



André Filipe Pimentel Furtado

Licenciado em Geologia Aplicada e do Ambiente

**Avaliação da instabilidade de vertentes e processos
de erosão superficial na zona de Castelo Branco,
Furnas, ilha de São Miguel, Açores**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Georrecursos)

Orientador: Maria da Graça Azevedo de Brito, Professora Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: António Neves Trota, Professor Auxiliar, Universidade dos Açores

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Paulo do Carmo Sá Caetano, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

Arguente: Prof. Doutor Carlos Nunes da Costa, Prof. Auxiliar Aposentado – FCT/UNL

Vogal: Prof. Doutor António Neves Trota, Prof. Auxiliar – Univ. dos Açores

2014

Avaliação da instabilidade de vertentes e processos de erosão superficial na zona de Castelo Branco, Furnas, ilha de São Miguel, Açores
André Furtado



André Filipe Pimentel Furtado

Licenciado em Geologia Aplicada e do Ambiente

**Avaliação da instabilidade de vertentes e processos
de erosão superficial na zona de Castelo Branco,
Furnas, ilha de São Miguel, Açores**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica
(Georrecursos)

Orientador: Maria da Graça Azevedo de Brito, Professora Auxiliar, FCT/UNL
Co-orientador: António Neves Trota, Professor Auxiliar, Universidade dos
Açores

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Setembro, 2014

Avaliação da instabilidade de vertentes e processos de erosão superficial na zona de Castelo Branco, Furnas, ilha de São Miguel, Açores

Copyright@ André Filipe Pimentel Furtado, 2014

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

O apoio e o suporte recebido por parte de diversas pessoas, ao longo da realização desta dissertação, foram essenciais para atingir o objetivo proposto. Assim, expresso os mais sinceros agradecimentos:

- À Prof.^a Graça Brito, orientadora desta dissertação, por toda a amizade, dedicação, motivação, crítica, apoio e disponibilidade demonstrada, durante a realização da dissertação, bem como pelo fornecimento de documentação adequada, conhecimentos e motivação necessária ao desenvolvimento do trabalho;
- Ao Prof. António Trota, coorientador desta dissertação, por toda a amizade, dedicação, motivação, crítica, apoio e disponibilidade demonstrada, durante a realização da dissertação, bem como pelo fornecimento de documentação adequada, e conhecimentos necessários para o desenvolvimento do trabalho;
- À Prof.^a Ana Paula Silva pela amizade e disponibilidade para tirar qualquer dúvida, bem como o apoio e disponibilidade durante a fase de recolha de amostras de solo;
- Ao Prof. Pedro Lamas pela amizade e apoio prestado na realização dos ensaios laboratoriais;
- Aos colaboradores da Açorgeo - Sociedade de Estudos Geotécnicos, Lda., em especial ao Eng.^o Miguel Bernardo e ao Eng.^o Pedro Raposo, pela disponibilidade demonstrada na realização dos ensaios laboratoriais;
- Ao Eng.^o Miguel Ferreira e à Eng.^a Malgorzata Pietrzak, pela amizade, apoio e disponibilidade demonstrada, durante a realização da dissertação e, a todos os colaboradores do Centro de Monitorização e Investigação das Furnas (CMIF), pelo apoio no trabalho de campo e na recolha de amostras;
- À Doutora Sofia Soares pela amizade, informação e documentação fornecida, bem como pelo apoio prestado na realização dos ensaios de corte direto;
- À Eng.^a Filomena Mendes pelo auxílio na realização dos ensaios de corte direto;
- À Secretaria Regional do Ambiente e do Mar do Governo Regional dos Açores, em especial à Doutora Ana Moreira pela disponibilização de informação técnica e cartográfica que muito contribuiu para o desenvolvimento do trabalho;
- Aos investigadores/estagiários que encontrei no Centro de Monitorização e Investigação das Furnas (CMIF), durante a realização do trabalho de campo, em especial ao Pablo Garcia e ao Florian Kohler, pelo apoio no trabalho de campo;
- Ao Prof. Joaquim Simão pela conversa que tivemos antes de iniciar a dissertação, sendo através desta que surgiu a possibilidade de ter o contacto do Prof. António Trota e realizar esta dissertação em São Miguel;
- Aos meus pais e madrinha, por todo o amor, motivação e apoio prestado durante toda esta fase académica;
- Ao meu irmão pelo apoio, carinho e paciência nos trabalhos de campo;

- A todos os meus amigos e colegas que, de uma forma ou de outra, ao longo deste percurso académico, contribuíram para a realização deste trabalho;

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo identificar e avaliar os elementos de instabilidade geotécnica das vertentes e terrenos da zona do Vanzinho (Castelo Branco, Furnas, ilha de São Miguel), com vista a propor medidas de estabilização das vertentes e controlo da erosão superficial dos terrenos.

Com este objetivo foi definida uma metodologia de trabalho em cinco etapas que consistiu: (i) a primeira etapa, no levantamento de dados bibliográficos, integração da informação geológica/geomorfológica em SIG (sistema de informação geográfica) e na observação e levantamento de campo das superfícies de instabilidade geotécnica; (ii) a segunda etapa, na recolha de amostras de solo, remexidas e não remexidas, para caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais; (iii) a terceira etapa, na realização de ensaios laboratoriais para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos solos e respetiva classificação; (iv) uma quarta etapa, que consistiu no tratamento estatístico multivariado de dados, nomeadamente, a aplicação dos métodos de análise fatorial das correspondências e de classificação hierárquica com vista à caracterização da tipologia dos materiais e eventual correlação com as evidências de instabilidade; (v) a quinta etapa consistiu na projeção de um conjunto de medidas estruturais e não estruturais (medidas biológicas) a implementar para a estabilização de vertentes e controlo dos processos de erosão superficial observados na área do Vanzinho.

Para a estimação da distribuição espacial das diferentes tipologias de solo foi utilizado o método geostatístico da krigagem multifásica.

Para cada elemento de instabilidade cartografado foi criada uma ficha que caracteriza a tipologia da ocorrência, a dimensão, a forma e o coberto vegetal do meio envolvente.

O trabalho realizado teve por base a integração de toda a informação num SIG, o que possibilita a atualização de eventuais novas ocorrências, bem como o fácil manuseamento e análise dos dados, a utilizar em trabalhos futuros.

Palavras-chave: erosão superficial, estabilidade de taludes, solos pomíticos, análise de dados, mitigação.

Abstract

The present thesis aims to identify and evaluate the elements of geotechnical instability of the slopes and the land area in Vanzinho (Castelo Branco, Furnas, São Miguel island) in order to propose stabilization measures of slopes and control surface erosion of the lands.

The study methodology includes five stages: (i) the first stage comprises the survey of published documents, integration of geological/geomorphological information into a GIS (geographic information system) and the observation and field survey of areas of geotechnical instability; (ii) the second stage, includes the collection of soil samples, intact and not intact, and the characterization of physical and mechanical properties of materials; (iii) in the third stage I made laboratory tests in order to obtain the physical and mechanical properties of soils and their classification; (iv) a fourth step, which consisted in the multivariate statistical data treatment, in particular, the application of the methods of correspondences factorial analysis and hierarchical classification for the characterization of the type of materials and possible correlation with evidence of instability; (v) a fifth step, which includes the proposal of a series of structural and non-structural measures (biological measurements) to be implemented to stabilize slopes and control of surface erosion processes observed in the area Vanzinho.

To estimate the spatial distribution of different types of soil was used the geostatistical method of multiphase kriging.

For each element of instability mapped, data sheets were developed that characterize the type of occurrence, size, shape and vegetation of the surroundings environment.

All the information obtained in this study was compiled and integrated in a GIS database, which allows us future update procedures, as well an easy handling and data analysis, to be used in upcoming studies.

Keywords: surface erosion, slope stabilization, pumice soils, data analysis, mitigation.

Índice Geral

Agradecimentos	V
Resumo	VII
Abstract	IX
Índice Geral	XI
Índice de Figuras	XV
Índice de Tabelas.....	XXI
Índice de Gráficos.....	XXIII
Abreviaturas, siglas e símbolos.....	XXV
1.Introdução.....	1
1.1. Objetivos e metodologia	2
1.2. Organização da dissertação	3
2. Caracterização da área de estudo: Castelo Branco, Furnas, ilha de São Miguel	5
2.1. Enquadramento geográfico	5
2.2. Enquadramento geomorfológico.....	6
2.3. Enquadramento geológico.....	10
2.4. Enquadramento tectónico.....	13
2.5. Enquadramento hidrológico e hidrogeológico	15
2.6. Sismicidade histórica.....	17
2.7. Vulcanismo: erupções de 1630 e 1439-43 (Pico do Gaspar, Furnas)	20
2.7.1. Erupção de 1439-43 (Pico do Gaspar, Furnas)	24
2.7.2. Erupção de 1630 (Furnas).....	26
2.8. Clima e pluviosidade	32
3. Fundamentos teóricos e estado da arte.....	35
3.1. Instabilidade de terrenos e erosão superficial de solos (processos erosivos lineares)	36
3.1.1. Tipos de instabilidade de terrenos	36
3.1.2. Fatores condicionantes e desencadeantes dos movimentos de massa e de erosão superficial	42
3.1.3. Tipos de instabilidade de terrenos resultantes da erosão hídrica.....	47
3.1.3.1 Erosão superficial de solo.....	50
3.2. Medidas mitigadoras/controlo para instabilidade de terrenos a implementar na região de estudo.....	58
3.2.1. Medidas mitigadoras/controlo de erosão superficial de solos	58
3.2.1.1. Medidas estruturais	60
3.2.1.2. Medidas biológicas	76
3.2.2. Medidas de estabilização de taludes	78
3.2.2.1. Drenagem	79
3.2.2.2. Reperfilamento do talude.....	81

3.2.2.3. Recobrimento vegetal.....	81
3.3. Ensaio de laboratório e classificação de solos	83
3.3.1. Análise granulométrica (crivagem).....	84
3.3.2. Densidade das partículas (aparente)	85
3.3.3. Limites de consistência	85
3.3.4. Sistemas de Classificação de Solos	89
3.3.4.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS).....	89
3.3.4.2. Classificação de solos para fins rodoviários (AASHTO)	91
3.4. Resistência ao corte dos solos	92
3.4.1. Critério de rotura	92
3.4.2. Ensaio de corte direto.....	94
3.4.2.1. Descrição do ensaio	94
3.4.2.2. Vantagens e desvantagens do ensaio de corte direto	98
3.4.2.3. Comportamento dos solos granulares submetidos a corte	98
3.5. Análise estatística de dados - fundamentos teóricos.....	100
3.5.1. Análise estatística multivariada de dados	103
3.5.1.1. Análise em Componentes Principais (ACP)	105
3.5.1.2. Análise de correspondências múltiplas (AFCM)	106
3.5.1.3. Análise de correspondências binárias (ACOR)	107
3.5.2. Análise classificatória	108
3.5.2.1. Métodos Hierárquicos.....	109
3.5.2.2. Classificação Hierárquica Ascendente (CHA)	110
3.6. Estimação por krigagem.....	111
4. Metodologia e aplicação à área do Vanzinho.....	115
4.1 Metodologia	117
4.2 Aplicação da metodologia à área do Vanzinho	117
4.2.1. Etapa 1 - Levantamento de campo das superfícies de instabilidade geotécnica superficiais.....	117
4.2.2. Etapa 2 - Recolha de amostras de solo (remexidas e indeformadas)	129
4.2.3. Etapa 3 - Ensaio laboratoriais e caracterização dos solos	134
4.2.4. Etapa 4 - Análise estatística e interpretação dos dados	145
4.2.4.1 Análise estatística univariada das propriedades do solo.....	145
4.2.4.2. Análise estatística multivariada de dados.....	151
4.2.4.3. Estimação espacial da tipologia de solos através da krigagem da indicatriz	169
5. Controlo/Mitigação de processos erosivos lineares e estabilidade de taludes: medidas implementadas e a implementar na área do Vanzinho.....	173
5.1. Medidas mitigadoras e de controlo de erosão superficial implementadas na área de estudo.....	173
5.1.1. Restituição de flora nativa	173
5.1.2. Construção de diversões ou dissipadores de energia	174

5.1.3. Bacias de retenção de caudal sólido.....	177
5.2. Medidas de mitigação/controlo propostas	179
6. Considerações finais e recomendações	183
7. Referências bibliográficas	189
Anexos	199

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Localização geográfica da ilha de São Miguel e da área de estudo no limite oeste do concelho da Povoação.....	5
Figura 2.2 - Área de estudo a amarelo, zona do Vanzinho (Furnas), a SW da Lagoa das Furnas.....	6
Figura 2.3 - Unidades geomorfológicas da ilha de São Miguel segundo Zbyszewski (1961).....	7
Figura 2.4 - Vista de uma parte do Planalto da Achada das Furnas com o Vulcão do Fogo em primeiro plano	7
Figura 2.5 - Vista geral do Vulcão das Furnas, a partir do Salto do Cavalo.....	8
Figura 2.6 - Mapa morfoestrutural do Complexo Vulcânico das Furnas.....	8
Figura 2.7 - Vista geral do Vulcão da Povoação de NW para SE (esquerda) e de E para W (direita)	9
Figura 2.8 - Vista geral de uma parte da Região da Tronqueira e dos vales encaixados.....	9
Figura 2.9 - Mapa hipsométrico do concelho da Povoação	10
Figura 2.10 - Carta de declives do concelho da Povoação	10
Figura 2.11 - Carta Vulcanológica da ilha de São Miguel.....	11
Figura 2.12 - Litologia da área de estudo, no Vanzinho (SW da Lagoa das Furnas).....	13
Figura 2.13 - Principais estruturas tectónicas da região dos Açores.....	14
Figura 2.14 - Esboço vulcano-tectónico do concelho da Povoação.....	14
Figura 2.15 - Mapa esquemático das estruturas tectónicas do Vulcão das Furnas e distribuição dos campos de fumarolas.....	15
Figura 2.16 - Rede de drenagem do concelho da Povoação	15
Figura 2.17 - Sistemas aquíferos na ilha de São Miguel.....	16
Figura 2.18 - Sismos históricos registados no Arquipélago dos Açores	18
Figura 2.19 - Carta de intensidades máximas históricas para a ilha de S. Miguel, integrando dados relativos aos sismos de natureza tectónica e dados associados a fenómenos vulcânicos.....	20
Figura 2.20 - Principais erupções vulcânicas ocorridas nos Açores desde o povoamento.....	20
Figura 2.21 – Localização da área de estudo e da localização do início das erupções de 1439-43 e de 1630	22
Figura 2.22 - Síntese da estratigrafia do Vulcão das Furnas.....	23
Figura 2.23 - Seção esquemática do Grupo Superior das Furnas que representa os últimos 5000 anos da atividade do Vulcão das Furnas e inclui depósitos adjacentes ao Vulcão do Fogo.....	24
Figura 2.24 - Colunas estratigráficas para diferentes distâncias e orientações à caldeira da erupção de 1439-43, referentes ao depósito Furnas “1”.....	25

Figura 2.25 - a) Intercalação de camadas de lapilli e cinzas presentes a oeste da cratera da erupção de 1630 (localização FL 37); b) Intercalação de camadas de lapilli e cinzas presentes no talude da parcela 39E.	27
Figura 2.26 - a) Seção composta dos piroclastos da erupção de 1630. Não está à escala; b) representação esquemática das fases eruptivas.....	28
Figura 2.27 - Seções de piroclastos da erupção de 1630 com as respetivas direções e distâncias à cratera. a) Seções mais próximas a médias da cratera; b) Seções médias a distantes a nordeste da cratera; c) Seções médias a distantes a noroeste da cratera.....	28
Figura 2.28 - Vulcão das Furnas e zona envolvente onde se observa a localização de alguns depósitos do Grupo Superior das Furnas.....	32
Figura 2.29 - Precipitação acumulada (mm) na ilha de São Miguel segundo o Modelo CIELO.....	34
Figura 3.1 - Escala de velocidades para os movimentos de vertente.....	36
Figura 3.2 - Abrangência dos diferentes termos: movimentos de vertente, movimentos de terreno e movimentos de massa)	37
Figura 3.3 - Desabamento	38
Figura 3.4 - Balançamento.....	39
Figura 3.5 - Deslizamento rotacional.....	40
Figura 3.6 - Deslizamento translacional.....	40
Figura 3.7 - Expansão lateral.....	41
Figura 3.8 - Escoda	42
Figura 3.9 - Fatores intervenientes nos movimentos de terreno.....	43
Figura 3.10 - Esquema de um processo de instabilização de um talude	44
Figura 3.11 - Fases do processo de erosão por salpico.....	51
Figura 3.12 - Exemplos de erosão laminar	52
Figura 3.13 - Exemplos de erosão por sulco.....	53
Figura 3.14 - Formas possíveis de um barranco/ravina.....	54
Figura 3.15 - Representação de uma ravina descontínua	55
Figura 3.16 - Representação de uma ravina contínua.....	55
Figura 3.17 - Erosão na "cabeça" do barranco devido ao fluxo de água superficial	56
Figura 3.18 - Representação esquemática do desenvolvimento de barrancos/ravinas num vale pomítico	57
Figura 3.19 - Exemplo de uma <i>badland</i>	58
Figura 3.20 - Estrutura bem encaixada na superfície, com a forma em "U" no topo central da estrutura.....	61
Figura 3.21 - Falha numa estrutura de controlo construída em gabião para o controlo de uma ravina.....	61
Figura 3.22 - Base da estrutura bem encaixada na superfície, com proteção a jusante... ..	61
Figura 3.23 - Dique ou barragem de controlo constituída por madeira.....	62
Figura 3.24 - Dique ou barragem de controlo constituída por madeira.....	62

Figura 3.25 - Perfil vertical e corte transversal de uma barragem de controlo constituída por uma fila de estacas de madeira.....	63
Figura 3.26 - Perfil vertical e corte transversal de uma barragem de controlo constituída por duas filas de estacas de madeira.....	63
Figura 3.27 – Combinação do uso de geotêxtil na base da superfície da ravina com a construção de um dique ou barragem de controlo.....	64
Figura 3.28 - Perfil frontal de uma barragem de controlo composta por rocha.....	65
Figura 3.29 - a) Cálculo do espaçamento entre barragens; b) Esquema representativo da distância entre barragens.....	66
Figura 3.30 - Construção de uma barragem de controlo de gabiões.....	67
Figura 3.31 - Sacos de areia a funcionarem como um dique ou barragem de controlo de uma ravina.....	69
Figura 3.32 - Exemplo de aplicação de <i>rock lining</i>	70
Figura 3.33 - Exemplos de drenos utilizados para a drenagem das águas sub-superficiais.....	71
Figura 3.34 - Exemplo de uma barreira de fardos de fenos.....	72
Figura 3.35 - Exemplo das dimensões de uma vala de drenagem.....	73
Figura 3.36 - Fases de construção de uma trincheira com material drenante e geotêxtil..	74
Figura 3.37 - Exemplo da aplicação de geotêxtil numa zona de drenagem.....	75
Figura 3.38 - Proteção das margens laterais de uma ravina com paredes de bambu.....	77
Figura 3.39 - Exemplo de uma galeria de drenagem e de esporões drenantes.....	80
Figura 3.40 - Alteração da geometria de um talude.....	81
Figura 3.41 - Efeito do peso das árvores de grande porte sobre o talude.....	83
Figura 3.42 - Comportamento dos solos com a variação do teor em água.....	86
Figura 3.43 - a) Esquema da concha de Casagrande; b) concha de Casagrande utilizada nos ensaios e riscador	86
Figura 3.44 - Pequenos filamentos cilíndricos para determinação do Limite de Plasticidade	87
Figura 3.45 - Critério de rotura em solos.....	92
Figura 3.46 - Envolvente de rotura e círculo de Mohr	93
Figura 3.47 - Esquema do aparelho de corte direto	94
Figura 3.48 - Aparelho de corte direto utilizado no ESTIG.....	95
Figura 3.49 - Obtenção da envolvente de rotura e dos parâmetros de resistência ao corte (c' , ϕ') a partir de um ensaio de corte direto drenado.....	96
Figura 3.50 - Ensaio não consolidado não drenado: análise em termos de tensões totais para obter a resistência não drenada c_u	97
Figura 3.51 - Curvas de ensaios de corte drenado sobre amostras granulares de distinta densidade inicial.....	99
Figura 3.52 - Envoltentes de rotura em função da densidade inicial da amostra.....	99
Figura 3.53 - Exemplo de um <i>box-plot</i> e a localização dos <i>outliers</i>	101
Figura 3.54 - a) Distribuição simétrica; b) distribuição enviesada à esquerda ou assimétrica positiva; c) distribuição enviesada à direita ou assimétrica negativa.....	103

Figura 3.55 - Matriz genérica X.....	105
Figura 3.56 - Exemplo de um dendrograma resultante de uma Classificação Hierárquica.....	109
Figura 3.57 - Esquema do formalismo da indicatriz	113
Figura 4.1 - Representação esquemática da metodologia utilizada.....	115
Figura 4.2 - Superfícies de instabilidade identificadas na área de estudo.....	120
Figura 4.3 - Ravinas/barrancos identificados na zona a NW do Vanzinho. a) RB 1; b) RB 2.....	121
Figura 4.4 - Ravinas/barrancos na zona a NW do Vanzinho. a) RB 3; b) RB 4. Intervenção com desvios de troncos de criptoméria (<i>Cryptomeria japonica</i>).....	122
Figura 4.5 - Ravina/barranco identificada na parcela 39 A (RB 5), sem intervenção.....	122
Figura 4.6 - Ravina/barranco identificada na parcela 39 B. a) RB 6; b) RB 7. Dissipadores de energia com troncos de Incenso (<i>Pittosporum undulatum</i>).....	122
Figura 4.7 - Ravinas/barrancos identificadas na parcela 39 C, sem intervenção. a) RB 8; b) RB 9. Sem intervenção.....	123
Figura 4.8- Ravinas/barrancos identificadas na parcela 38 B, com intervenção (plantação de endémicas e desvios com troncos de criptoméria - <i>Cryptomeria japonica</i>). a) RB 10; b) RB 11; c) RB 12; d) RB 13.....	123
Figura 4.9 - Ravina/barranco identificada na parcela 38 B (RB 14), sem intervenção....	124
Figura 4.10 - Ravina/barranco identificada na parcela 39 G (RB 15), sem intervenção	124
Figura 4.11 - Sulcos identificados na zona a NW do Vanzinho (a) e no caminho do trilho, próximo da parcela 39 A (b).....	124
Figura 4.12 - Forma de erosão laminar na zona a NW do Vanzinho.....	125
Figura 4.13 - Escorregamento na zona a NW do Vanzinho.....	125
Figura 4.14 - Escorregamentos ao longo do caminho do trilho. De W para E: a) Vertente esquerda na parcela 39 A; b) Vertente direita na zona das parcelas 39 A-B; c) Vertente direita na zona das parcelas 39 A-B; d) vertente esquerda na parcela 39 B.....	126
Figura 4.15 - Escorregamentos ao longo do caminho do trilho. De W para E: a) Vertente esquerda na parcela 39 B; b) Vertente direita na zona da parcela 39 B; c) Vertente direita na zona da parcela 39 B; d) Vertente direita na zona da parcela 39 B.....	126
Figura 4.16 - Escorregamento ao longo do caminho do trilho (de W para E) na vertente direita da parcela 39 E.....	127
Figura 4.17 - Escorregamento junto à linha de água numa vertente da parcela 38 B.....	127
Figura 4.18 - Escorregamentos no caminho do trilho (final) próximo da estrada regional, a E do Vanzinho.....	127
Figura 4.19 - Escorregamentos nas margens das ravinas/barrancos. a) RB 1; b) RB 11... ..	128
Figura 4.20 - Recolha de amostra indeformada, com caixa de corte, na zona a NW do Vanzinho (amostra AM2).....	130
Figura 4.21 - Recolha de amostra remexida com trado mecânico, na zona a NW do Vanzinho (amostra T2).....	131
Figura 4.22 - Localização das amostras recolhidas. Mapa na escala 1:5000.....	132
Figura 4.23 - Localização das ravinas RB1 e RB2 e da recolha da amostra T1 (Vanzinho).....	133

Figura 4.24 - Localização da ravina RB3 e da recolha das amostras T4 e T5	133
Figura 4.25 - Vista geral (de E para W) do talude do caminho do trilho, contíguo à parcela 39 A, aquando da recolha da amostra T14.....	133
Figura 4.26 - Vista geral (de W para E) do talude do caminho do trilho, contíguo à parcela 39 B, aquando da recolha da amostra T17.....	134
Figura 4.27 - Vista geral (de W para E) da estação 38 B.....	134
Figura 4.28 - Localização das amostras classificadas segundo o Sistema de Classificação Unificada.....	141
Figura 4.29 - Localização das classificadas segundo o Sistema de Classificação <i>AASHTO</i>	141
Figura 4.30 - Amostra AM2 na caixa de corte antes da realização do ensaio de corte direto.....	144
Figura 4.31 - Aspeto da amostra AM2 após o final do ensaio e após sair da estufa.....	145
Figura 4.32 - Estatísticos das variáveis densidade e teor em água	147
Figura 4.33 - Estatísticos das variáveis de classes granulométricas (MAT1, MAT2, MAT3, MAT4).....	148
Figura 4.34 - Estatísticos das variáveis de novas classes granulométricas (MAT5 e MAT6)	149
Figura 4.35 - Estatísticos das variáveis distância das amostras às linhas de água	150
Figura 4.36 - Análise de componentes principais para as variáveis quantitativas (eixos 1 e 2).....	152
Figura 4.37 - Análise de componentes principais para as variáveis quantitativas (eixos 1 e 3).....	153
Figura 4.38 - Análise de componentes principais para as variáveis quantitativas (eixos 1 e 4).....	153
Figura 4.39 - Análise de componentes principais para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 2).....	154
Figura 4.40- Análise de componentes principais para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 3).....	155
Figura 4.41 - Análise de componentes principais para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 4).....	156
Figura 4.42 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas (eixos 1 e 2).....	157
Figura 4.43 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas (eixos 1 e 3).....	158
Figura 4.44 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas (eixos 1 e 4).....	159
Figura 4.45 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 2).....	160
Figura 4.46 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 3).....	161
Figura 4.47 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 4).....	162

Figura 4.48 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 2).....	163
Figura 4.49 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 3).....	164
Figura 4.50 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 4).....	165
Figura 4.51 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 2).....	166
Figura 4.52 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 3)	166
Figura 4.53 – Localização da tipologia de solos classificados pela Classificação Hierárquica Ascendente com base em 6 variáveis quantitativas e 5 variáveis qualitativas	167
Figura 4.54 - Localização da tipologia de solos classificados pela Classificação Hierárquica Ascendente com base nas variáveis – AASHTO, textura e granulometrias (grosseira e fina)	168
Figura 4.55 - Variograma da variável indicatriz	170
Figura 4.56 - Mapa de probabilidades de ocorrência de solos do tipo 1 ou do tipo 2.....	170
Figura 4.57 - Mapa da tipologia de solos do tipo 1 e do tipo 2.....	171
Figura 5.1 - a) Ravina/barranco RB 10 existente na parcela 38 B antes da intervenção; b) Intervenção com plantação de endémicas, na ravina RB10.....	174
Figura 5.2 - Intervenção, com plantação de endémicas, na ravina/barranco RB 11 existente na parcela 38 B.....	174
Figura 5.3 - Dissipadores de energia em forma de V, construídos a montante da ravina RB 10, na parcela 38 B.....	175
Figura 5.4 - Dissipadores de energia construídos a montante da ravina RB 3, no Vanzinho	175
Figura 5.5 - Dissipadores de energia construídos a montante da ravina RB 4, no Vanzinho	175
Figura 5.6 - Dissipadores de energia (<i>Pittosporum undulatum</i>) construídos a montante da ravina RB 6, na parcela 39 B.....	176
Figura 5.7 - Localização dos diversores construídos na área de estudo (Vanzinho) e o tipo de intervenção aplicada em cada ravina identificada.....	176
Figura 5.8 - Bacia de retenção ao longo da Ribeira do Rosal, a sul da Lagoa das Furnas.....	177
Figura 5.9 - Bacia de retenção ao longo da Ribeira do Rosal, a sul da Lagoa das Furnas.....	177
Figura 5.10 - Bacia de retenção ao longo da Ribeira do Rosal, a sul da Lagoa das Furnas.....	178
Figura 5.11 - Localização do trecho da Ribeira do Rosal onde se encontram as bacias de retenção.....	178
Figura 5.12 - Estrutura de proteção construída na proximidade do escorregamento identificado na parcela 38 B.....	179
Figura 5.13 - Medidas de controlo e regularização a aplicar na área de estudo.	182

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Caracterização dos sistemas aquíferos do concelho da Povoação.....	17
Tabela 2.2 - Principais sismos destrutivos ocorridos nos Açores desde o povoamento.....	19
Tabela 2.3 - Principais erupções vulcânicas ocorridas nos Açores desde o povoamento.....	21
Tabela 2.4 - Cálculos para as alturas de coluna das camadas de lapilli da erupção de 1630.	30
Tabela 2.5 - Cálculo de volumes para diferentes camadas e produtos da erupção de 1630.....	31
Tabela 3.1 - Classificação dos movimentos de terreno.....	38
Tabela 3.2 - Principais tipos de erosão hídrica.....	49
Tabela 3.3 - Classificação dos barrancos com base na profundidade e área de drenagem.....	57
Tabela 3.4 – Diferentes dimensões dos gabiões e quantidade de arame necessário para cada dimensão	68
Tabela 3.5 - Dimensões dos gabiões implementados pela entidade Santos Moura Porto.....	68
Tabela 3.6 – Diferentes malhas implementadas pela entidade Santos Moura Porto.....	69
Tabela 3.7 – Espaçamento entre valas de drenagem de acordo com o declive do terreno e o tipo de solo.....	73
Tabela 3.8 - Dimensões dos peneiros da série <i>ASTM</i>	83
Tabela 3.9 - Dimensões (mm) das classes granulométricas.....	84
Tabela 3.10 - Propriedades das diferentes classes granulométricas.....	84
Tabela 3.11 - Classificação de Atterberg baseada no comportamento "plástico" dos solos.	88
Tabela 3.12 - Propriedades dos solos, quando compactados, agrupados segundo a Classificação Unificada de Solos.....	90
Tabela 3.13 - Valores do ângulo de atrito interno de solos granulares não plásticos em função da granulometria e da compactação inicial	100
Tabela 4.1 - Nomenclatura utilizada para o registo dos elementos de instabilidade geotécnica	118
Tabela 4.2 - Ravinas/barrancos identificados na área de estudo e respetivos elementos morfométricos	119
Tabela 4.3 - Síntese descritiva dos escorregamentos/deslizamentos identificados na área de estudo	128
Tabela 4.4 - Tipo de ensaios de laboratório realizados sobre as amostras de solo.....	129
Tabela 4.5 - Localização das amostras recolhidas	131
Tabela 4.6 - Amostras não ensaiadas e semelhança macroscópica com as restantes amostras	135
Tabela 4.7 - Teores em água das 25 amostras ensaiadas	135
Tabela 4.8 - Peso volúmico aparente seco das amostras	136
Tabela 4.9 - Percentagem do material retido e passado no peneiro #10 e material passado no peneiro #200 para as 25 amostras ensaiadas.....	138

Tabela 4.10 - Limites de consistência determinados	138
Tabela 4.11 - Classificação das amostras de acordo com a Classificação Unificada e a Classificação AASHTO	139
Tabela 4.12 - Resultados obtidos para as amostras ensaiadas	140
Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios de corte direto	143
Tabela 4.14 - Variáveis quantitativas utilizadas na análise univariada	146
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios realizados às 25 amostras	146
Tabela 4.16 - Variáveis quantitativas em estudo (análise ACP e ACOR).....	151
Tabela 4.17 - Variáveis qualitativas em estudo (análise ACP, ACOR e AFCM).....	151
Tabela 4.18 - Variáveis quantitativas (análise AFCM).....	160
Tabela 4.19 - Parâmetros de variograma da variável indicatriz.....	169
Tabela 5.1 - Resumo das medidas propostas para controlar e regularizar os ravinamentos ativos e os taludes instáveis da área de estudo.....	180
Tabela 6.1 - Principais conclusões da análise multivariada de dados.....	185
Tabela 6.2 - Parâmetros a utilizar numa análise multivariada de dados sobre solos.....	188

Índice de Gráficos

Gráfico 3.1 - Gráfico de Plasticidade de Casagrande.....	88
Gráfico 4.1 - Perfil longitudinal da ravina/barranco RB 11.....	121
Gráfico 4.2 - Curvas granulométricas das amostras	137
Gráfico 4.3 - Envolvente de rotura segundo o critério de Mohr-Coulomb para os diferentes materiais analisados	143

Abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas e siglas

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AC	Análise de Correspondências
ACOR	Análise de Correspondências Binárias
AÇORGEO	Sociedade de Estudos Geotécnicos Lda.
ACP	Análise em Componentes Principais
AD	<i>Anno Domini</i> (“no ano do Senhor”)
AFCM	Análise de Correspondências Múltiplas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BP	<i>Before Present</i>
¹⁴ C	Carbono
CAH	Classificação Hierárquica Ascendente
CIELO	Clima Insular à Escala Local
CMIF	Centro de Monitorização e Investigação das Furnas
CS	<i>Coefficient of Skewness</i>
CV	Coeficiente de Variação
CVARG	Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DRE	Equivalente de Rocha Densa
DROTRH	Direção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos
<i>et al.</i>	<i>et alia</i> (e outros)
EMS	Escala de Mercalli-Sieberg
ESTIG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FR	Força Resistente
HRB	<i>Highway Research Board</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MDR	Taxa Média de Descarga

MED	Taxa de Erupção Média
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i> (Oscilação do Atlântico Norte)
NP	Norma Portuguesa
POBHLF	Plano de Ordenamento da Bacia Hidrográfica da Lagoa das Furnas
RHHRA	Rede Hidrometeorológica da Região Autónoma dos Açores
SIG	Sistema de Informação Geográfica
s.l.	Sentido lato
SPRAçores	Sociedade de Promoção e Gestão Ambiental, SA
UNL	Universidade Nova de Lisboa
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
WPWLI	<i>Working Party on World Landslide Inventory</i>

Simbolos

ΔH	Deslocamento
ΔV	Varição Volumétrica
δ_v	Deformação Volumétrica da Amostra
δ_{ev}	Deformação Vertical
σ_n	Tensão Normal
τ	Tensão de Corte
φ	Ângulo de Atrito Interno
γ_a	Peso Volúmico Aparente
$\lambda (h)$	Variograma
A	<i>Ash</i> (camada de cinzas)
c	Coesão
c'	Coesão Efetiva
C_c	Coefficiente de Curvatura
c_u	Resistência Não Drenada
C_u	Coefficiente de Uniformidade
D_s	Diâmetro representativo do tamanho dos grãos do solo

F_H	Força Horizontal
F_{HI}	Intervalos de Tempo
G	Gradiente ou Declive da Ravina (decimal)
H	Altura
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
k_G	Coefficiente de Permeabilidade do Geotêxtil
k_s	Coefficiente de Permeabilidade do Solo
L	Altura de Coluna de Clastos Líticos; camada de lapilli
LL	Limite de Liquidez
L_f	Cama de Lapilli Final
LP	Limite de Plasticidade
m	Média Aritmética
N	Força Normal
O_s	Dimensão de Abertura de Filtro do Geotêxtil
P	Altura de Coluna de Clastos de Pedra-pomes
S	Seção da Amostra
s	Desvio Padrão
s^2	Variância
u	Pressão Intersticial
ω	Teor em Água
W_L	Limite de Liquidez
W_n	Força Estabilizadora
W_P	Limite de Plasticidade
W_R	Limite de Retração ou Consistência
W_t	Força Instabilizadora

1.Introdução

O tema abordado no presente trabalho surge na sequência de uma preocupação por parte do Centro de Monitorização e Investigação das Furnas (CMIF), que integra a Azorina - Sociedade de Gestão Ambiental e Conservação Natureza S.A. relativamente ao ravinamento de terrenos utilizados para plantações de árvores e espécies endémicas, à forte erosão superficial dos terrenos, à instabilidade de vertentes nas zonas contíguas a linhas de água e à crescente chegada de carga sólida à Lagoa das Furnas. Estas partículas são transportadas por arrastamento e em suspensão pelas águas que drenagem as bacias, provenientes dos terrenos circundantes à Lagoa das Furnas, em particular na zona SW, a zona do Vanzinho (Castelo Branco, São Miguel, Açores).

A área de estudo foi, no passado, utilizada para a atividade agrícola, nomeadamente para a agropecuária (zona de pasto para bovinos). Atualmente, com a aquisição de terrenos na bacia hidrográfica da ribeira do Rosal por parte da SPRAçores, o grande objetivo passa pela redução da erosão do solo e pela eliminação dos poluentes no solo com vista à recuperação da qualidade da água na Lagoa das Furnas. Este objetivo tem como estratégia a alteração do uso do solo através da implementação do Plano de Ordenamento da Bacia Hidrográfica da Lagoa das Furnas (POBHLF). Devido ao estado de eutrofização da Lagoa das Furnas, desde 2007 foram adquiridos cerca de 300 hectares de terrenos agrícolas e florestais, considerados como terrenos com um grande risco de escorrência de nutrientes (azoto e fósforo) para a referida lagoa, provenientes das fertilizações e estrumes utilizados nas explorações agrícolas da bacia hidrográfica, bem como dos excrementos do gado, causas principais da deterioração da qualidade da água da lagoa (Laboratório de Paisagem das Furnas, Furnas *Landlab*, 2012).

O estabelecimento do POBHLF e a aquisição dos terrenos levou à classificação de Paisagem Protegida das Furnas e à conceção de projetos e ações multissetoriais cujo objetivo principal era a recuperação da qualidade de água mas também a transformação e dinamização da paisagem. A minimização dos riscos geotécnicos era igualmente um objetivo a atingir.

O Laboratório de Paisagem das Furnas, que executa as medidas impostas pelo POBHLF e pela Área de Paisagem Protegida das Furnas, tem como referência a qualidade da paisagem e a sustentabilidade nas vertentes ecológica, económica, social, cultural e estética.

Desde julho de 2011 entrou em funcionamento o Centro de Monitorização e Investigação das Furnas (CMIF) que, atualmente, para além de acolher o centro de gestão e coordenar o projeto de recuperação da paisagem protegida da bacia hidrográfica da Lagoa das Furnas, promove atividades lúdicas e de recuperação ecológica, sendo também a sede do Parque Natural da ilha de São Miguel.

Algumas das linhas de erosão existentes nos terrenos do Vanzinho já foram alvo de intervenções e reabilitação de taludes nas zonas contíguas às linhas de água (construção de dissipadores de energia, sementeiras e plantações de flora nativa), tarefas inseridas no Plano de Ordenamento da Bacia Hidrográfica da Lagoa das Furnas, que tem como objetivo principal a recuperação da qualidade da água da lagoa, evitando a redução de cargas afluentes à lagoa. Como já foi referido, as causas mais diretas da eutrofização da Lagoa das Furnas, e da diminuição da profundidade da mesma estão relacionadas com o transporte da carga sólida dos terrenos limítrofes para a Lagoa das Furnas. A existência de precipitações intensas e concentradas, o rasteiro coberto herbáceo existente e a instabilidade dos solos (friáveis e constituídos maioritariamente por cinzas e pedra-pomes), são alguns dos fatores que propiciam a erosão dos solos através da escorrência superficial. É importante ainda salientar que, os solos da zona do Vanzinho foram alvo, no passado, de terraplenagens (alteram as propriedades do solo), para a criação de pastos.

Segundo Ponce Álvares e Pimenta (1998), a erosão hídrica dos solos e a produção de sedimentos tem sido alvo de uma preocupação crescente da gestão do uso do solo e da água.

Para Imeson & Curfs (s.d.), para o início de um processo de formação de ravinas ou barrancos é necessário que o limite relacionado com a resistência do solo à erosão seja ultrapassado pela força exercida através do fluxo de água de escorrência superficial. As ravinas ou barrancos correspondem a formas de erosão que normalmente se originam num tipo de material característico ou em campos agrícolas em que o solo superficial tem pouca coerência e existe a compactação do solo em profundidade.

1.1. Objetivos e metodologia

A presente dissertação, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Georrecursos), pela Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL) tem como principal objetivo a contribuição para a implementação de medidas de controlo e de correção dos processos de instabilização geotécnica existentes nos terrenos do Vanzinho (Castelo Branco, São Miguel, Açores). O estudo incidiu nestes terrenos, dado que a área do Vanzinho era prioritária, porque corresponde à região onde se localizam os ravinamentos ativos.

Assim, apresenta-se uma metodologia que se desenvolve em cinco etapas, que visa a identificação e previsão dos fenómenos de erosão e instabilidade geotécnica que ocorrem na área do Vanzinho, que tem por base a análise multivariada de dados para avaliar a correlação entre as propriedades físicas e mecânicas dos solos e a tipologia dos fenómenos observados.

- Etapa 1 – levantamento e caracterização de superfícies de instabilidade geotécnica;

- Etapa 2 – recolha de amostras para a caracterização das propriedades físico-mecânicas dos solos;
- Etapa 3 – ensaios laboratoriais para a caracterização das propriedades dos solos;
- Etapa 4 – análise estatística multivariada de dados para avaliação das correlações entre as propriedades dos solos e a tipologia dos fenómenos de instabilidade;
- Etapa 5 – identificação de áreas potenciais de instabilidade e definição de medidas de mitigação.

