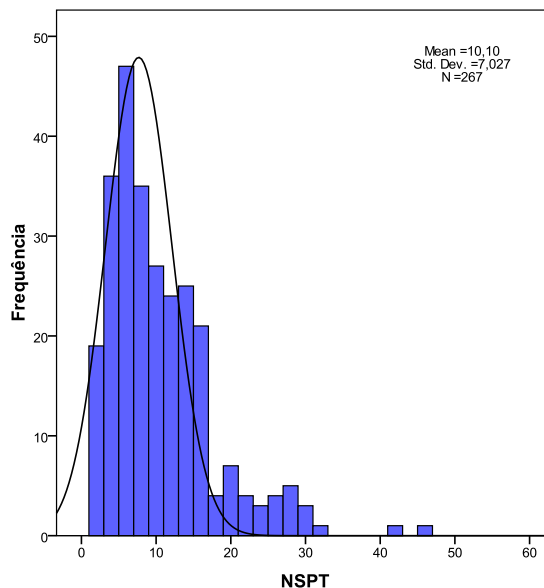


Figura 12 – Histograma de frequências absolutas dos valores de N_{SPT} .

Quadro 8 - Tabelas de frequência relativas e acumuladas para intervalos de valores.

Classes	Nº	Freq. Rel. (%)	Cumulativo (%)
0-10	164	61,4	61,4
10-20	81	30,3	91,8
20-30	19	7,1	98,9
30-40	1	0,4	99,3
40-50	2	0,7	100,0
>50	0	0	

Da análise do quadro 8, num total de 267 ensaios sobre depósitos piroclásticos pomíticos, verifica-se que 92% dos valores de N_{SPT} são inferiores a 20 pancadas e apenas cerca de 8% apresentam valores compreendidos entre as 20 e as 50 pancadas, não se tendo verificado um número de pancadas superiores a 50. Quando os valores de N_{SPT} são analisados em função da compactidade (Terzaghi & Peck, 1967), verifica-se que cerca de 61% dos casos apresentam-se como areias soltas a muita soltas e 38% como areias medianamente compactas (Quadro 9).

Quadro 9- Tabelas de frequências relativas e cumulativas em função das classes de valores que expressam o grau de compactidade de solos arenosos.

Classes	Grau de compactidade	Nº	Freq. Rel. (%)	Cumulativo (%)
<4	Muito solta	55	20,6	20,6
4-10	Solta	109	40,8	61,4
10-30	Medianamente compacta	100	37,5	98,9
30-50	Compacta	3	1,1	100,0
>50	Muito compacta	0	0	

São várias as correlações empregues para obter parâmetros mecânicos a partir dos dados de N_{SPT} . No entanto, essas correlações são apenas válidas para as regiões geológicas análogas nas quais foram obtidas, não devendo, por isso, serem extrapoladas para outros domínios, em particular o vulcânico, em virtude das especificidades que os seus produtos apresentam.

Com base na informação obtida por Amaral (2010), na apresentada neste trabalho e na publicada por Malheiro e Nunes (2007), que apresentaram valores característicos do número de pancadas para diferentes litologias, foram relacionados os valores N_{SPT} com os ângulos de atrito efetivos obtidos por Amaral (2010), obtendo-se a função apresentada na expressão 6 (Fig. 13).

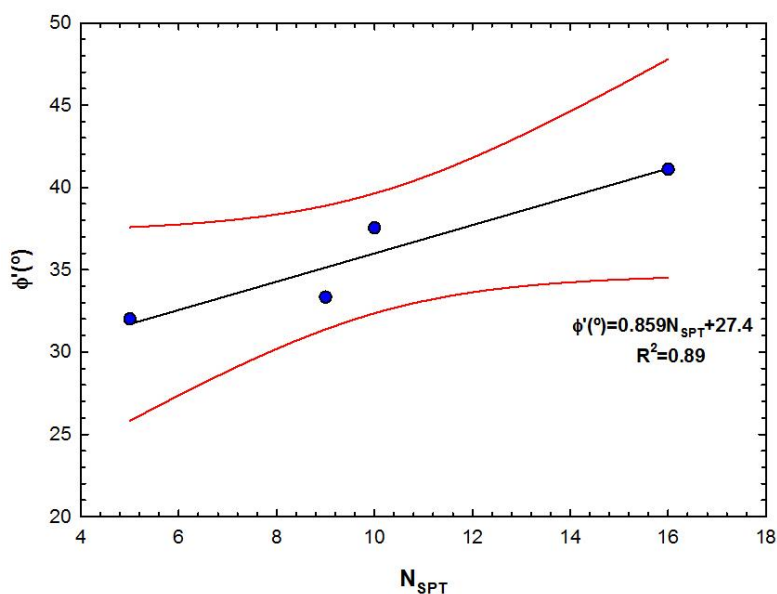


Figura 13 – Regressão linear simples obtida para o ângulo de atrito e o valor de N_{SPT} . A linha vermelha representa o intervalo de confiança de 95%, pese embora a reduzida representatividade dos valores experimentais.