Primeira etapa - consiste no levantamento de campo das superfícies alvo de instabilização (os terrenos agrícolas) na área de estudo, num estudo pormenorizado das características morfológicas dos ravinamentos existentes (alguns não foram possíveis devido à inacessibilidade dos mesmos);

Segunda etapa - contempla a recolha de amostras de solo, intactas e remexidas, para posterior caracterização física e geotécnica dos solos da região, do ponto de vista físico e mecânico;

Terceira etapa - relativa à caracterização física e mecânica dos solos através da realização de ensaios laboratoriais (propriedades físicas e parâmetros de resistência ao corte), para avaliar preliminarmente as suas características geotécnicas e interpretar as causas dos fenómenos erosivos e instabilizadores;

Quarta etapa - consiste numa análise estatística univariada e multivariada das propriedades dos solos e tipologia dos fenómenos de instabilidade geotécnica observados para a identificação de áreas com potencial de instabilidade e relação entre os fenómenos de instabilidade geotécnica existentes;

Quinta etapa - relativa à apresentação de medidas de mitigação/correção para as áreas potenciais de instabilidade.

1.2. Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório, onde é realizada uma breve introdução à temática abordada na dissertação.

No segundo capítulo é efetuada uma caracterização geral do concelho da Povoação e da zona de estudo, focada nos enquadramentos geográfico, geomorfológico, geológico, hidrogeológico, geoestrutural e climático, com base em referências bibliográficas atualizadas. É também feita uma referência à sismicidade e vulcanismo histórico, sendo referidas as erupções históricas registadas no Vulcão das Furnas.

No terceiro capítulo descrevem-se os principais processos de instabilidade de vertentes e os processos erosivos lineares, relacionados com a erosão hídrica. São também abordados os principais agentes e causas dos movimentos de vertente e erosão superficial. São apresentadas medidas de estabilização de vertentes e controlo de erosão superficial que podem ser implementadas na região de estudo, tendo como base as características dos solos da região e a finalidade das mesmas. Descreve-se a amostragem realizada, as metodologias e as técnicas utilizadas para a obtenção das propriedades físicas e mecânicas dos terrenos da área de estudo, bem como as normas adotadas na realização dos ensaios laboratoriais. Por último, são descritos os conceitos teóricos relativos à análise estatística univariada, aos métodos da estatística multivariada e à krigagem multifásica (krigagem da indicatriz).

No quarto capítulo é descrita a metodologia e são definidos os critérios para a classificação das superfícies de instabilidade geológico-geotécnicas observadas. Apresentam-se e discutem-se os resultados da caracterização física e mecânica dos solos amostrados e tecem-se algumas considerações. A caracterização mecânica é efetuada por intermédio de ensaios de corte direto. As propriedades dos solos da área de estudo são caracterizadas estatisticamente tendo por base os resultados dos ensaios laboratoriais e a distância dos locais de amostragem às linhas de água, codificando as várias variáveis quantitativas e qualitativas. É realizada também uma análise estatística univariada e multivariada dos parâmetros dos solos, determinados, através de várias medidas utilizadas na análise multivariada de dados, classificando-se também os solos da área de estudo com base na Classificação Hierárquica Ascendente. Por último, é feita uma estimacão espacial da tipologia de solos obtida através da análise hierárquica.

No quinto capítulo, foi realizado um levantamento de campo para identificar as medidas de correção e controlo implementadas na região de estudo relativas aos processos de erosão superficial mencionados no capítulo três. Por último, apresentam-se e propõem-se algumas das medidas de estabilização de vertentes e controlo de erosão superficial a implementar na região de estudo, tendo como base as características da região em causa e a finalidade das mesmas.

Por fim, no sexto capítulo são tecidas as considerações finais do presente trabalho e apresentam-se recomendações para futuros desenvolvimentos no âmbito da temática estudada.

2. Caracterização da área de estudo: Castelo Branco, Furnas, ilha de São Miguel

No presente capítulo caracteriza-se a área de estudo nos contextos geográfico, geomorfológico, geológico, geoestrutural e hidrogeológico. Como a área de estudo está enquadrada numa zona de vulcanismo ativo e na fronteira de placas Núbia e Eurásia, será abordada sinteticamente a sismicidade regional e o vulcanismo histórico da ilha de S. Miguel, nomeadamente as erupções históricas de 1630 e 1439-43 (Pico do Gaspar), próximas da área de estudo.

2.1. Enquadramento geográfico

A área de estudo desenvolve-se no sector SE da ilha de São Miguel, uma das nove ilhas que integram o arquipélago do Açores (englobada no grupo oriental), inserindo-se em termos administrativos no concelho da Povoação, freguesia das Furnas (Figura 2.1). O número de habitantes do concelho da Povoação, em 2011, era de 6327 habitantes (Census, 2011) e apresenta uma área planimétrica de 110,3 km². A freguesia das Furnas apresenta, segundo os Census de 2011, um registo de 1439 habitantes e a área da freguesia é 70,2 km².

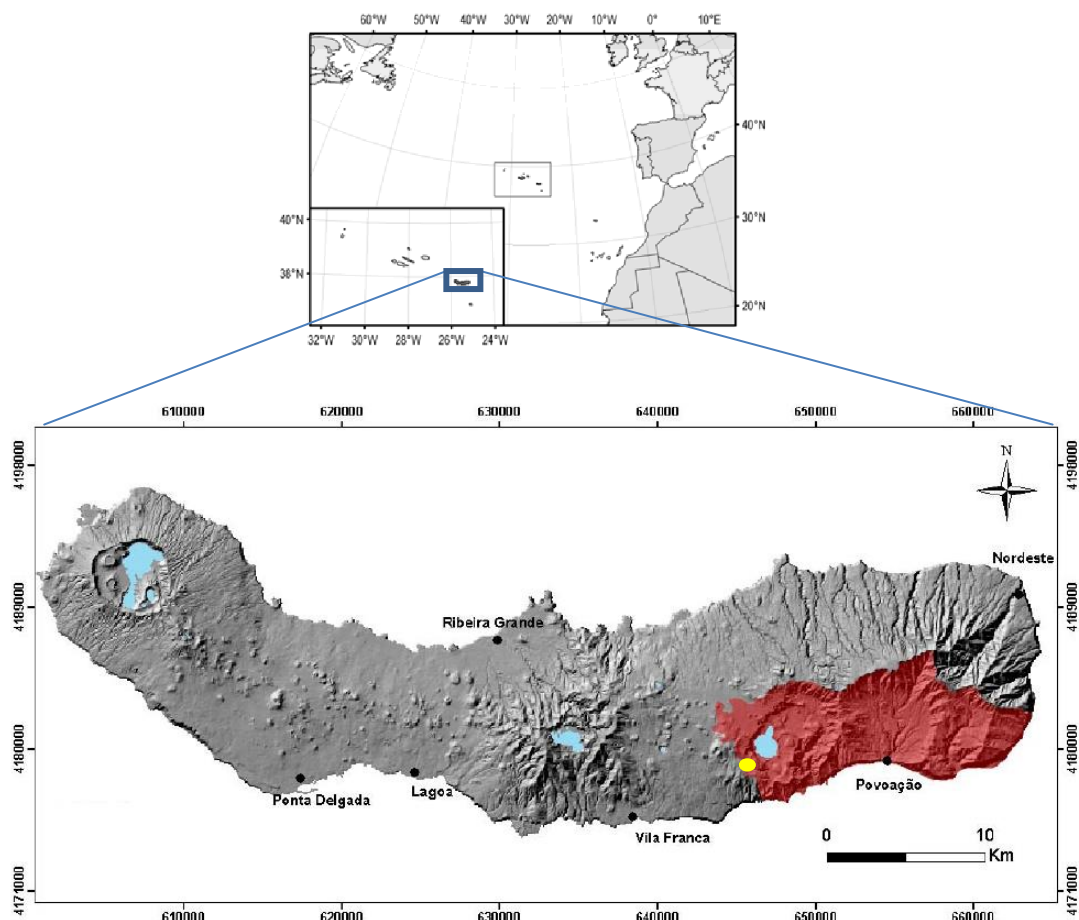


Figura 2.1 - Localização geográfica da ilha de São Miguel no arquipélago dos Açores e da área de estudo (elipse de cor amarela) no limite oeste do concelho da Povoação (sombreado vermelho) (adaptado de Amaral, 2011)

A área está inserida na zona do Vanzinho (Furnas), situado a SW da Lagoa das Furnas (Figura 2.2).

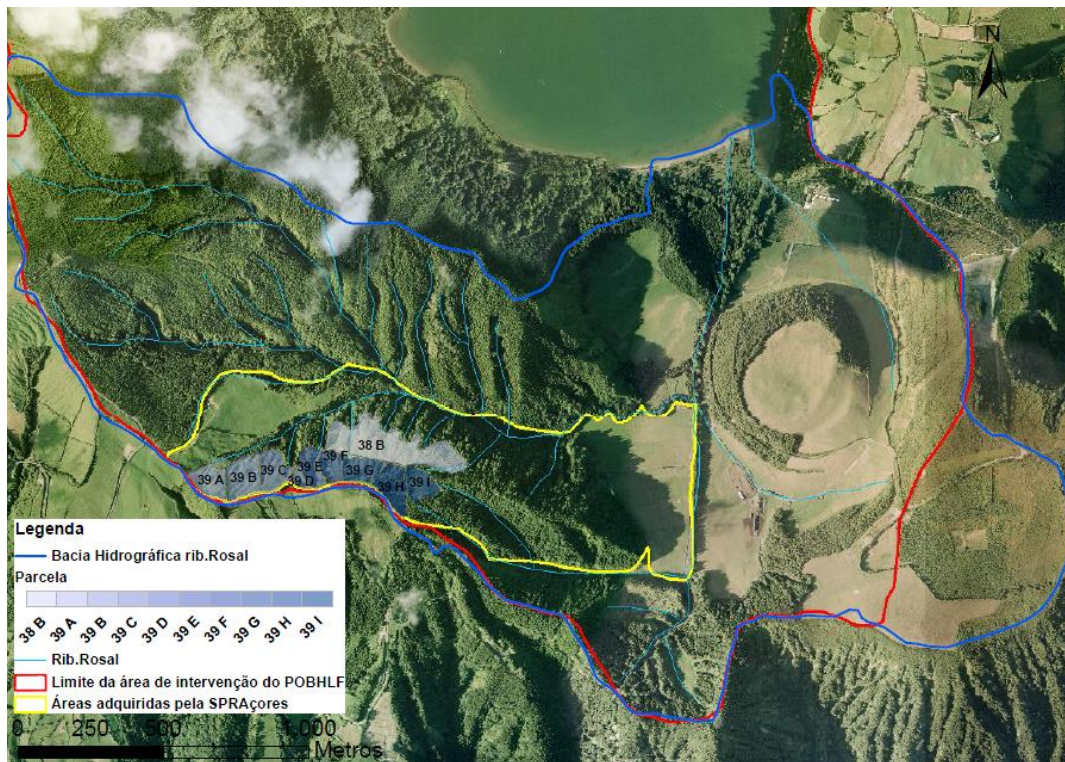


Figura 2.2 - Área de estudo a amarelo, zona do Vanzinho (Furnas), a SW da Lagoa das Furnas (escala 1:12500)

2.2. Enquadramento geomorfológico

A nível geomorfológico o concelho da Povoação apresenta uma complexidade natural devido à atividade eruptiva antiga e histórica responsável pela emissão de depósitos vulcânicos. Zbyszewski *et al.* (1958, 1959a) e Zbyszewski (1961) distinguem, para a ilha de São Miguel, oito unidades geomorfológicas (Figura 2.3), sendo o concelho da Povoação abrangido por quatro dessas oito unidades geomorfológicas. De W para E, destacam-se:

1. A parte do sector do Planalto da Achada das Furnas (4), que corresponde a uma zona aplanada que se localiza entre dois vulcões (Vulcão do Fogo e o Vulcão das Furnas);
2. O edifício vulcânico das Furnas (5);
3. O edifício vulcânico da Povoação (6);
4. Uma parte da Região da Tronqueira e do Nordeste (7).

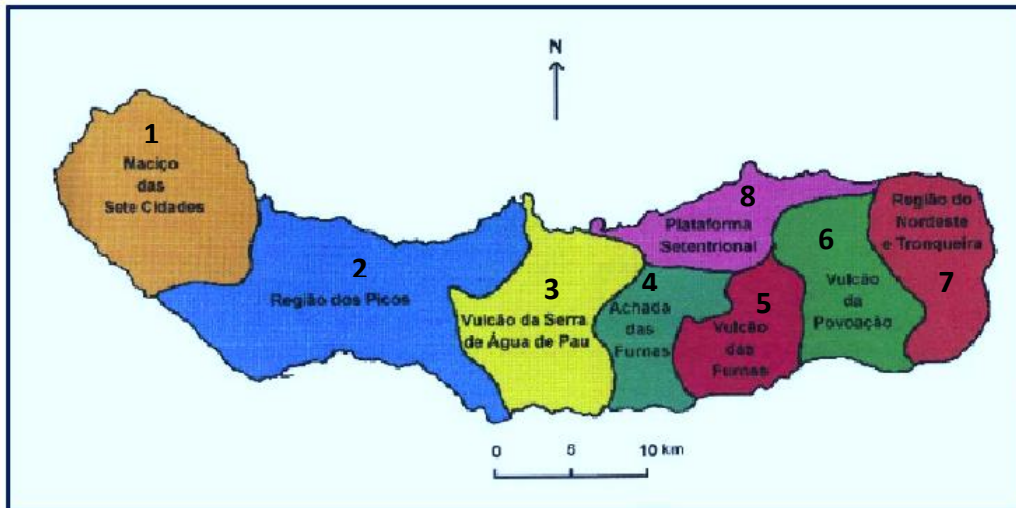


Figura 2.3 - Unidades geomorfológicas da ilha de São Miguel segundo Zbyszewski (1961) (Freire, 2006)

O Planalto da Achada das Furnas (4) apresenta uma altitude média variável entre os 400 m e os 500 m e corresponde a uma região cuja zona central está relativamente aplanada (Figura 2.4). Nesta região destaca-se a existência de cones de escórias e aglutinados (*spatter na terminologia inglesa*) na zona intermédia existente entre o Maciço de Água de Pau e o Vulcão das Furnas. Fazem parte deste Planalto inúmeros cones vulcânicos, instalados, por vezes, em fraturas locais, o *maar* da Lagoa do Congro e um alinhamento de pequenos domos traquíticos, com orientação predominante E-W (Zbyszewski *et al.*, 1958; França *et al.*, 2003).



Figura 2.4 - Vista de uma parte do Planalto da Achada das Furnas, com o Vulcão do Fogo em primeiro plano (fotografia de Coutinho in Cordeiro, 2011)

A unidade geomorfológica Vulcão das Furnas (5) engloba o vulcão central poligenético (Vulcão das Furnas) e localiza-se no sector leste da ilha de São Miguel (Figura 2.5). Deste vulcão faz parte um complexo de caldeiras cujo diâmetro máximo apresenta aproximadamente 6 km e cerca de 290 m de profundidade. As fases de formação do Vulcão das Furnas envolveram alguns processos de colapso e explosão (Gaspar *et al.*, 1995). Existe um contraste facilmente observável entre as vertentes N e S do Vulcão das Furnas, onde se notam declives mais suaves na parte norte da ilha de São Miguel, existindo ribeiras que se encontram profundamente encaixadas (como por exemplo, a Ribeira Funda). Além da Lagoa das Furnas,

encontram-se ainda, no interior da caldeira do referido vulcão, cones de pedra-pomes, cones vulcânicos intra-caldeira, *maars*, cones de escórias e de aglutinados, domos (Figura 2.6), fumarolas e nascentes de águas termais (França *et al.*, 2003).



Figura 2.5 - Vista geral do Vulcão das Furnas, a partir do Salto do Cavalo (fotografia de Coutinho *in* Cordeiro, 2011)

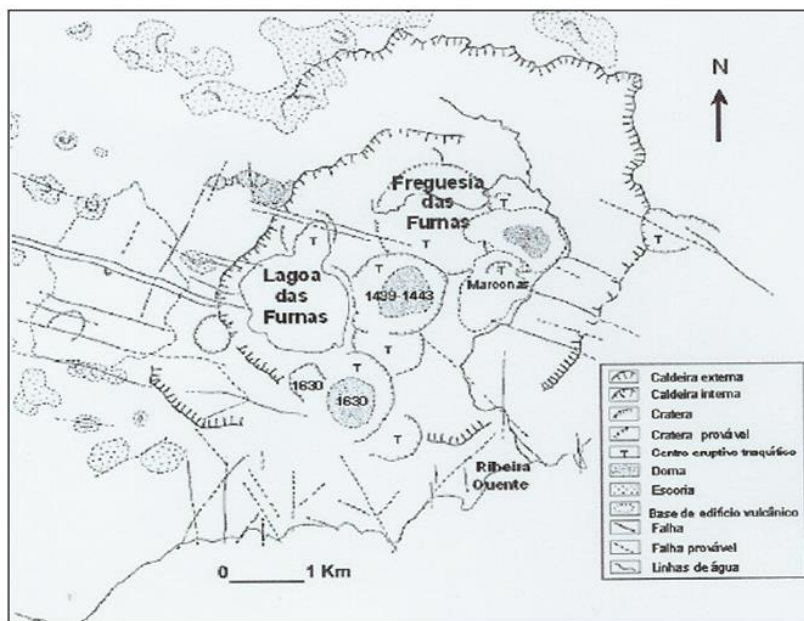


Figura 2.6 - Mapa morfoestrutural do Complexo Vulcânico das Furnas (adaptado de Gaspar *et al.*, 1995 por Freire, 2006)

A unidade geomorfológica Vulcão da Povoação (6) inclui um vulcão central com caldeira semicircular que se encontra aberta para o lado sul da ilha, tal como o Vulcão das Furnas. O interior da caldeira deste vulcão (Figura 2.7) está dividido nas várias lombas da Povoação através de um conjunto de linhas de água que se encontram, normalmente, profundamente encaixadas, e a convergir para o lado sul da ilha. As arribas litorais, a S, encontram-se bastante fraturadas e muito escarpadas, sendo de difícil acesso. Apresentam alturas variáveis entre os 200 e os 400 m e demonstram a existência de acidentes tectónicos de direção

predominante WNW-ESE, sendo menos frequentes os acidentes de direção E-W e N-S (Zbyszewski *et al.*, 1958, França *et al.*, 2003).



Figura 2.7 - Vista geral do Vulcão da Povoação de NW para SE (esquerda) e de E para W (direita) (fotografias de Coutinho *in* Cordeiro, 2011)

A Região da Tronqueira e do Nordeste (7) localiza-se na zona leste da ilha de São Miguel e encontra-se extremamente afetada pela erosão, apresentando as formas vulcânicas muito atenuadas (Figura 2.8). É uma região montanhosa, estando as “linhas de água intensamente encaixadas e separam alguns interflúvios basculados na direção do litoral” (França *et al.*, 2003). O ponto de maior altitude encontra-se aos 1105 m (Pico da Vara), sendo ainda possível destacar a Serra da Tronqueira, de orientação NW-SE, o Espigão do Galego (908 m) e o Pico do Bartolomeu (888 m) (França *et al.*, 2003).



Figura 2.8 - Vista geral de uma parte da Região da Tronqueira e dos vales encaixados (fotografia de Coutinho *in* Cordeiro, 2011)

O concelho da Povoação apresenta uma hipsometria diversificada, que varia desde a cota do nível do mar até aos 1104 m, no Pico da Vara (Figura 2.9). Tanto nas vertentes dos vulcões das Furnas e da Povoação, como na região da Tronqueira e do Nordeste, observam-se declives muito acentuados, chegando a atingir 86° (Figura 2.10) (Amaral, 2011).

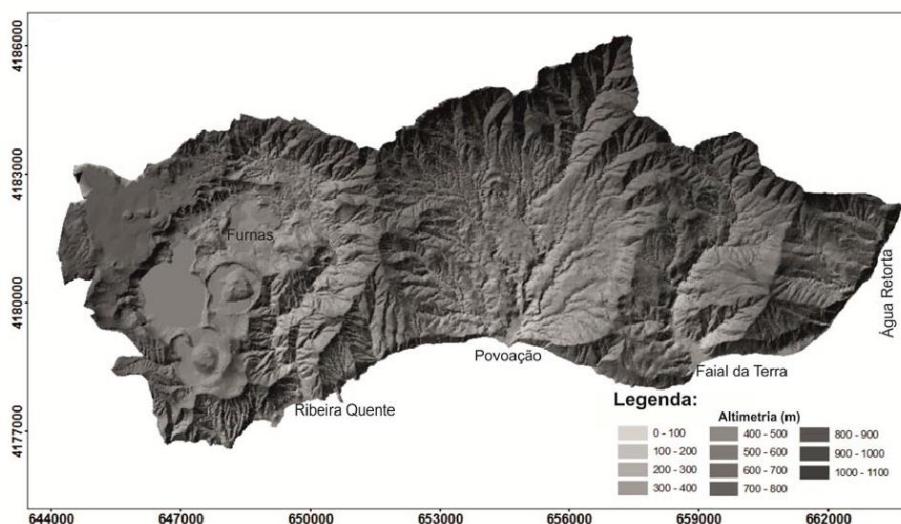


Figura 2.9 - Mapa hipsométrico do concelho da Povoação (Amaral, 2011)

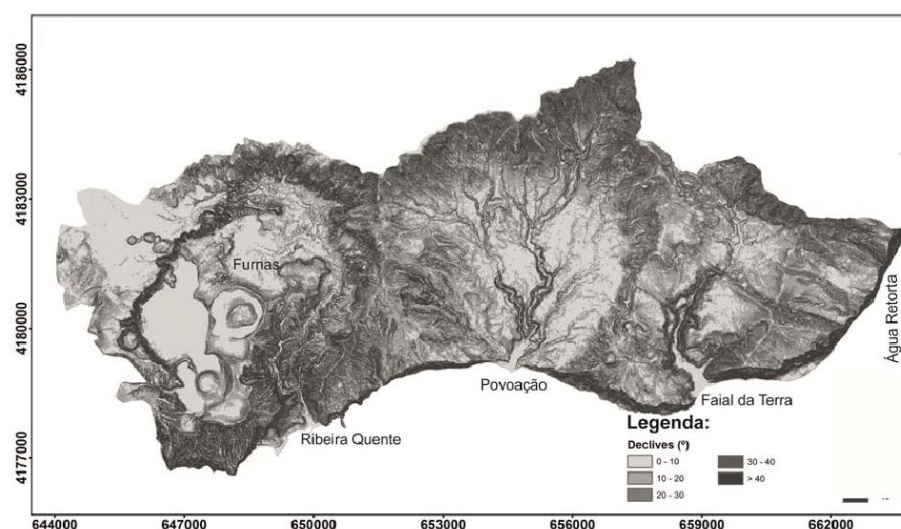


Figura 2.10 - Carta de declives do concelho da Povoação (Amaral, 2011)

Os episódios vulcânicos cujos estilos eruptivos explosivos promoveram a formação de espessuras significativas de material piroclástico de queda, que nalguns casos atinge algumas dezenas de metros, sendo as propriedades físicas e mecânicas do material distintas (Amaral *et al.*, 2009a).

2.3. Enquadramento geológico

Zbyszewski *et al.* (1958 e 1959a) elaboraram a primeira carta geológica da ilha de São Miguel, na escala 1:50000, fundamentando-se unicamente em critérios de carácter petrográfico. Para Forjaz (1984, 1999), distinguem-se na ilha de São Miguel seis unidades vulcanoestratigráficas, sendo elas por ordem cronológica decrescente (Figura 2.11 a): Complexo Vulcânico do Nordeste (6), Complexo Vulcânico da Povoação (5), Complexo Vulcânico das Furnas (4),

Complexo Vulcânico das Sete Cidades (3), Complexo Vulcânico do Fogo (2) e Complexo Vulcânico dos Picos (1).

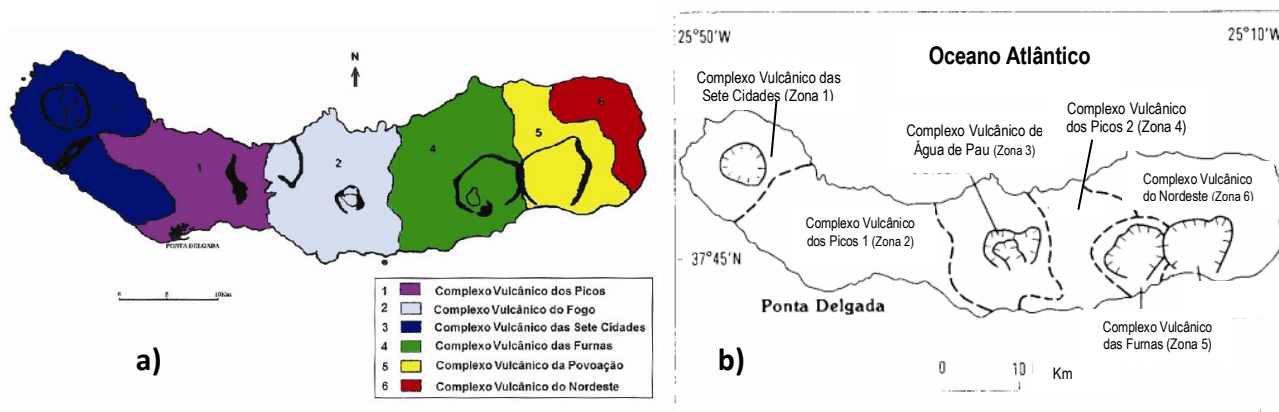


Figura 2.11 - Carta Vulcanológica da ilha de São Miguel. a) Adaptado de Forjaz, (1984); b) Adaptado de Moore, (1991b)

Moore (1991a) também elaborou um mapa geológico da ilha de São Miguel, distinguindo também seis complexos vulcânicos (Figura 2.11 b), tendo como base datações absolutas atualizadas (Moore, 1991b), embora a delimitação e a ordenação sequencial desses complexos vulcânicos seja discordante da que foi adotada por Forjaz (1984).

De seguida será dada ênfase aos dois Complexos Vulcânicos que mais abrangem o concelho da Povoação, segundo Forjaz, (1984): Complexos Vulcânicos da Povoação e das Furnas.

Na região E e NE do concelho da Povoação encontram-se um conjunto de sequências lávicas relativas ao complexo Vulcânico do Nordeste (Zbyszewski, 1961), e correspondentes à base da coluna lito-estratigráfica.

Subindo na estratigrafia do concelho, desenvolveu-se o chamado complexo Vulcânico da Povoação, adjacente ao Complexo Vulcânico do Nordeste, que é constituído pela alternância de escoadas lávicas de natureza basáltica e por produtos vulcanoclásticos que marcaram a atividade do vulcão da Povoação. O Complexo Vulcânico da Povoação apresenta a sua caldeira truncada no seu nível superior e aberta para sul, para o mar, devido à existência de fenómenos de colapso e erosão. Guest *et al.*, (1999) sugerem que a ação da erosão marinha terá originado a abertura para o mar, e, Forjaz (1994) sugere que esta abertura terá surgido “após o colapso do flanco sul do vulcão da Povoação, controlado por uma tectónica de direção E-W”.

A parede W da caldeira da Povoação encontra-se confinada ao estratovulcão das Furnas, cujos produtos vulcânicos cobrem densamente o material projetado pelo Vulcão da Povoação. Segundo Moore (1990, 1991c) o ignimbrito da Povoação é correlacionável com o evento vulcânico responsável pela formação da caldeira das Furnas, tal como algumas escoadas lávicas basálticas e cones estrombolianos observáveis na caldeira da Povoação.

O Complexo Vulcânico das Furnas faz fronteira com dois complexos da ilha (a Oeste com o Complexo Vulcânico do Fogo e a Este com o Complexo Vulcânico da Povoação) e é constituído por alguns mantos lávicos pontuais que estão relacionados com a edificação do seu edifício vulcânico e, também por depósitos piroclásticos de queda e de fluxo, que foram resultado de processos magmáticos e hidromagmáticos, predominantemente do tipo explosivo e natureza traquítica (Amaral, 2011).

Fora do perímetro definido pelas caldeiras deste vulcão existem também produtos resultantes da atividade vulcânica, tais como, depósitos pomíticos de queda e de fluxo (Guest *et al.*, 1999).

Nos últimos 5000 anos ocorreram dois episódios de subsidência (Guest *et al.*, 1994, 1999) que foram responsáveis pela origem das áreas deprimidas onde se encontram atualmente o lugar da freguesia das Furnas (Booth *et al.*, 1978) e a Lagoa das Furnas (Zbyszewski, 1961).

Segundo Moore (1990), a edificação do Vulcão central das Furnas iniciou-se há 100.000 anos, enquanto que a maioria dos afloramentos são posteriores a uma escoada lávica datada de 48.000 ± 4.000 anos.

Nos últimos 5000 anos ocorreram, no Vulcão das Furnas, pelo menos dez erupções vulcânicas explosivas, tendo a última erupção ocorrida em 1630, localizando-se o centro eruptivo deste episódio, segundo Booth *et al.* (1978), na Cova da Burra/Diogo Preto. Para Cole *et al.* (1995) e Guest *et al.* (1999), o local sugerido para o centro eruptivo, corresponde a um local na extremidade sul da caldeira atual. Segundo Queiroz *et al.* (1995) a primeira erupção ocorrida na ilha de São Miguel, terá ocorrido entre os anos de 1439-1443, na região que atualmente é designada por Pico do Gaspar/Lagoa Seca, após o início do povoamento da ilha, o que vem contrariar a proposta de outros diversos autores (Weston, 1964; Zbyszewski, 1961, 1963; Booth *et al.*, 1978; Forjaz, 1984), que defendem que a sua localização corresponde ao Maciço das Sete Cidades (França *et al.*, 2003).

As duas erupções referidas (1439-1443 e 1630) serão caracterizadas sinteticamente mais à frente neste capítulo.

Na figura seguinte (Figura 2.12) apresenta-se a litologia presente na área de estudo, no Vanzinho (SW da Lagoa das Furnas), produzida à escala 1:2500, segundo a carta geológica elaborada por Moore (1991).

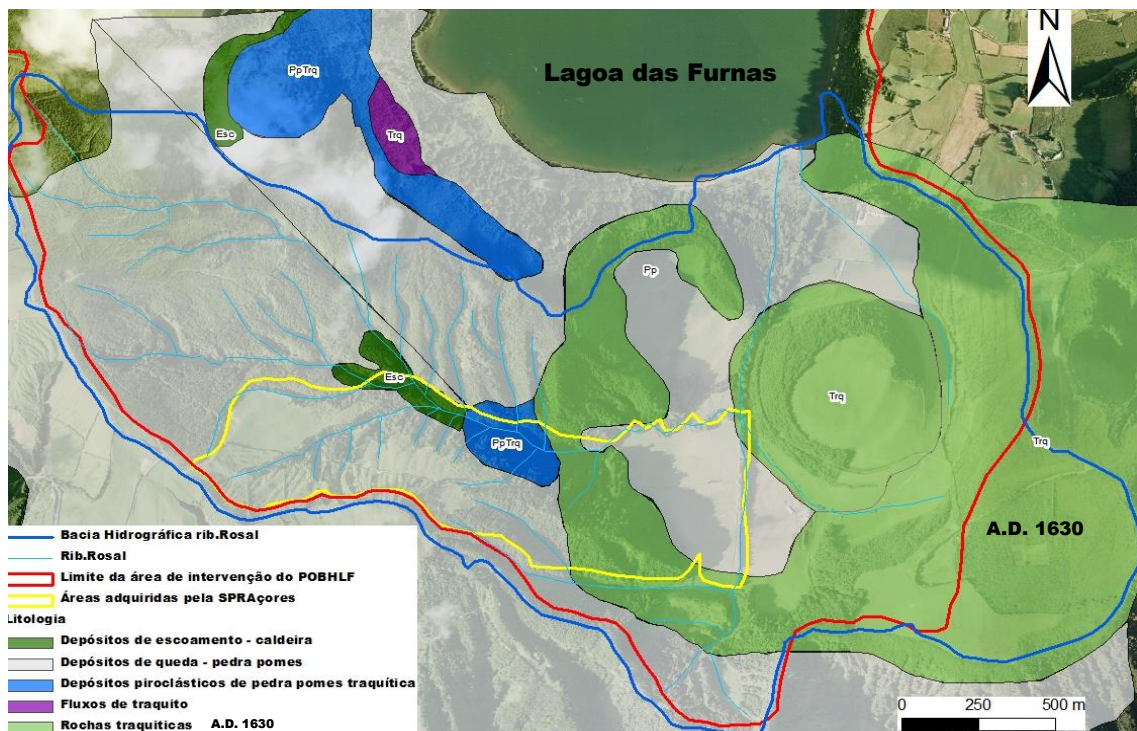


Figura 2.12 - Litologia da área de estudo, no Vanzinho (SW da lagoa das Furnas), segundo a carta geológica elaborada por Moore (1991)

É de salientar que as rochas traquíticas presentes (verde claro) correspondem ao material traquítico resultante da erupção de 1630. Esta erupção foi a responsável pela litologia encontrada na região do Vanzinho.

2.4. Enquadramento tectónico

Os Açores situam-se no “Ponto Triplo dos Açores” onde as placas litosféricas da América do Norte, da Eurásia e Núbia se encontram. Do ponto de vista geodinâmico, são identificadas três estruturas principais (Figura 2.13): a crista média atlântica, a zona de cisalhamento dos Açores e a Falha da Glória. A crista média atlântica é recortada por diversas falhas transformantes servindo de fronteira, a Oeste, entre a placa Norte Americana e as placas Eurásia e Núbia. Apresenta uma orientação NE-SW, a Sul dos Açores e, praticamente N-S, a Norte e um movimento divergente relativamente a uma zona axial. A zona de cisalhamento dos Açores corresponde a uma faixa de deformação complexa, que estabelece a ligação entre as placas Eurásia e Núbia, dominada pelos efeitos da tectónica global e da atividade vulcânica. A falha da Glória corresponde a um vale submarino, apresentando uma importante atividade sísmica e comportando-se como uma falha transformante com movimentos de desligamento direito (Trota e Pereira, 2013).

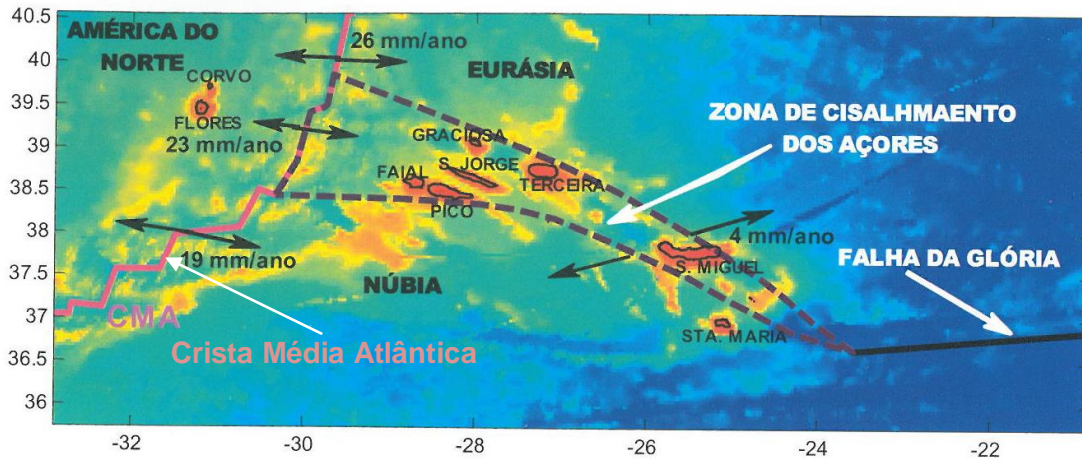


Figura 2.13 - Principais estruturas tectónicas da região dos Açores (Trota e Pereira, 2013)

Carmo (2004) elaborou uma carta tectónica referente à região da Povoação e do Nordeste (Figura 2.14). O concelho da Povoação encontra-se sob a influência de importantes sectores sismogénicos, sendo esse facto comprovado através das expressões morfológicas de assinatura tectónica regional e local, da sismicidade instrumental e da documentação histórica. Isto deve-se devido à presença das estruturas tectónicas regionais já mencionadas, mas também devido à presença dos sistemas vulcânicos da Achada das Furnas, Furnas e Povoação, e à proximidade ao complexo vulcânico do Fogo.

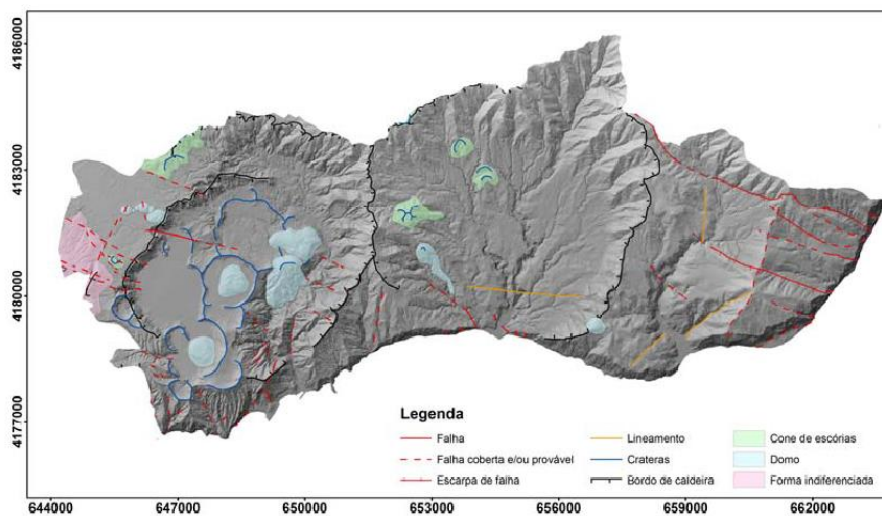


Figura 2.14 - Esboço vulcano-tectónico do concelho da Povoação (adaptado de Carmo, 2004)

Relativamente às estruturas tectónicas (Figura 2.15) existentes na área de estudo (Freguesia das Furnas), existem dois importantes sistemas de fraturas. Um dos sistemas cruza o edifício vulcânico, apresentando uma orientação WNW-ESSE e exibe uma componente normal associada a uma componente de desligamento direito. A orientação de alguns vales sugere a existência de falhas de orientação E-W. O outro sistema, observável na costa Sul, desde Amoras até à Ribeira Quente, caracteriza-se pela existência de falhas de direção N-S e NNE-SSW. Existe também uma outra estrutura distensiva de direção NW-SE paralela ao sistema de fraturas regional do *Rifte* da Terceira (Guest *et al.*, 1999).

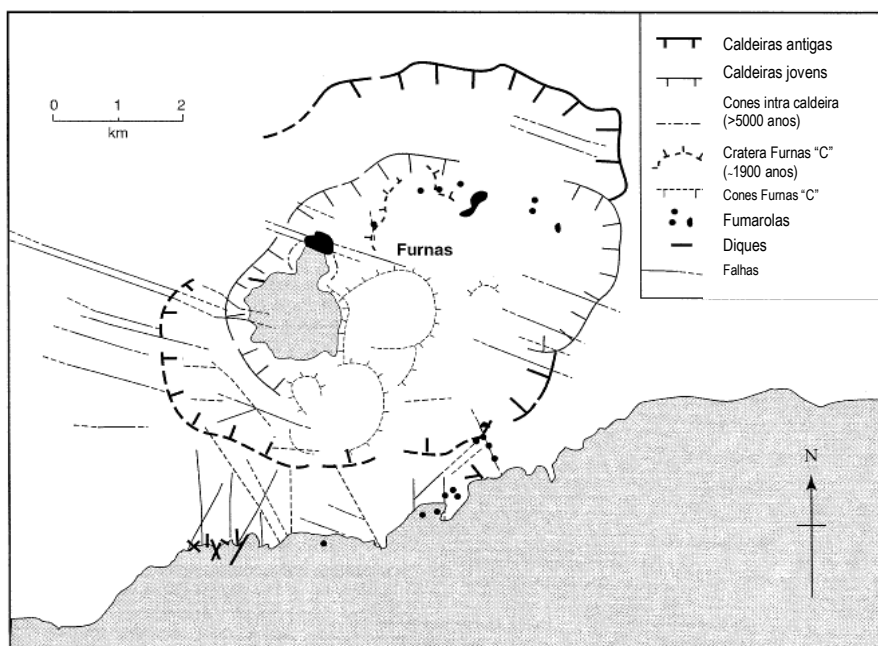


Figura 2.15 - Mapa esquemático das estruturas tectónicas do Vulcão das Furnas e a distribuição dos campos de fumarolas (adaptado de Guest *et al.*, 1999)

2.5. Enquadramento hidrológico e hidrogeológico

O concelho da Povoação apresenta um regime hidrológico superficial e sub-superficial controlado por vários fatores naturais, tais como, a topografia local, a tectónica regional e a geologia regional. Assim, as características da rede de drenagem são dependentes das características da área em que se inserem, sendo o reflexo destas.

O concelho da Povoação apresenta uma densa rede de drenagem, apresentando vales profundos e encaixados, estando as linhas de água normalmente instaladas segundo um padrão dendrítico ou arborescente, desaguando no mar (Figura 2.16).

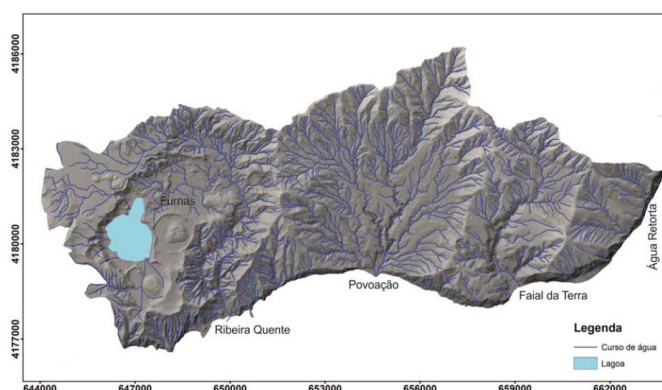


Figura 2.16 - Rede de drenagem do concelho da Povoação (Amaral, 2011)

As principais bacias hidrográficas do concelho correspondem às bacias da Ribeira Quente, Povoação e Faial da Terra, sendo exorreicas e apresentando todas um regime permanente. O regime hidrológico é considerado torrencial, sendo caracterizado por respostas muito rápidas,

nas situações de precipitação muito intensa e concentrada no tempo, provocando por várias situações a destruição de equipamentos, edifícios e estradas. Este regime deve-se à tipologia das bacias, às áreas de contribuição, ao elevado declive longitudinal dos cursos de água, à litologia, à cobertura vegetal e ao regime pluviométrico (Amaral, 2011).

A circulação da água subterrânea é um processo dependente da tectónica da região e da litologia dos aquíferos, cuja permeabilidade é variável conforme o tipo de litologia. Nas regiões vulcânicas é comum existirem barreiras que funcionam como barreiras impermeáveis ou pouco permeáveis, dificultando a circulação livre da água subterrânea. A existência de descontinuidades impermeáveis pode alterar o regime do fluxo das águas subterrâneas, originando a emergência de nascentes nas vertentes dos aparelhos vulcânicos (Cruz, 2004).

Nas ilhas vulcânicas existem dois tipos de aquíferos: os aquíferos de base (limitados perifericamente pelo mar) e os aquíferos suspensos ou de altitude. Os primeiros estão associados à zona saturada, e correspondem à camada lenticular de água doce, menos densa, que flutua sobre a água salgada, mais densa. Este tipo de aquífero depende da precipitação ou de uma suposta transferência hídrica desde aquíferos de altitude existentes. Os segundos situam-se na zona não saturada do solo, sendo associados a níveis impermeáveis sem continuidade lateral significativa (Costa, 2006).

De acordo com vários critérios de natureza geológica, tais como, a estratigrafia, a litologia e os condicionamentos tectónicos, foram definidos para a ilha de São Miguel seis sistemas aquíferos (Figura 2.17). São eles: Sete Cidades (1), Ponta Delgada-Fenais da Luz (2), Água de Pau (3), Achada (4), Furnas-Povoação (5) e Nordeste-Faial da Terra (6).



Figura 2.17 - Sistemas aquíferos da ilha de São Miguel (adaptado de Cruz, 2001 in Cordeiro, 2011)

A tabela 2.1 apresenta uma breve caracterização dos sistemas aquíferos existentes no concelho (sistemas aquíferos da Achada, Furnas-Povoação e Nordeste-Faial da Terra).

Tabela 2.1 - Caracterização dos sistemas aquíferos do concelho da Povoação (adaptado de Cruz, 2001 in Costa, 2006)

Sistema aquífero	Área (km ²)	Litologia dominante	Limites	Características gerais	Fácies química
Achada	71,68	Escoadas lávicas basálticas s.l., cones de escória e cobertura de piroclastos indiferenciados	Limites das formações geológicas e a sua base corresponde ao limite inferior da lenticula de água doce	Sistema aquífero misto, basal e de altitude, constituído predominantemente por aquíferos fissurados. Os aquíferos suspensos ou de altitude são descontínuos ou estão conectados hidraulicamente aos aquíferos de base, porosos e fissurados. São aquíferos dependentes da existência de níveis de permeabilidade muito reduzida ou de aparelhos vulcânicos secundários com volume significativo do ponto de vista hidrogeológico.	Fácies cloretada sódica, a bicarbonatada sódica e a cloretada bicarbonatada sódica cálcica
Furnas-Povoação	90,86	Escoadas lávicas e domos traquíticos, depósitos piroclásticos (pedra pomes, escoadas piroclásticas, surges), escoadas lávicas basálticas s.l., <i>mudflows</i> e cobertura piroclástica indiferenciada	Limites das formações geológicas e a sua base corresponde ao limite inferior da lenticula de água doce	Sistema aquífero misto basal e de altitude, constituído por aquíferos porosos e fissurados. Os aquíferos suspensos ou de altitude são descontínuos ou estão conectados hidraulicamente aos aquíferos de base que são porosos e fissurados. São aquíferos dependentes da existência de níveis de permeabilidade muito reduzida ou de aparelhos vulcânicos secundários com volume significativo do ponto de vista hidrogeológico.	Predomínio da fácies bicarbonatada sódica e a fácies bicarbonatada sódica magnesiânica menos representativa
Nordeste-Faial da Terra	166,41	Escoadas lávicas e depósitos piroclásticos basálticos subaéreos e intercalados, ostentando um grau de alteração superior aos restantes sistemas de aquíferos	Limites das formações geológicas e a sua base corresponde ao limite inferior da lenticula de água doce	Sistema aquífero misto, basal e de altitude, constituído predominantemente por aquíferos fissurados. Os aquíferos suspensos ou de altitude são descontínuos ou estão conectados hidraulicamente aos aquíferos de base que são porosos e fissurados e estão dependentes da existência de níveis de permeabilidade muito reduzida.	Predomínio das fácies cloretada sódica a bicarbonatada sódica, da bicarbonatada sódica cálcica, e, a fácies bicarbonatada cloretada sódica menos representativa

A nível hidrogeológico, o concelho da Povoação apresenta um conjunto de exsurgências de regime permanente que são provenientes de aquíferos de altitude e que fazem parte do sistema aquífero Furnas-Povoação (Cruz, 2004). O regime hidrológico é temporário em certas vertentes (de cotas mais baixas), sobretudo onde existe o contacto entre os depósitos vulcânicos desagregados e os materiais rochosos ou os depósitos finos (cinzas e paleosolos), que impedem a circulação livre das águas subterrâneas.

2.6. Sismicidade histórica

A atividade vulcânica e o registo sísmico existente no Arquipélago dos Açores são resultado do seu enquadramento geotectónico, visto que a Região dos Açores se encontra inserida no “Ponto Triplo dos Açores”, zona de ligação das Placas Euroasiática, Norte Americana e Núbia. A atividade sísmica está associada tanto à tectónica ativa do arquipélago, como à atividade

vulcânica ocorrida, visto que os sismos são por vezes numerosos (pré-eruptivos ou sin-eruptivos) (Nunes *et al.*, 2004).

As principais falhas ativas existentes na Região dos Açores são responsáveis pela atividade sísmica de natureza tectónica existente nos Açores. Esta exprime-se usualmente sob a forma de um elevado número de sismos de magnitude inferior a 3, os micro-sismos. Essa atividade sísmica está associada à Falha Glória, à zona de cisalhamento dos Açores e à Crista Média Atlântica (França *et al.*, 2003).

No entanto, periodicamente, os Açores são afetados por sismos de maior magnitude, moderados a fortes, causadores de impactos tanto económicos, como materiais, através da destruição de edifícios.

As localizações epicentrais para os principais sismos históricos ocorridos nos Açores podem ser observadas na figura 2.18. Na tabela 2.2 faz-se referência à intensidade dos principais sismos históricos ocorridos nos Açores, às áreas mais afetadas e aos principais efeitos registados.

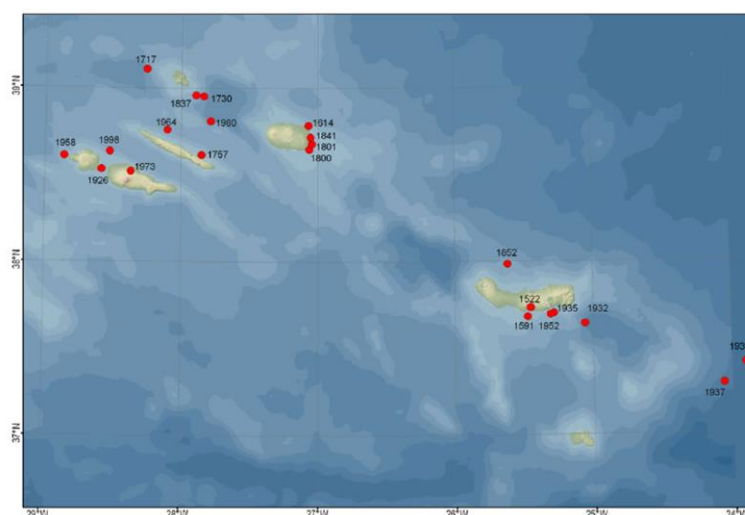


Figura 2.18 - Sismos históricos registados no Arquipélago dos Açores (CVARG, 2014)

Desde o povoamento das ilhas, os eventos sísmicos registados nos Açores já foram responsáveis por mais de 6000 mortes (Tabela 2.2). Pode-se destacar, de entre os eventos mais significativos, o sismo de 22 de Outubro de 1522, o mais catastrófico que afetou a ilha de S. Miguel, que destruiu o centro de Vila Franca do Campo, ceifando indiretamente a vida a cerca de 5000 pessoas, e os sismos de 1614 na Praia da Vitória (ilha da Terceira) e de 1757 na Calheta (ilha de São Jorge), nos quais também resultaram, indiretamente, muitas mortes (Cordeiro, 2011; França *et al.*, 2003).

Tabela 2.2 - Principais sismos destrutivos ocorridos nos Açores desde o povoamento (adaptado de Escuer, 2006 in Trota, 2009)

Data	Ilha	Intensidade (EMS-98)	Áreas mais afetadas	Efeitos registados
22.10.1522	São Miguel	X	Vila Franca do Campo	5000 mortos, grande destruição
17.05.1547	Terceira	VII	Biscoitos, Altares e Raminho	Algumas mortes
26.07.1591	São Miguel	VIII-IX	Vila Franca do Campo	Muitas mortes, grande destruição
24.05.1614	Terceira	X	Praia da Vitória	200 mortos, muitos edifícios destruídos
09.06.1647	Terceira	VII	Angra do Heroísmo	Algumas mortes, muitos edifícios destruídos
13.06.1730	Graciosa	VII	Luz e Praia	Quase total destruição
09.07.1757	São Jorge	X	Calheta	1000 mortos, grande destruição
21.01.1837	Graciosa	VII	Luz e Praia	Quase total destruição
15.06.1841	Terceira	IX	Praia da Vitória	Muita destruição
16.04.1852	São Miguel	VIII	Sete Cidades	9 mortos, pessoas feridas, grande destruição
31.08.1926	Faial	IX	Horta	20 mortos, 200 feridos, grande destruição
05.08.1932	São Miguel	VIII	Povoação	Pessoas feridas, edifícios destruídos
26.04.1935	São Miguel	IX	Povoação	1 morto, grande destruição
21.11.1937	Santa Maria	VII*	Santo Espírito	Sem informação
08.05.1939	Santa Maria	VII*	Santo Espírito	Sem informação
29.12.1950	Terceira	VII	Aqualva	Muitos edifícios destruídos
12.01.1951	Terceira	VI	Angra do Heroísmo	Prejuízos não estruturais
26.06.1952	São Miguel	VIII	Ribeira Quente	Mais de 600 sem abrigo, grande destruição
12.02.1964	São Jorge	VIII	Velas e Rosais	Grande destruição
23.11.1973	Pico	VIII	Santo António	Grande destruição
01.01.1980	Terceira	VIII	Doze Ribeiras e Angra do Heroísmo	59 mortos, 400 feridos, colapso de estruturas
26.06.1989	São Miguel	VII	Vila Franca do Campo	Prejuízos em edifícios
09.07.1998	Faial	VIII	Ribeirinha	8 mortos, mais de 100 feridos, colapso de estruturas

*Valores na Escala de Mercalli-Sieberg, EMS (Ferreira, 1955).

Para finalizar, com a integração de toda a informação macrossísmica obtida, independentemente da sua natureza tectónica ou vulcânica, Silveira (2002) obteve para a ilha de São Miguel a carta de intensidades máximas históricas global (Figura 2.19). A área de estudo está enquadrada numa região com intensidade máxima histórica de grau IX (escala de Mercalli Modificada).

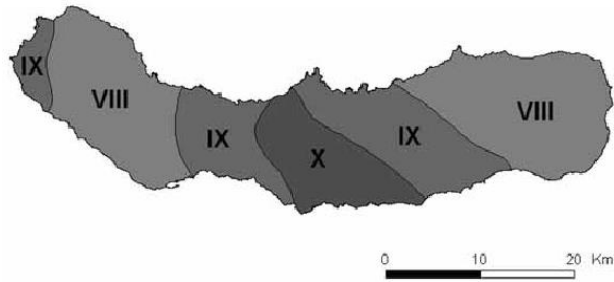


Figura 2.19 - Carta de intensidades máximas históricas para a ilha de S. Miguel, integrando dados relativos aos sismos de natureza tectónica e aqueles associados a fenómenos vulcânicos (Silveira, 2002)

2.7. Vulcanismo: erupções de 1630 e 1439-43 (Pico do Gaspar, Furnas)

Como já foi mencionado, dado o seu enquadramento geotectónico, a região dos Açores apresenta uma importante atividade vulcânica e uma notável sismicidade. A atividade vulcânica exprime-se, particularmente, ao longo da Crista Médio-Atlântica e do Rift da Terceira.

Na figura 2.20 estão localizadas as principais erupções vulcânicas ocorridas nos Açores desde o povoamento, segundo Madeira (1998), sendo incluídas tanto as erupções terrestres, como as submarinas. A tabela 2.3 sintetiza as principais erupções vulcânicas ocorridas nos Açores. A sombreado amarelo estão as erupções vulcânicas ocorridas na proximidade da área de estudo (Vanzinho).

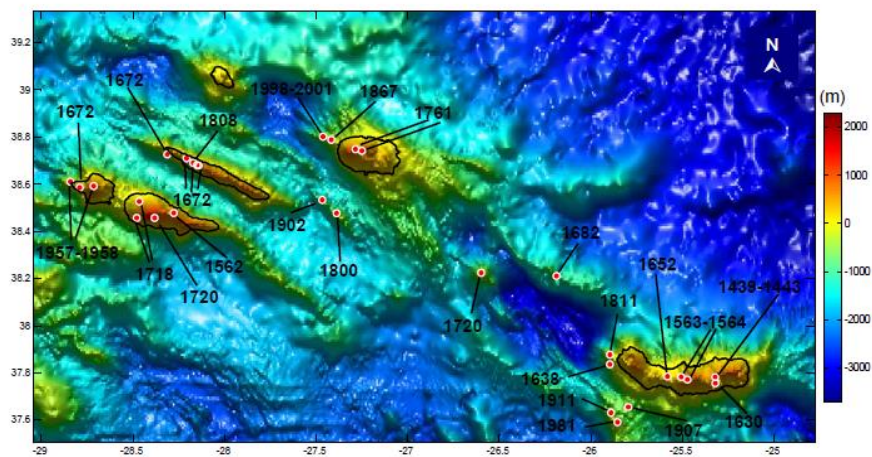


Figura 2.20 - Principais erupções vulcânicas ocorridas nos Açores desde o povoamento (adaptado de Madeira, 1998 in Trota, 2009)

As erupções ocorridas foram, maioritariamente, básicas e predominantemente efusivas. No entanto, há a registar algumas erupções de natureza ácida e com características de carácter subpliniano a pliniano ou hidromagmático, na ilha de São Miguel no ano de 1563 (Lagoa do Fogo) e as erupções subaéreas históricas localizadas na caldeira das Furnas, em 1439-43 e 1630 (Queiroz *et al.*, 1995; França *et al.*, 2003).

Os últimos eventos eruptivos ocorridos nos Açores foram de natureza submarina e basáltica. Nos últimos 60 anos, há a destacar os eventos de 1957/58 nos Capelinhos, na extremidade ocidental da ilha do Faial e de 1998/2001, a cerca de 8,5 km para NW da Ponta da Serreta, ao largo da ilha Terceira. Esta última erupção foi intermitente sendo caracterizada por uma alternância de emissão de bolhas de gases e de projeção de piroclastos finos e de lavas em almofada, que atingiram a superfície da água do mar (Gaspar *et al.*, 2001).

Tabela 2.3 - Principais erupções vulcânicas ocorridas nos Açores desde o povoamento (adaptado de Madeira, 1998 in Trota, 2009)

Data	Ilha	Localização
1439-1443	São Miguel	Pico do Gaspar, Furnas
1562-1564	Pico	Cabeços do Fogo
1563-1564	São Miguel	Lagoa do Fogo e Pico Queimado
1580	São Jorge	Ribeira do Almeida; Mistério da Queimada; Ribeira do Nabo; Bocas
1630	São Miguel	Lagoa Seca, Furnas
1638	No mar	São Miguel; Ponta da Candelária
1652	São Miguel	Pico do Fogo I/II
1672-1673	Faial	Cabeço do Fogo e Pincarito
1682	No mar	São Miguel; entre os Mosteiros e o Banco D. João de Castro.
1718	Pico	S. João, Lomba de Fogo e Cabeços de Cima e de Baixo
1720	Pico	Cabeço do Soldão
1720	No mar	Terceira; Banco D. João de Castro
1761	Terceira	Pico das Caldeirinhas
1800-1801	No mar	São Jorge; Ponta do Topo
1808	São Jorge	Pico do Pedro
1811	No mar	S. Miguel; Ponta da Ferraria ilha Sabrina
1867	No mar	Terceira; Serreta
1902	No mar	São Jorge; Ponta do Topo
1907	No mar	São Miguel; a sul da costa sul da ilha
1911	No mar	São Miguel; Banco do Mónaco
1957-1958	Faial	Capelinhos e Caldeira
1963	No mar	Pico; Cachorro
1964	No mar	S. Jorge; oeste das Velas.
1981	No mar	Mar de Prata
1999-2001	No mar	Terceira; oeste da Serreta

De seguida é feita uma referência às duas erupções históricas ocorridas na caldeira das Furnas, localizadas próximas da área de estudo (Vanzinho).

A atividade eruptiva mais recente na caldeira das Furnas (área de estudo inserida na elipse vermelha da Figura 2.21) está representada pelas erupções históricas de 1439-43 (Pico do Gaspar) (circulo laranja da Figura 2.21) e de 1630 (circulo preto da Figura 2.21), ambas de natureza freatomagmática, sub-plinianas, caracterizadas pela extrusão de um domo traquítico na sua fase terminal. A primeira incluiu uma fase de atividade explosiva que terá coberto o terreno do Vanzinho de cinzas, seguida de fluxo piroclástico; a segunda incluiu uma grande

cobertura de piroclastos de queda, fundamentalmente pedra-pomes e líticos, causando uma grande devastação e perda de vidas humanas.

O Vulcão das Furnas entrou em erupção dez vezes nos últimos 5000 anos. No entanto, as erupções não estão distribuídas de forma uniforme no tempo. Com o objetivo de determinar a probabilidade de uma futura erupção, Moore (1990) com base no número de erupções ocorridas ao longo dos últimos 5000 anos, determinou uma ocorrência média de 300 anos.

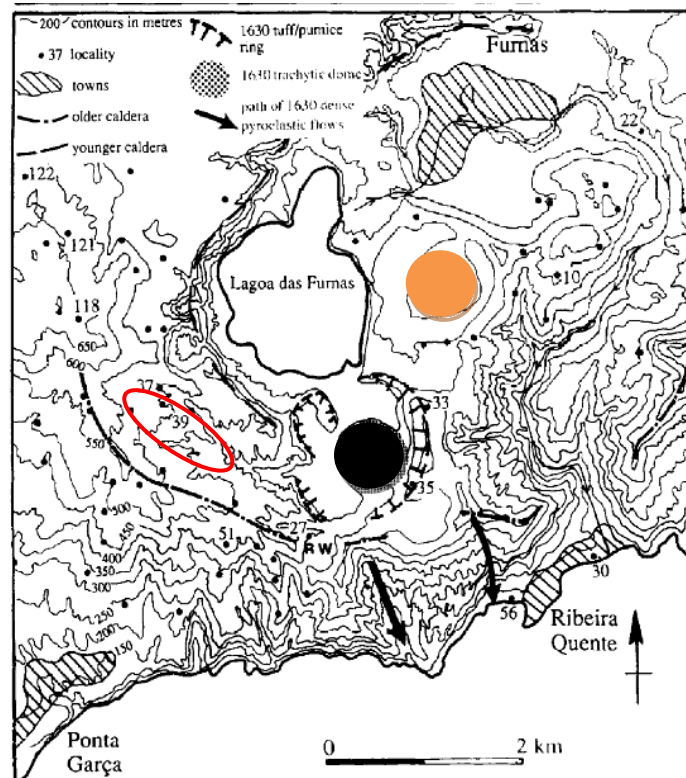


Figura 2.21 - Localização da área de estudo (vermelho) e do início das erupções de 1439-43 (a laranja) e de 1630 (a preto). Ponteados numerados são referentes a depósitos da erupção de 1630 (Cole *et al.*, 1995)

Segundo Guest *et al.*, (1999), estratigraficamente, o Vulcão das Furnas apresenta três grupos principais (Figura 2.22): Grupo Inferior, cujo topo é definido pela Formação de Ignimbrito da Povoação, Grupo Médio e Grupo Superior. Os Grupos Médio e Superior são separados pelo depósito Fogo A a divisão entre os Grupos Inferior e Médio corresponde a uma grande erupção que estará relacionada com o primeiro grande evento de formação da caldeira-formação, e a divisão entre os Grupos Médio e Superior baseia-se num depósito adjacente do Vulcão do Fogo.

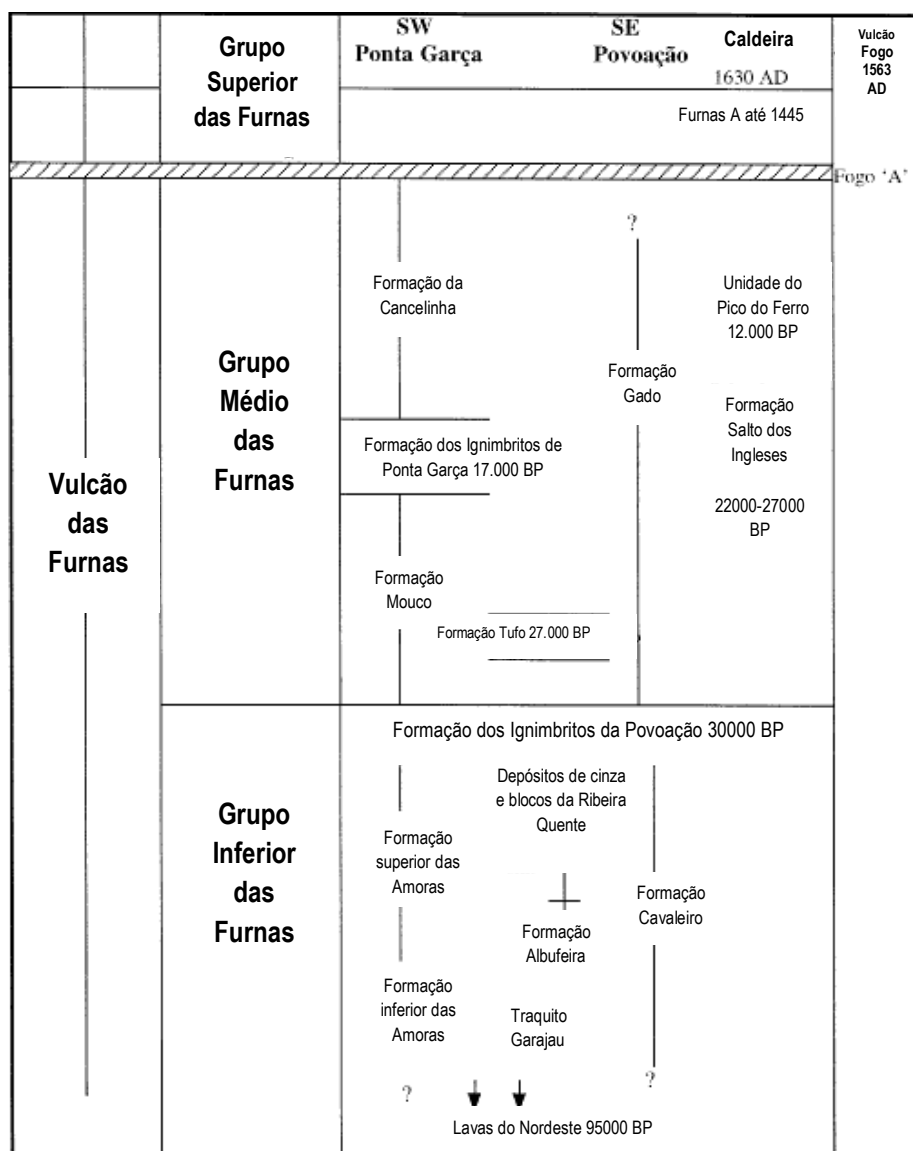


Figura 2.22 - Síntese da estratigrafia do Vulcão das Furnas (adaptado de Guest *et al.*, 1999)

Como as erupções de 1439-1443 e 1630 estão enquadradas, estratigraficamente, no Grupo Superior das Furnas, sendo seguir apresentada uma caracterização sintetizada deste Grupo.

A base do Grupo Superior das Furnas é definida pela parte superior do depósito Fogo A e a última erupção que contribuiu para esta sequência foi a de 1630. A erupção do Fogo A terá ocorrido há cerca de 4600 anos (Wallenstein, 1999). Embora o depósito Fogo A tenha sido originado por outro vulcão, mais distante do Vulcão das Furnas, é um dos depósitos mais conhecidos e identificados na área e um excelente marcador estratigráfico para a ilha de São Miguel, devido à sua grande dispersão e características distintivas que apresenta. Os eventos ocorridos nas Furnas posteriores à erupção do Fogo A foram previamente descritos por Booth *et al.* (1978) e foram discutidos posteriormente por Cole *et al.* (1999) e Guest *et al.* (1999).

Booth *et al.* (1978) definiu 10 depósitos originados no vulcão das Furnas, que se sobrepõem ao depósito Fogo A, dando as designações aos depósitos de Furnas 'A' a Furnas 'I' estando a última erupção (1630) inserida no topo do Grupo Superior das Furnas. Cada um dos depósitos

originados por erupções individuais nesse grupo está bem definido e caracterizado, existindo uma uniformidade geral em cada tipo de depósito, sendo as litologias dominantes correspondentes a camadas alternadas de cinzas finas e lapilli (Cole *et al.*, 1999). Cada evento na caldeira envolveu tanto uma atividade magmática como uma atividade hidromagmática, e as pequenas erupções foram resultado da subida do magma através de um sistema hidrotermal ativo e interagindo com os lagos intracaldeira.

A figura 2.23 mostra uma coluna esquemática da sequência que é descrita com mais pormenor por Cole *et al.* (1999), correspondente ao Grupo Superior das Furnas (Guest *et al.*, 1999).

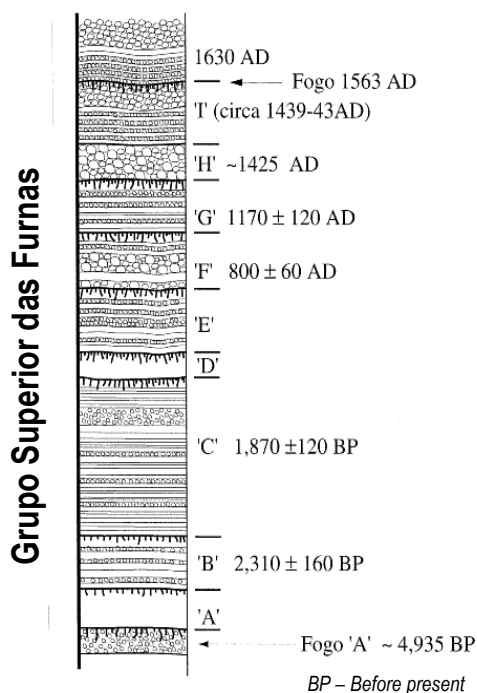


Figura 2.23 - Seção esquemática do Grupo Superior das Furnas representando os últimos 5000 anos da atividade do Vulcão das Furnas, incluindo também depósitos adjacentes ao Vulcão do Fogo. A figura não está à escala (adaptado de Guest *et al.*, 1999)

2.7.1. Erupção de 1439-43 (Pico do Gaspar, Furnas)

A erupção de 1439-43 foi considerada uma erupção histórica apenas na década de 90, sendo antes reconhecida como ocorrida no Pico das Camarinhas (Sete Cidades). Esta erupção, que ficou reconhecida com base em trabalho de campo efetuado por Queiroz *et al.* (1995), deu origem ao chamado Pico do Gaspar (localizado entre a Lagoa das Furnas e a freguesia das Furnas, figura 2.21). O início do povoamento da ilha de São Miguel coincidiu com esse evento eruptivo sendo, por este motivo, apenas observado na sua fase final, na qual se formou o domo traquítico que se encontra localizado no interior do cone de pedra-pomes (Madeira, 2007).

Esta erupção corresponderá à última erupção do Pico do Gaspar designada de Furnas “I” (Figura 2.24). Esta teve uma fase inicial explosiva que cobriu a superfície com cinzas brancas, seguida da formação de um domo traquítico (Guest *et al.*, 1999). As erupções de 1439-43 e 1630 são idênticas já que os seus depósitos apresentam camadas alternadas de lapilli e cinzas, estando a camada final, rica em lapilli pomítico, graduada, da base para o topo, e rica

num depósito de dispersão limitada composto por fragmentos densos e juvenis pobres em vesículas. As camadas de lapilli encontram-se bem graduadas, compostas por pedra-pomes e fragmentos líticos que usualmente se encontram topograficamente na parte superior (Cole *et al.*, 1999).

Em regiões próximas da parte inferior do depósito Furnas 'I' é possível observar variações locais da espessura da camada de lapilli pomítico. Essa variação de espessura, em “*pinch and swell*” (estruturas representativas de variação de espessura lateral com efeito de menor espessura (material “prensado”) - maior espessura (material “expandido”) e vice-versa), é fácil de identificar, sobretudo, na coluna estratigráfica designada de FL 8 (Figura 2.24). A pedra-pomes encontrada nas camadas de lapilli é angular e algumas camadas de lapilli são descontínuas. As alturas de coluna determinadas para o depósito Furnas “I” apresentam valores entre os 9 e os 10 km e a velocidade do vento devia ser de cerca de 5 m/s (Cole *et al.*, 1999).

Subjacente ao depósito Furnas “I” está o depósito Furnas “H”, originário de uma erupção anterior à de 1439-43, e estes encontram-se separados através de uma fina camada (<3 cm) indicadora da existência de um curto período de tempo entre os dois eventos vulcânicos (Cole *et al.*, 1999). A inexistência de solo e a datação por radiocarbono ¹⁴C, efetuada por Guest *et al.* (1999) sugerem um período temporal de 25 anos entre a formação dos depósitos Furnas “H” e “I”.

Na figura 2.24 observam-se diferentes colunas estratigráficas, com diversas distâncias e orientações (Figura 2.21) à cratera da erupção de 1439-43 (depósito Furnas “I”).

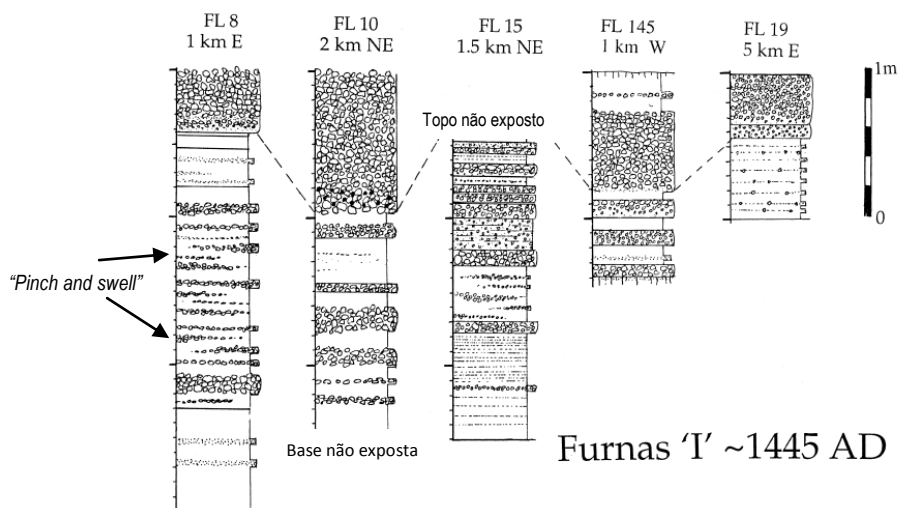


Figura 2.24 - Colunas estratigráficas para diferentes distâncias e orientações à caldeira da erupção de 1439-43, referentes ao depósito Furnas “I” (Cole *et al.*, 1999)

2.7.2. Erupção de 1630 (Furnas)

A erupção de 1630 ocorreu na zona da Lagoa Seca, a sul da lagoa das Furnas (figura 2.21). Oito horas antes do início da erupção, a atividade sísmica precursora fez-se sentir a mais de 30 km, destruindo quase todos os edifícios num raio de 10 km. A explosão inicial da erupção provocou um escorregamento nas arribas de Ponta Garça (Cole *et al.*, 1995).

A atividade explosiva durou cerca de 3 dias, tendo as cinzas atingido cerca de 550 km de distância. Alguns modelos publicados preveem um volume de $0,65 \text{ km}^3$ (DRE ou Equivalente de Rocha Densa) para os produtos explosivos. Durante a atividade eruptiva existiram mais de seis camadas de lapilli de queda, originadas pela atividade magmática explosiva, cada uma de magnitude sub-pliniana (Cole *et al.*, 1995).

Para leste de Vila Franca do Campo os terrenos ficaram cobertos com espessuras de pedrapomes e cinzas superiores a meio metro e na região mais próxima do centro eruptivo (e no Vanzinho) as espessuras encontram-se na ordem dos cinco a seis metros de espessura. As explosões iniciais, os escorregamentos nas arribas litorais da costa sul e algumas escoadas piroclásticas ceifaram a vida a 150-300 pessoas na Caldeira das Furnas e em Ponta Garça, sendo por isso a erupção de 1630 considerada a mais mortífera ocorrida nos Açores. No entanto, há que ter em consideração que na altura da erupção muitas pessoas acampavam à volta da lagoa das Furnas porque era época de colher a baga de loureiro (Madeira, 2007).

Foram encontrados depósitos da erupção até 8 km a oeste desde o centro eruptivo, sendo identificados mais de seis camadas de lapilli pomíticos na sequência piroclástica que terão sido originadas através da atividade magmática explosiva. A dispersão segundo várias orientações das camadas de lapilli, inicialmente para sudoeste e, finalmente, para nordeste da cratera, indica a alteração na direção do vento durante os 3 dias da fase explosiva (Guest *et al.*, 1999).

As camadas ricas em cinzas com abundantes lapilli de acreção e texturas vesiculares encontram-se intercaladas com as camadas de lapilli representando os depósitos formados por fases freatomagmáticas, marcadoras da atividade magmática. Estas camadas ricas em cinzas apresentam variações de espessura laterais bem como a existência de estratificação cruzada e estruturas onduladas que sugerem a baixa concentração dos fluxos turbulentos (surges), tendo o material sido depositado a cotas altas. As partículas de alta concentração, os fluxos piroclásticos não turbulentos foram canalizados para vales íngremes na costa sul simultaneamente com os surges de baixa concentração. Os depósitos de fluxo de massa (2 m de espessura) passam lateralmente às cinzas finas, estratificadas e de acreção ricas em lapilli, apresentando desde 20 cm de espessura, a mais de 100 m, na horizontal.

A atividade efusiva foi seguida da atividade explosiva durante a qual se formou um domo de lava traquítico dentro do complexo anel de tufo formado durante a fase explosiva inicial, com um volume de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($0,02 \text{ km}^3$ DRE), cerca de 600-700 m de diâmetro e 100 m de altura

(Cole *et al.*, 1995). Os registos históricos sugerem que a construção do domo ocorreu durante um período de pelo menos dois meses (Guest *et al.*, 1999).

Na figura 2.25 observa-se a intercalação de camadas de lapilli e cinzas presentes a cerca de 2.5 km a oeste da cratera da erupção de 1630 na localização designada de FL 37, visível na figura 2.21.

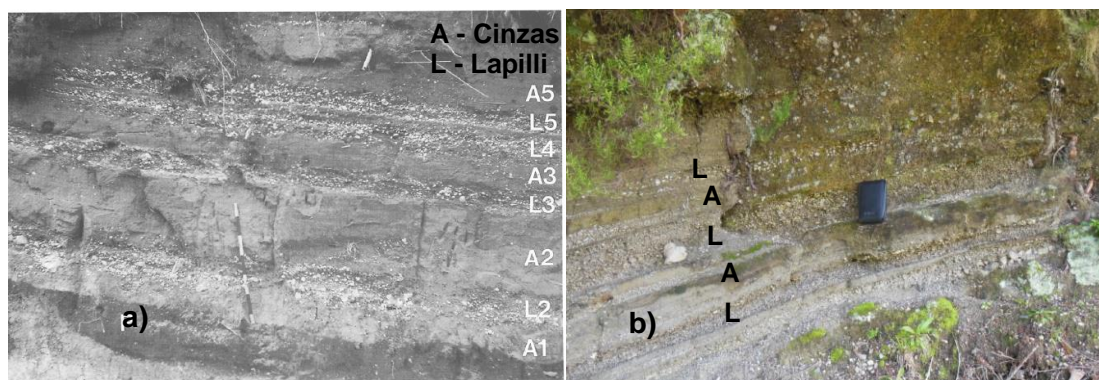


Figura 2.21 - a) Intercalação de camadas de lapilli e cinzas presentes a cerca de 2.5 km a oeste da cratera da erupção de 1630 na localização designada de FL 37. Escala com intervalos de 10 cm (Cole *et al.*, 1995); b) Intercalação de camadas de lapilli e cinzas presentes no talude do caminho do trilho, adjacente à parcela 39E, existente na área de estudo. Escala: 12 cm (14/4/2014)

As camadas de lapilli da erupção de 1630, foram denominadas de L1, L2, L3, L4 e L5, porém, como não é conhecido o número total de camadas de lapilli, devido à erosão, o nível mais alto corresponde ao designado lapilli final ou Lf (Cole *et al.*, 1995).

A forma das camadas e a natureza angular da pedra-pomes indicam que estas camadas tenham sido depósitos de queda, enquanto os grãos grosseiros e a presença de pedra-pomes vesiculadas sugerem que as camadas foram originadas por explosões magmáticas.

A base da erupção de 1630 é composta por uma camada de lapilli pomítico grosseira, L1 (Figura 2.26 a) e Figura 2.27), com 8 m de espessura, na sua localização mais proximal da cratera. O mapa de isopacas (ANEXO I) indica que L1 foi distribuído apenas ao longo de uma zona estreita, com cerca de 1,5 km de largura para sudoeste. Existem outras camadas de lapilli menos granuladas do que L1, exibindo uma distribuição mais ampla, como por exemplo, a camada L3 que pode estar correlacionada até 8 km da cratera (Cole *et al.*, 1995). Na figura 2.26 b) é possível observar uma sequência das fases eruptivas.

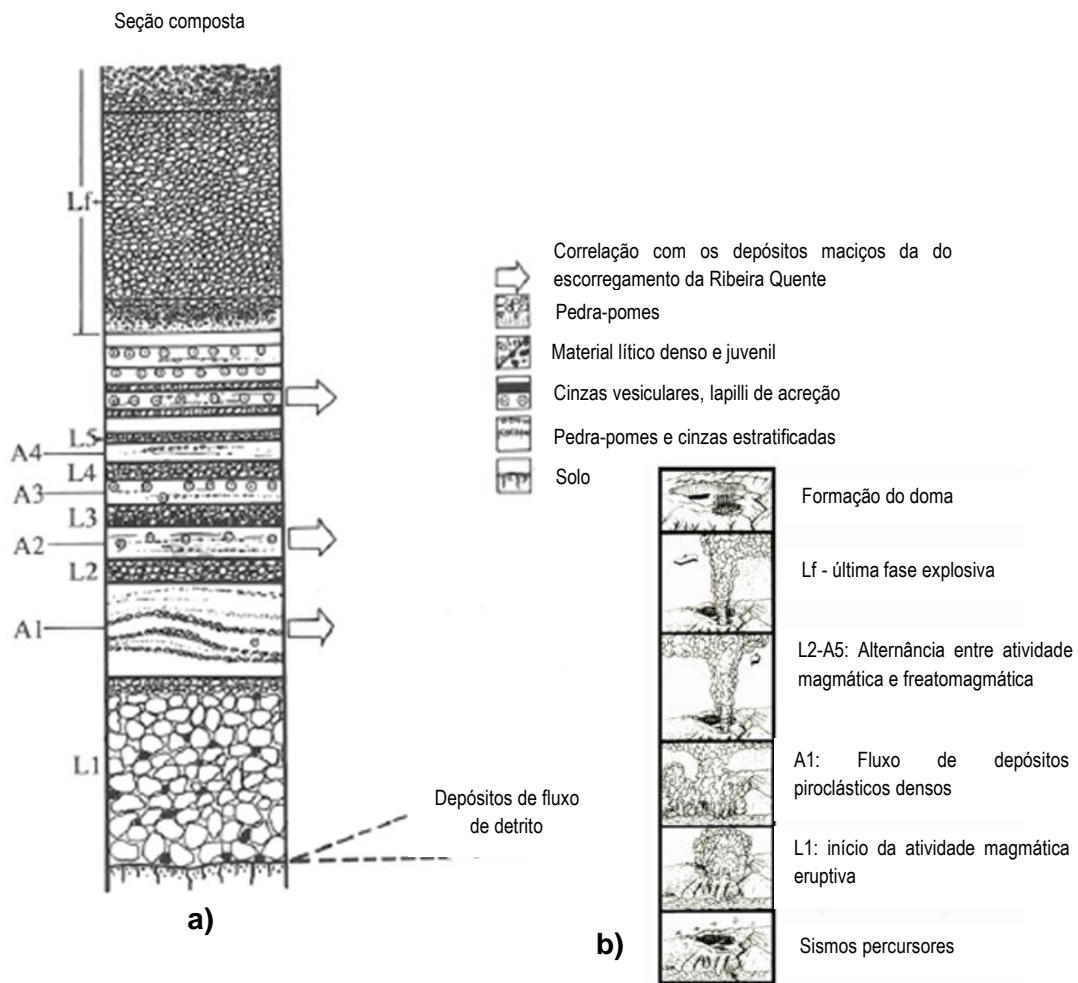


Figura 2.22 - a) Seção composta dos piroclastos da erupção de 1630. Não está à escala (Cole *et al.*, 1995); b) representação esquemática das fases eruptivas (Rowland-Smith, 2007)

As fases iniciais da erupção dispersaram-se para sudoeste e oeste (L1-L3), enquanto L4 e L5 têm uma pequena dispersão preferencial, indicando a existência de ventos fracos e, a camada de lapilli final (Lf), encontra-se dispersa para nordeste.