A partir da relação e da análise de regressão, a equação empírica para estimar o ϕ' para areias e siltes pomíticos pode ser escrita da seguinte forma:

$$\phi' = 0,859 N_{SPT} + 27,4 \quad [6]$$

onde ϕ' corresponde ao ângulo de atrito interno, em graus. Pese embora a baixa representatividade estatística face ao número reduzido de amostras, os resultados apontam para uma relação do ângulo de atrito interno com o número de pancadas N_{SPT} . A expressão (6) apresenta um coeficiente de correlação (R^2) de 0,89, significando uma boa correlação entre o número de N_{SPT} e os parâmetros de resistência ao corte, em particular a componente friccional.

4.2.3 - Ensaio de permeabilidade

O valor médio da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) apresenta-se, no geral, elevado, com uma magnitude de $8,4E^{-04}$ ($\pm 0,002$, para 1σ), um máximo e um mínimo de $9,20E^{-03}$ e $1,20E^{-06}$ (m/s), respetivamente.

No Quadro 10 apresentam-se os principais parâmetros estatísticos referentes à condutividade hidráulica em função dos locais geográficos onde foram realizados os ensaios.

Quadro 10- Resumo da estatística descritiva dos dados obtidos para a condutividade hidráulica saturada, por maciço vulcânico e no global.

Estatística descritiva	Furnas	Fogo	Sete Cidades	Total
Média	$2,18E^{-03}$	$2,08E^{-04}$	$2,96E^{-06}$	$8,38E^{-04}$
Desvio Padrão	$3,9E^{-03}$	$3,2E^{-03}$	$1,76E^{-06}$	$2,4E^{-037}$
Coef. Variação	183	156	60	292
Mínimo	$1,20E^{-06}$	$3,70E^{-06}$	$1,87E^{-06}$	$1,20E^{-06}$
Máximo	$9,20E^{-03}$	$6,90E^{-04}$	$6,10E^{-06}$	$9,20E^{-03}$
Mediana	$7,20E^{-05}$	$6,90E^{-05}$	$2,24E^{-06}$	$8,55E^{-06}$

É reconhecido que a condutividade hidráulica saturada apresenta uma elevada variabilidade espaço-temporal devido, essencialmente, às heterogeneidades e às alterações físico-químicas que ocorrem nos solos (Nielsen et al., 1973). Tal como se pode verificar através da análise do Quadro 10, existe uma clara diminuição dos valores da permeabilidade de E para W, ou seja, do maciço vulcânico das Furnas para o das Sete Cidades, o que poderá refletir a idade geológica dos depósitos ensaiados e, deste modo, a redução do índice de vazios.

Os valores mais elevados refletem as características granulométricas grosseiras que estes depósitos patenteiam. Os valores mais baixos surgem nas intercalações de níveis mais finos que muitas vezes estes depósitos *in situ* apresentam face às alternâncias de dinâmicas eruptivas. Os resultados obtidos apontam para um quadro de características rápidas a lentas, típicas de solos arenosos e siltosos, respetivamente.

Amaral (2010) e Amaral et al. (2009) determinaram a condutividade hidráulica saturada pelo método da carga constante, em laboratório. Os resultados obtidos no presente trabalho, pelos ensaios *in situ* através do método de Lefranc, ficaram situados no intervalo dos valores obtidos por aqueles autores.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente desenvolvimento observado na engenharia civil tem exercido uma pressão cada vez maior sobre os recursos naturais, o que com a crescente tomada de consciência da sociedade sobre a importância dos aspetos ambientais, e com a cada vez maior necessidade de redução de custos das obras, faz com que se tentem aproveitar todos os materiais que surgem em obra, em vez da sua simples remoção a vazadouro e substituição por materiais de características mais nobres.

As propriedades dos solos desempenham um papel importante em muitas práticas de engenharia geotécnica. Apesar da informação ainda ser diminuta, constata-se que, em termos granulométricos, os depósitos apresentam uma ampla variabilidade textural, com baixas percentagens em partículas finas e com um grande predomínio de frações mais grosseiras (areias e cascalhos). Apresentam no seu estado solto barididades reduzidas, entre os 400 e os 700 kg/m³, e um volume de vazios entre os 39 e os 48%. A absorção de água denotou valores compreendidos entre 14 e 40% e a massa volúmica ponderada das partículas secas exibiu quantitativos entre os 0,74 e 1,55 Mg/m³.