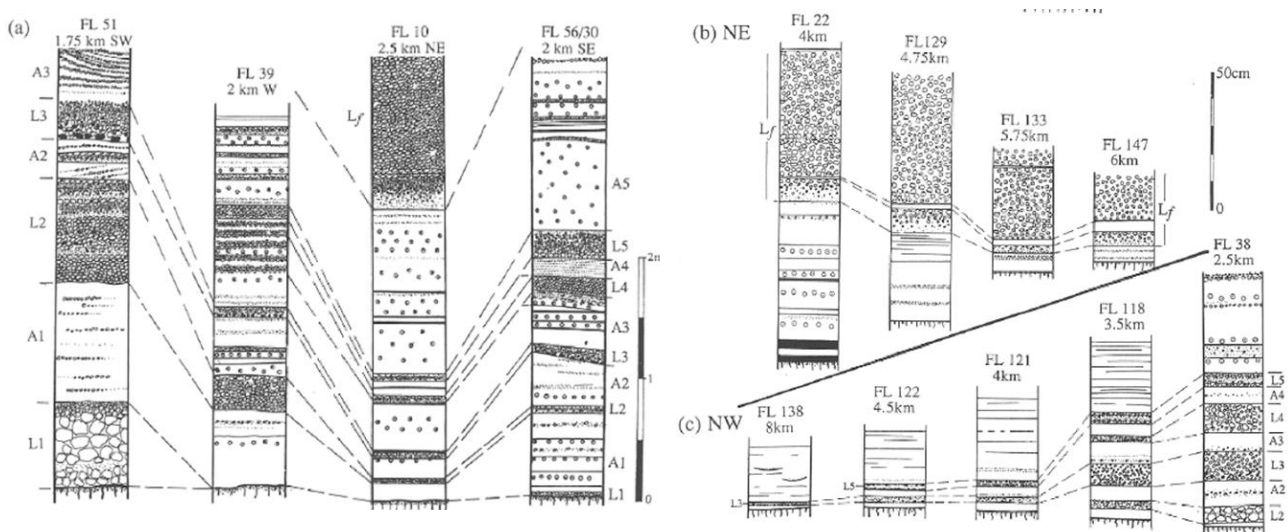


Figura 2.23 - Seções de piroclastos da erupção de 1630 com as respetivas direções e distâncias à cratera. a) Seções mais próximas a médias da cratera; b) Seções médias a distantes a nordeste da cratera; c) Seções médias a distantes, a noroeste da cratera (Cole *et al.*, 1995)

No mesmo horizonte estratigráfico da camada de lapilli L2, mas com declives mais íngremes (20-30°) na vertente sul do vulcão, afloram em certos locais depósitos que contêm pedrapomes arredondada e geralmente pobres em cinzas (localizações marcadas com "s" no ANEXO I). As camadas mostram variações de espessura que diminuem e aumentam independente da topografia. Essas camadas de lapilli têm localmente geometrias convexas, dando origem a superfícies superiores com relevo positivo. As análises granulométricas destas camadas ilustram que estas são semelhantes às típicas camadas de lapilli (Cole *et al.*, 1995).

Duffield *et al.* (Duffield *et al.*, 1979 *in* Cole *et al.*, 1995) descrevem que as camas de lapilli pomíticos que caem nas vertentes com maiores declives tornam-se gradualmente inversas. Os depósitos de tufo cônico de Udo, na Ilha Jeju (sul da Coreia), foram descritos por Sohn e Chough (Sohn e Chough, 1993 *in* Cole *et al.*, 1995) e interpretaram-nos como sendo o produto do fluxo de grãos que são transformados a partir de depósitos de queda de piroclastos nas vertentes com declives acentuados de um cone de tufo. As lentículas equivalentes à camada L2 mostram várias características semelhantes às descritas por Sohn e Chough (1993). Estas características podem ter sido formadas devido à transformação do material de queda à medida que ele caiu sobre as encostas abruptas do vulcão.

Relativamente às camadas ricas em cinzas, existem camadas ricas em cinzas acinzentadas que estão intercaladas com as camadas de lapilli (Figuras 2.24, 2.26 e 2.27). Os lapilli de acreção são abundantes e encontram-se aleatoriamente dispersos ou fortemente concentrados em horizontes.

As texturas vesiculares sugerem que as cinzas estavam húmidas aquando da sua deposição. Os lapilli de acreção são típicos mas não exclusivos de erupções freatomagmáticas, havendo agregação das cinzas devido à humidade. Ocorreu interação água/magma devido à existência de fragmentação das camadas de cinzas. A humidade da nuvem da erupção teve uma distribuição heterogénea e pode ter sido afetada por tempestades locais já que há uma distribuição localizada dos lapilli de acreção e das camadas vesiculares ricas em cinzas.

Existe um contacto variável entre as camadas ricas em cinza e as camadas de lapilli, sendo alguns limites nítidos, enquanto outros são difusos e graduáveis. Em alguns casos, as zonas superiores ou inferiores das camadas ricas em cinzas englobam abundantes clastos de pedrapomes. Estas camadas ricas em cinzas não compactadas podem ter sido deformadas e impactadas pelos lapilli pomíticos, dando origem a contactos superiores graduais e difusos. Segundo Cole *et al.* (1995) o contacto difuso e gradual entre as camadas de pedra-pomes e as camadas de cinzas pode ter ocorrido devido a uma transição muito rápida entre as atividades magmática e freatomagmática ou estas duas atividades podem ter ocorrido, em simultâneo, a partir de duas crateras espaçadas.

Relativamente à camada de lapilli do topo da sequência (Lf), representativa da fase explosiva final da erupção, esta é mais homogénea, mais pobre em líticos e mais grosseira (atingindo 11

m no cone) do que as outras camadas de lapilli dentro da área da dos piroclastos da erupção de 1630 (Figuras 2.26 e 2.27). Esta camada é também distinta já que é mais refinada e gradualmente inversa, sendo a parte basal mais rica em líticos, e separada da parte superior da camada seguinte por uma cinza fina acinzentada (Figuras 2.26 e 2.27 b) (Cole *et al.*, 1995).

O mapa de isopacas (ANEXO I) indica a dispersão direcionada para NE na fase final, esclarecendo o elevado formato do anel de pedra-pomes da erupção de 1630, com a existência de pedra-pomes no lado leste. Nas localizações mais próximas, a cerca de 0.5 km a sudoeste da abertura no anel de pedra-pomes, a parte superior do Lf é composta por uma sequência de lapilli juvenis acinzentados escuros (cerca de 5 m de espessura), com uma distribuição limitada (Cole *et al.*, 1995).

Finalmente, e quanto aos parâmetros físicos da erupção de 1630 (altura da coluna, velocidade do vento, volumes, durações), Cole *et al.* (1995) combinaram os mapas de isopletas construídos para as várias camadas de lapilli de queda com modelos de pluma existente (Carey & Sparks, (1986); Sparks, (1986); Wilson & Walker, (1987)) e calcularam a descarga de massa/taxa de erupção e as alturas da coluna da erupção. Os resultados são apresentados na tabela 2.4.

O modelo de Wilson e Walker (1987) determinou alturas de colunas da erupção mais baixas relativamente ao modelo de Carey e Sparks (1986). De acordo com esses dois modelos a coluna da erupção aumenta em altura, atingindo um pico (L3) com 14 km diminuindo depois nas camadas de lapilli posteriores provenientes de colunas inferiores. Quanto menor é a altura da coluna maior é a diferença entre os valores calculados para os dois modelos, possivelmente devido aos dados estarem próximos do limite inferior do modelo de Wilson e Walker (1987) (Cole *et al.*, 1995).

Tabela 2.4 - Cálculos para as alturas de coluna das camadas de lapilli da erupção de 1630 (adaptado de Cole *et al.*, 1995)

Camadas de lapilli	Wilson & Walker (1987)		Carey & Sparks (1986)			Sparks (1986)
	MED (x10 ⁶)	Altura de coluna (km)	Altura de (P) coluna (km)	Altura de (L) coluna (km)	Velocidade do vento (m/s)	MDR (x 10 ⁶ kg/s)
L2	3-4	10.6	11.5-12.8	12-13	5	4-6
L3	5-6	11.7	11.5-12.8	13.3-14	5	5-8
L5	~2	8.9	11.2-13	-	5	4-6
Lf	~0.2	5	8-11	-	5-25	2-4

Altura de coluna (P) = cálculo usando clastos de pedra-pomes; Altura de coluna (L) = cálculo usando clastos líticos; MDR = Taxa média de descarga; MED = Taxa de erupção média

Cole *et al.*, (1995), através do modelo de Sparks (1986) calcularam alturas de coluna com uma taxa de erupção na ordem dos 8×10^6 kg/s (Tabela 2.4). Os modelos de pluma de Carey e Sparks (1986) permitem ainda estimar velocidades do vento e indicam ventos inicialmente fracos (5 m/s ou menos) aumentando (25-30 m/s) durante a fase final explosiva (Lf) (Tabela 2.4).

Tabela 2.5 - Cálculo de volumes para diferentes camadas e produtos da erupção de 1630 (adaptado de Cole *et al.*, 1995)

Camada	Volume (x 10 ⁶ m ³)	Densidade (g/cm)	DRE (x 10 ⁶ m ³)	Massa (x 10 ⁹ kg)	MDR (x 10 ⁶ kg/s)	Duração (min)
L1	179	0.5	37.9	90.96	nd	-
L2	67	0.75	20.8	49.92	4-6	166.4
L3	76	1.04	32.7	78.48	5-8	186.9
L4	10	0.73	3	7.2	nd	-
L5	28	0.73	8.4	20.16	4-6	67.2
Lf	503	0.44	90.5	217.2	4	905
Cinzas (total)	1230	0.9	461.3	-	nd	-
Doma	20	2.4	20	-	nd	-
Volume total	2093	-	654.6	-	-	-

MDR = Taxa média de descarga; DRE = Equivalente de rocha densa

Para calcular os volumes das diferentes camadas de lapilli, Cole *et al.* (1995) utilizaram o método de Fierstein e Nathenson (1992), determinando um volume total de 2.11 km³ e um volume de 0.675 km³ DRE (Tabela 2.5), quanto ao volume total de cinza e ao domo de lava. Este volume pode ser considerado como uma estimativa do volume mínimo de fluxos piroclásticos que atingiu o mar e que não é tido em conta. Do volume total eruptido, 68,4% foram produtos freatomagmáticos, 28,6% produtos magmáticos e 3% pertencem à extrusão efusiva do domo de lava.

Através do volume das várias partes da erupção e da densidade do magma, Cole *et al.* (1995), derivaram a massa de cada camada, que combinada com a taxa média de descarga (MDR), calculada a partir das alturas da coluna, através do modelo de Carey e Sparks (1986), dá uma estimativa da duração de quatro camadas de lapilli da erupção (Tabela 2.5). As camadas de lapilli L2-L5 foram eruptidas durante um período de 1-3 horas e a camada Lf, respeitante à fase final explosiva, teve uma duração de aproximadamente 15 horas.

As plumas em ambientes húmidos conseguem atingir alturas superiores comparativamente com ambientes mais secos. Como a ilha de São Miguel tem um clima subtropical húmido e a humidade atinge muitas vezes os 100%, esta pode ter contribuído para o aumento da altura da coluna bem como para a dispersão dos piroclastos. Assim, a taxa de descarga de massa calculada pode ser sobreestimada e os valores das alturas da coluna podem ter sido elevadas devido às condições atmosféricas, condições estas que os modelos de Carey e Sparks (1986) e Wilson e Walker (1987) não têm em consideração (Cole *et al.*, 1995). A coesão dos solos pode ter sido também influenciada (aumento de coesão) devido à humidade que aglutinou os clastos (lapilli de acreção).

Para concluir, na figura 2.28 é possível observar a localização de alguns depósitos do Grupo Superior das Furnas. Nota-se o depósito Furnas “I”, correspondente à erupção de 1439-43, a SW a localização do foco eruptivo da erupção de 1630 (círculos vermelhos) e o Vanzinho a laranja (elipse). Os ponteados numerados correspondem às localizações de diferentes colunas estratigráficas.

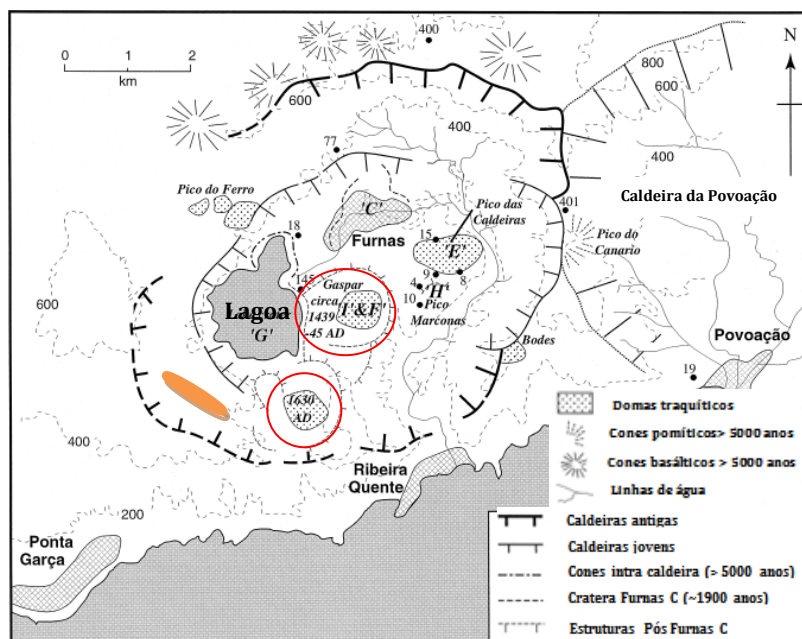


Figura 2.28 - Vulcão das Furnas e zona envolvente e localização de alguns depósitos do Grupo Superior das Furnas (adaptado de Guest *et al.*, 1999)

2.8. Clima e pluviosidade

O arquipélago dos Açores, devido à sua localização geográfica em latitude e à sua posição no meio do Atlântico, apresenta, geralmente, um clima temperado marítimo, refletido na baixa amplitude térmica, elevadas pluviosidade, humidade relativa e, ventos persistentes (Cruz *et al.*, 2004). Há ainda influência das massas de ar húmido oriundas de sudoeste, da corrente quente do Golfo que modera o clima, e ainda da oscilação anual do chamado anticiclone dos Açores (Fernandes, 2004).

No clima do arquipélago dos Açores é também possível assistir a um contraste acentuado entre uma estação seca e uma estação húmida já que entre os meses de outubro e março pode ocorrer cerca de 75% da precipitação anual (DROTRH, 2001).

O clima, embora suave, é ao mesmo tempo instável, devido à circulação atmosférica geral no Atlântico Norte. O desenvolvimento, orientação e deslocação do anticiclone dos Açores, influencia o estado do tempo, mas as massas de ar (tropical marítimo e polar marítimo) a ele associadas podem também afetar o clima (Fernandes, 2004).

Na ilha de São Miguel a amplitude térmica registada não excede os 8°C a 9°C, e a temperatura média anual varia entre 17°C, na costa Sul, e 11°C-12°C no interior da ilha, nas regiões com 800 m a 900 m de altitude. O mês de agosto é o que apresenta temperaturas médias mensais mais elevadas (cerca de 22°C no litoral e sensivelmente 15°C nas regiões mais elevadas). O mês de fevereiro é o mês mais frio, apresentando temperaturas médias de 14°C, no litoral, e inferiores a 5°C, nas zonas de maior altitude (Ricardo *et al.*, 1977).

No concelho da Povoação, à semelhança de toda a ilha de São Miguel, as condições climáticas resultam da posição geográfica do arquipélago no Atlântico Norte no contexto da circulação global atmosférica e oceânica, mas também da influência da massa aquática envolvente (Azevedo, 2001).

A precipitação é fortemente condicionada por um modo de circulação atmosférica de larga escala que é designada de Oscilação do Atlântico Norte (NAO ou *North Atlantic Oscillation*). Segundo Trigo *et al.* (2002), a NAO está relacionada com uma alternância da intensidade dos centros de baixa e alta pressão que se encontram localizados sobre os Açores e sobre a Islândia e controla a temperatura e o regime de precipitação no arquipélago dos Açores.

A NAO é um fator relevante no controlo da precipitação no inverno devido às perturbações atmosféricas que ocorrem no oceano Atlântico mas, a sua ligação com a atividade geomorfológica no concelho da Povoação não é clara, devido à influência do oceano e dos aspetos de microescala, tais como, os fatores geomorfológicos e fisiográficos do concelho, (altitude, distância à linha de costa, variações na forma e orientação das vertentes, exposição do relevo, natureza e heterogeneidades do coberto pedológico e vegetal existente) (Amaral, 2011).

Marques (2014), realizou um estudo entre os anos 1976/77 e 2007/08, no qual fez uma análise dos dados referentes ao mesmo período de anos hidrológicos da estação meteorológica da Lagoa das Furnas, e de outros 5 Postos udométricos existentes no concelho da Povoação, pertencentes à Direção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos (Espigão da Ponte, Lomba da Erva, Monte Simplício, Salto de Cavalo e Salto do Fojo). Para Marques (2014), a precipitação apresenta uma enorme variabilidade, quer a nível inter-anual, como a nível intra-anual. No período de 1976/77 a 2007/08, a precipitação média anual foi de 2283.5 mm, sendo um máximo de 3046.4 mm registado no ano hidrológico de 1986/87, sendo também o valor referente ao ano de 1997/98 muito alto (2780.8 mm). Importa referir que nos dois anos hidrológicos referidos o concelho da Povoação foi fustigado com duas catástrofes hidrogeomorfológicas, desencadeadas por episódios de precipitação muito intensa (Vila da Povoação e Faial da Terra no dia 2 de setembro do ano de 1986 e Ribeira Quente no dia 31 de outubro do ano de 1997).

Há também que ter em consideração a precipitação oculta, em forma de neblinas e nevoeiros com grande persistência, que se faz sentir nas regiões com maiores altitudes do concelho. Esta contribui consideravelmente para manter percentagens relevantes de teores de água, nos solos do concelho, durante todo o ano (Amaral, 2011).

Segundo o Modelo genérico CIELO (Clima Insular à Escala Local) desenvolvido por Azevedo (1996) (Fernandes, 2004) determinado para a ilha de São Miguel (Figura 2.29), pode observar-se que o concelho da Povoação é uma das regiões, em que a precipitação acumulada anual é das mais elevadas da ilha de São Miguel, principalmente na Região da Tronqueira (a NE da caldeira do vulcão da Povoação). A zona de estudo (pontado amarelo), além de ser uma

região razoavelmente elevada também apresenta uma gama de valores de precipitação acumulada na ordem dos 1800-2200 mm anuais.

O Modelo CIELO teve como objetivo a simulação do clima local em regiões insulares de pequena dimensão espacial, mas que apresentem uma orografia complexa a uma escala que se ajuste com aquela em que se desenvolve a atividade humana, ou em que a variação das condições climáticas tenha impacto significativo sobre o ambiente e os recursos naturais (Fernandes, 2004). É um Modelo que consiste na modelação física dos mecanismos climáticos locais, permitindo generalizar a informação meteorológica de todo o território bem como uma caracterização climática à escala local da superfície insular. O modelo foi inicialmente desenvolvido num Sistema de Informação Geográfica (SIG) e testado nas ilhas do Arquipélago dos Açores (CLIMAAT, 2005).

A precipitação exibe uma componente orográfica importante, sendo a região do Vanzinho uma região que apresenta registos elevados de precipitação.

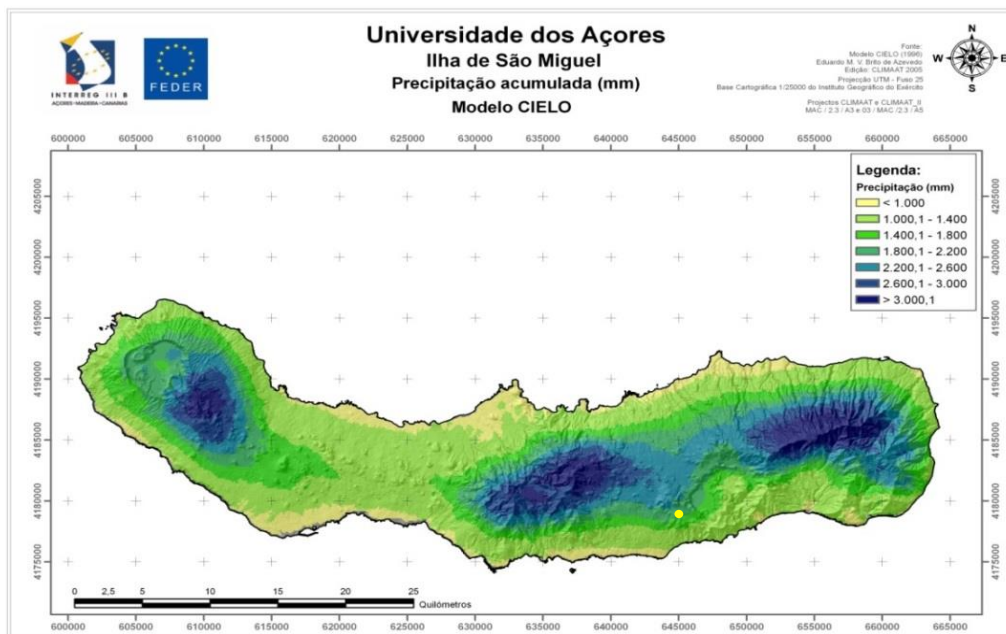


Figura 2.29 - Precipitação acumulada (mm) na ilha de São Miguel segundo o Modelo CIELO (CLIMAAT, 2005)

3. Fundamentos teóricos e estado da arte

No presente capítulo apresentam-se os fundamentos teóricos relativos: à instabilidade de terrenos e processos erosivos lineares associados à erosão hídrica; as medidas de estabilização de vertentes e controlo de erosão superficial; as propriedades físico-mecânicas dos solos e respetivos ensaios de caracterização e, os métodos matemáticos usualmente utilizados para a estimação espacial e o tratamento multivariado de dados.

A análise multivariada de dados é uma técnica estatística usualmente aplicada em diversas áreas, entre as quais se inserem as Ciências da Terra, no domínio da geotecnia. Entre os estudos realizados para a erodibilidade de solos, na Índia (West Bengal), Ghosh & Bhattacharya, (2012) utilizaram a análise multivariada para categorizar o risco de erosão de solos lateríticos, em diferentes bacias de drenagem de ravinamentos ativos, em diferentes magnitudes, através do uso de parâmetros morfométricos, hidrológicos e parâmetros do solo. Com este estudo, foi possível determinar a erodibilidade de cada bacia hidrográfica, de cada ravinamento ativo, podendo auxiliar na seleção da medida de correção/mitigação a implementar em cada bacia hidrográfica, de cada ravinamento.

Kummer *et al.* (2010), através da análise de componentes principais (ACP) conseguiram agrupar amostras de solo de ambientes próximos, recolhidos próximos ao Rio Ribeira numa área mineira e de metalurgia desativada de metais pesados (no município de Adrianópolis, Brasil), com base na granulometria e em características químicas e mineralógicas dos solos. Os solos eram constituídos por diferentes materiais de origem e foram submetidos a variados graus de interferência antrópica. Neste estudo, verificou-se que a intensa interferência antrópica influenciou a mineralogia das amostras de solos.

Em Itália, Agnesi *et al.*, (2007) efetuaram uma análise multivariada, para determinar uma relação espacial entre variáveis geo-ambientais, que controlam o processo erosivo (ravinamentos), e a ocorrência de ravinamentos. O objetivo do estudo era avaliar a suscetibilidade à erosão de uma bacia hidrográfica (Rio San Giorgio) afetada por processos erosivos (ravinamentos) na região norte-centro da Sicília, e a variação temporal do processo erosivo. Através deste estudo foi possível realizar um mapa de suscetibilidade para a área de estudo, tendo sido encontrada correlação entre as variáveis e a ocorrência de ravinamentos.

3.1. Instabilidade de terrenos e erosão superficial de solos (processos erosivos lineares)

3.1.1. Tipos de instabilidade de terrenos

A utilização de uma classificação geral para os diferentes movimentos de vertente torna-se difícil devido aos vários tipos de ocorrência de movimentos de terrenos bem como as inter-relações entre si, em função de uma grande variedade de critérios. Ao longo das últimas décadas têm sido recomendadas diferentes classificações, por diferentes autores, para que haja uma aprovação quanto à nomenclatura usada. A geometria do movimento, a velocidade de ocorrência, o tipo de material afetado e a atividade do movimento, são alguns dos critérios em que se baseiam as classificações existentes (Lamas, 2013).

Varnes (1978) propôs uma classificação, baseada em dois critérios principais, a tipologia do movimento e o tipo de material envolvido, sendo esta a mais adotada pela sociedade científica.

Neste trabalho adota-se o sistema de classificação dos Açores (Valadão, 2002; Amaral, 2005), baseado nas classificações de Varnes (1978) e da *Working Party on World Landslide Inventory* ou WP/WLI (1993), posteriormente reformuladas por Cruden e Varnes (1996).

A designação *landslide*, em sentido lato, corresponde a um “movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha ou solo em que o centro de gravidade do material afetado progride para jusante e para o exterior” (WP/WLI, 1993). Deste modo, um *landslide* corresponde a um movimento de vertente (Zêzere, 2005)

Os movimentos de vertente podem ser associados a uma escala de movimentos, apresentada por Cruden e Varnes (1996) (Figura 3.1).

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Velocidade típica
7	Extrem.rápido	5×10^3	5 m/seg
6	Muito rápido	5×10^1	3 m/min
5	Rápido	5×10^{-1}	1.8 m/hor
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m/mês
3	Lento	5×10^{-5}	1.6 m/ano
2	Muito lento	5×10^{-7}	16 mm/ano
1	Extrem.lento		

Figura 3.1 - Escala de velocidades para os movimentos de vertente (adaptado de Cruden e Varnes, 1996 in Zêzere, 2005)

Para Flageollet (Flageollet, 1989 in Zêzere, 2005), os movimentos de terreno “englobam todas as formas de deslocação que se podem verificar (abatimentos, desabamentos, deslizamentos, escoadas, etc.) e todos os materiais que podem ser colocados em movimento”. Assim, são

incluídos como movimentos de terreno, os movimentos de vertente, os movimentos de subsidência (abatimentos e assentamentos) e também os movimentos associados à expansão-retração de solos argilosos.

Hutchinson (Hutchinson, 1968 *in* Zêzere, 2005) definiu o termo movimento de massa como “todos os movimentos induzidos pela gravidade, com a exclusão daqueles onde o material é mobilizado por um agente de transporte, como o gelo, neve, água ou ar, designados por transporte em massa”. Um movimento de massa inclui os movimentos de vertente, os movimentos de subsidência (abatimentos e assentamentos), reptação (*creep*), e os processos associados à atividade do gelo e da neve.

Na figura 3.2 estão sintetizados os diferentes graus de abrangência utilizados para os diferentes termos baseados nas classificações de Varnes (1978) e Zêzere (2005). A tabela 3.1 apresenta a classificação dos tipos de movimento de terreno de acordo com a classificação europeia da UNESCO *Working Party on World Landslide Inventory* (WP/WLI, 1993; Cruden e Varnes, 1996), baseada no tipo de mecanismo envolvido e com quatro critérios secundários: tipo de material, atividade, velocidade de avanço e conteúdo em água.

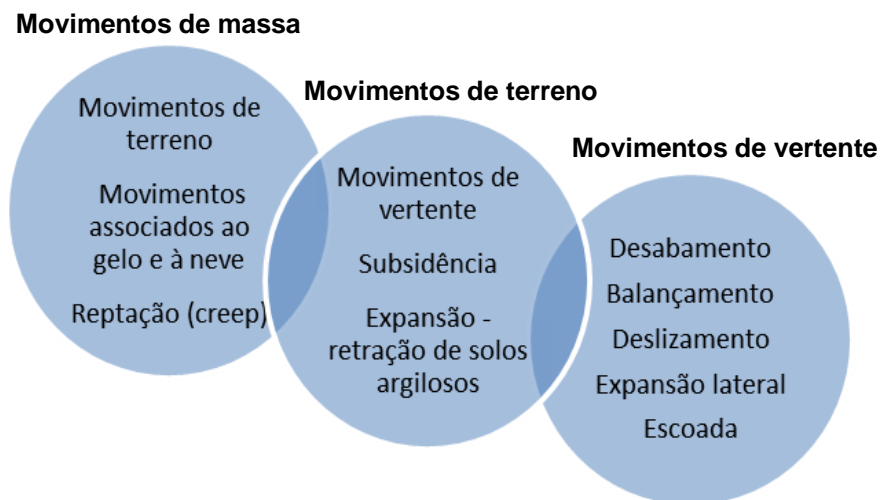


Figura 3.2 - Abrangência dos diferentes termos: movimentos de vertente, movimentos de terreno e movimentos de massa (adaptado de Varnes, 1978; Zêzere, 2005)

Tabela 3.1 - Classificação dos movimentos de terreno (adaptado de Varnes, 1978 e Dikau *et al.*, 1996 in Silva, 2010)

Tipo de mecanismo			Tipo de material		
			Substrato rochoso	Solos	
				Predominantemente grosseiros	Predominantemente finos
Desabamento/Queda (<i>fall</i>)			rochoso	de detritos	de solo
Balançamento (<i>topple</i>)			rochoso	de detritos	de solo
Deslizamento (<i>slide</i>)	Rotacional	Poucas unidades	rotacional rochoso	rotacional em detritos	rotacional em solo
	Translacional	Muitas unidades	translacional rochoso	translacional de detritos	translacional de solo
Expansão lateral (<i>lateral spread</i>)			de rocha	de detritos	de solo
Escoada/fluxo (<i>flow</i>)			de rocha	de detritos	de solo
			Reptação (<i>creep</i>)		
Movimentos complexos (<i>complex</i>)			Combinação mínima de dois mecanismos principais		

Seguidamente são descritos os tipos de mecanismo apresentados na tabela anterior.

Desabamento/Queda (*fall*)

A *Working Party on World Landslide Inventor* (WP/WLI, 1993) define um desabamento ou queda (*fall*) como sendo a deslocação de solo ou rocha, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são reduzidos ou não existem, a partir de uma encosta íngreme, (Figura 3.3). Este tipo de movimento pode atingir uma elevada velocidade, ocorrendo deslocação, pelo ar, queda, saltação ou rolamento do material.

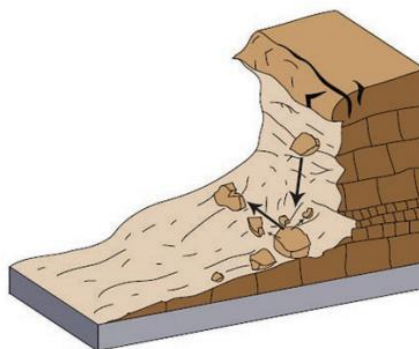


Figura 3.3 - Desabamento (Highland e Bobrowsky, 2008)

Existem quatro critérios necessários para a classificação dos desabamentos: o material afetado (o tipo de material, sendo um desabamento rochoso, desabamento de detritos ou desabamento de terra); a origem do material desabado (se é um desabamento primário ou um desabamento secundário); a geometria da rotura (planar, em cunha, em escadaria ou vertical) e, o volume de material afetado, ou seja, o volume de material deslocado (Zêzere, 2005).

Segundo Zêzere (2005) os desabamentos podem desenvolver-se em três fases: 1) a individualização de blocos através de fendas existentes (ação de gelo-degelo da água nos

poros e fissuras, ação mecânica das raízes ou a erosão diferencial); 2) o aumento das fendas e concentração das tensões na secção da rocha com suporte basal inexistente e, 3) a queda associada a rotura por flexa tração.

Balançamento (*topple*)

Segundo a WPWLI (1993), os balançamentos ou tombamentos (*topples*) (Figura 3.4) correspondem à rotação de uma massa de solo ou rocha, a partir de um ponto ou eixo situado abaixo do seu centro de gravidade. Há influência da gravidade e ação de forças laterais, praticadas tanto por blocos vizinhos, como por fluidos existentes nas fraturas e diáclases. Os balançamentos são frequentes em massas rochosas cujas descontinuidades estão inclinadas inversamente ao declive.

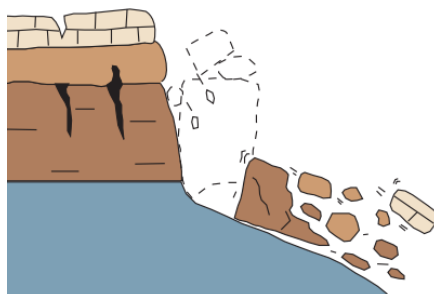


Figura 3.4 - Balançamento (Highland e Bobrowsky, 2008)

Os balançamentos ou tombamentos (*topples*) podem ser condicionados por três fatores principais, tais como, a força da gravidade e a força lateral praticada quer por unidades vizinhas quer pela água existente nas fraturas ou diaclases da rocha (Zêzere, 2005).

Deslizamento (*slide*)

Para a WPWLI (1993), os deslizamentos ou escorregamentos (*slides*) correspondem a movimentos de solo ou rocha que acontecem predominantemente ao longo de planos de rotura ou de zonas relativamente estreitas, afetadas por uma enérgica deformação tangencial.

Os deslizamentos são subdivididos em dois tipos principais de acordo com o tipo de rotura tangencial e as características do material afetado: 1) rotacionais ou 2) translacionais, com rotura compósita e com rotura planar (Zêzere, 2005).

1) Deslizamentos rotacionais (*slumps*)

Os deslizamentos rotacionais (Figura 3.5) ocorrem sobretudo em materiais homogêneos e isotrópicos, ao longo de superfícies de rotura curvas (Zêzere, 2005). Segundo Varnes (1978) ocorre um “movimento mais ou menos rotacional, sobre um eixo paralelo aos contornos da

vertente, envolvendo deslocamento (*sliding*) por cisalhamento ao longo da concavidade da superfície de rotura, a qual é visível ou inferida”.

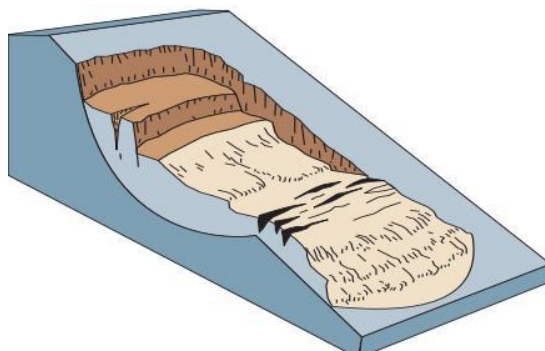


Figura 3.5 - Deslizamento rotacional (Highland e Bobrowsky, 2008)

Os deslizamentos rotacionais podem ser subdivididos em três tipos, de acordo com a posição relativa do plano de rotura: a) rotura de vertente (*slope failure*); b) rotura de sopé (*toe failure*); c) rotura de base (*base failure*) (Zêzere, 2005).

2) Deslizamentos translacionais (*planar slides*)

Os deslizamentos translacionais (Figura 3.6) ocorrem em materiais heterogêneos, sendo o material deslocado muito deformado.

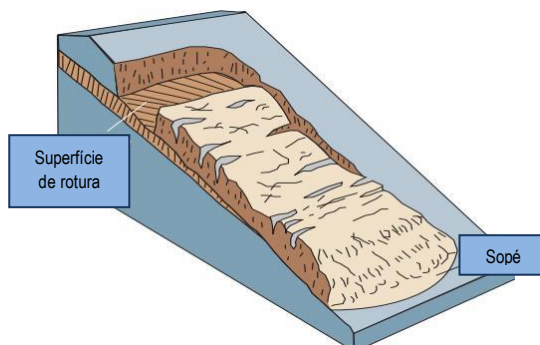


Figura 3.6 - Deslizamento translacional (adaptado de Highland e Bobrowsky, 2008)

Como já foi referido, os deslizamentos translacionais podem ser subdivididos em dois tipos: deslizamentos translacionais com rotura compósita e deslizamentos translacionais com rotura planar. Os primeiros, com rotura compósita, encontram-se na transição entre os deslizamentos rotacionais e os translacionais planares e o seu plano de rotura pode apresentar uma seção de forma circular ou planar com uma forte inclinação, a montante, sendo a inclinação mais reduzida, a jusante. Os segundos, com rotura planar, apresentam o plano de rotura ao longo de superfícies de fraqueza marcadas por uma resistência ao corte reduzida (falhas, diáclases, planos de estratificação ou o contacto entre uma cobertura detrítica e o substrato rochoso). Os deslizamentos com rotura planar podem ser subdivididos em três tipos, de acordo com o tipo de material afetado: a) deslizamentos de rocha (*rockslides*); b) deslizamentos de detritos (*debris slides*); 3) deslizamentos lamacentos (*mudslides*) (Zêzere, 2005).

Expansão lateral (*lateral spread*)

A WP/WLI (1993) define o movimento de expansão lateral (*lateral spread*) (Figura 3.7) como uma conjugação da deslocação natural de massas coesivas de solo ou rocha, com uma subsidência ocorrida no material brando subjacente, afetado por liquefação ou escoada, sendo as roturas basais ausentes.

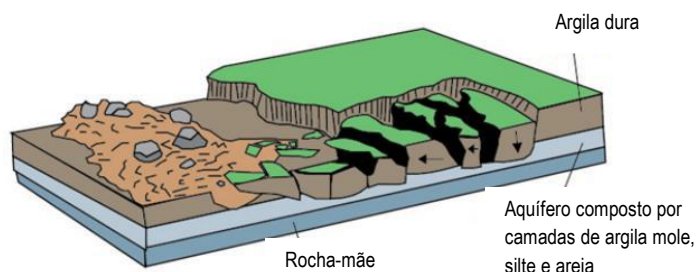


Figura 3.7 - Expansão lateral (adaptado de Highland e Bobrowsky, 2008)

Segundo Zêzere (2005), e de acordo com o tipo de material, este tipo de movimento é subdividido em dois tipos: 1) expansão lateral em rocha (movimento muito lento que resulta de deformações visco-plásticas profundas); 2) expansão lateral em solo (movimento muito rápido, relacionado com o colapso de uma camada de solo a uma certa profundidade, por liquefação, e posterior assentamento ou rotura gradual do material sobrejacente).

Escoada/fluxo (*flow*)

Segundo a WP/WLI (1993), uma escoada ou fluxo (*flow*) consiste no movimento contínuo no espaço cujas superfícies de tensão tangencial são momentâneas e mal preservadas (Figura 3.8), havendo distribuição das tensões por toda a massa afetada, e uma grande deformação interna dos materiais. A distribuição das velocidades, no material instabilizado, assemelha-se à de um fluido viscoso. São subdivididas em três tipos: 1) as escoadas ocorridas em rocha (*rock flows*); 2) as escoadas lamacentas (*mud flows, soil flows ou lahars*); 3) as escoadas de detritos (*debris flows*). As primeiras (*rock flows*), como a própria designação insinua, afetam massas rochosas muito estratificadas ou diaclasadas, em vertentes montanhosas, cujos movimentos são muito lentos e permanentes no tempo. As escoadas lamacentas (*lahars*) correspondem a um movimento, cuja velocidade pode variar do muito lento a muito rápido, de escoada de massa de água com terrenos que contêm, no mínimo, 50 % de partículas da dimensão da areia, silte e argila. As escoadas de detritos (*debris flows*) são o resultado da mistura de material fino (areia, silte ou argila) e material grosseiro (calhaus ou blocos), com água, formando uma massa que se desloca, em função da força da gravidade e com velocidades diferenciadas, geralmente por impulsos sucessivos, em direção à base da vertente (Zêzere, 2005).

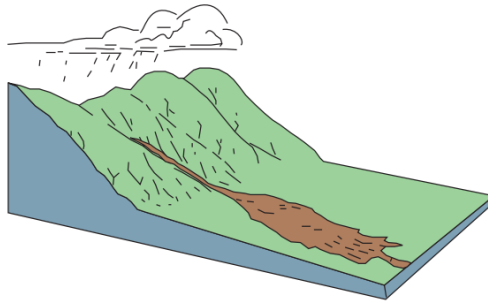


Figura 3.8 - Escoada (Highland e Bobrowsky, 2008)

Nas vertentes de origem vulcânica, os movimentos de massa considerados mais importantes consistem nos movimentos ocorridos devido a processos de solifluxão, responsáveis pela formação dos *lahars* ou *mud flows*. Os processos de solifluxão (liquefação) acontecem quando há saturação das formações detriticas, principalmente cinzas, em água e as vertentes tornam-se instáveis. Quando o limite de liquidez da formação é ultrapassado, a formação movimentase ao longo da vertente do aparelho vulcânico, sob a forma de “escoadas ou fluxos de lama” ou de “escoadas detriticas” (Nunes, 2003 *in* Silva, 2010).

Os *lahars* são processos que podem estar associados a uma erupção vulcânica, designando-se de *lahars* primários. Quando ocorrem sem estar associados a uma erupção, designam-se por *lahars* secundários. Em associação com um evento eruptivo, formam-se, devido às chuvadas que podem acompanhar as erupções vulcânicas explosivas, ao transbordo de um lago por uma abertura que se forma na depressão em consequência da erupção ou, pela rápida fusão de gelo e neve existente nas vertentes de um vulcão em atividade. Quando não estão associados à atividade vulcânica, os *lahars* correspondem à movimentação, por exemplo, devido a um sismo, de materiais vulcânicos saturados em água, ou devido a episódios de precipitação intensa (Nunes, 2003 *in* Silva, 2010). Importa referir que o sismo de outubro de 1522 (Vila Franca do Campo, ilha de São Miguel) provocou um *lahar* secundário responsável por uma grande destruição, sendo a causa principal das mortes registadas.

3.1.2. Fatores condicionantes e desencadeantes dos movimentos de massa e de erosão superficial

Nos processos de erosão e movimento de massa é essencial o reconhecimento das causas que levam à ocorrência desse movimento, ou erosão, para que se possam prever futuras situações de instabilidade ou influenciar a sua evolução, caso o processo de instabilização já se tenha iniciado, ou mesmo, adotar soluções de mitigação e correção da instabilização ocorrida.

A estabilidade/instabilidade dos terrenos é influenciada por dois grupos de fatores: os agentes e as causas. Os agentes correspondem aos fatores intrínsecos ao meio ambiente envolvente ao talude, tais como, as condições climáticas, hidrológicas, geológicas (litologia, estrutura e hidrogeologia) e morfológicas (forma de relevo e inclinação das vertentes). As causas

consistem no modo de atuação dos agentes, levando à criação de desequilíbrios que provocam a rotura do terreno e ao seu deslocamento gravítico. É assim perceptível que um único agente pode estar na origem de várias causas (Lamas, 2013).

Existem diversas causas dos movimentos de vertente, sendo que, muitas vezes, ocorrem em simultâneo e, o movimento dá-se quando o limiar da rotura está presente.

Com base no trabalho de Crozier (1986), Popescu (1994) (Crozier, 1986; Popescu, 1994 *in* Zêzere, 2005; Silva, 2010) propôs uma distinção entre fatores condicionantes e fatores desencadeantes, baseando-se em critérios: tais como o tipo e intensidade dos agentes atuantes, isto é, dos fatores de predisposição, fatores preparatórios e fatores desencadeantes (Figura 3.9).

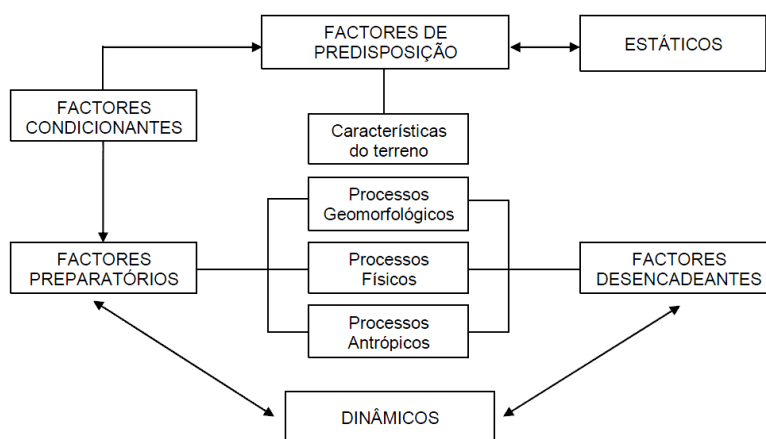


Figura 3.9 - Fatores intervenientes nos movimentos de terreno (adaptado de Popescu, 1994 *in* Silva, 2010)

Como se pode observar na figura anterior, os fatores de predisposição são considerados estáticos e inerentes ao terreno, controlando o nível de instabilidade potencial das formações das vertentes e determinando a variação espacial da suscetibilidade do terreno à instabilidade. São fatores que abrangem características intrínsecas do meio, expressando a menor ou maior suscetibilidade dos terrenos à rotura, ao nível da litologia e estrutura, morfologia e hidrogeologia (Silva, 2010).

Os fatores preparatórios são dinâmicos e levam à diminuição da margem de estabilidade sem ocorrer a rotura inicial. Quanto aos fatores desencadeantes, estes reproduzem a causa imediata da instabilidade, colocando o talude numa situação de desequilíbrio, devido à ocorrência de rotura e, determinam o intervalo de tempo associado a cada movimento de vertente, sendo exemplo desse tipo de fator, episódios de precipitação intensa e/ou prolongada, a fusão de neve e de gelo, as erupções vulcânicas e os sismos de elevada magnitude (Silva, 2010; Brissos, 2013). “Além dos fatores que condicionam a evolução das vertentes, há sempre pelo menos um ou outro que contribui para o rompimento da anterior situação de equilíbrio instável e que, normalmente é a água proveniente da chuva, a qual, muitas vezes, também origina cheias nas ribeiras açorianas” (Lourenço, 2008 *in* Silva, 2010).

Alguns destes fatores podem ser o vento intenso e o peso próprio ou a inclinação das árvores.

A figura 3.10 mostra a forma como os agentes contribuem para a instabilização de um talude.

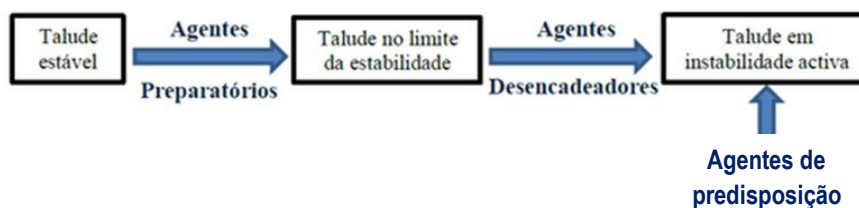


Figura 3.10 - Esquema de um processo de instabilização de um talude (adaptado de Crozier, 1986 in Lamas, 2013, Brissos, 2013)

Popescu (Popescu, 1994 in Silva, 2010), com base no modo como todos os agentes mencionados concedem características aos movimentos de terreno, em relação à geometria, velocidade e duração, estruturou várias causas dos movimentos de vertente: (i) características do terreno; (ii) processos geomorfológicos; (iii) processos físicos; (iv) processos antrópicos.

- i. Características do terreno: podem ser subdivididas em fatores geológicos e em fatores morfológicos. Fatores geológicos: a) Presença de rochas com componente argilosa e comportamento mecânico plástico; b) Presença de depósitos sedimentares pouco consolidados ou não consolidados; c) Presença de solos pouco densos assentes em rochas maciças e impermeáveis; d) Presença de rochas alteradas ou fissuradas; e) Presença de discontinuidades estruturais, tais como, falhas, diaclases, planos de estratificação, planos de xistosidade, e a concordância com o declive; f) Contraste da permeabilidade e efeito no regime hidrológico dos terrenos. Fatores morfológicos: a) A forma das vertentes, que influencia a distribuição da água no solo, já que a saturação do solo é atingida mais rapidamente nas topografias côncavas, devido à convergência da escorrência superficial e do escoamento sub-superficial; b) O declive das vertentes.
- ii. Processos geomorfológicos: a) Tectónica e encaixe da rede hidrográfica; b) Descompressão e expansão volumétrica devido ao recuo de glaciares; c) Erosão subterrânea; d) Erosão fluvial, marinha ou glaciária no sopé das vertentes; e) Deposição de sedimentos e aumento da carga nas vertentes.
- iii. Processos físicos: a) Meteorização física; b) Precipitação intensa e concentrada, abundante e prolongada; c) Fusão da neve e do gelo; d) Descida súbita do nível da água; e) Fenómenos de expansão-retração em solos argilosos; f) Atividade sísmica; g) Erupções vulcânicas.
- iv. Processos antrópicos: a) Escavações na zona central, ou no sopé, de um talude; b) Sobrecargas no topo da vertente (árvores); c) Rega; d) Manutenção defeituosa dos sistemas de drenagem; e) Desflorestação; f) Atividades mineiras e pedreiras; g) Atividades associadas à exploração de recursos subterrâneos (água, geotermia, petróleo, gás); h) Vibrações artificiais (tráfego rodoviário e maquinaria pesada).

De entre os fatores referidos acima, a precipitação, a erosão marinha, a atividade sísmica, a atividade vulcânica e a ação antrópica, podem ser considerados os fatores mais relevantes no desencadeamento de processos de instabilidade nos Açores, mais concretamente quanto aos movimentos de terreno e de vertente. No caso da erosão hídrica, como é natural, a precipitação é o principal fator responsável pelo desencadeamento deste processo. De seguida estes fatores são discutidos mais pormenorizadamente, à exceção da erosão marinha visto que esta não se enquadra na zona de estudo.

Precipitação

A precipitação é um importante agente desencadeador de deslizamentos e outros tipos de processos de instabilidade, sendo também responsável pela denominada erosão hídrica mas, a precipitação não atua isolada. É habitual proceder-se a uma avaliação pormenorizada da sua incidência diária, mensal ou anual, já que os fenómenos de instabilização não são limitados às estações húmidas. Deste modo, a precipitação pode ser responsável por (Amaral, 2007 *in* Silva, 2010):

1. Alterações dos parâmetros de resistência mecânica dos materiais devido à diminuição da coesão aparente, havendo eliminação das tensões capilares;
2. Aumento da massa específica dos materiais constituintes das vertentes;
3. Aumento de pressão nos poros dos solos, subpressões nas descontinuidades rochosas e forças de percolação, devido ao avanço da frente de saturação nos maciços.

Em algumas regiões dos Açores, como é o caso do concelho da Povoação, as linhas de água são muito encaixadas e, na ocorrência de precipitações intensas e concentradas, podem suceder-se várias catástrofes, como já ocorreu no passado (cheias de 1886 e de 1986 ocorridas na vila da Povoação). A água proveniente da precipitação pode ainda ser acompanhada pelo transporte de lama, cascalho/seixo ou até troncos de árvores, para as regiões situadas a cotas mais baixas, provocando a destruição dessas regiões e/ou a formação de cheias. A precipitação tem também um papel preponderante na modelação da paisagem, modelando e construindo novas linhas de água, sulcos profundos e outros tipos de erosão hídrica, como as ravinas/barrancos identificadas na área do Vanzinho. O impacto das gotas da chuva e o escoamento superficial afetam o material normalmente mais solto e alterado à superfície, arrastando, normalmente, as partículas de menor granulometria. Pode-se assim dizer que o escoamento superficial é um dos fatores mais importantes no que diz respeito à forma de erosão hídrica (Gomes, 2011).

Atividade sísmica

Como já foi referido no capítulo anterior, o arquipélago dos Açores está inserido numa região com atividade sísmica frequente. Nos Açores, a ocorrência de episódios sísmicos importantes originaram milhares de mortos e enormes danos materiais. Devido à sua posição no limite da

fronteira de placas da Eurásia e da Núbia (Trota, 2009) as ilhas dos Grupos Oriental e Central do arquipélago dos Açores apresentam elevada atividade sísmica.

A atividade sísmica desempenha portanto um papel importante no desencadeamento dos movimentos de vertente, sendo resultado do efeito produzido pela propagação das ondas sísmicas, através da aceleração horizontal nos terrenos. Para Zêzere (2005) as consequências da aceleração horizontal na instabilidade das vertentes manifestam-se, através da modificação das forças de uma forma idêntica à de um aumento súbito e temporário do declive e da submissão dos solos e formações geológicas à alternância de ciclos de carga e descompressão, produzindo alterações irreversíveis na pressão intersticial e na resistência ao corte dos solos e das formações geológicas. A existência de uma camada saturada e a presença de solos suscetíveis à liquefação, ao longo do plano de rotura são condições que favorecem a ocorrência de movimentos de vertente de grande magnitude, em resultado de um sismo.

Atividade vulcânica

A atividade vulcânica produz sismicidade elevada, normalmente com múltiplos eventos sísmicos de baixa a média magnitude (até cerca de 5,5). Existem relatos de prejuízos em habitações e movimentos de vertente associados à atividade vulcânica histórica nos Açores, particularmente nos períodos pré e sin-eruptivos (Trota, 2009).

Ação antrópica

A evolução natural dos movimentos de terreno e das vertentes é um processo que, como o próprio termo significa, advém de fatores naturais. No entanto, a ação antrópica afeta o ritmo dessa evolução natural, acelerando-a ou diminuindo-a, conforme o seu grau de interação (Amaral, 2007 *in* Silva, 2011). As atividades antrópicas que mais intervêm na estabilidade dos terrenos nos Açores correspondem à construção de infraestruturas viárias, às expansões urbanas, às atividades agrícolas, à desflorestação, ao pastoreio e às explorações de massas minerais (por exemplo, escórias e *spatter*) existentes na região, embora com menor representatividade relativamente às atividades anteriores (Silva, 2010).

Começando pela expansão urbana, é natural a sua consequência no meio ambiente, visto que a vegetação e os solos são afetados. A destruição do coberto vegetal leva à impermeabilização dos terrenos com elevado potencial de infiltração das águas e produção de biomassa.

O pastoreio pode contribuir para a degradação da paisagem e diminuição da infiltração, devido à compactação do solo e à destruição ou diminuição do coberto vegetal, para alimentação dos animais. Tanto o primeiro caso, como o segundo, favorecem um tipo de escoamento superficial desorganizado, devido à redução da infiltração das águas da chuva no solo, da interceção feita pela vegetação às gotas de água provenientes da chuva e à compactação (Silva, 2010). O solo

fica a descoberto, durante longos períodos, e as chuvas transportam as camadas mais superficiais e mais ricas em nutrientes e matéria orgânica.

Quanto às práticas agrícolas, os problemas associados a essas atividades estão relacionados com a substituição da vegetação natural por uma vegetação artificial. Quando o solo fica descoberto, e até que o coberto vegetal cresça, ocorre lavagem de solo, com arrastamento de partículas.

Por fim, a desflorestação determina a exposição completa do solo aos agentes climáticos (vento, precipitação), a redução de matéria orgânica no solo e de biomassa, e o término da função termo-reguladora das árvores, provocando fortes consequências no equilíbrio do ecossistema. A existência de uma florestação errada e em vertentes também é nefasta.

Segundo Lamas (2013), a análise dos efeitos relativos à presença de coberto vegetal na estabilidade de taludes torna-se complexa visto que a sua relevância nos processos de estabilização é variável consoante o tipo e as características da vegetação implementada. A presença de vegetação rasteira impede o contacto direto das gotas da chuva com o solo e reduz os efeitos erosivos das águas de escorrência, havendo assim estabilidade da vertente. A vegetação de grande porte provoca o aumento da coesão do solo devido ao efeito das suas raízes. No entanto, a presença de vegetação de grande porte, situada sobretudo no sopé dos taludes e na face do próprio talude, pode provocar um efeito contrário em maciços rochosos devido à fragmentação do maciço, originada pelo alargamento das fraturas existentes pelas raízes, ajudando à fragmentação do maciço. Também impõem acréscimo das tensões de corte no terreno devido ao peso próprio e da água temporária existente na folhagem das árvores, transmitindo tensões cíclicas no solo quando agitadas por ventos fortes.

3.1.3. Tipos de instabilidade de terrenos resultantes da erosão hídrica

Existem dois tipos principais de instabilidade de solos que resultam da atividade hídrica:

- 1) Erosão ou remoção superficial do solo;
- 2) Movimentos de massa (tais como, os deslizamentos, movimentos de solo ou solifluxão e *creeping*).

Neste subcapítulo apenas será abordada a erosão superficial do solo, pois os movimentos de vertente foram já abordados no início deste capítulo.

A erosão do solo pode ser compreendida como sendo um fenómeno físico de evolução natural em que ocorre transporte de partículas do solo através da ação de agentes erosivos como a água, o vento, o gelo/neve e a gravidade (Tóth and Van Beek 2012 *in* Simões, 2013). A erosão pode ser considerada como um processo natural indispensável à formação do solo na escala

temporal geológica, que só ocorre quando a taxa de remoção do solo excede a taxa de formação do mesmo. Contudo, a ação antrópica pode acelerar o processo erosivo designando-se assim, a erosão, como erosão antrópica.

Os fatores responsáveis pela origem da erosão do solo (grau de erosividade do agente erosivo, erodibilidade do solo, declive das vertentes, tipo de coberto vegetal e a presença/ausência de medidas de preservação ou proteção) podem atuar em conjunto ou haver um predomínio de uns fatores relativamente a outros.

Segundo Garcia e Furtado (Garcia e Furtado, 1991 *in* Silva, 2010) o empobrecimento acelerado dos solos das ilhas açorianas pode estar fortemente relacionado com a erosão hídrica do solo, muito frequente no arquipélago dos Açores. Esta é gerada pela ação da precipitação intensa, como resultado do impacto das gotas da chuva e do escoamento superficial desorganizado.

Por outro lado, a utilização dos solos para pasto também provoca a alteração da sua estrutura original através da modelação dos terrenos por ação antrópica e a compactação dos mesmos, provocando a alteração da estabilidade dos agregados do solo, o levando à aceleração do processo erosivo e o conseqüente empobrecimento dos solos.

O impacto intenso das gotas da chuva no solo corresponde apenas à fase inicial do processo de erosão que poderá evoluir com o tempo. O tipo de solo e de coberto vegetal interferem também nesse processo. Os terrenos argilosos reduzem a capacidade de infiltração, e portanto há um aumento do escoamento superficial (Simões, 2013).

O escoamento superficial é o processo responsável pela remoção e transporte das partículas para fora do seu local de origem e ocorre sobretudo quando a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração do solo (Henriques, 2009 *in* Simões, 2013). Os fatores que interferem na quantidade de material que é transportado pela escorrência superficial correspondem à dimensão das partículas, à topografia do terreno, à presença de coberto vegetal e à intensidade do agente mobilizador (Galas, 2006). Ocorre transporte das partículas de diferente modo: as mais finas, a argila, são transportadas em solução, enquanto o silte é transportado em suspensão e as grosseiras são roladas, havendo atrito entre as partículas desagregadas e a superfície do solo, levando à desagregação de novas partículas.

Por último, ocorre a deposição do material transportado, ao surgir um obstáculo ao longo do caminho do fluxo de transporte, ou quando simplesmente há cessação da precipitação (Galas, 2006).

Existem assim três percursores no aparecimento de erosão hídrica: a desagregação ou remoção, o transporte das partículas de solo ou rocha inicialmente desagregada em partículas de menor dimensão e a deposição em regiões com cotas mais baixas.

Os fatores que influenciam a erosão hídrica correspondem à energia (aumenta com a intensidade da chuva) e quantidade de precipitação, a resistência do solo (influenciada pela presença de matéria orgânica, a química do solo e o tamanho das partículas de solo), a quantidade e tipo de coberto vegetal, as características da vertente (declive e comprimento das vertentes) e as práticas de gestão dos solos (Alho, 2006).

A resistência do solo ao impacto das gotas de água e a capacidade de infiltração da água são afetadas pelas propriedades físicas do solo, especialmente a sua estrutura, textura e porosidade (macro porosidade) (Gray, 1982 *in* Galas, 2006). A estrutura corresponde ao tamanho, forma e arranjo das partículas e vazios, atuando como a textura (tamanho das partículas) e influenciando a capacidade de infiltração da água e no arrastamento das partículas. Há um maior arrastamento das partículas de um solo arenoso, visto ser pouco coeso, embora este tipo de solo permita uma maior infiltração da água no solo.

Nos Açores é possível observar a ocorrência de fenómenos de erosão, nas regiões cujas pastagens são submetidas a uma atividade de pastoreio excessivo, especialmente em encostas com declives significativos, devido ao pisoteio por parte do gado.

Neste caso particular de estudo, o solo erodido dos terrenos adjacentes à Lagoa das Furnas (Vanzinho), é transportado para a própria lagoa através das linhas de água. O material erodido é depositado na lagoa e torna-se problemático na medida em que esta se encontra a perder profundidade, ou seja, a altura máxima de água existente na lagoa, está a diminuir. Os solos e litologias existentes na área de estudo são friáveis e facilmente desagregáveis permitindo assim que os processos erosivos lineares se instalem com maior rapidez.

Na tabela 3.2 encontram-se descritos sinteticamente os principais tipos de erosão hídrica segundo Vieira *et al.* (1996) e Branca (1996) (Vieira *et al.*, 1996; Branca, 1996 *in* Alho, 2006).

Tabela 3.2 - Principais tipos de erosão hídrica (adaptado de Vieira *et al.*, 1996 e Branca, 1996 *in* Alho, 2006)

Formas	Tipos	Observações
Remoção superficial do solo	Salpico (<i>splash</i>)	Corresponde ao primeiro estado do processo erosivo. Resulta do impacto das gotas da chuva no solo, causando desagregação do mesmo.
	Laminar	Corresponde ao transporte de partículas que se encontram em suspensão, sendo pouco evidente. Ocorre em solos de declive variável e precede a erosão por sulco.
	Sulco	Corresponde à remoção e transporte de partículas do solo provocando a abertura de sulcos. Pode originar canais com 30 cm de profundidade. É evidente no terreno.
	Ravina/barranco	Ocorre em solos com declive acentuado, sucedendo a erosão por sulco, ampliando os seus efeitos. O tipo de ravinamento depende da friabilidade dos solos.
Movimento de massas	Deslizamentos	Movimento de massas rápido de solo/rocha ao longo de um plano inclinado.
	Solifluxão	Movimento de massas de solo sob a forma de correntes de lama.
	<i>Creeping</i>	Movimento lento da camada superficial do solo ao longo da superfície do talude.

Os tipos de erosão hídrica responsáveis pela remoção superficial do solo, referidos na tabela anterior, correspondem aos designados processos de erosão linear e são abordados a seguir.

3.1.3.1 Erosão superficial de solo

O ciclo hidrológico apresenta uma grande importância nos processos erosivos, dado que uma percentagem da água da precipitação cai diretamente no solo, e outra percentagem é interceptada pelo coberto vegetal, retornando essa última parte à atmosfera através de processos de evaporação ou atinge o solo através do gotejamento das folhas e da escorrência ao longo do caule ou tronco das árvores. Numa fase inicial, a água que atinge o solo, pode causar o salpico ou infiltrar-se, aumentando o teor de humidade do solo, podendo também os espaços existentes na região superficial do solo formando poças, que casualmente podem dar início ao escoamento superficial (Ramos, 2008).

Quando falamos de remoção superficial do solo, podem ser definidos vários processos de erosão hídrica, destacando-se os mais comuns, como a erosão por salpico (*splash*), a erosão laminar, a erosão em sulcos e a erosão em barrancos/ravinhas. A combinação de vários tipos de erosão hídrica dá origem às chamadas *badlands*.

Erosão por salpico (*splash*)

As gotas provenientes da chuva são o principal agente de remoção das partículas do solo, por salpico, sendo o destacamento maior quanto mais intensa for a precipitação. Assim, a erosão por salpico (*splash*) corresponde à desintegração ou remoção e movimento pelo ar de pequenas partículas de solo (podendo ser projetadas até cerca de um metro ou mais de distância) causado pelo impacto das gotas da precipitação nos solos (Ramos, 2008).

As forças que a influenciam o efeito de salpico correspondem: a massa da gota de água e a sua velocidade de queda, o declive da superfície topográfica e as características do solo, tais como, a condutividade hidráulica, o teor em água, aspereza, tamanho das partículas, elasticidade e a massa da superfície associada (Desta & Adugna, 2012).

A seguir estão descritos alguns princípios básicos que devem ser considerados na erosão por salpico (Desta & Adugna, 2012):

- O salpico do solo resulta do impacto direto das gotas de água sobre as partículas do solo;
- Quando uma gota de chuva atinge a superfície do solo, coberta por uma espessa camada de vegetação, o solo encontra-se protegido e a água infiltra-se lentamente preenchendo os poros do solo. No entanto, se o solo está descoberto, ocorre erosão por salpico;
- Com a queda das gotas há desagregação das partículas do solo e os materiais finos do solo são retirados;

- O principal efeito da erosão por salpico é a erosão da parte superficial do solo, ocorrendo posteriormente o transporte das partículas através da escorrência superficial;
- A quantidade, o tamanho e a velocidade das gotas determinam o impacto da chuva por unidade de área. Gotas de grandes dimensões podem aumentar a capacidade de transporte de sedimentos e a velocidade das gotas de chuva, é afetada pelo tamanho, altura de queda, velocidade do vento e pela resistência do ar;
- Uma única gota de chuva pode provocar o salpico de solo húmido, até cerca de 60 centímetros de altura e cerca de 150 centímetros desde o local que a gota de chuva caiu;
- A queda contínua de chuva de uma tempestade pode transformar o solo numa lama fluida.

Os fatores que afetam a direção e a distância do salpico do solo correspondem à existência e direção do vento, às condições de superfície do solo (presença e tipo de coberto vegetal) e ao declive do terreno. A erosão por salpico (*splash*) dá início às outras formas de erosão hídrica.

Na figura 3.11 é representada esquematicamente a gênese da erosão por salpico.

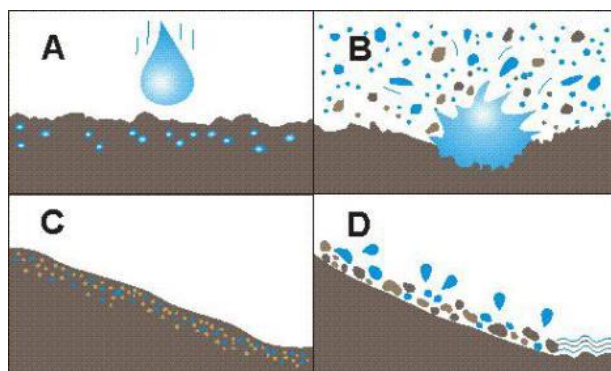


Figura 3.11 - Fases do processo de erosão por salpico. A) Impacto da gota de chuva sobre o solo, sem coberto vegetal; B) Desintegração e formação de pequenas partículas; C) As partículas bloqueiam os poros e formam uma superfície que funciona como um selo; D) A água de escorrência transporta as partículas de solo sendo depositadas a cotas mais baixas onde a velocidade da água é reduzida (Wordpress, 2014)

Erosão laminar

A erosão laminar (Figura 3.12) é considerada como o processo de remoção de uma camada fina e uniforme de solo superficial através da ação da precipitação (que pode ser por salpico) e transporte pelo escoamento superficial não concentrado.

A erosão laminar é uma das formas mais prejudiciais de erosão do solo por ação da água. Muitas vezes é difícil reconhecer esse tipo de erosão hídrica, mas a ocorrência repetida do processo erosivo, expõe o subsolo. Áreas onde o solo superficial se encontre solto ou seja pouco coerente, estão mais suscetíveis à erosão laminar (Desta & Adugna, 2012).



Figura 3.12 – À esquerda, um exemplo de um caso de erosão laminar (Landcarevic, 2014); à direita, erosão laminar observada na área de estudo (Vanzinho) com zonas um pouco mais profundas relativamente ao meio envolvente (26/04/2014)

A erosão laminar pode ser prevenida através da manutenção da cobertura vegetal, tal como no caso da erosão por salpico, e da potenciação da infiltração da água (Alho, 2006).

Os seguintes sinais observáveis no solo são indicadores da existência de erosão laminar (Desta & Adugna, 2012):

- Existência de raízes expostas;
- Existência de rocha sã exposta;
- Os solos tornam-se mais cascalhentos;
- Presença de solo erodido em poças existentes;
- Ocorre mistura do subsolo com a superfície;
- O rendimento das culturas agrícolas cai gradualmente.

Erosão por sulco

A erosão por sulcos (Figura 3.13) é um dos tipos de erosão linear causada pelo escoamento superficial e corresponde a um processo de erosão que ocorre em terrenos com inclinações consideráveis e se formam numerosos canais aleatórios que podem ter apenas alguns centímetros de profundidade.

A existência de processos de fragmentação ou remoção e de transporte de partículas do solo, por ação do escoamento superficial concentrado, originam a erosão por sulco. A fragmentação das partículas através do escoamento superficial depende do grau de erodibilidade dos sulcos, das características hidráulicas do escoamento ocorridas no interior dos sulcos e da carga de sedimentos em suspensão (Bagarello e Ferro 1999 *in* Alho, 2006).



Figura 3.13 – À esquerda, um exemplo de erosão por sulco (Imeson & Curfs, s.d.); à direita, erosão por sulco observada na zona do Vanzinho, com a formação de um pequeno canal (26/04/2014)

Durante uma chuvada intensa, o fluxo concentra-se rapidamente em microsulcos, que por sua vez desagua em sulcos de maiores dimensões e pode casualmente atingir um sistema de canais existente. A concentração do fluxo em sulcos aumenta o poder erosivo do fluxo havendo um aumento da desagregação do solo das margens do sulco/canal. Geralmente, a erosão por sulco é o processo precedente à formação de ravinas/barrancos e o desenvolvimento dos sulcos ocorre no sentido para onde o escoamento é canalizado (Desta & Adugna, 2012).

A prevenção do desenvolvimento de erosão por sulcos pode ser prevenida com a diminuição da velocidade do escoamento (diminuição do declive do talude, no caso de ocorrer erosão em taludes) ou com a compactação do solo (Alho, 2006). Pode-se também preencher o sulco com material drenante, como a brita.

Erosão por ravina/barranco

Os principais processos de erosão linear, ravinas ou barrancos, encontram-se frequentemente em materiais característicos, com fraca coerência, tais como os solos pouco consolidados (arenosos) ou solos grosseiros a muito grosseiros (cascalhos). Ocorrem também nas cabeceiras dos cursos de água de primeira ordem e frequentemente em campos agrícolas onde há compactação do solo em profundidade e o solo superficial é pouco coerente (Alho, 2006).

A erosão por barrancos/ravinas corresponde à formação de canais, tal como a formação de um sulco, embora as profundidades atingidas sejam consideráveis, e a sua secção, numa primeira fase tem a forma de V e pode ser estreita. Com a evolução do processo de erosão, a secção da ravina pode ser moldada por processos de desgaste e deslizamento, nas zonas laterais, adotando uma forma triangular (subsolo mais resistentes do que os horizontes superficiais), trapezoidal (solos profundos, constituídos por diferentes horizontes com material de consistência uniforme) ou em U (Figura 3.14) (Bagarello e Ferro, 1999 *in* Alho, 2006).

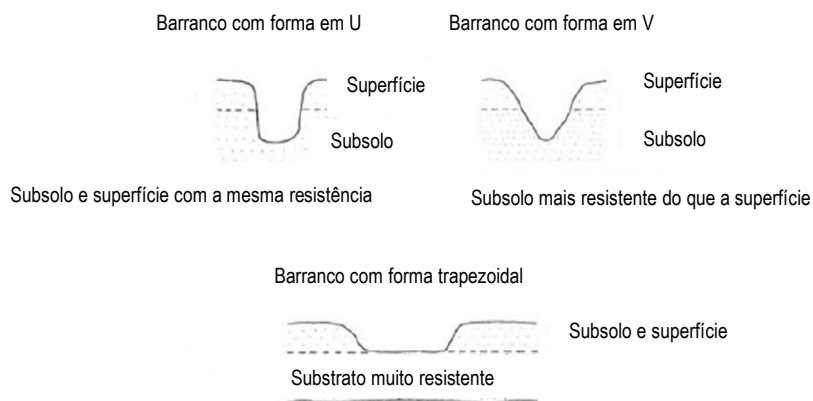


Figura 3.14 - Formas possíveis de um barranco/ravina (adaptado de Thomas, 1997 in Desta & Adugna, 2012)

Algumas ravinas podem ser formadas como resultado da erosão em túnel, também conhecida como *piping*. O escoamento superficial pode passar através de fendas ou macro poros (canais construídos por toupeiras ou térmitas) e ao chegar ao subsolo infiltra-se lentamente, escoando lateralmente como fluxo de sub-superfície. A existência de argila dispersa pode ocorrer ao longo da linha de fluxo e levar à formação de túneis. Casualmente, o topo do túnel pode colapsar e originar um barranco ou ravina (Desta & Adugna, 2012).

Vulgarmente um barranco é formado pela expansão rápida do sistema de drenagem superficial numa área de terreno instável, como por exemplo, a existência de formações geológicas friáveis e facilmente desagregáveis. Este tipo de erosão é afetado por vários fatores, muito deles já anteriormente mencionados. Alguns destes fatores determinam o perigo potencial, enquanto outros determinam a intensidade e a velocidade de avanço do barranco. Os fatores que originam os barrancos podem ser classificados em dois grupos: fatores antrópicos, tais como, o uso indevido do solo, o sobre pastoreio (gado excessivo), o sistema de cultivo em terras declivosas ou marginais, o cultivo descuidado sem controlo do escoamento da água, a desflorestação e a má construção ou construção indevida de pontões e outras estruturas como canais de escoamento, os incêndios florestais e a construção de estradas, de trilhos e caminhos pedonais, e os fatores físicos, tais como, a precipitação, a topografia do terreno (que influencia a forma e tamanho das bacias hidrográficas, comprimento e inclinação da vertente), as propriedades do solo e o tipo e densidade do coberto vegetal.

A estabilização ou controlo de uma ravina/barranco requer tipicamente a remoção ou o redireccionamento do fluxo de água proveniente da escorrência superficial e que passa pela ravina/barranco, ou seja, é necessária uma drenagem eficaz (Keller & Sherar, 2003).

O tratamento/reabilitação de uma ravina/barranco depende de vários fatores, tais como, o tamanho do barranco, a existência de erosão ativa ou não, o tipo de solo, a frequência e intensidade do fluxo, a topografia da área e o uso do terreno após a reabilitação (Natural Resource Management of the Northern Territory Government, s.d.).

As ravinas/barrancos podem ser classificados de acordo com a sua continuidade, podendo ser contínuas ou descontínuas (Heede & Research Forester, 1960).

Uma ravina descontínua (Figura 3.15) pode evoluir para uma contínua se o processo erosivo persistir ao longo do tempo. Pequenos barrancos iniciais podem ao longo do tempo dar origem a um único barranco de maiores dimensões caso hajam múltiplos barrancos na proximidade.

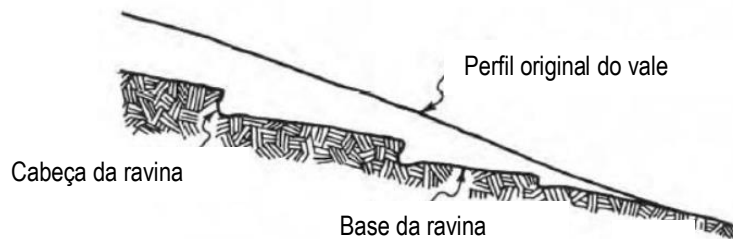


Figura 3.15 - Representação de uma ravina descontínua (adaptado de Heede & Research Forester, 1960)

A profundidade do barranco aumenta ao longo do seu comprimento, ou seja, há aumento de profundidade ao longo do perfil longitudinal de um barranco (para jusante).

O declive de um barranco descontínuo é sempre menor do que o declive original do terreno. Após a estabilização da formação de um barranco, e com o avançar da erosão, a distância existente entre cada barranco diminui.

Um barranco descontínuo evolui tanto na direção das regiões localizadas acima de cada barranco individual já formado, como na direção de regiões localizadas abaixo de cada barranco existente.

O declive de um barranco contínuo (Figura 3.16) assemelha-se mais com o declive original do terreno. O perfil longitudinal torna-se côncavo e a profundidade do canal diminui até o gradiente da base/cota original do vale e a base do canal intersecte a boca do barranco. Os sedimentos são depositados a jusante da boca do barranco na zona mais aplanada.

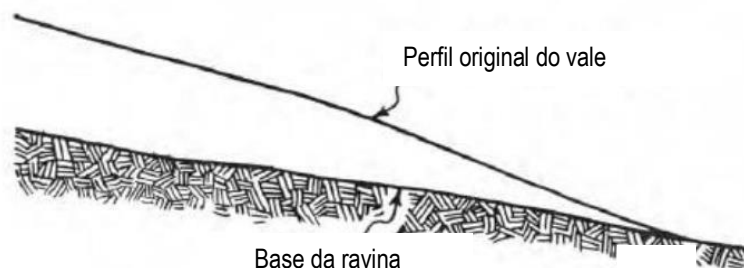


Figura 3.16 - Representação de uma ravina contínua (adaptado de Heede & Research Forester, 1960)

Num barranco contínuo, a evolução do mesmo ocorre apenas na direção do segmento mais baixo de escorrência das águas superficiais, portanto, para jusante da boca do barranco, onde é maior a diferença entre o gradiente do piso do vale e entre o canal. Aqui, o gradiente ainda não atingiu o equilíbrio com o declive original do vale.

Na figura 3.17 está representado esquematicamente o desenvolvimento de um barranco após a sua formação, onde se pode observar o recuo da “cabeça” do barranco devido á passagem do fluxo de água superficial, podendo haver também um aumento do declive no interior do mesmo e de profundidade. Este recuo pode persistir até ser encontrada rocha sã (Desta & Adugna, 2012).

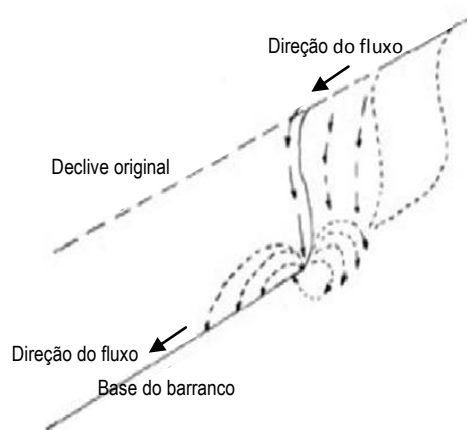


Figura 3.17 - Erosão na "cabeça" do barranco devido ao fluxo de água superficial (adaptado de Desta & Adugna, 2012)

Na figura 3.18 está representado esquematicamente a passagem de barrancos/ravinas descontínuas a uma única contínua.

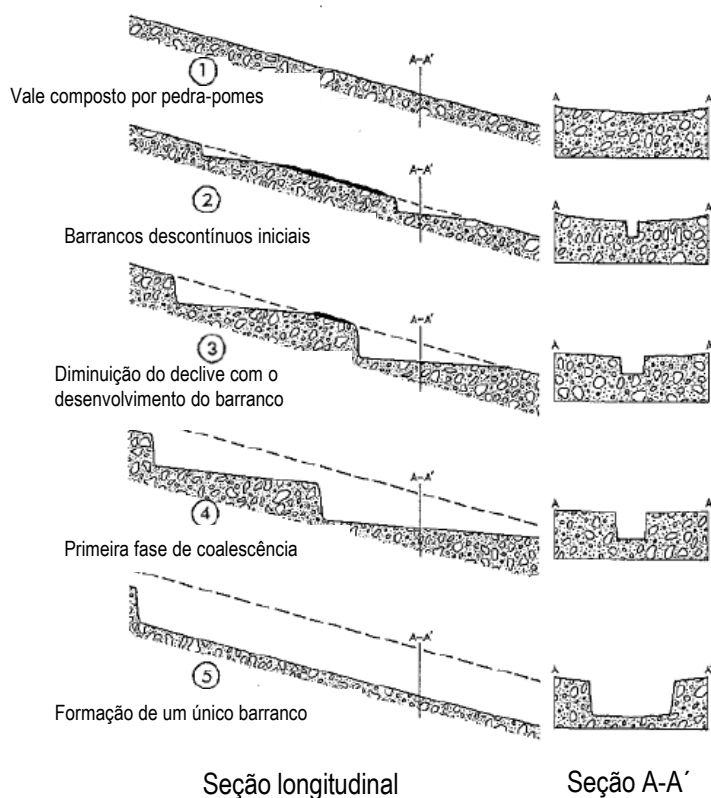


Figura 3.18 - Representação esquemática do desenvolvimento de barrancos/ravinas num vale pomítico (adaptado de Blong, s.d.)

Os barrancos/ravinas podem também ser classificados com base na sua profundidade e área de drenagem, como se pode ver na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Classificação dos barrancos com base na profundidade e área de drenagem (adaptado de Desta & Adugna, 2012)

Classe do barranco	Profundidade (m)	Área de drenagem (ha)	Descarga (m ³ /s)
Pequeno	<1.5	<10	<0.1
Médio	1.5 a 3	10 a 30	0.1 a 1
Grande	> 3	> 30	> 1

Os barrancos/ravinas podem também ser classificados com base na sua forma, como já se viu na figura 3.14. A seção da ravina pode adotar uma forma triangular (em V), trapezoidal ou em U. Nos primeiros, o subsolo é relativamente mais resistente do que a superfície do solo. É a forma mais comum de um barranco, especialmente em solos arenosos e pouco coesos. A longo prazo, muitos barrancos em forma de U transformam-se em forma de V, com o avançar da erosão nas margens do barranco, até se obter um ângulo estável. Os barrancos trapezoidais podem ser formados nos casos em que a base da ravina é constituída por material mais resistente do que a camada mais superficial do solo e subsolo, sendo a taxa de erosão maior ao longo do canal do barranco do que na zona mais inferior, junto á base. O último tipo de barranco é formado nos casos em que a camada superficial do solo e o subsolo têm o mesmo grau de resistência contra a erosão sendo o subsolo erodido tão facilmente como a

superfície do solo. Estes tipos de barrancos são originados em áreas onde o solo é coeso e apresenta alto teor de argila.

Badlands

Um outro tipo de erosão hídrica muitas vezes observável corresponde às *badlands*. Estas consistem em áreas, que podem ser extensas, onde os processos de erosão dominam a superfície do terreno e todos os processos de erosão hídrica mencionados anteriormente podem estar presentes. Neste tipo de erosão hídrica a escorrência superficial é a principal responsável pelo seu aparecimento, sendo as regiões de rochas brandas, muito sensíveis à erosão, as zonas inicialmente erodidas.