Do ponto de vista mecânico, exibem valores de CBR maioritariamente superiores a 20, com máximos de 70. Para além disso, apresentam curvas de compactação extensas, mantendo uma ampla gama de teores em água para o valor da baridade seca máxima.

No que concerne aos teores químicos destes materiais, determinados de acordo com a norma europeia EN 1744-1:2009, verificou-se que a sua variação em função do maciço vulcânico é um pouco aleatória. No entanto, observou-se que as amostras provenientes do maciço vulcânico das Furnas geralmente apresentavam valores maiores, em especial para o teor total de enxofre (S), com exceção dos ensaios da solubilidade em água e da perda ao fogo, para os quais a amostra 28732, proveniente do maciço do Fogo, apresentou valores significativamente superiores. Em relação às exigências das normas de produto para agregados leves (EN 13055-1 e EN 13055-2), apesar de serem especificados os requisitos químicos para os agregados, não são apresentados valores limites para estes requisitos, não existindo por esta via limitação à sua utilização.

Os resultados dos valores N_{SPT} obtidos para os depósitos piroclásticos pomíticos, quer através dos ensaios de campo, quer através da análise existente no acervo documental do LREC, apontam para um quadro de valores maioritariamente reduzidos, situando este tipo de material essencialmente na gama das areias soltas a muito soltas.

Do ponto de vista de resistência ao corte, apresentam valores de ângulos de atrito normalmente elevados, com uma média na ordem dos 35° . Em termos coesivos, à saturação apresentam coesões efetivas nulas. No entanto, é possível verificar em taludes de escavação, por vezes com alturas superiores a 10 m e declives subverticais, a manutenção de condições de marginalmente estáveis, derivadas do imbricamento entre as partículas e da atuação das forças de capilaridade que contribuem para o aumento da coesão aparente.

A análise do comportamento hidrológico com o recurso ao método do tipo Lefranc para a obtenção da condutividade hidráulica saturada apresentou resultados consistentes para a quantificação desta grandeza, tendo-se obtido ordens de grandeza globais entre os $10E^{-03}$ e os $10E^{-06}$ (m/s), o que permite considerar uma amplitude de classes rápidas a lentas. Os valores mais lentos surgiram, provavelmente, devido à presença de lenticulas de cinzas pomíticas intercaladas nos depósitos pomíticos. Tal facto é confirmado pelas análises granulométricas realizadas.

Tendo em consideração o descrito neste documento, o material em análise apresenta-se no seu estado natural solto a muito solto, confirmado pelos ensaios SPT e ensaios de carga com placa. Face às características determinadas, este material após compactação apresenta um comportamento bastante satisfatório, o que permite a sua utilização em aterros, nas camadas de leito de pavimento e na camada de sub-base de pavimentos rodoviários, não só verificado pelo CBR mas também pelas restantes características determinadas (e.g. equivalente de areia, azul metileno, Los Angeles, granulometria, etc.).

Para além disso, uma vez que estes materiais são extremamente porosos apresentam características favoráveis (e.g. betão leve) e desfavoráveis (e.g. misturas betuminosas) para determinadas aplicações.

No contexto da estabilidade de vertentes, a permeabilidade elevada confere uma ação positiva na dissipação rápida do conteúdo hídrico no solo. Os elevados valores de ângulos de atrito conjuntamente com o efeito positivo da coesão aparente, em virtude da atuação das forças de capilaridade, favorecem a estabilidade de taludes com alturas e inclinações significativas. No entanto, constituem materiais propensos a gerar instabilidade de cariz superficial (e.g. deslizamentos translacionais superficiais) quando o solo se aproxima da saturação.

Os resultados obtidos pelo relacionamento entre os parâmetros de resistência ao corte obtidos por Amaral (2010), os valores N_{SPT} obtidos neste trabalho e os obtidos por Malheiro e Nunes (2007) indicam que aqueles podem ser estimados pelo número de pancadas do ensaio SPT, tendo-se, neste contexto, proposto uma formulação empírica (eq.6) para determinar o ângulo de atrito interno de solos pomíticos com a utilização do valor de N_{SPT} .