Na figura 3.19 está representado um exemplo de uma *badland*.



Figura 3.19 - Exemplo de uma *badland* (Imeson & Curfs, s.d.)

3.2. Medidas mitigadoras/controlo para instabilidade de terrenos a implementar na região de estudo

Existem várias medidas mitigadoras ou de controlo de erosão superficial, tanto estruturais como biológicas (não estruturais), que podem ser implementadas na área de estudo, de acordo com as características do terreno. Estas medidas são apresentadas de seguida.

3.2.1. Medidas mitigadoras/controlo de erosão superficial de solos

As estruturas de remediação/contenção definitiva de uma ravina podem tornar-se processos dispendiosos, portanto, a prevenção é sempre melhor do que a remediação. Como já foi mencionado anteriormente, a formação e o desenvolvimento de ravinas é muitas vezes o

resultado do mau uso do solo, podendo ser prevenida com a adoção de boas práticas no uso do solo (Desta & Adugna, 2012).

A redução do volume de escoamento superficial através de um adequado sistema de uso do solo é essencial para o controlo do processo de desenvolvimento de uma ravina, sendo que muitas vezes o escoamento superficial é afetado pelo mau uso do solo por parte do ser humano.

A retenção de água na bacia hidrográfica é uma medida essencial para o controlo eficaz de uma ravina, através de processos mecânicos e técnicas de plantio. A gestão adequada do escoamento de água proporciona o aumento da cobertura vegetal, melhora as condições hidrológicas da bacia hidrográfica, reduzindo o volume de escoamento superficial e aumentando a capacidade de infiltração.

No controlo do desenvolvimento de ravinas é essencial a aplicação de três métodos pela seguinte ordem prioritária (Desta & Adugna, 2012):

- 1) Aperfeiçoamento das condições de drenagem da ravina para reduzir e regular o volume de escoamento;
- 2) Construção de desvios a montante da área dos ravinamentos;
- 3) Estabilização das ravinas através da aplicação de medidas estruturais e de revegetação.

Em determinadas áreas afetadas por ravinamento, a aplicação do primeiro e/ou do segundo método pode ser suficiente para estabilizar ravinas de pequena dimensão. O controlo do escoamento deve ser o primeiro método a seguir, sendo o mais eficaz no controlo de ravinamentos. Com o controlo do escoamento que atinge a ravina, será mais fácil proporcionar o crescimento de vegetação no interior da mesma.

O sucesso da aplicação dos métodos referidos depende do planeamento do processo de controlo de uma ravina e das técnicas aplicadas, bem como da alteração do uso do solo.

Não existem normas para o controlo de ravinas visto que os ravinamentos não são todos iguais e os fatores percussores não são sempre os mesmos. O tratamento de ravinamentos pode ser um processo dispendioso logo, é indispensável definir prioridades no tratamento de ravinamentos dado que os recursos, tanto materiais como financeiros, são sempre limitados.

Como já foi referido, prevenir a formação de uma ravina é muito mais fácil do que controlar o seu desenvolvimento após a sua formação. Quando há a formação de uma ravina e esta não é estabilizada/controlada, com o passar do tempo ocorre um aumento da sua extensão, largura e profundidade. Quando se forma uma ravina/barranco, deve-se proceder de imediato ao seu controlo e remediação para evitar o seu desenvolvimento e favorecer a estabilidade da mesma.

Segundo Keller & Sherar (2003), “um grama de medidas de controlo da erosão e estabilização de uma ravina previne a perda de um quilograma de sedimentos”.

A prevenção é sempre mais económica do que a remediação dado que as medidas estruturais são consideravelmente mais dispendiosas do que as medidas preventivas.

Além das práticas adequadas de um bom uso do solo, existem medidas de tratamento específicos, tais como, valas de retenção e infiltração/drenagem e construção de terraços, que podem ser construídas a montante da área das ravinas formadas e/ou entre áreas sucessivas de ravinas, com a finalidade de reduzir o volume de escoamento superficial. Estas medidas apresentam um custo inferior ao das medidas estruturais de controlo de ravinamentos.

Em muitos casos, o desvio do escoamento a montante da ravina torna-se num método de controlo mais simples e menos dispendioso. Este é um método especialmente vantajoso em áreas de floresta e de pastagem. Os diversores redirecionam o escoamento para as linhas de água mais próximas ou em áreas estáveis, não suscetíveis à erosão. O objetivo destes diversores é a redução da água de escorrência superficial que entra na ravina e a proteção de áreas plantadas com elevado risco de serem atingidas por um grande volume de escoamento.

Existem inúmeras técnicas físicas e biológicas que podem ser aplicadas no tratamento eficaz dos ravinamentos, podendo proceder-se à combinação de várias medidas. A construção de medidas estruturais deverá ser seguida pela aplicação de medidas biológicas.

A seguir apresentam-se algumas das medidas estruturais e biológicas que podem ser aplicadas nos ravinamentos da área de estudo.

3.2.1.1. Medidas estruturais

Para o controlo de ravinamentos existem medidas estruturais temporárias que podem ser aplicadas, tais como, a construção de diques ou barragens de controlo compostas por rocha, gabiões, sacos de areia ou madeira. As barragens de controlo são construídas ao longo do leito da ravina, dissipando a energia do escoamento, através da diminuição da velocidade do fluxo de escoamento superficial e, para promovendo a estabilidade da ravina. As barragens de controlo podem ser temporárias e têm um tempo de vida de 3-8 anos, sendo capazes de armazenar o material que é erodido de montante. Podem ser combinadas com medidas biológicas, como o plantio, e com outras medidas estruturais de controlo da drenagem, tais como, diversores ou valas de drenagem, temporárias ou permanentes (Desta & Adugna, 2012).

Barragens de controlo, diques ou açudes

Usualmente, o sucesso de um projeto de estabilização de uma ravina consiste na remoção e/ou redirecionamento do fluxo de água proveniente da escorrência superficial e que passa pela ravina/barranco, com a construção de várias estruturas de estabilização no interior da

mesma, tais como, barragens de controlo ou açudes, seguindo os seguintes passos (Keller & Sherar, 2003):

1. Construção de um açude ou barragem de controlo em forma de "U" com uma altura mais baixa no topo central para manter o fluxo de água concentrado no centro do canal (Figura 3.20);

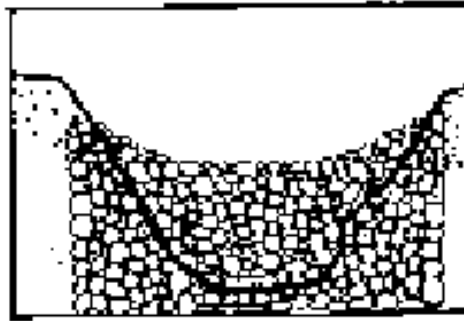


Figura 3.20 - Estrutura bem encaixada na superfície, com a forma em U no topo central da estrutura (Keller & Sherar, 2003)

2. Encaixar bem as estruturas nas margens adjacentes do canal para evitar a erosão nas extremidades das estruturas (Figura 3.21);



Figura 3.21 - Falha numa estrutura de controlo, construída em gabião para o controlo de uma ravina (Keller & Sherar, 2003)

3. Enterrar as estruturas com a profundidade necessária no canal para impedir a passagem do fluxo por baixo da estrutura (Figura 3.22);

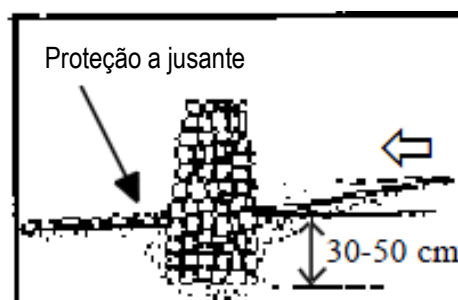


Figura 3.22 - Base da estrutura bem encaixada na superfície, com proteção a jusante (adaptado de Keller & Sherar, 2003)

4. Aplicar um espaçamento adequado às estruturas com uma proximidade suficiente para que o fluxo passe a estrutura a velocidades inferiores até atingir a estrutura a jusante e assim sucessivamente.

O principal objetivo das barragens de controlo é reter o material fino transportado pelo fluxo de água que passa através da ravina (Desta & Adugna, 2012).

O tipo de rocha geralmente utilizado como dique ou como barragem de controlo deve ter uma alta dureza, ser durável, bem calibrada com finos, e ter as dimensões suficientes para resistir a movimentações que possam ocorrer. Pode também ser utilizada, como dique ou barragem de controlo, gabiões, madeira ou bambu, rocha ou seixo e sacos de areia (Keller & Sherar, 2003).

Barragens de controlo em madeira, estacas e ramos ou galhos

Em áreas onde o solo da ravina apresenta grandes profundidades, as barragens de controlo constituídas por madeira, estacas e ramos, são uma boa opção (Figuras 3.23 a 3.26). O gradiente do canal da ravina pode variar entre 5 e 12%: no entanto não é aconselhável quando a mini-bacia hidrográfica da ravina tem uma grande área e é responsável por um grande volume de escoamento. O uso desse tipo de barragem é muito limitado nos casos em que as ravinas são muito extensas (Desta & Adugna, 2012).

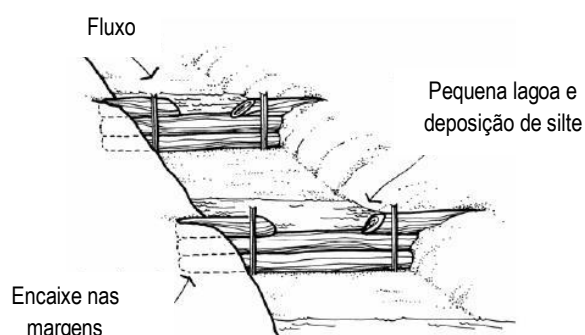


Figura 3.23 - Dique ou barragem de controlo constituída por madeira (adaptado de Natural Resource Management of the Northern Territory Government, s.d.)

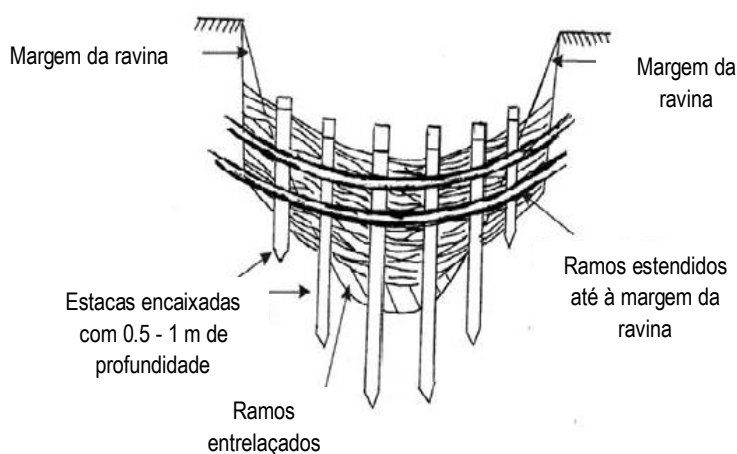


Figura 3.24 - Dique ou barragem de controlo constituída por madeira (adaptado de Desta & Adugna, 2012)

Existem dois tipos de barragem de controlo de madeira, estacas e ramos: constituídas por uma única linha de estacas (Figura 3.25) ou por duas linhas de estacas (Figura 3.26).

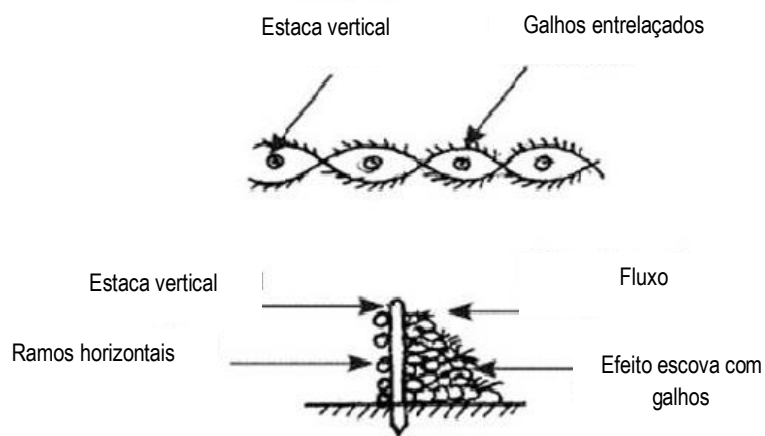


Figura 3.25 - Perfil vertical e corte transversal de uma barragem de controlo constituída por uma fila de estacas de madeira (adaptado de Desta & Aduugna, 2012)

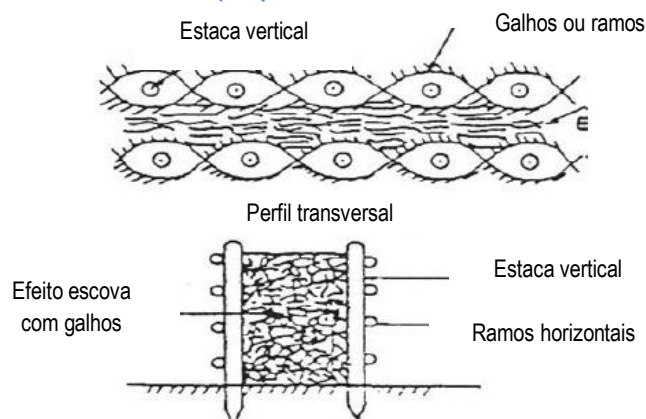


Figura 3.26 - Perfil vertical e corte transversal de uma barragem de controlo constituída por duas filas de estacas de madeira (adaptado de Desta & Aduugna, 2012)

O primeiro tipo pode ser usado nos casos em que o escoamento é inferior a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. A estrutura deve ser temporária e a sua durabilidade depende da qualidade das estacas utilizadas. As estacas devem ter entre 8 e 10 cm de diâmetro e os ramos ou galhos devem ser flexíveis e apresentar a configuração da figura 3.24. Os galhos mais grossos são utilizados como postes ou estacas verticais sendo escavados no solo com cerca de 0.5 m a 1 m ($1/3$ a $1/2$ do comprimento dos postes) de profundidade, com um espaçamento de cerca de 30 a 50 cm entre si. As estacas devem ter um comprimento de 1 a 2 m e o espaçamento entre as estacas depende da altura efetiva da barragem. Quanto maior for a altura da barragem, menor será o espaçamento entre as estacas (Desta & Aduugna, 2012).

Quanto ao segundo tipo, é um tipo de barragem adequada quando o escoamento é inferior a $1 \text{ m}^3/\text{s}$. As duas filas de estacas devem ter entre 5 e 10 cm de diâmetro e cerca 1 a 2 m de comprimento, sendo escavadas até cerca de 0.5 a 0.6 m de profundidade. O espaçamento entre as estacas deve ser de 0.5 m e o espaçamento entre as duas filas de estacas deve ser preenchido com ramos ou galhos.

Estas barragens podem ser reforçadas com bambu ou com sacos de areia a montante para funcionar como um absorvedor de choque e para dissipar a energia de escoamento ou, a jusante, para funcionar como reforço. Podem ser utilizados como estacas ou postes todas as espécies de árvores ou arbustos, no entanto, os postes de madeira devem ser resistentes ao apodrecimento e não vulneráveis às térmitas. É importante fixar os galhos com uma corda, arame ou pregos.

O tipo de barragem deve ser selecionado de acordo com a quantidade e o tipo de madeira disponível bem como de acordo com a velocidade e o volume de escoamento. A zona central do topo da barragem deve ser mais baixa do que as margens, para permitir o fluxo da água através da barragem e não através das margens. A altura máxima efetiva da barragem deve ser de um metro (sem contar com a profundidade das estacas que devem ser encaixadas na superfície do solo), adotando a barragem uma forma côncava ou retangular (Desta & Adugna, 2012).

Em casos de ravinamentos ocorridos em áreas pequenas ou menos graves, pode ser utilizado geotêxtil para proteção da base da superfície da ravina (Figura 3.27).

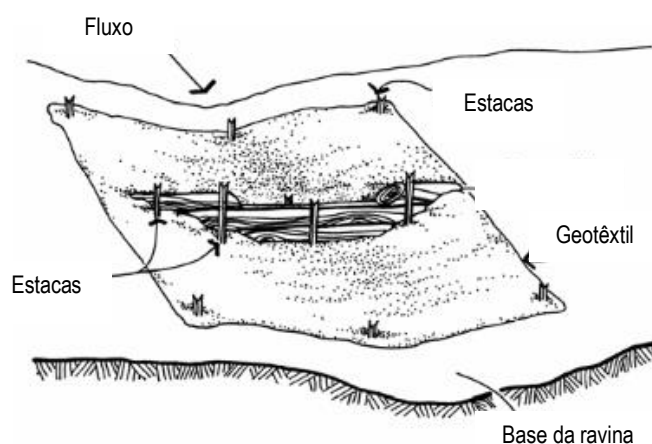


Figura 3.27 - Combinação do uso de geotêxtil na base da superfície da ravina com a construção de um dique ou barragem de controle (adaptado de Natural Resource Management of the Northern Territory Government, s.d.)

Barragens de controle em rocha

No que diz respeito às barragens de controle compostas por rocha, estas correspondem a uma estrutura composta por pequenas rochas colocadas em toda a largura do canal da ravina com a finalidade de reduzir a velocidade de escoamento (Figura 3.28). Os flancos ou a ancoragem nas margens do barranco deve ser bem profunda e as rochas de maiores dimensões devem ser combinadas com rochas de menores dimensões na zona interior da barragem. As rochas devem ser colocadas de modo que fiquem interligadas e as rochas de menor devem ser colocadas na zona central e na superfície externa da barragem, sendo cobertas com rochas de maiores dimensões para reforçar a barragem. A zona superior central da barragem deve ter

uma forma côncava e a superfície a montante pode ser reforçada com bambu (Desta & Adugna, 2012).

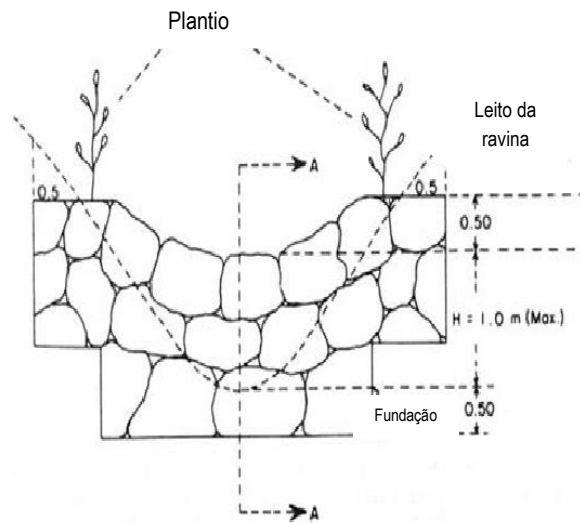


Figura 3.28 - Perfil frontal de uma barragem de controle composta por rocha (adaptado de Desta & Adugna, 2012)

O espaçamento adequado para as estruturas de controle a construir no interior de uma ravina/barranco depende do declive do canal do barranco e da altura da barragem de controle.

Assim, o espaçamento (S) entre sucessivas barragens pode ser calculado através da seguinte fórmula empírica (Desta & Adugna, 2012):

$$\frac{H * 1.2}{G} \quad (1)$$

Em que (1):

H - corresponde à altura efetiva desde o leito da ravina até ao centro côncavo da barragem (m);

G - corresponde ao gradiente ou declive da ravina (decimal).

O espaçamento entre barragens pode ainda ser calculado com base no seguinte ábaco, que utiliza o declive da ravina (G) e a altura efetiva da barragem (H) (Figura 3.29):

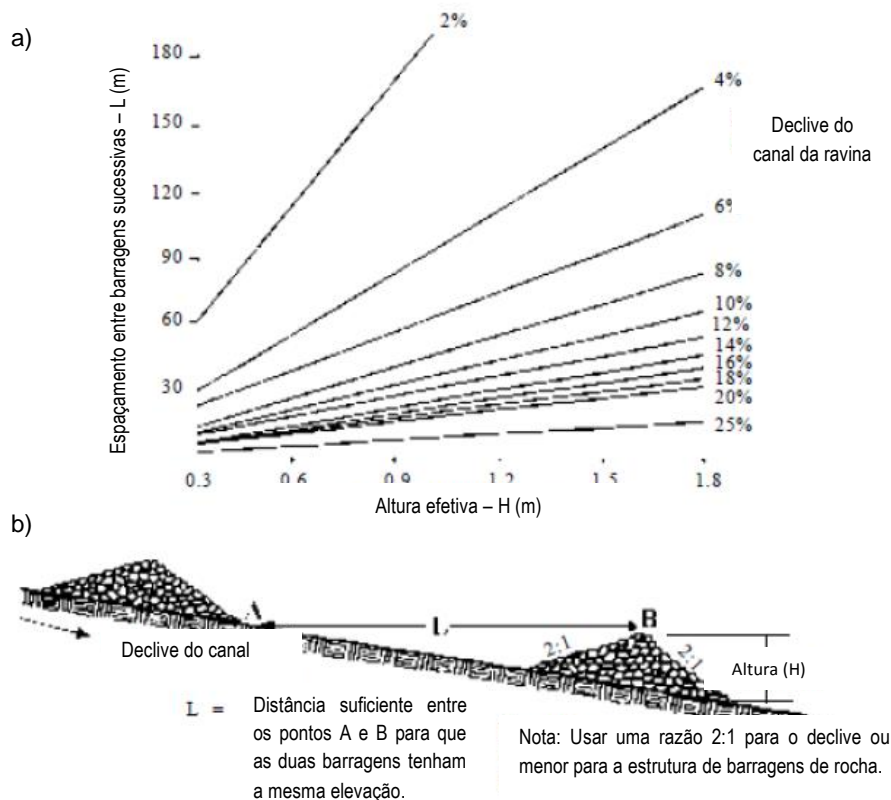


Figura 3.29 - a) Ábaco para calcular o espaçamento entre barragens; b) Esquema representativo da distância entre barragens (adaptado de Gray & Leiser, 1982 in Keller & Sherar, 2003)

Há outros parâmetros que podem ser considerados no dimensionamento da barragem, tais como:

- Fundação e base inferior com 0.5 m de profundidade;
- Zonas laterais da barragem: 0.5 - 1 m de cada lado;
- Altura: 1 - 1.5 m excluindo a profundidade da fundação (geralmente com 1 m de profundidade);
- Largura da base: 1 - 3.5 m;
- Zona central trapezoidal/côncava da barragem: 0.25 - 0.5 m de profundidade e 0.25 m nas margens e largura de 0.5 - 1.2 m;
- Deve ser construída na base, a jusante da barragem, uma estrutura com comprimento de pelo menos 1.5 vezes a altura efetiva da altura da barragem de controle e ter uma largura idêntica à do leito da ravina. Esta estrutura serve para dissipar a água que passa através da barragem e cai a jusante da mesma e deve ter uma escavação de cerca de 0.3 - 0.5 m para assegurar uma maior estabilidade da barragem.

A seleção do local apropriado para implementar uma barragem deste tipo deve seguir os seguintes aspetos (Desta & Adugna, 2012):

- O declive do leito da ravina na zona específica onde a barragem vai ser construída não deve ser superior a 5%;

- A profundidade do solo do local deve ser superior a 0.5 m e a barragem não deve ter a sua fundação construída numa camada impermeável;
- Os locais relativamente mais amplos existentes no interior da ravina são os mais apropriados para a construção de barragens de controlo em rocha;
- Há que evitar os locais onde a ravina apresenta uma forma sinuosa.

Barragens de controlo com gabiões

As barragens de controlo construídas com gabiões (Figura 3.30) correspondem a caixas retangulares de várias dimensões, amarradas com arame de aço galvanizado e são preenchidas com rocha, seixo ou brita, sendo os blocos de rocha bem encaixados uns nos outros. Podem ser utilizadas rochas de pequenas dimensões para preencher os espaços vazios entre os blocos de maiores dimensões (Desta & Adugna, 2012).

A utilização de gabiões apresenta certas vantagens, tais como a sua resistência e longa duração, desde que o arame seja bem galvanizado. Os gabiões são também flexíveis e podem ser instalados em locais onde a superfície é irregular. No caso concreto de erosão hídrica linear os gabiões podem ser usados para estabilizar as margens da ravina, ou a “cabeça” da mesma. Embora apresentem várias vantagens, os gabiões são dispendiosos (€/m³ depende do diâmetro da caixa/arame e do tipo de aplicação) e só devem ser utilizados quando outra técnica mais acessível, a nível financeiro, não seja suficiente. É uma medida que deve ser combinada com medidas biológicas, como a restauração da cobertura vegetal através do plantio.



Figura 3.30 - Construção de uma barragem de controlo de gabiões (Desta & Adugna, 2012)

Como foi possível observar numa figura anterior (Figura 3.21) as barragens de gabiões devem ser bem encaixadas nas margens da ravina para não haver circulação de fluxo pelas margens. Outro aspeto a ter em atenção corresponde ao encaixe dos gabiões na superfície do solo com

uma profundidade de fundação suficiente (não deve ser inferior a 0.5 m). Deve ser construída uma estrutura na base, a jusante da barragem, para dissipar a queda de água que passa através da barragem e esta deve ser fundada até 30 cm, em rocha seca e ter uma largura de 1.5 vezes a largura da barragem (Desta & Adugna, 2012).

Geralmente, as barragens de gabiões são inicialmente construídas com uma altura não superior a 1.5 m, em relação á zona central da barragem (mais baixa). Após o primeiro ano de funcionamento, quando houver a deposição de sedimentos a montante da estrutura, é possível aumentar a altura da barragem e da zona central da mesma, caso não haja remoção dos sedimentos acumulados, com a adição de mais caixas de gabiões.

As dimensões dos gabiões e a quantidade de fio requerida para cada dimensão são apresentadas na seguinte tabela (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Diferentes dimensões dos gabiões (comprimento x largura x altura) e quantidade de arame necessário para cada dimensão (adaptado de Desta & Adugna, 2012)

	Dimensão dos gabiões (m)	Arame de 2,5 mm (kg)	Arame de 3.5 mm (kg)	Arame para atar (kg)	Relevância de cada dimensão durante a construção (%)
1	2x1x1	12,0	2,3	0,6	60
2	2x1x0,5	8,5	1,7	0,5	20
3	1x1x1	7,0	1,5	0,4	15
4	1x1x0,5	3,4	0,9	0,3	5

Em Portugal são normalmente utilizadas, além das dimensões 2x1x1 m e 2x1x0.5 m referidas na tabela anterior, as dimensões 1.5x1x1, 2.5x1x1, 3x1x1, 3x1.5x1, 3x1x0.5, 4x1x1 e 4x1x0.5. Na tabela seguinte (Tabela 3.5) apresentam-se as dimensões utilizadas pela empresa Santos Moura Porto, Lda (SMP).

Tabela 3.5 - Dimensões dos gabiões utilizadas pela entidade Santos Moura Porto, Lda. (Projectista, 2014)

Dimensões dos gabiões	
Malha 8x10 - 2,7 mm/ 5x7 - 2,00 mm	
Comprimento x Largura x Altura	
2x1x0,5	3x1x0,50
4x1x0,5	1,5x1x1
2x1x1	2,5x1x1
3x1x1	3x1,5x1
4x1x1	

Na tabela 3.6 apresentam-se as diferentes malhas (aramé da bordadura, atar e tirantes), diâmetro do arame (mm) e a espessura mínima do revestimento da liga de zinco-alumínio (anti-corrosão), utilizadas pela mesma empresa.

Tabela 3.6 - Diferentes malhas (arame, bordadura, atar e tirantes) utilizadas pela entidade Santos Moura Porto, Lda. (Projectista, 2014)

Malhas	Arame da malha		Arame da bordadura		Arame para atar e tirantes	
	Ø/mm	ZN	Ø/mm	ZN	Ø/mm	ZN
50 x 70 mm	2,00	240 g/m ²	2,40	260 g/m ²	2,20	240 g/m ²
80 x 100 mm	2,70	260 g/m ²	3,40	275 g/m ²	2,20 ou 2,40	240/260 g/m ²
80x100 mm + PVC	2,70/3,70	260 g/m ²	3,40/4,40	275 g/m ²	2,20 ou 2,40	240/260 g/m ²
ZN – espessura mínima do revestimento da liga de zinco-alumínio (anti-corrosão)						

Barragens de controlo com sacos de areia

As barragens de controlo com sacos (Figura 3.31) são constituídas por sacos de polietileno usados preenchidos com solo denso ou com areia. Estes sacos podem ser empilhados até perfazer um máximo de 3-4 camadas formando uma pequena barragem de controlo. Esta técnica é economicamente acessível, especialmente em áreas com pouco oferta de rocha para a construção de barragens comuns. Podem ser utilizadas para estabilizar pequenos ou grandes sulcos e pequenos ravinamentos (Desta & Adugna, 2012).



Figura 3.31 - Sacos de areia a funcionarem como um dique ou barragem de controlo de uma ravina (Desta & Adugna, 2012)

Rock lining (ou sulcos de drenagem superficial)

Nas regiões onde há evidências de erosão potencial ou onde se observam pequenos sulcos ou pequenos alinhamentos erosivos, pode adotar-se o método de *rock lining* (Figura 3.32). Consiste em colocar rochas com boa calibração ou material grosseiro anguloso nos alinhamentos ou sulcos, reduzindo a velocidade da água de escorrência (Ngapo *et al.*, 2013).



Figura 3.32 - Exemplo de aplicação de *rock lining* (Ngapo *et al.*, 2013)

Drenagem das ravinas

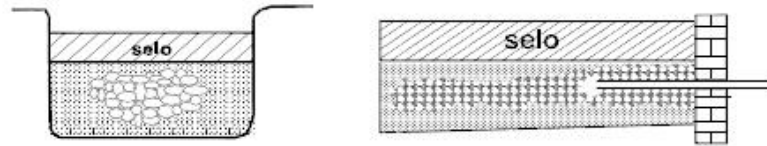
O tratamento dos ravinamentos pode também implicar a implantação de drenos em profundidade, ao longo do leito da ravina, com vista a drenar as águas sub-superficiais (Gomes *et al.*, 2011). Os drenos podem ser aplicados tanto a montante da ravina como no interior da mesma (com ou sem material impermeável na zona superior do dreno).

Os principais tipos de drenos a aplicar são os seguintes (Figura 3.33): dreno cego, dreno de bambu e dreno com material sintético geotêxtil (Gomes *et al.*, 2011).

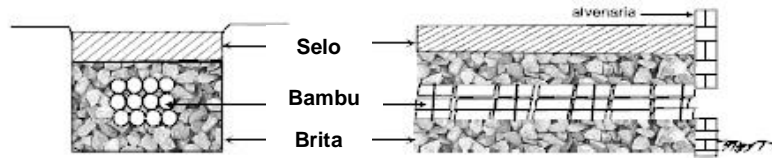
Dreno cego (Figura 3.33 a) - é composto por uma pequena vala revestida com material filtrante e de um tubo PVC, colocado à saída do dreno. Sobre o material filtrante pode ser instalado material impermeável, normalmente constituído por argila (selo).

Dreno de bambu (Figura 3.33 b) - é composto por bambu amarrado em várias faixas e brita envolvida com uma manta geotêxtil. O fecho da vala pode ser feito com material impermeável.

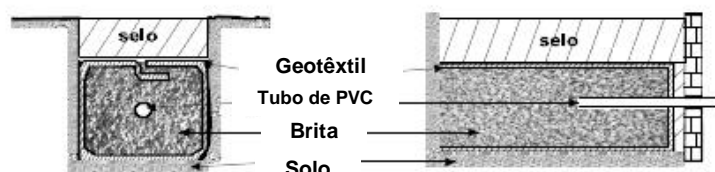
Dreno com material sintético geotêxtil (Figura 3.33 c) – corresponde a uma vala revestida com uma manta geotêxtil e preenchida com material filtrante (brita). Após o envolvimento total do material filtrante com a manta de geotêxtil pode-se fechar a vala com material impermeável (selo). Este tipo de dreno é mais dispendioso, mas é o mais adequado para locais mais problemáticos já que apresenta um melhor desempenho.



a) Dreno cego: composto por brita e um tubo PVC, cobertos com material impermeável (selo)



a) Dreno de bambu: composto por brita e bambu amarrados em vários feixes e cobertos com material impermeável (selo)



c) Dreno de geotêxtil: composto por uma manta de geotêxtil preenchida com brita e cobertos com material impermeável (selo)

Figura 3.33 - Exemplos de drenos utilizados para a drenagem das águas sub-superficiais (Gomes *et al.*, 2011)

A construção dos drenos deve ser sempre realizada de jusante para montante, havendo interligação lateral com as exurgências de água existentes. No caso de se aplicar uma manta geotêxtil, esta deve sobrepor as suas abas em pelo menos 20 cm. No fundo da ravina, junto à sua superfície, o material deve ser escavado para melhor assentamento do dreno subterrâneo.

Diversores ou dissipadores de energia

Outro tipo de medida que pode ser aplicado, já implementado em algumas ravinas da área de estudo, corresponde ao desvio da direção do escoamento da ravina formada. Com esta medida há um redirecionamento do fluxo de água para as linhas de água mais próximas através da construção de diques ou diversões para evitar a chegada de fluxo à ravina. Estes diversores são construídos a montante da ravina e têm como principal objetivo a dispersão da água a partir dos seus pontos de concentração e a redução da velocidade da água antes de atingir as ravinas (Keller & Sherar, 2003).

Os diversores, além de serem constituídos por troncos de madeira (com grande duração e resistentes ao apodrecimento), também podem ser constituídos por barreiras de fardos de feno em algumas situações (Figura 3.34). As barreiras de fardos de feno têm mais sucesso quando são utilizadas para desviar o escoamento de pequenas áreas de captação. Devem ser utilizadas apenas para interceptar o fluxo laminar e não o fluxo canalizado, não sendo aconselhável em vertentes com mais de 20% de declive. Só deve ser utilizado apenas um fardo, em altura, não sendo aconselhável empilhar fardos em cima uns dos outros. Os fardos

devem ser bem encaixados na superfície do solo e devem ser utilizadas estacas para segurá-los (Ngapo *et al.*, 2013).

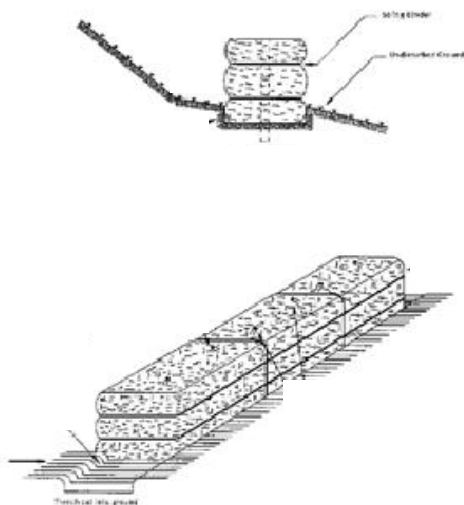


Figura 3.34 - Exemplo de uma barreira de fardos de feno (Ngapo *et al.*, 2013)

Valas de drenagem

As valas de drenagem são utilizadas para interceptar, perpendicularmente, o escoamento superficial em terrenos inclinados, desviar o fluxo de água e armazenar os sedimentos transportados pelas águas de escorrência (Ngapo *et al.*, 2013).

Correspondem a canais escavados temporários, podendo ou não, haver acumulação de material a jusante do canal escavado, formando uma crista, para evitar a passagem do fluxo que vem de montante. Os solos pomíticos ou compostos por cinzas são muito suscetíveis à formação de ravinas devido à sua fraca coesão. O espaçamento entre as valas de drenagem neste tipo de solos deve ser menor do que nos solos coesivos. As valas de drenagem podem ainda ser utilizadas como canais de desvio para as linhas de água mais próximas ou para zonas estáveis, com vegetação.

As valas escavadas podem ser preenchidas com material drenante (brita) e geotêxtil para funcionar como um dreno.

Na figura 3.35 apresenta-se um exemplo das dimensões a aplicar numa vala de drenagem, podendo ser de menores ou maiores dimensões, dependendo das circunstâncias.

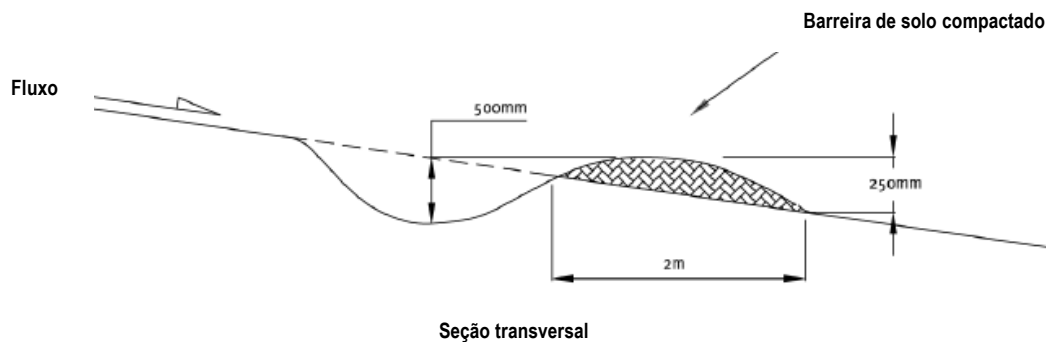


Figura 3.35 - Exemplo das dimensões de uma vala de drenagem (Ngapo *et al.*, 2013)

Os canais e as cristas devem ser bem compactados e o espaçamento entre valas pode variar de acordo com a inclinação da vertente, e o espaçamento pode seguir o exemplo da tabela 3.7 (Ngapo *et al.*, 2013).

Tabela 3.7 - Espaçamento entre valas de drenagem de acordo com o declive do terreno e o tipo de solo (adaptado de Ngapo *et al.*, 2013)

Declive (%)	Espaçamento entre valas	
	Solos coesivos	Solos pomíticos
5	50 (m)	30 (m)
10	40 (m)	20 (m)
15	30 (m)	10 (m)

Além das valas de drenagem, podem ser escavadas várias trincheiras que têm o mesmo objetivo que as valas de drenagem. A trincheira pode ser preenchida com material drenante, como, rocha solta e grosseira ou seixo, podendo também haver combinação com geotêxtil. Na figura 3.36 pode observar-se um exemplo das fases de construção de uma trincheira com material drenante e geotêxtil. Esta medida pode ser aplicada no interior da ravina ou a montante desta para intercepar o escoamento superficial.

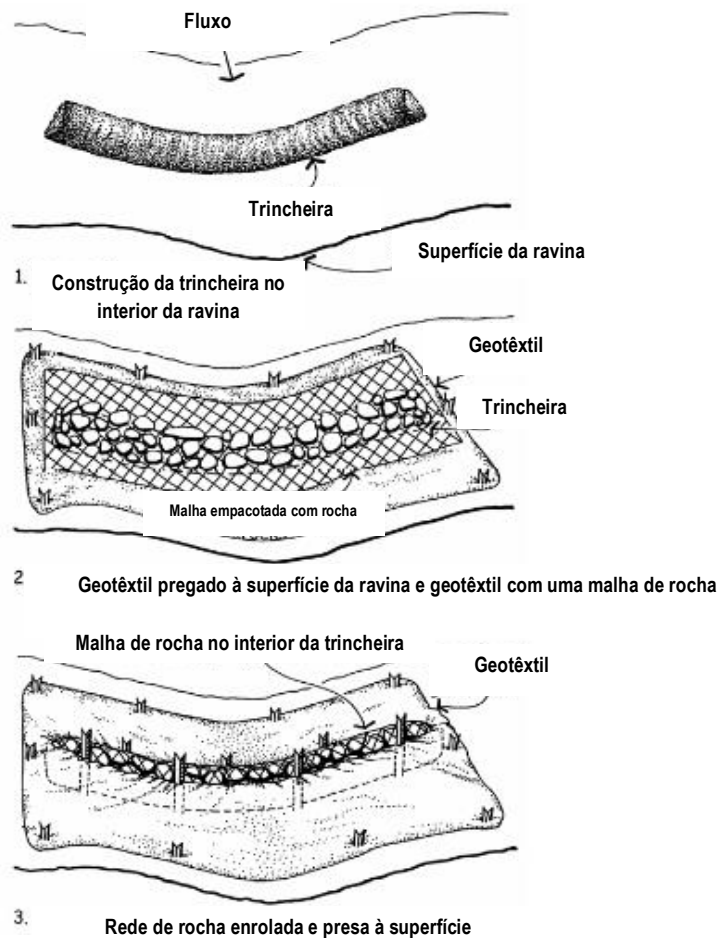


Figura 3.36 - Fases de construção de uma trincheira com material drenante e geotêxtil (adaptado de Keller & Sherar, 2003)

Geossintéticos

Como já se viu em medidas anteriores, pode haver combinação de medidas, entre elas sistemas de controlo da erosão com geossintéticos (Figura 3.37). Os geossintéticos podem ser usados como drenos e filtros e servem para reduzir o potencial de erosão de áreas suscetíveis à erosão e/ou eliminar a erosão com efeito imediato, durante um certo período, até a vegetação protetora se estabelecer (Ngapo *et al.*, 2013).

Os tipos de geossintéticos utilizados para drenagem e filtragem são os geotêxtis e os geocompósitos drenantes, podendo ser utilizados em vários tipo de obras, como é o caso de controlo de erosão, protegendo canais e taludes sujeitos à erosão (Gourc e Palmeira, s.d.).

Importa referir que é difícil comparar diferentes produtos, não existindo padrões na indústria para validar produtos idênticos ou comparar preços de produtos semelhantes.

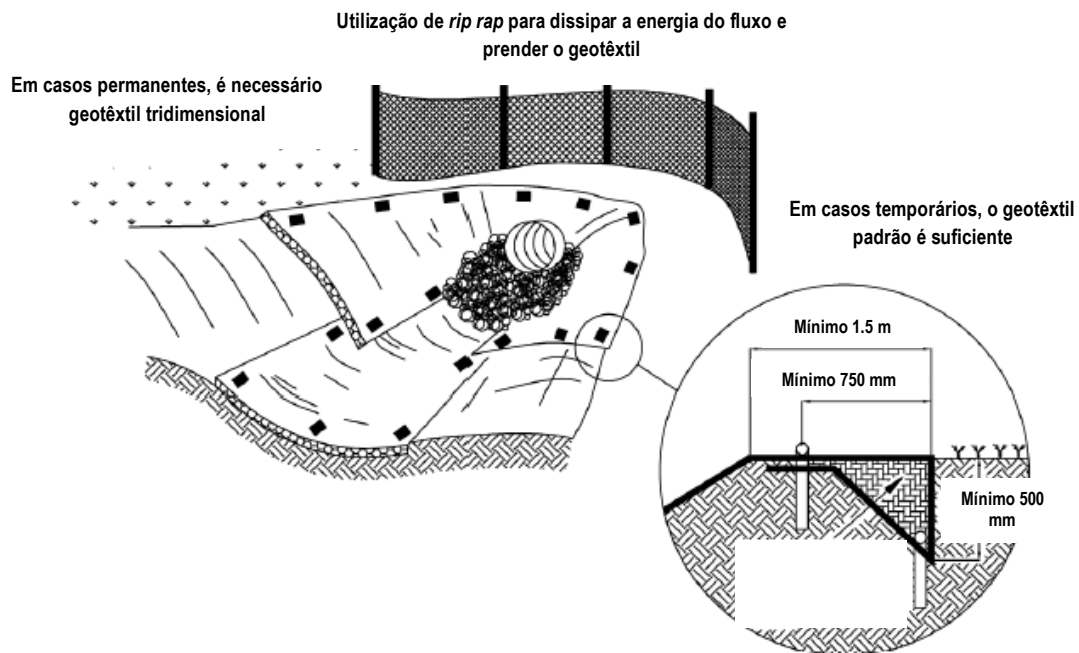


Figura 3.37 - Exemplo da aplicação de geotêxtil numa zona de drenagem (adaptado de Ngapo *et al.*, 2013)

Os sistemas de controlo da erosão com geossintéticos devem ser utilizados em vertentes íngremes mas de reduzidas dimensões, onde as velocidades de escoamento são elevadas e quando não há espaço suficiente para aplicar outro tipo de medida financeiramente mais favorável (Ngapo *et al.*, 2013).

Um geossintético pode ser utilizado como dreno, sendo dimensionado para seguir certos requisitos hidráulicos que permitam o fluxo livre de líquidos ou gases ao longo ou segundo a normal ao seu plano (Gourc e Palmeira, s.d.).

Os geotêxteis que atuam como filtros devem cumprir os critérios que garantam que os grãos de solo sejam retidos sem impedir o fluxo de água. Os critérios de retenção disponíveis estabelecem a seguinte relação (Gourc e Palmeira, s.d.):

$$O_s \leq nD_s \quad (2)$$

Em que (2):

O_s corresponde à dimensão de abertura de filtro do geotêxtil, associada às dimensões dos poros e às restrições no geotêxtil, n corresponde a um número que depende do critério utilizado e D_s é um diâmetro representativo do tamanho dos grãos do solo (geralmente D_{85} , representando o diâmetro para o qual 85% dos grãos do solo em peso são menores que o diâmetro considerado).

O filtro também deve ser mais permeável do que o solo adjacente ao longo da vida útil da obra. Logo, o critério de permeabilidade para geotêxteis estabelece que (Gourc e Palmeira, s.d.):

$$k_G \leq Nk_s \quad (3)$$

Em que (3):

k_G corresponde ao coeficiente de permeabilidade do geotêxtil, N é um fator que depende das características do projeto (geralmente varia entre 10 e 100) e k_s é o coeficiente de permeabilidade do solo.

Quando dimensionados e instalados adequadamente, os geossintéticos podem fornecer soluções de custo competitivo para drenagem e filtragem em obras de engenharia civil e ambiental.

Todos os métodos referidos necessitam de manutenção periódica, ora seja para extrair os sedimentos que entretanto ficam acumulados a montante, ora para se observar a necessidade, ou não, de adaptar o método adotado (espaçamentos entre barragens, alturas, desvios da direção do fluxo), bem como de reparar imediatamente danos ocorridos.

3.2.1.2. Medidas biológicas

As medidas biológicas podem consistir no plantio de culturas em faixas de largura variável, para haver combinação das plantas que oferecem pouca proteção ao solo com outras de crescimento denso. É uma medida muito prática no controlo da erosão laminar sendo bastante eficiente. Deve ser orientada no sentido das curvas de nível do terreno, alternando a disposição das culturas mais densas, com culturas menos densas (Gomes *et al.*, 2011).

No interior da ravina o recobrimento vegetal deve ser feito com plantas rústicas endémicas que se desenvolvam bem em solos erodidos, ofereçam uma boa cobertura do solo e tenham um abundante sistema radicular. O tipo de vegetação mais apropriado para a proteção dos ravinamentos são as gramíneas e leguminosas. O bambu também é uma boa proteção quando plantado junto às laterais internas dos ravinamentos.

O tipo de espécie vegetal e o tempo de plantio influenciam o sucesso na reabilitação de ravinamentos já que há relação direta com a humidade e a quantidade de fluxo existente nas diferentes seções da ravina. Assim, recomenda-se a realização do plantio nas margens da ravina e na zona final do barranco, imediatamente quando os períodos de chuva começam e, a zona do leito da ravina deve ser plantada quando o fluxo é mais reduzido, nos meses em que ocorre menos precipitação. Se o plantio não for realizado deste modo, as sementes serão facilmente levados pelas águas de escorrência (Desta & Adugna, 2012).

Ao longo do leito da ravina podem ser plantadas gramíneas, arbustos ou árvores tolerantes à humidade, ou seja, espécies vegetais capazes de se desenvolverem em condições húmidas, com um espaçamento adequado. No estado adulto estas espécies conseguem dissipar a velocidade de escoamento das águas superficiais, reter sedimentos e proteger o leito da ravina da erosão.

Nas margens da ravina, podem ser criadas paredes de retenção com bambu (Figura 3.38), já que é complicado controlar o fluxo lateral que chega à ravina, originando muitas vezes escorregamentos laterais no interior da ravina. As zonas superiores dessas paredes de bambu, podem ser preenchidas com ramos e/ou galhos ou podem ser plantadas árvores de médio porte para conter as margens. Estas árvores devem ser plantadas na zona mais inferior das margens. Pode ser feito plantio direto no leito da ravina e em fendas existentes nas margens laterais para servir de cobertura das áreas frágeis.



Figura 3.38 - Proteção das margens laterais de uma ravina com paredes de bambu (Desta & Adugna, 2012)

A proteção da superfície do terreno pode ser feita com o chamado “mulch” ou com hidrossementeira, em situações florestais (Ngapo *et al.*, 2013).

“Mulch”

O “mulching” ou cobertura do solo é utilizado para evitar a lavagem da superfície do terreno devido ao impacto das gotas de chuva e ao reduzido escoamento superficial, funcionando como uma camada de proteção (cobertura “morta”) para a superfície do solo (Ngapo *et al.*, 2013).

O “mulching” corresponde ao uso de materiais orgânicos, tais como, resíduos de culturas, (palha, caules de arrozais), pedaços de madeiras, cascas de madeira compostas, ou areia grossa, sendo posteriormente espalhados sobre a superfície do solo numa camada uniforme (Alho, 2006).

O “mulch” simula o efeito do revestimento vegetal já que reduz o impacto da precipitação sobre a superfície, originando uma diminuição do escoamento superficial de água e do aparecimento de ravinas.

Pode ser utilizado com ou sem sementeira, até se estabelecer a vegetação, servindo como proteção temporária da superfície do solo. O “*mulching*” é particularmente útil quando se pretende o estabelecimento da vegetação em condições muito secas, quentes ou frias (Ngapo *et al.*, 2013).

Hidrossementeira

A técnica de hidrossementeira pode ser utilizada com ou sem “*mulch*” e é utilizada para o estabelecimento rápido da vegetação, fornecendo uma proteção instantânea ao impacto das gotas da chuva. Esta técnica apresenta custos maiores relativamente ao “*mulch*”, devendo ser utilizada nas áreas onde os métodos de sementeira convencional não funcionam e quando as áreas se apresentam nuas e as condições climáticas não favorecem os métodos de sementeira convencional (Ngapo *et al.*, 2013).

A hidrossementeira corresponde à projeção de sementes, fertilizantes e outras substâncias, através de uma mistura aquosa, sobre a superfície do terreno. É uma técnica rápida e efetiva para semear taludes e banquetas. Contudo, é uma técnica que não evita de imediato a erosão da superfície do solo (Fryar *et al.*, 2002 in Alho, 2006) e a área que vai ser semeada deve ter boa acessibilidade, possibilitando a deslocação de um hidrossemeador (Alho, 2006).

A hidrossementeira sem “*mulch*” é recomendável apenas nas estações húmidas ou em zonas húmidas com abundante sombra, não devendo ser executada em períodos de intensa precipitação, ventos fortes ou neve. Esta técnica é principalmente aplicada em taludes rochosos, com declives acentuados, acessíveis a veículos (Alho, 2006).

Como há utilização de fertilizantes e pode ser necessária maquinaria para aplicar esta técnica, pode-se considerar que esta técnica não é adequada para o caso de estudo.

3.2.2. Medidas de estabilização de taludes

Atualmente existem vários métodos para a estabilização de taludes. A seleção do método depende quer do tipo de situação que se quer resolver, como da viabilidade de execução do mesmo e da capacidade financeira existente para aplicar um determinado método. As várias soluções de estabilização a seguir apresentadas correspondem a medidas que podem ser aplicadas nos casos da ocorrência de escorregamentos e apenas serão abordadas as soluções viáveis no caso concreto da área de estudo, não sendo referidas, por exemplo, as várias obras de reforço que hoje em dia são aplicadas em casos geotécnicos idênticos mas em outros contextos (por exemplo, taludes de estradas).

3.2.2.1. Drenagem

As águas superficiais e de infiltração têm grande influência na estabilidade dos taludes, tornando-se assim relevantes os métodos de drenagem.

Estes métodos apresentam como objetivo a redução das pressões intersticiais que atuam sobre as superfícies de deslizamento potenciais ou existentes. Este facto proporciona o aumento da resistência ao longo destas e diminui o peso total dos terrenos, reduzindo as forças instabilizadoras.

Como a maior parte dos problemas com taludes está relacionada com aspetos de ordem hidrogeológico torna-se conveniente a minimização da sua instabilidade. Os sistemas de drenagem, regra geral, não constituem a única forma de estabilizar um talude, porque não há garantias que não ocorram problemas no seu funcionamento ao longo do seu tempo de vida. Alguns dos problemas que podem ocorrer consistem na colmatação por argilas dispersivas, siltes incoerentes, ou por meio das raízes das plantas ou a precipitação de carbonato de cálcio nos furos dos drenos devido à circulação de águas duras. Os sistemas de drenagem necessitam de manutenção periódica e muitas vezes é necessário substituir parte ou a totalidade dos seus elementos. Os métodos de drenagem funcionam como o complemento de outras medidas, como o reperfilamento do talude (Lamas, 2013).

As medidas de controlo da drenagem podem ser de dois tipos: drenagem superficial e drenagem profunda (Lamas, 2013).

1. A drenagem superficial é normalmente realizada em maciços terrosos, tendo como objetivo a minimização dos efeitos das águas de escorrência sobre o talude, dificultando a erosão superficial e a infiltração de água para o interior do talude. Habitualmente utilizam-se sistemas coletores que consistem em valetas, sarjetas e meias canas instaladas em banquetas, nas bermas e nas cristas dos taludes, geralmente associadas a um sistema de revestimento superficial (vegetação rasteira, enrocamento), sendo a água captada conduzida para um local mais conveniente. As valetas devem ser impermeáveis e inclinadas para dificultar a deposição de material e facilitar o escoamento das águas recolhidas. O período de vida útil de um sistema de drenagem superficial depende de vários fatores: a colmatação das valetas e a perda de estanqueidade das mesmas devido ao desencaixe dos elementos que as compõem ou por abertura de fissuras; alterações pontuais ou generalizadas da topografia. Neste tipo de sistema de drenagem é necessária manutenção, com limpeza e desobstrução das valetas e eventual substituição de elementos danificados.
2. A drenagem profunda tem como objetivo o rebaixamento dos níveis freáticos. São utilizados mecanismos de recolha das águas que atravessam o interior do talude, em que os processos de erosão interna, as forças de percolação na direção do exterior e as pressões intersticiais provêm dessa circulação de água. É habitual a construção de:

- a) Galerias de drenagem: são galerias construídas paralelamente ao talude e a grande profundidade. É um método dispendioso e a sua aplicação está limitada a obras importantes ou de grande dimensão. Sendo obras visitáveis, é possível observar diretamente as condições hidrogeológicas do talude durante e após a sua construção bem como evidências de movimentos ocorrentes no talude;
- b) Poços de drenagem: correspondem a poços executados atrás da crista do talude, através dos quais a água subterrânea é bombeada;
- c) Esporões drenantes: correspondem a maciços drenantes verticais, colocados no pé do talude perpendiculares à sua direção. Têm como objetivos o rebaixamento do nível freático e servir de contraforte, efetuando uma drenagem profunda do maciço e atingindo uma profundidade suficiente para interseccionar eventuais superfícies de escorregamento. São aplicados nas situações em que os níveis freáticos passam relativamente próximos da frente do talude;
- d) Máscaras drenantes: correspondem a dispositivos aplicados sobre a superfície do talude, sendo utilizadas em taludes cuja estabilidade é condicionada pela exsurgência de água à sua superfície. A sua espessura é crescente desde o topo do talude para a base, normalmente com um elemento filtrante. Tal como nos esporões drenantes, as águas são recolhidas por um coletor no pé do talude;
- e) Drenos sub-horizontais: correspondem a tubos em aço ou PVC ou mangas de geotêxtil preenchidas por material drenante, instalados no interior de maciços terrosos ou rochas brandas através de furos de 100 - 120 mm de diâmetro. Apresentam orientação aproximadamente horizontal para proporcionar o escoamento das águas captadas de forma gravítica;
- f) Furos drenantes: são furos efetuados, principalmente, através de maciços rochosos ou de estruturas de suporte.

Na figura abaixo (Figura 3.39) apresentam-se exemplos de esporões drenantes e de galerias de drenagem.

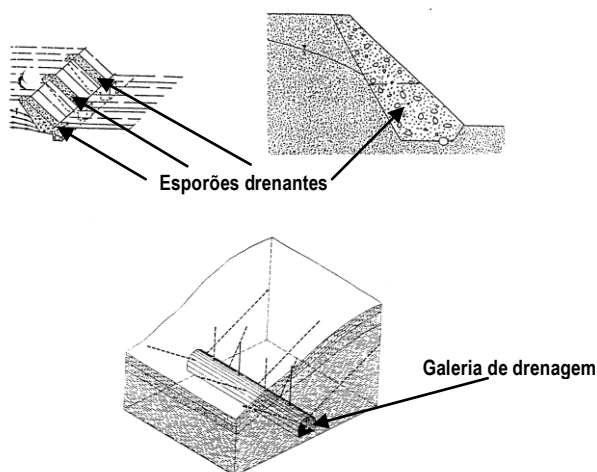


Figura 3.39 - Exemplo de uma galeria de drenagem e de esporões drenantes (Lamas, 2013)

3.2.2.2. Reperfilamento do talude

O reperfilamento do talude (Figura 3.40) corresponde à alteração da geometria do talude com recurso a escavações ou a aterros adequadamente localizados, podendo também haver trabalhos de recompactação do solo para reforço das características resistentes do terreno. É um tipo de obra que, regra geral, proporciona uma diminuição do estado de tensão no interior do maciço.

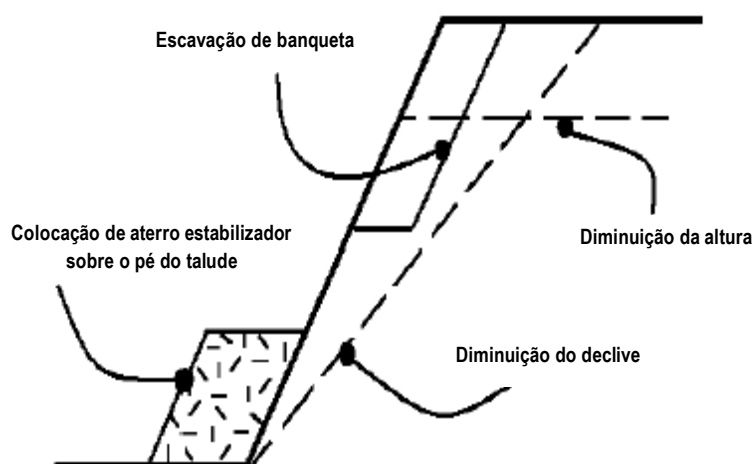


Figura 3.40 - Alteração da geometria de um talude (Lamas, 2013)

A redução da altura, através da remoção do material do topo do talude instável e/ou a diminuição do declive médio (redução do peso do talude e suavização do seu ângulo de inclinação) podem ser uma das soluções a adotar no caso de estudo, podendo estas medidas ser implementadas isolada ou conjuntamente. São medidas de estabilização, geralmente, pouco dispendiosas.

Pode haver combinação das medidas anteriores com obras de controlo de drenagem superficial e com o plantio de recobrimento vegetal.

A plantação do talude com espécies endémicas é uma proteção eficaz contra a erosão do mesmo e contra a erosão superficial. No entanto, esta proteção está dependente do tamanho da planta (árvore, arbusto, gramínea).

3.2.2.3. Recobrimento vegetal

O recobrimento vegetal é uma medida de estabilização utilizada unicamente para taludes com pequena espessura de camada superficial instabilizada e grandes áreas arborizadas. Deste modo, é possível assegurar a estabilidade dos taludes apenas com o coberto vegetal. No entanto, o seu efeito na estabilidade depende de (Lamas, 2013):

- a) Natureza do terreno (solo ou rocha);
- b) Morfologia da vertente;

- c) Exposição aos principais agentes climáticos;
- d) Características do clima (duração e intensidade da precipitação, direções principais e intensidade do vento, variações de temperatura);
- e) Características das espécies vegetais (prado, arbusto ou arvoredo; altura das árvores; volume das copas; profundidade e densidade dos sistemas radiculares; capacidade de absorção pelas raízes da água infiltrada; quantidade de água devolvida à atmosfera pela evapotranspiração).

O crescimento de árvores de baixo-médio porte ao longo das vertentes favorece a criação de uma barreira natural contra quedas de blocos que se destaquem de cristas rochosas existentes mais acima. O efeito das raízes das árvores e arbustos estabilizam os taludes sujeitos a escorregamentos. No entanto, a ação de ventos intensos sobre a parte arbórea pode levar à ocorrência de um processo de instabilização nos taludes.

No entanto, podem considerar-se fatores ou mecanismos hidrológicos e mecânicos capazes de promover a instabilidade e estabilidade do talude (Lamas, 2013):

- a) Os fatores hidrológicos correspondem às formas de interferência direta da vegetação no ciclo hidrológico e podem promover a estabilidade, através da: intercepção da chuva pelas folhas das plantas; absorção de água infiltrada pelas raízes, diminuindo as tensões intersticiais no interior do talude. Os fatores hidrológicos podem também promover a instabilidade através de: efeito das raízes e dos caules no aumento da rugosidade da superfície do terreno, que dificulta o escoamento superficial e favorece a infiltração; quando as plantas morrem há decomposição das raízes, favorecendo a permeabilidade; secagem total dos solos devido à absorção radicular pode originar a abertura de fendas de dissecação, levando ao aumento da infiltração;
- b) Os fatores mecânicos são o resultado das interações físicas entre as copas, folhagens e raízes com o terreno. Podem promover a estabilidade através de: reforço da resistência ao corte do solo pelas raízes; efeito de ancoragem da superfície da encosta pelas raízes entrelaçadas em camadas profundas mais resistentes; o aumento da aderência entre as partículas do solo mais superficial pelas raízes. Podem ser fatores desestabilizadores: o alargamento de fendas pré-existentes em taludes rochosos que leva ao destaque de rocha e as tensões de corte transmitidas ao terreno pelos caules e raízes, resultantes da ação do vento ao atuar nas copas das árvores e dos arbustos.

O peso das árvores pode também levar à instabilização nos casos em que os declives dos taludes são superiores ao valor do ângulo de atrito interno do terreno.

A sobrecarga exercida pelo peso imposto pelas árvores de grande porte é um efeito mecânico que tanto pode estabilizar, como instabilizar, os taludes (Figura 3.41), visto que essa sobrecarga corresponde a uma força que atua segundo as suas componentes normal (W_n ,

força estabilizadora, dirigida de encontro com a superfície do talude) e tangencial (W_t , força instabilizadora, dirigida no sentido da vertente) (Lamas, 2013).

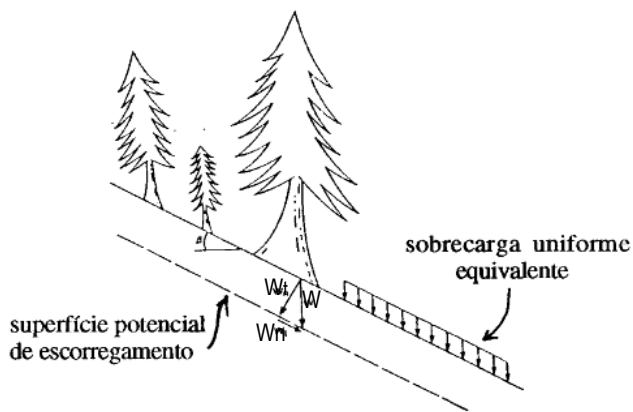


Figura 3.41 - Efeito do peso das árvores de grande porte sobre o talude (Lamas, 2013)

3.3. Ensaios de laboratório e classificação de solos

As normas a seguir nos ensaios laboratoriais executados no âmbito desta dissertação são (LNEC e ASTM, *American Society for Testing and Materials*):

- ❖ LNEC E 195 (1966) - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação;
- ❖ LNEC E 196 (1966) - Análise granulométrica;
- ❖ Procedimento interno da Açorgeo - Sociedade de Estudos Geotécnicos, Lda. - Determinação da densidade aparente das partículas
- ❖ NP 84 (1965) - Determinação do teor em água;
- ❖ NP-143 (1969) - Determinação dos Limites de Atterberg (Limites de Liquidez e de Plasticidade);
- ❖ ASTM D 3080 - 04 - Ensaio de corte direto.

Serão adotadas as normas que utilizam os peneiros (Tabela 3.8) da série ASTM de malha quadrada, aplicados pelas classificações de solos geralmente mais utilizadas:

- ❖ Classificação de Solos e Misturas de Solos - Agregados para Fins Rodoviários – *AASHTO* (ASTM M-145-91, 2000 Modificada);
- ❖ Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM D 2487-06).

Tabela 3.8 - Dimensões dos peneiros da série ASTM

Peneiro	#200	#140	#60	#40	#20	#10	#4	#3/8"	#3/4"	#1"	#1 1/2"
Diâmetro (mm)	0,075	0,106	0,25	0,425	0,85	2,00	4,75	9,5	19,0	25,0	38,0

3.3.1. Análise granulométrica (crivagem)

As análises granulométricas são os ensaios de identificação utilizados para determinar a dimensão das partículas e a quantidade de cada material presente no solo da área de estudo. Consistem na separação de uma amostra, de um agregado, em frações, sendo as dimensões das partículas definidas pela abertura da malha correspondente à qual o material passa, ficando retido na malha seguinte, de menor abertura.

Os solos da região são predominantemente grosseiros e não sendo expectável a presença de percentagens altas de material fino (dimensões inferiores a 0,075 mm) só será utilizada a granulometria por via seca.

Toma-se uma amostra representativa de cada amostra de solo, que posteriormente é seca e desagregada. As análises granulométricas são realizadas agitando cada amostra de solo através de uma série de peneiros (série ASTM de malha quadrada), em que os de malha mais larga se encontravam na parte superior e, na parte inferior, os de malha mais pequena. Posteriormente é pesado o material retido em cada peneiro.

Antes de cada análise granulométrica procede-se ao procedimento de esquartelamento da amostra (LNEC, 1966, Especificação E 195).

De acordo com a Especificação LNEC E-219 (Prospecção Geotécnica de Terrenos), esquematiza-se na tabela 3.9 as principais frações granulométricas e as respetivas designações.

Tabela 3.9 - Dimensões (mm) das diferentes classes granulométricas (LNEC E-219)

Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau	Pedra
	fino	médio	grosso	fini	média	grossa	fino	médio	grosso		
	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2,0	6,0	20	60	150 [mm]

Pela nomenclatura da terminologia vulcânica podem-se definir três tipos de materiais sólidos resultantes de uma erupção (piroclastos): cinzas (dimensões inferiores a 2 mm); lapilli (dimensões compreendidas entre 2-64 mm) e bombas (dimensões superiores a 64 mm).

Na tabela seguinte (Tabela 3.10) é possível observar algumas das propriedades das diferentes classes granulométricas.

Tabela 3.10 - Propriedades das diferentes classes granulométricas (adaptado de Sampaio, 2006)

Classe granulométrica	Retenção iónica	Retenção de água	Permeabilidade	Propriedades mecânicas
Argila	Forte	Forte	Fraca	Seco - tenaz; húmido - plástico
Silte	Fraca	Média	Fraca	Seco - pouco tenaz; húmido - plástico

Classe granulométrica	Retenção iónica	Retenção de água	Permeabilidade	Propriedades mecânicas
Areia fina	Nula	Fraca	Forte	Seco – pouco tenaz e solto; húmido – pouco plástico
Areia grosseira	Nula	Nula	Forte	Seco - solto; húmido - solto

Com vista a classificar as amostras, segundo a Classificação Unificada de Solos, calculam-se os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c).

O Coeficiente de uniformidade (C_u) corresponde à relação entre o diâmetro correspondente ao peneiro pelo qual passa 60% do material (D_{60}) e o diâmetro correspondente ao peneiro pelo qual passa 10% do material (D_{10}).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

O Coeficiente de curvatura (C_c) fornece-nos a forma da curva granulométrica entre o peneiro pelo qual passa 60% (D_{60}) e 10% do material (D_{10}).

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (5)$$

Para a fração de material inferior aos 0,425 mm (peneiro 40 da série ASTM), são determinados os limites de Atterberg (referidos a seguir), que servem para classificar a fração fina do solo através da Carta de Plasticidade.

A percentagem de finos corresponde à percentagem de material que passa no peneiro 200 da série ASTM (dimensões inferiores a 0,075 mm). Esta percentagem indica a quantidade de argila e silte que o solo apresenta. Segundo Vallejo *et al.*, (2002), quanto maior a percentagem de finos num solo, maior é a dificuldade em expulsar a água do solo, quando este é submetido a esforços

3.3.2. Densidade das partículas (aparente)

A densidade aparente das partículas foi determinada com base em procedimento interno da Açorgeo. O método consiste na cravação de um amostrador no solo a amostrar, com peso e volume previamente determinados. Após a cravação pesa-se o amostrador e a amostra e calcula-se assim o peso volúmico aparente.

3.3.3. Limites de consistência

Para a determinação da plasticidade das amostras, procede-se à determinação dos designados Limites de Atterberg (Limite de Liquidez ou LL e Limite de Plasticidade ou LP).

Estes limites são determinados através da fração de solo que passa pelo peneiro 40 da série ASTM (0,425 mm), tendo sido utilizada a norma NP-143 (1969).

Como os diferentes estados físicos têm diferentes comportamentos, é necessário definir as fronteiras entre esses estados (Figura 3.42). As mudanças de estado ocorrem de forma gradual e as transições consistem em intervalos de teores em água que, em certos solos, podem ser intervalos relativamente altos.

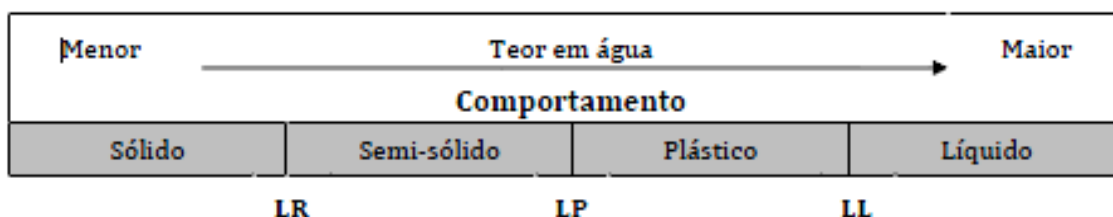


Figura 3.42 - Comportamento dos solos com a variação do teor em água (Sousa, 2011)

Os limites de consistência, que dividem os quatro tipos de comportamento do solo, podem ser definidos da seguinte forma (Vallejo *et al.*, 2002):

a) Limite de Liquidez (LL ou W_L): corresponde ao teor em água que serve de fronteira entre o comportamento líquido e o plástico. Permite classificar os solos finos quanto à plasticidade.

Segundo a norma portuguesa NP-143 (LNEC, 1969), é determinado pela concha de Casagrande (Figura 3.43 b)), desenvolvida por Casagrande. É calculado através da amassadura de um solo seco e desagregado, sendo adicionada água destilada e formando-se uma pasta que é moldada na Concha de Casagrande.

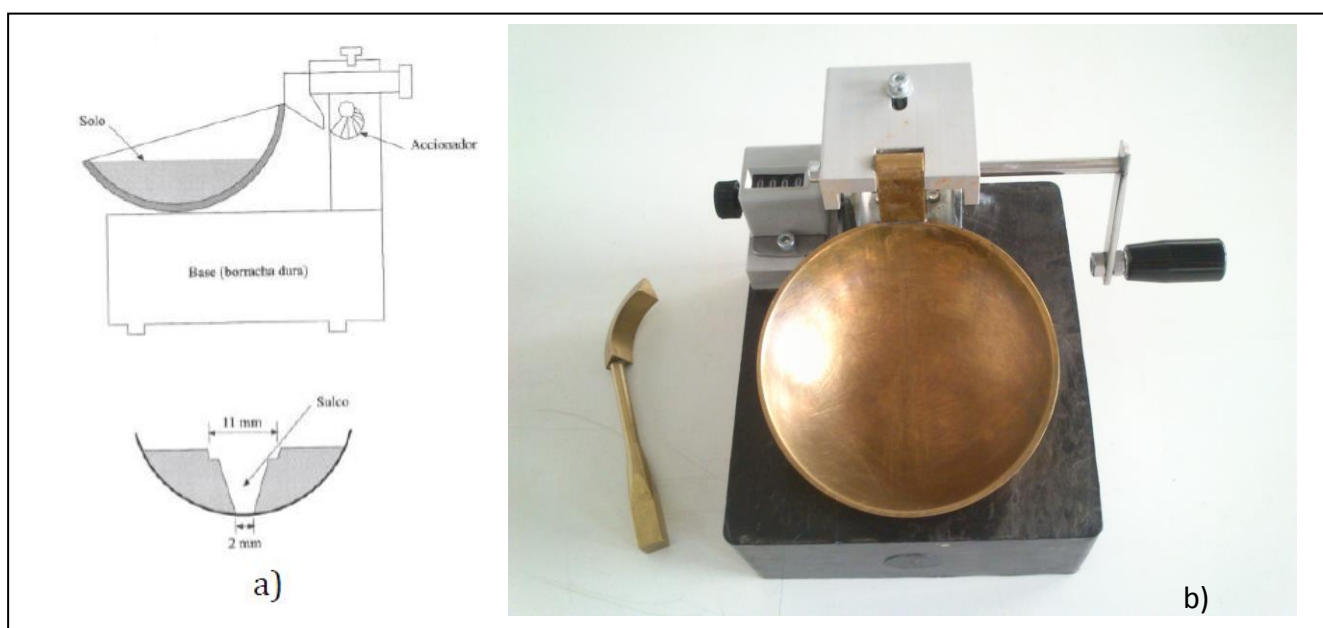


Figura 3.43 - a) Esquema da concha de Casagrande (adaptado de Fernandes, 2006 por Sousa, 2011); b) concha de Casagrande utilizada nos ensaios e riscador (2/6/2014)

O aparelho consiste numa concha semiesférica que, através de um mecanismo de manivela e engrenagens é deixada cair repetidamente de uma altura de 10 mm sobre uma base de borracha (mole ou rija). O contador de golpes auxilia na operação de contagem e o riscador ou cinzel serve para fazer a abertura do sulco que separa a pasta em duas metades. Girando a manivela a um ritmo de dois golpes por segundo, o sulco aberto fecha-se e quando a parte inferior das duas metades se toca, em pelo menos 1 cm, o ensaio termina. O número de golpes é anotado e, para determinação do teor em água, recolhe-se uma porção de solo da zona de contacto entre as duas metades.

Após o ensaio faz-se um gráfico número de pancadas (escala logarítmica) /teor em água. Obtém-se uma reta por regressão linear dos pontos experimentais e o limite de Liquidez corresponde ao teor em água para o qual são necessárias 25 pancadas para unir o sulco.

b) O Limite de Plasticidade (LP ou W_p) corresponde ao teor em água que define a fronteira entre o comportamento plástico e o friável. Na generalidade dos solos finos, o intervalo é de tal modo pequeno que este índice não é tão representativo das características dos solos como o é o limite de Liquidez. É calculado através da amassadura de um solo seco e desagregado, sendo adicionada água destilada aos poucos, formando-se pequenos filamentos cilíndricos (Figura 3.44), enrolados com a palma da mão numa superfície lisa, até atingirem 3 mm de diâmetro.



Figura 3.44 - Pequenos filamentos cilíndricos para determinação do Limite de Plasticidade

Preparam-se 4 amostras com teor em água semelhante, sendo o limite de plasticidade a média dos teores em água das amostras.

Será também calculado o Índice de Plasticidade (IP) que consiste na diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), sendo tão significativo como o Limite de Liquidez.

$$IP = LL - LP \quad (6)$$

Em 1911, Atterberg propôs uma nova classificação complementar baseada no comportamento plástico do material, definindo um índice e dois limites (Sousa, 2011):

1. Limite de Plasticidade superior – corresponde ao teor em água acima da qual uma massa de solo apresenta um comportamento líquido;

2. Limite de Plasticidade inferior – corresponde ao teor em água abaixo do qual uma massa de solo não pode ser moldada sem abrir fissuras;
3. Índice de Plasticidade – corresponde à diferença entre os dois limites.

Mais tarde, Atterberg reformulou os limites de Plasticidade para limites de Liquidez e de Plasticidade, sendo os ensaios foram normalizados e, com base no Índice de Plasticidade, estabeleceu a classificação de solos quanto à plasticidade exposta na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Classificação de Atterberg baseada no comportamento "plástico" dos solos (adaptado de Folque, 1991 por Sousa, 2011)

Índice de Plasticidade	Plasticidade
0 - 1	Solo não plástico
1 - 7	Solo de baixa plasticidade
7 - 15	Solo de média plasticidade
> 15	Solo de elevada plasticidade

Após a determinação dos limites de Liquidez (W_L) e de Plasticidade (W_P) pode obter-se um ponto representativo de cada amostra de solo na Carta de Plasticidade de Casagrande (Gráfico 3.1).

O gráfico de plasticidade é subdividido em diferentes regiões pelas linhas "A", "B" e "U". A linha "A" separa, no que diz respeito aos solos orgânicos, os siltes das argilas, à exceção da região onde os solos são classificados com as letras CL e ML. Abaixo da linha "A" encontram-se representados os siltes e as argilas acima desta linha.

A linha "B" separa os solos de alta e baixa compressibilidade, localizados à direita e à esquerda, respetivamente.

A linha "U" é determinada empiricamente e representa o limite superior aproximado para solos naturais. É importante visto que indica que os pontos que recaem acima ou à esquerda dessa linha devem ser verificados, podendo existir erros de cálculos.

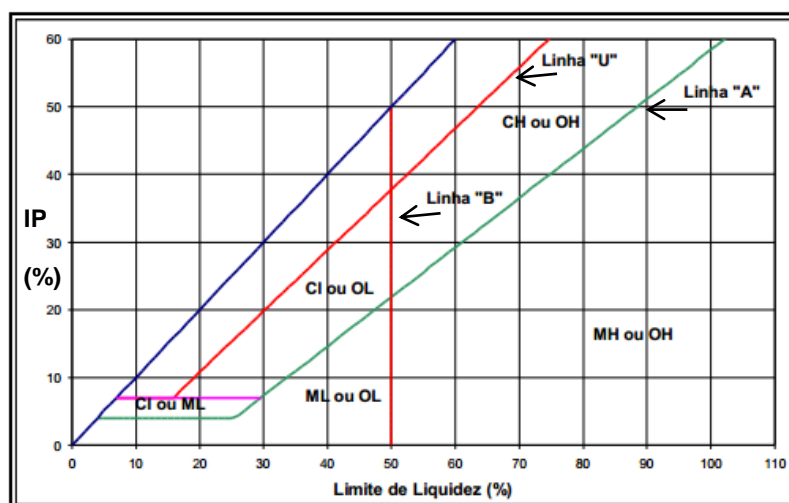


Gráfico 3.1 - Gráfico de Plasticidade de Casagrande (ASTM, 1990 in Santos, 2006)

3.3.4. Sistemas de Classificação de Solos

As classificações geotécnicas servem para agrupar solos com comportamentos semelhantes, prever ou estimar o comportamento dos solos, facilitando deste modo a comunicação entre técnicos e engenheiros.

Casagrande completou o sistema de identificação com dados de granulometria e definiu o Sistema Unificado de Classificação de Solos, que é um sistema de classificação de solos globalmente muito utilizado. Um outro Sistema muito utilizado para a classificação de solos é a Classificação de solos para fins rodoviários (AASHTO). Foi um sistema de classificação elaborado principalmente para uso nas obras rodoviárias.

3.3.4.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS)

A Classificação Unificada de Solos foi apresentada por Arthur Casagrande em 1940 e destina-se a classificar os solos com vista à sua utilização como material de aterro (aterros para estradas, aeroportos). Este sistema de classificação possui como parâmetros para a determinação da classificação de solos, a granulometria e os limites de Atterberg (LL e LP), além da presença de matéria orgânica.

A versão utilizada (ASTM D 2487-06) divide os solos em três divisões principais: solos de granulometria grosseira, solos de granulometria fina e solos orgânicos. No total existem quinze grupos e a classificação do solo corresponde a um símbolo composto por duas letras maiúsculas (a primeira é relativa à granulometria e segunda à plasticidade).

Os solos de granulometria grosseira, com mais de 50% em massa de solo retida no peneiro 200 da série ASTM são representados pelos grupos:

- a) Grupos GW e SW: Correspondem os solos cascalhosos e arenosos bem graduados que contêm menos de 5% de finos não plásticos passados no peneiro 200 da série ASTM;
- b) Grupos GP e SP: Compreendem os solos cascalhosos e arenosos mal graduados que contêm menos de 5% de finos não plásticos passados no peneiro 200 da série ASTM;
- c) Grupos GM e SM: Correspondem a cascalhos ou areias que contêm mais de 12% de finos pouco plásticos ou não plásticos. A graduação destes solos não é relevante podendo estar incluídos nestes grupos, tanto materiais bem graduados, como mal graduados;
- d) Grupos GC e SC: Correspondem a solos cascalhosos ou arenosos com mais de 12% de finos que podem apresentar baixa ou alta plasticidade. A graduação não é relevante, no entanto, a fração fina presente neste tipo de solos é normalmente constituída por argilas que influenciam o comportamento do solo.

Os solos de granulometria fina com 50% ou mais em massa de solo passado pelo peneiro 200 da série ASTM são representados pelos grupos:

- a) Grupos ML e MH: Correspondem a materiais predominantemente siltosos, tais como, siltes arenosos, siltes argilosos ou siltes inorgânicos com relativa baixa plasticidade;
- b) Grupos CL e CH: Correspondem a argilas inorgânicas com baixos (CL) e altos limites de liquidez CH());
- c) Grupos OL e OH: Correspondem a solos com a presença de matéria orgânica, incluindo siltes e argilas orgânicas;
- d) Grupo Pt: Correspondem a solos que apresentam grande conteúdo em matéria orgânica, sendo facilmente identificáveis através da cor, cheiro, porosidade e pela sua textura fibrosa. São solos muito compressíveis, possuindo características inconvenientes para as obras de construção civil. Os materiais típicos deste grupo correspondem aos materiais que apresentam texturas orgânicas como as turfas, o húmus e os solos pantanosos.

A tabela 3.12 seguinte apresenta algumas propriedades importantes dos solos, quando compactados, dos grupos em que se divide a Classificação Unificada de Solos.

Tabela 3.12 - Propriedades dos solos, quando compactados, agrupados segundo a Classificação Unificada de Solos (adaptado de USDA, 2012 *in* Santos, 2013)

Símbolo	Permeabilidade quando compactado	Resistência ao corte quando compactado e saturado	Compressibilidade quando compactado e saturado	Trabalhabilidade como material de construção
GW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
GP	Muito permeável	Boa	Desprezável	Boa
GM	Semi-permeável a permeável	Boa	Desprezável	Boa
GC	Impermeável	Boa a razoável	Muito baixa	Boa
SW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
SP	Permeável	Boa	Muito baixa	Razoável
SM	Semi-permeável a impermeável	Boa	Baixa	Razoável
SC	Impermeável	Boa a razoável	Baixa	Razoável
ML	Semi-permeável a impermeável	Razoável	Média	Razoável
CL	Impermeável	Razoável	Média	Boa a razoável
OL	Semi-permeável a impermeável	Má	Média	Razoável
MH	Semi-permeável a impermeável	Razoável a má	Alta	Má
CH	Impermeável	Má	Alta	Má
OH	Impermeável	Má	Alta	Má
Pt	-	-	-	-

3.3.4.2. Classificação de solos para fins rodoviários (AASHTO)

Esta classificação foi aprovada em 1945 pelo *Highway Research Board* (HRB), constituído a partir de um aperfeiçoamento do antigo sistema do *Bureau Public Roads Administration*, proposto em 1929 (DNER, 1996 in Santos, 2006). É um sistema de classificação utilizado, principalmente, para uso nas obras rodoviárias, classificando o comportamento previsível dos solos na camada de fundação (subleitos) dos pavimentos das rodovias.