Os resultados alcançados neste trabalho confirmam as singularidades presentes nestes materiais de natureza vulcânica e, pelo facto de serem escassos os estudos sobre este tema, constituem um contributo importante para a Região Autónoma dos Açores de modo a servir de referência em termos de obras de engenharia civil/geotécnica, reutilização para outros fins e para o auxílio no planeamento e ordenamento do território.

REFERÊNCIAS

- Amaral, P. (2010) - Caracterização geotécnica e hidrológica de depósitos vulcânicos: Modelação da estabilidade de taludes no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel – Açores). Dissertação de Doutoramento em Geologia especialidade de Vulcanologia. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 277 p.
- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J.L., Marques, F., Queiroz, G., Ramos, T. e Gonçalves, M.C. (2009) - Caracterização hidrológica e geotécnica de solos vulcânicos pomíticos com vista à integração em modelos determinísticos para avaliação da instabilidade de vertentes no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Vol. VI, p. 127-132.
- ASTM D 2487-00 – Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system).
- BS 1377-9 (1990) – Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 9: in-situ tests.
- EN 933-1:1997/A1:2005 – Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method.

- EN 1097-2: 2010 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.
- EN 1097-7:2008 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 7: Determination of the density of filler – Pycnometer method.
- EN 1744-1:2009 – Test for chemical properties of aggregates. Part 1: Chemical analysis.
- EP (2009) - Caderno de encargos tipo obra – 14.01 – Terraplenagem. Características dos materiais. Estradas de Portugal, S.A., Lisboa.
- EP (2009) - Caderno de encargos tipo obra – 14.03 – Pavimentação. Características dos materiais. Estradas de Portugal, S.A., Lisboa.
- Folque, J. (1987) – Comportamento de maciços terrosos sob a ação de solicitações sísmicas, Geotecnia nº51, Lisboa, pp. 1-31.
- Gaspar, J.L., Ferreira, T., Queiroz, G., Wallenstein, N., Pacheco, J., Guest, J. Ducan, A e Cole, P. (1995) – Evolução morfoestrutural do vulcão das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores). IV Congresso Nacional de Geologia, Faculdade de Ciências, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Universidade do Porto. Memória nº4., pp.999.
- LNEC E 197: 1966 – Solos. Ensaio de compactação.
- LNEC E 198: 1967 – Solos. Determinação do CBR.
- LNEC E199: 1970 – Solos. Ensaio de equivalente de areia.
- LNEC E204: 1967 – Solos. Determinação da baridade seca “in situ” pelo método da garrafa de areia.
- LNEC E239: 1970 – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida.
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W. e Erh, K.T (1973) – Spatial variability of field-measured soil water properties. Hilgardia, 42, pp. 215-259.
- NP 84: 1965 – Solos. Determinação do teor em água.
- NP 143: 1969 – “Solos. Determinação dos limites de consistência”.
- NP EN 933-1:2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração.
- NP EN 933-3:2002 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento.
- NP EN 933-4:2002 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma.
- NP EN 933-8:2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos. Ensaio do equivalente de areia.
- NP EN 933-9:2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos. Ensaio do azul de metileno.
- NP EN 1097-1: 2002 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval).
- NP EN 1097-3: 2002 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios.
- NP EN 1097-6:2003 + NP EN 1097-6:2003/A1:2010 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.
- NP EN 13055-1:2005 + NP EN 13055-1:2005/AC:2010 – Agregados leves. Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injeção.
- NP EN 13055-2:2011 – Agregados leves. Parte 2: Agregados leves para misturas betuminosas e tratamentos superficiais e para aplicações em camadas de materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos.
- Malheiro, A. 3 Nunes, J.C. (2007) – Volcanostratigraphic profiles for the Azores Region: A contribution for the EC8 Regulations and the characterization of volcanic rocks geomechanical behaviour. In: Malheiro & Nunes (Eds.). Volcanic Rocks. pp. 59-64.

- Queiroz, G. (1997) – Vulcão das Sete Cidades (S. Miguel – Açores). História eruptiva e avaliação do hazard. Tese de doutoramento no ramo de Geologia especialidade de Vulcanologia, Departamento de geociências, Universidade dos Açores, 226 p.
- RRL (1952) – Road Research Laboratory. Soil Mechanics for Road Engineers, Department of Scientific and Industrial Research – London.
- Skempton, A. W, (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Géotechnique* 36, nº3, pp. 425-447.
- Terzaghi, K. e Peck, R.B. (1987). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.
- Wallentein, N. (1999) – Estudo da história eruptiva recente e do comportamento eruptivo do vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores). Avaliação preliminar do hazard. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Univ. dos Açores, Dep. Geociências. 266 p.