Para efetuar o procedimento de classificação é apenas necessário realizar os ensaios de granulometria, determinar os limites de Liquidez e de Plasticidade e calcular o Índice de Grupo. Posteriormente consulta-se a tabela de classificação AASHTO, iniciando sempre a análise da esquerda para a direita.

Os solos são divididos em sete grupos principais, de A-1 a A-7, de acordo com a sua granulometria. Esta classificação sofreu, entre 1943 e 1945, uma revisão pelo *Highway Research Board*, sendo alguns grupos subdivididos e sendo introduzido o Índice de Grupo (IG).

O IG corresponde a um número inteiro com intervalo de variação entre 0 e 20, sendo função da percentagem de material que passa no peneiro 200 e dos limites de Liquidez e de Plasticidade. É determinado através da seguinte fórmula:

$$IG = (F-35) * [0,2 + 0,005 * (LL - 40)] + 0,01 * (F -15) * (IP -10) \quad (7)$$

Em que (7):

F: corresponde à percentagem de solo que passa no peneiro 200 (número inteiro);

LL: corresponde ao Limite de Liquidez (%);

IP: corresponde ao Índice de Plasticidade (%).

O valor do Índice de Grupo ajuda a dimensionar das camadas do pavimento visto que ordena os solos dentro de um determinado grupo, conforme as suas aptidões. Quanto maior for o IG, pior será o solo para ser utilizado no pavimento (um solo classificado como A-4 e um IG igual a 7 é considerado melhor do que um solo também classificado como A-4 mas com um IG igual a 8).

Os materiais granulares (até 35% do material que passa no peneiro 200), compreendem os grupos A-1; A-2, A-3 (A-1 e A-3 são divididos em subgrupos) e os materiais siltsos e argilosos (mais de 35% do material passa no peneiro 200) compreendem os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 (A-7 é dividido em subgrupos).

Os grupos A-1, A-2 e A-3 correspondem a solos bem graduados constituídos principalmente por cascalho e areia, mas contendo uma pequena quantidade de finos. São considerados materiais granulares com um comportamento excelente a bom como subleito de uma rodovia. Quanto maior o IG, melhor será o comportamento como subleito.

Os grupos A-4 e A-5 representam os solos siltosos e os grupos A-6 e A-7, os solos argilosos. Estes grupos possuem um comportamento como material de subleito que varia de regular a mau. Quanto menos o IG, pior será o comportamento como material de subleito. Assim, os solos que contêm uma grande proporção de finos (A-4 a A-7) são inadequados para ser utilizados como materiais de subleito. Quando o subleito apresenta um comportamento inadequado, é reforçado ou há substituição do material por outro de melhor qualidade.

3.4. Resistência ao corte dos solos

3.4.1. Critério de rotura

A resistência ao corte do solo depende da sua natureza, estrutura, ligações, nível de deformações e, particularmente, do seu estado de tensão e da pressão de fluido que preenche os seus poros (Vallejo *et al.*, 2002).

O critério de rotura em solos mais divulgado foi proposto por Coulomb, relacionando tensões efetivas normais e tensões tangenciais atuantes em qualquer plano do solo. Para um solo saturado, a resistência ao corte é dada pela seguinte expressão:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (8)$$

Onde (8):

τ = Resistência ao corte do terreno a favor de um determinado plano

σ_n = Tensão total normal atuando sobre o mesmo plano

u = Pressão intersticial

c' = Coesão efetiva

ϕ' = Ângulo de atrito interno efetivo.

A equação anterior representa uma reta no espaço (σ', τ) : a linha de resistência intrínseca ou envolvente de rotura do solo (Figura 3.45). Esta linha proporciona a máxima tensão tangencial mobilizada no dito plano, para cada valor da tensão efetiva normal a um plano que atravessa um elemento do solo.

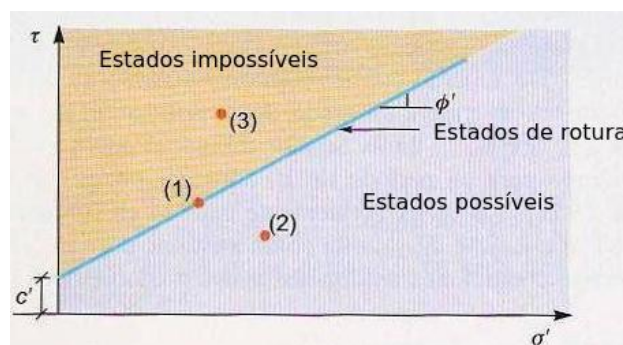


Figura 3.45 - Critério de rotura em solos (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002)

Segundo a figura 3.45 pode inferir-se que (Vallejo *et al.*, 2002):

- A coesão efectiva corresponde à ordenada na origem da envolvente de rotura, e representa a máxima resistência tangencial mobilizável num plano qualquer. A tensão efectiva normal é nula;
- Há proporcionalidade directa entre a tensão tangencial mobilizável e a tensão efectiva normal que actuam sobre o mesmo plano, ou seja, o solo apresenta maior resistência quanto maior for o seu nível de tensões efectivas;
- A linha de resistência atua como uma envolvente e separa os estados possíveis de impossíveis.

Deste modo, na figura 3.45 (Vallejo *et al.*, 2002):

- O ponto (1) representa um estado de rotura;
- O ponto (2) reproduz uma combinação (σ' , τ), que conta com um certo factor de segurança, porque para uma determinada tensão efectiva normal a tensão tangencial é inferior à máxima mobilizável;
- O ponto (3) representa um estado impossível porque está situado acima da envolvente de rotura.

Os conceitos básicos do tensor de tensões e do círculo de Mohr podem ser relacionados com as condições de rotura num dado plano com tensões atuantes favoráveis em outros planos. Na figura 3.46 estão representados três círculos de Mohr no espaço (σ' , τ), que podem representar três estados de tensão de um elemento de solo.

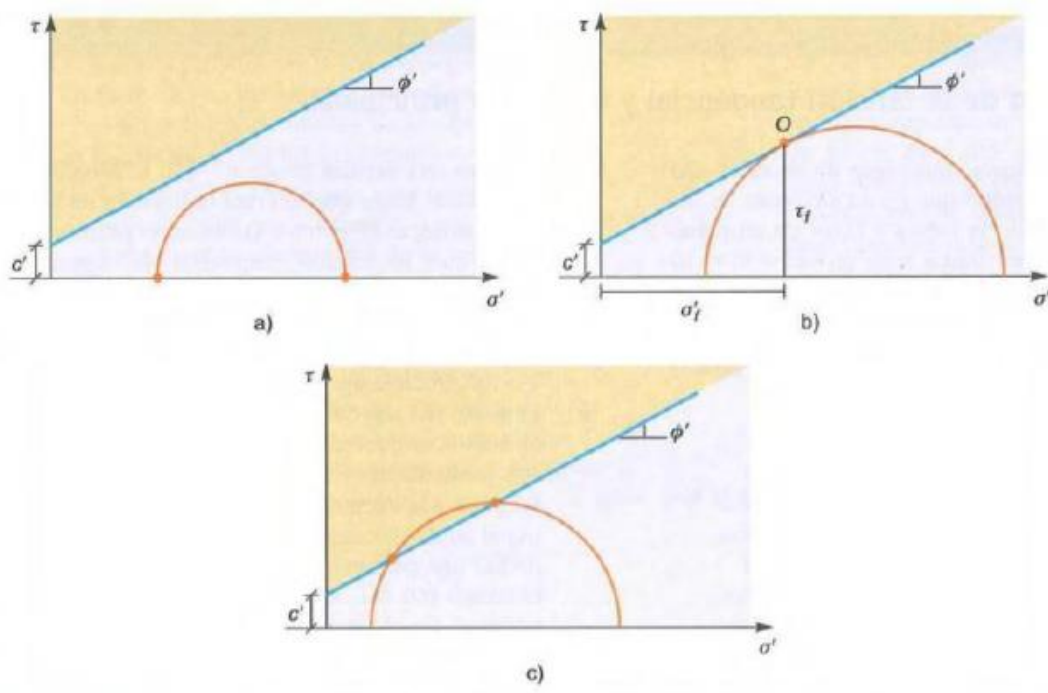


Figura 3.46 - Envolvente de rotura e círculo de Mohr (Vallejo *et al.*, 2002)

Observa-se que o estado tensional representado pelo círculo a) apresenta uma margem de segurança, já que não alcança a envolvente de rotura do solo, sendo assim, um estado possível e seguro.

O estado tensional representado pelo círculo b) indica uma situação de rotura e o ponto O representa a combinação (σ'_f, τ_f) , num plano que atravessa o elemento de solo no momento em que se alcançam as condições do critério de rotura definidas.

O estado tensional representado pelo círculo c) é impossível, pois existem orientações de planos a atravessar o elemento de solo que excedem as condições (σ', τ) , de rotura.

Quando se atingem as condições de rotura de um elemento de solo, o círculo de Mohr que representa o seu estado tensional, corresponde à tangente, à linha de resistência intrínseca. O plano em que se atingem as condições de rotura será representado pelo ponto de tangência (Vallejo *et al.*, 2002).

3.4.2. Ensaio de corte direto

O ensaio de corte direto é um ensaio que permite saber as características de deformabilidade e a resistência, em condições não-drenadas, de solos. Como os solos da área de estudo estão inseridos numa região onde a erosão hídrica se faz notar, torna-se importante a realização de ensaios de corte direto para a definição dos parâmetros de resistência ao corte dos solos e avaliar os seus parâmetros coesivos. Os cortes realizados foram rápidos, sendo os mais recomendados em solos grosseiros.

3.4.2.1. Descrição do ensaio

O dispositivo utilizado para a realização dos ensaios de corte está representado esquematicamente nas figuras 3.47 e 3.48.

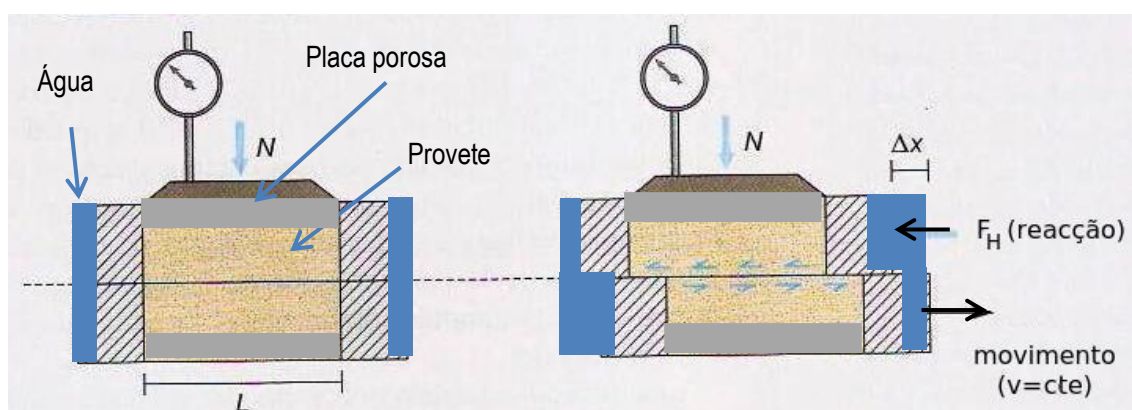


Figura 3.47 - Esquema do aparelho de corte direto (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002)

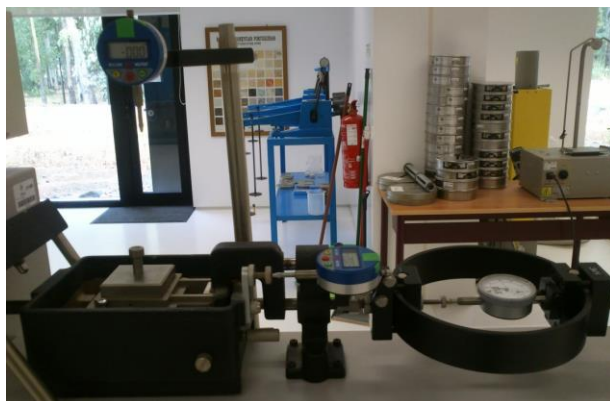


Figura 3.48 - Aparelho de corte direto utilizado no Instituto Politécnico de Beja (24/06/2014)

O dispositivo de ensaios consiste numa caixa rígida de aço, normalmente de secção quadrada, que se encontra dividida em duas metades, sendo colocada a amostra de solo a ensaiar no interior da caixa. Sobre esta dispõe-se uma placa de distribuição rígida sobre a qual se pode aplicar uma carga vertical (M). Introduce-se todo o conjunto num recipiente de maiores dimensões, sendo preenchido com água para realizar o ensaio em condições de saturação (colocam-se placas porosas nas faces superior e inferior da amostra para facilitar a drenagem). Para um ensaio não drenado, a amostra tem que estar no estado saturado durante todo o ensaio.

A indução de tensões cortantes no solo obtém-se pelo deslizamento horizontal da parte inferior da caixa de corte, impedindo-se o movimento da parte superior. Neste caso a superfície de rotura é imposta pelo dispositivo e a rotura dá-se quando o valor da tensão de corte diminui ou se mantém constante (Vallejo *et al.*, 2002).

Um ensaio completo de um determinado solo consiste em ensaiar no mínimo três amostras idênticas do mesmo material sob três cargas verticais distintas (N_1 , N_2 , N_3), sendo cada carga o dobro da anterior.

Em cada ensaio individual, à medida que se dá o movimento horizontal a velocidade constante da parte inferior da caixa vai-se medindo a força (F_H) necessária para impedir o movimento da parte superior e o deslocamento vertical da amostra. Para obter a tensão tangencial (τ) atuante em cada momento sobre o plano de corte, divide-se a força F_H pela secção (S_0) da amostra. Sendo as paredes da caixa de corte rígidas, a deformação vertical medida (δ_{ε_v}) corresponde à deformação volumétrica da amostra (δ_v), uma vez que (Vallejo *et al.*, 2002):

$$\delta_{\varepsilon_v} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta H * S_0}{H_0 * S_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \delta_v \quad (9)$$

Onde (9):

H_0 = altura inicial da amostra (4,2 cm para as caixas de corte habituais);

S_0 = secção da amostra (usualmente 36 cm² para caixas com L = 6 cm de lado);

$V_0 = H_0 \cdot S_0$ é o volume inicial de solo;

ΔH = deslocamento vertical (positivo se há encurtamento);

ΔV = variação de volume de solo (positivo se há compressão).

Quanto às fases de ensaio, o procedimento é o seguinte (Vallejo *et al.*, 2002):

- Aplica-se uma tensão vertical total N_v ;
- Se o ensaio é realizado com a amostra saturada e a célula inundada, geralmente deixa-se consolidar a amostra até que se dissipe o excesso de pressão intersticial gerada;
- Aplica-se na parte inferior da caixa de corte uma velocidade horizontal constante e medem-se os intervalos de tempo da reação (F_{HI}) necessários para evitar o deslocamento da parte superior da caixa, para que ocorra a tensão tangencial a cada instante sem haver dissipação do excesso de pressão intersticial gerada pela tensão tangencial aplicada e o ensaio pode considerar-se drenado. Nestas condições os resultados são obtidos em termos de tensões efetivas ($\sigma_n = \sigma'_n$). Torna-se relevante importante utilizar uma velocidade suficientemente pequena já que no aparelho de corte direto não é possível controlar a drenagem ou medir a pressão intersticial em cada instante (depende, naturalmente, do tipo e da permeabilidade do solo ensaiado);

$$\tau = \frac{F_{HI}}{L^2} \quad (10)$$

- Para os mesmos intervalos de tempo são medidos os deslocamentos verticais da amostra, possibilitando alterações de volume do solo em cada momento.

Este processo é realizado com outras duas amostras de solo idênticas, mas com tensões normais crescentes (σ_{n2}) e (σ_{n3}) (Vallejo *et al.*, 2002).

No caso de um ensaio de corte drenado (consolidado drenado) nota-se que (Figura 3.49):

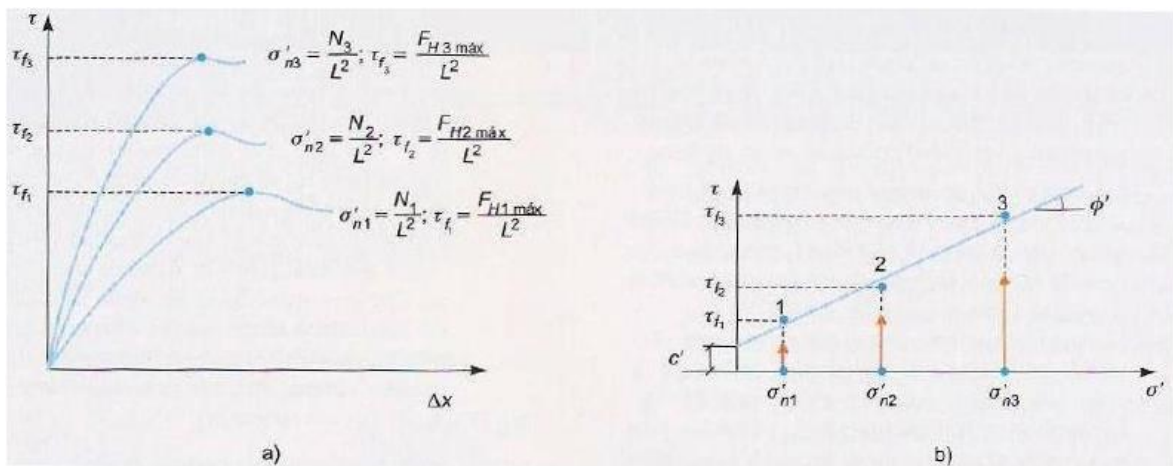


Figura 3.49 - Obtenção da envolvente de rotura e dos parâmetros de resistência ao corte (c' , ϕ') a partir de um ensaio de corte direto drenado (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002)

- Seja qual for a tensão efetiva normal aplicada, a tensão tangencial mobilizada aumenta gradualmente à medida ocorre deslocamento da caixa de corte até ser um máximo atingido (τ_f);
- Quanto maior é a tensão efetiva normal inicial, maior será a tensão tangencial máxima atingida;
- O declive inicial da curva de tensão tangencial - deslocamento horizontal é tanto maior quanto maior for a tensão efetiva normal inicial. Este facto indica que o solo aumenta a rigidez com o nível de tensões.

Na figura 3.49 b) podem observar-se as tensões tangenciais máximas das curvas anteriores juntamente com as tensões efetivas normais iniciais. Nota-se que os pontos representativos (σ'_n , τ_f) dos três ensaios unem-se de forma aproximada através de uma reta (a linha de resistência intrínseca ou envolvente de rotura), podendo-se determinar os parâmetros (c' , ϕ') (Vallejo *et al.*, 2002).

No caso de um ensaio não drenado (não consolidado não drenado) submete-se a amostra ao ensaio mantendo as válvulas de drenagem sempre fechadas (para simular o comportamento não drenado do material, não havendo tempo para ocorrer variação do teor em água) a uma pressão lateral e aumenta-se, de seguida, a tensão axial até à rotura. Este ensaio permite obter a resistência não drenada do solo (c_u ou c_{uu}).

Os resultados são obtidos em termos de tensões totais. Como não há consolidação o índice de vazios dos três provetes será semelhante se os três provetes forem idênticos logo não há alteração da resistência do material. Assim, os três círculos têm o mesmo diâmetro (Figura 3.50). O desfasamento no eixo das tensões normais ocorre apenas devido ao diferente confinamento (σ_{cam}) aplicado durante o ensaio. Neste caso, a envolvente de rotura corresponde à reta tangente aos três círculos, sendo uma reta horizontal (Critério de Tresca). A ordenada na origem corresponde ao raio dos círculos e dá-nos a resistência não drenada c_u (Instituto Superior Técnico, 2009).

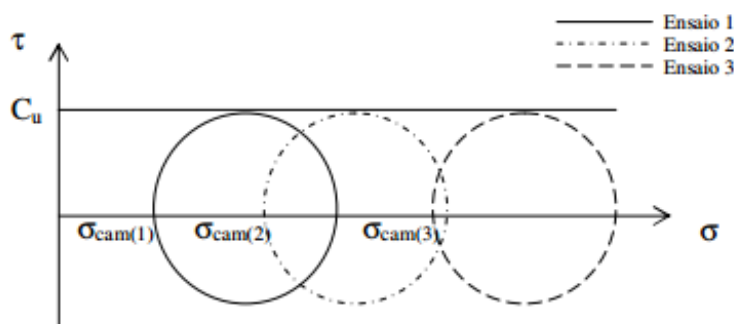


Figura 3.50 - Ensaio não consolidado não drenado: análise em termos de tensões totais para obter a resistência não drenada c_u (Instituto Superior Técnico, 2009)

3.4.2.2. Vantagens e desvantagens do ensaio de corte direto

O dispositivo de ensaio descrito apresenta vantagens e desvantagens. As principais vantagens são as seguintes (Vallejo *et al.*, 2002):

- É um ensaio rápido, simples e barato;
- Os seus princípios básicos são elementares;
- Simplicidade na preparação das amostras;
- Podem ensaiar-se materiais de grão grosseiro com caixas de corte de grandes dimensões;
- Podem ser aplicados os mesmos princípios para determinar a resistência de discontinuidades em rocha se forem realizadas algumas modificações;
- É possível medir a resistência residual em argilas.

As desvantagens são (Vallejo *et al.*, 2002):

- A superfície de rotura é imposta;
- A distribuição das tensões não é uniforme ao longo da superfície de corte;
- Não é possível medir pressões intersticiais, e por isso, a única forma de controlar a drenagem é variar a velocidade de deslocamento horizontal;
- A área de contacto do plano de corte diminui à medida que ocorre deslocamento horizontal relativo entre as duas meias caixas.

3.4.2.3. Comportamento dos solos granulares submetidos a corte

Como os solos da área de estudo são granulares, a seguir são descritos os padrões para este tipo de solos.

Se forem ensaiadas três amostras do mesmo solo grosseiro mas com densidades diferentes e crescentes, ou seja, a amostra 1 encontra-se num estado muito solto e apresenta um índice de vazios elevado, a amostra 2, um pouco mais densa que a amostra 1 para que o volume de vazios seja menor e, a amostra 3, apresenta uma densidade elevada e, o menor índice de vazios das três amostras a ensaiar.

Se as três amostras forem ensaiadas em condições drenadas, sendo aplicada a mesma tensão normal, para que as tensões totais e efetivas sejam coincidentes em qualquer momento (Vallejo *et al.*, 2002).

$$\sigma'_n = \frac{N}{L^2} \quad (11)$$

Na figura 3.51 estão representados os resultados dos ensaios acima referidos. A figura 3.51 a) mostra as curvas tensão tangencial mobilizada - deslocamento horizontal. A figura 3.51 b) mostra a relação deslocamento horizontal - variação de volume. A figura 3.51 c) mostra a

relação índice de vazios - deslocamento horizontal e a figura 3.51 d) mostra a rota tensional exercida no plano (σ', τ).

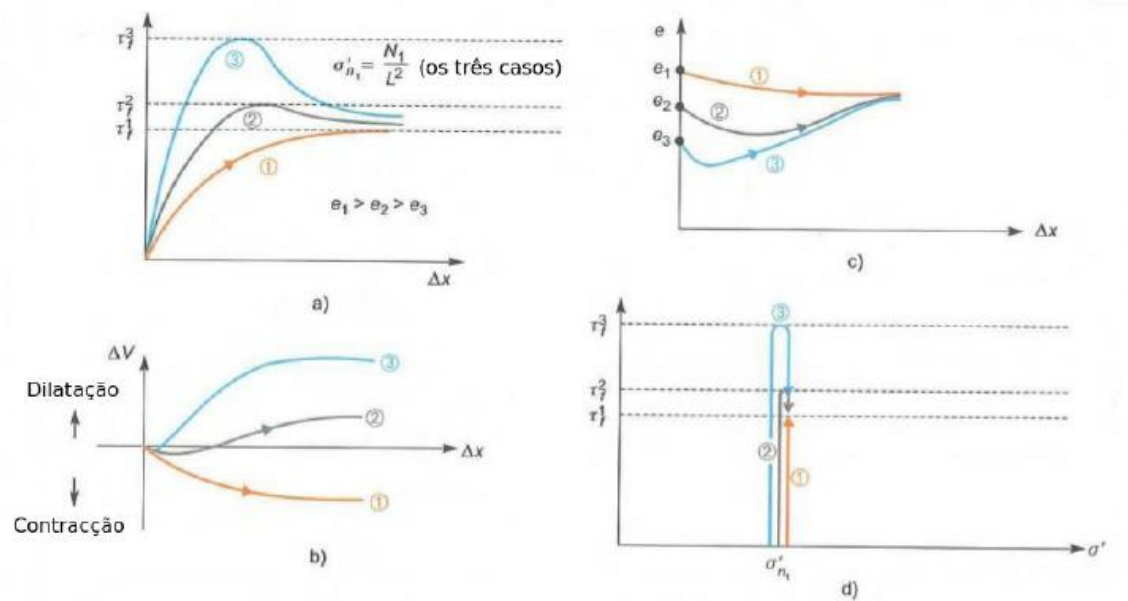


Figura 3.51 - Curvas de ensaios de corte drenado sobre amostras granulares de distinta densidade inicial (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002)

Os três ensaios de corte podem ser repetidos com tensões efetivas normais maiores ($\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$). A figura 3.52 representa esquematicamente as três envolventes de rotura resultantes, mostrando a dependência direta do ângulo de atrito de pico para com a densidade inicial do solo.

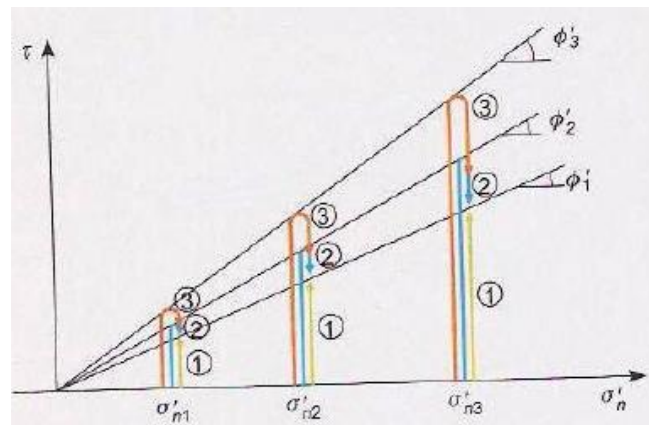


Figura 3.52 - Envolventes de rotura em função da densidade inicial da amostra (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002)

A relação existente entre a densidade e a compacidade inicial de um determinado solo granular com a sua resistência é muito elevada. No entanto, a resistência de um solo granular depende também de outros fatores, como, a forma das partículas, a distribuição granulométrica e o tamanho dos grãos. A influência desses fatores sobre a resistência é perceptível (Vallejo *et al.*, 2002):

- Forma das partículas: é mais fácil fazer deslizar ou rodar entre si partículas arredondadas do que partículas angulosas e irregulares, logo, um solo constituído por partículas angulosas e irregulares apresenta maior resistência ao corte;
- Granulometria: num solo uniforme a maioria das partículas apresentam tamanho idêntico, logo o índice de vazios entre partículas depende diretamente do tamanho das mesmas. Um solo bem graduado possui partículas de vários tamanhos, podendo os grãos de dimensão média ocupar os espaços existentes entre as partículas mais grosseiras, e as partículas mais finas ocuparem os espaços das partículas médias, diminuindo o índice de vazios. Deste modo, a estrutura é mais densa e resistente do que a estrutura existente num solo uniforme;
- Tamanho dos grãos: é mais difícil fazer deslizar e rodar entre si partículas de grandes dimensões do que partículas de pequenas dimensões.

Na tabela 3.13 mostram-se algumas ordens de grandeza dos ângulos de atrito que se podem esperar em função da compactidade e do tipo de solo, onde se podem verificar alguns dos aspetos referidos anteriormente (Vallejo *et al.*, 2002).

Tabela 3.13 - Valores do ângulo de atrito interno de solos granulares não plásticos em função da granulometria e da compactidade inicial (adaptado de Vallejo *et al.*, 2002)

Tipo de solo	Ângulo de atrito interno em função da compactidade inicial (°)		
	Solto	Medianamente compacto	Compacto
Silte não plástico	26-30	28-32	30-34
Areia uniforme fina a média	26-30	30-34	32-36
Areia bem graduada	30-34	34-40	38-46
Mistura de areia e cascalho	32-36	36-42	40-48

3.5. Análise estatística de dados - fundamentos teóricos

Para resumir um conjunto de dados recolhidos num determinado estudo é habitual a organização dos mesmos, usualmente, através de números, tabelas e/ou gráficos, sendo utilizados um conjunto de técnicas analíticas da estatística descritiva. Estas apresentam informações sobre a tendência central e a dispersão dos dados, sendo necessário a determinação de certos valores, tais como, o valor mínimo, o valor máximo, a média, a moda, a mediana, a variância e o desvio padrão.

A análise estatística apresenta os seguintes objetivos principais (Almeida, 2013):

- Organização e descrição exploratória de dados;
- Síntese de informação;

- Apresentação dos resultados de um modo sintético.

O método mais adequado a utilizar para descrever as principais características de um conjunto de dados depende da natureza das variáveis, que podem ser qualitativas (apresentam uma determinada qualidade, categoria ou característica, que não pode ser medida mas pode ser classificada) ou quantitativas (apresentam uma determinada característica que pode ser medida).

Os dados estatísticos podem ser organizados e apresentados através de quadros, gráficos, diagramas de caixa (*box-plot* ou caixa de bigodes) e de distribuições de frequência (relativa, que representa o número de vezes que um acontecimento se repete na amostra em relação ao número total de casos e/ou, absoluta, que representa o número de vezes que um acontecimento se repete na amostra). De entre os vários tipos de gráficos existentes há que destacar, por exemplo, os gráficos de linhas e os gráficos de barras ou histogramas (Morais, 2005).

A representação das variáveis de uma determinada amostra pode assim ser feita através de um histograma, que corresponde à representação gráfica das frequências. Num histograma há que considerar alguns parâmetros, tais como, o número de classes ou a amplitude das classes, sendo possível identificar o tipo de distribuição (uni-modal ou bi-modal), a presença de valores extremos e *outliers* e a variabilidade dos dados.

Um diagrama de caixa, ou *box-plot* (Figura 3.53), é um gráfico em que a base representa o quartil Q1 (25% dos menores valores) e o topo da caixa representa o quartil Q3 (75% dos valores observados). O diagrama de caixa identifica e representa 50% de todos dos valores mais prováveis, a mediana e os valores extremos. Através de um *box-plot* é possível ficar a conhecer as seguintes medidas estatísticas: a mediana, a média, o mínimo, o máximo e os quartis Q1 e Q3.

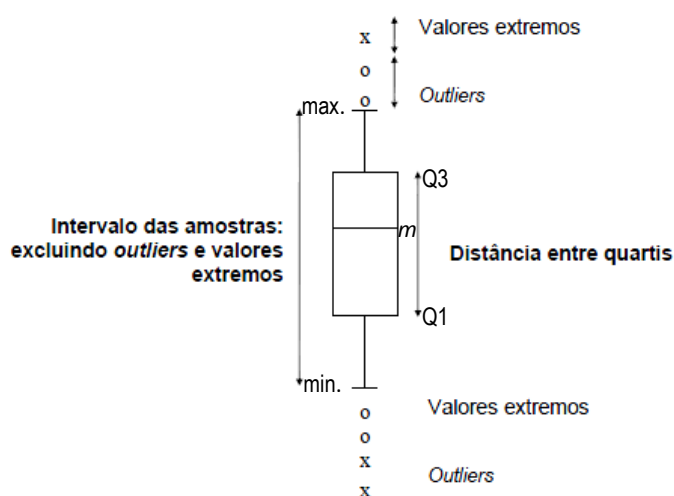


Figura 3.53 - Exemplo de um *box-plot* e a localização de *outliers* (Almeida, 2013)

Medidas de estatística descritiva

As medidas de estatística descritiva permitem sintetizar os dados da população ou da amostra através de um só valor. As medidas descritivas mais utilizadas são as medidas de localização que correspondem às medidas de tendência central (média aritmética, mediana e moda) e as medidas de dispersão (desvio absoluto médio, variância e desvio padrão).

As medidas de tendência central indicam o modo de distribuição dos dados, indicando o valor, ou valores da variável aleatória.

Correspondem a:

- Média aritmética: consiste no quociente entre a soma de todos os valores observados e o número total de observações. A média aritmética é sensível a valores extremos;
- Mediana: após a ordenação dos dados da amostra, consiste no valor que divide a amostra ao meio, ou seja, 50% dos elementos da amostra são menores ou iguais à mediana e os outros 50% da amostra são maiores ou iguais à mediana. A mediana é sensível a ausências de valores no meio da distribuição;
- Moda: consiste no valor mais frequentado, indicando o valor ou categoria/classe mais provável;
- Quartis (Q1 ou Q25 e Q3 ou Q75): Q1 ou Q25 consiste no valor a que corresponde uma percentagem cumulativa de 25% e Q3 ou Q75 consiste no valor a que corresponde uma percentagem cumulativa de 75%.
- Mínimo (min) e máximo (max): consistem no valor mais baixo da amostra e no valor mais alto da amostra, respetivamente.

Medidas de dispersão

A variabilidade de um conjunto de dados é exprimida através das medidas de dispersão. Estas medidas permitem identificar até que ponto os resultados se concentram ou não em torno da tendência central de um conjunto de observações. Quanto maior é a dispersão, menor é a concentração e vice-versa.

As medidas de dispersão que usualmente exprimem a variabilidade são:

- Variância (s^2 ou σ^2): corresponde à soma dos quadrados dos desvios das observações da amostra, relativamente à sua média, e dividindo por n ou por $n-1$, consoante o tamanho da amostra (superior a 20 ou não superior a 20, respetivamente). A variância é extremamente sensível aos valores extremos;

- Desvio padrão (s ou σ): corresponde à raiz quadrada da variância s^2 . É uma medida que só assume valores não negativos e quanto maior é, maior será a dispersão dos dados (maior variabilidade dos dados). Quando o desvio padrão é igual a zero não existe variabilidade.

Medidas da forma da distribuição

As medidas da forma da distribuição dos dados podem ser:

- Coeficiente de assimetria ou *coeficient of skewness*: é extremamente sensível aos valores extremos. O sinal do coeficiente de assimetria indica o tipo de distribuição, em que, positivo (+) representa uma cauda da distribuição para a direita e, negativo (-) representa a cauda da distribuição para a esquerda (Figura 3.54).

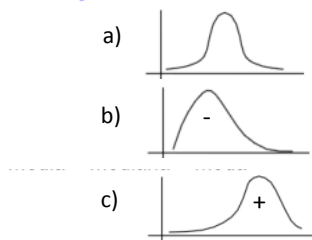


Figura 3.54 - a) Distribuição simétrica, b) distribuição enviesada à esquerda ou assimétrica positiva, c) distribuição enviesada à direita ou assimétrica negativa (Almeida, 2013)

- Coeficiente de variação: é uma medida da assimetria para distribuições assimétricas e é um indicador prévio de dificuldades na estimação de valores locais.

3.5.1. Análise estatística multivariada de dados

Os métodos de análise multivariada, desenvolvidos no início do século XX para servir a área da psicologia quantitativa, são atualmente aplicados em múltiplos domínios, tais como: a Educação, as Ciências da Terra (no domínio da geotecnia), a Química, a Física e as Engenharias. A expansão do uso desta técnica deve-se ao desenvolvimento da tecnologia computacional e ao grande número de *softwares* estatísticos com implementação de módulos de análise multivariada.

A análise multivariada consiste em um grande número de métodos e técnicas estatísticas que utilizam conjuntamente todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos. Para efetuar uma análise multivariada existem variadas técnicas em que cada uma delas é aplicada a um determinado estudo específico.

Geralmente as variáveis estão correlacionadas entre si e quanto maior o número de variáveis em análise, mais complexa será a análise para métodos comuns de estatística univariada (Mingoti, 2005)

Segundo Amaral Júnior (Amaral Júnior, 1999 *in* Mota, 2007), a análise multivariada corresponde à análise conjunta de diversas características simultaneamente, ou seja, a análise multivariada consiste em um conjunto de técnicas analíticas que permitem o tratamento de determinadas características em conjunto, conseguindo-se assim agregar as numerosas informações obtidas das avaliações experimentais e/ou amostrais.

A análise multivariada é uma técnica muito útil para os estudos de classificação e ordenação. Pode-se considerar a classificação como multivariada, consistindo na identificação de indivíduos ou objetos em n grupos ou classes, fundamentando-se em medições de várias variáveis (x_1, \dots, x_n) efetuadas para esses indivíduos ou objetos.

Os procedimentos de classificação procuram dividir os indivíduos ou objetos em classes de objetos similares, em que o número de classes não é estabelecido no início do processo de classificação, e cujos critérios para a sua criação e inclusão de cada objeto são quantitativos, baseados em um índice de similaridade ou dissimilaridade (Jongman *et al.*, 1995 *in* Mota, 2007).

O processo de ordenação tem como objetivo a síntese de um grande número de medidas em poucas variáveis, com o intuito de facilitar a identificação de certos padrões. Na grande generalidade das técnicas de ordenação existentes, as variáveis, eixos ou componentes, correspondem a combinações lineares das medidas originais, mas o modo como os eixos são calculados é que define cada técnica de ordenação. Como método de ordenação, temos por exemplo a análise de componentes principais.

Para Johnson e Wichern (Johnson e Wichern, 1992 *in* Mota, 2007), existem várias técnicas utilizadas na análise multivariada e cada uma é aplicada de acordo com o objetivo específico de determinado estudo:

- a) Redução dos dados ou simplificação estrutural, facilitando a interpretação;
- b) Agrupar os dados em grupos de objetos ou variáveis semelhantes com base nas medidas características;
- c) Análise da dependência entre as variáveis;
- d) Predição através da análise das relações entre as variáveis;
- e) Construção de hipóteses estatísticas específicas, com base nos parâmetros da população multivariada, e testes.

Como exemplos de técnicas de análise multivariada temos: análise fatorial em componentes principais, análise fatorial de correspondências múltiplas e análise fatorial de correspondências binárias.

Nestas técnicas o objetivo principal é a extração das estruturas existentes na matriz de dados para sintetizar a informação principal, retendo os aspetos estruturais mais relevantes. Através da síntese da informação principal, conseguem relacionar-se os dados da matriz original e/ou

realizar testes entre os dados. Os dados de saída, ou de *output*, correspondem geralmente a uma representação gráfica, num espaço de pequena dimensão, das características estruturais mais relevantes dos conjuntos de base, funcionando como uma filtragem estrutural (Pereira, 1983).

Os métodos anteriores são considerados métodos de deteção estrutural e neste tipo de métodos, cada linha ou coluna da matriz X ($n \times p$) (Figura 3.55) é tomada como um vetor das coordenadas dos indivíduos no espaço das propriedades (R^p) ou das coordenadas das propriedades no espaço dos indivíduos (R^n). A deteção estrutural tem como objetivo a análise da matriz $X'X$ ($p \times p$), após uma eventual codificação, ou da matriz XX' ($n \times n$). Estas matrizes podem ser interpretadas de uma forma geométrica, correspondendo à matriz de inércia, ou de forma probabilística, correspondendo à matriz da covariância (Pereira, 1983).

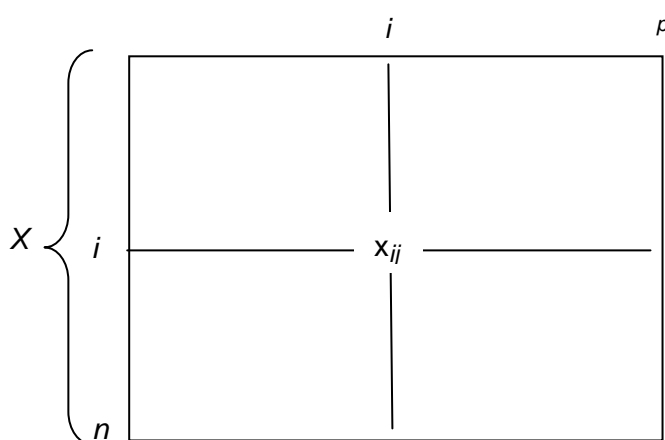


Figura 3.55 - Matriz genérica X

3.5.1.1. Análise em Componentes Principais (ACP)

A análise de componentes principais é uma das técnicas de análise estatística multivariada, no domínio da análise fatorial (tenta descrever a variabilidade de uma população com base num pequeno número de fatores independentes) e, corresponde a uma técnica estatística que permite uma visualização e a redução do número de variáveis bem como a redução de dados incluídos em tabelas de grandes dimensões, através do cruzamento de um certo número de indivíduos com as variáveis quantitativas que os caracterizam (Sousa e Sousa, 2001). Há a transformação do conjunto inicial das variáveis independentes num outro conjunto de variáveis ortogonais (eixos), em que cada eixo, a extrair sucessivamente, apresenta uma inércia máxima. A análise de componentes principais baseia-se em conceitos geométricos simples e, tal como a análise fatorial, tem um carácter puramente descritivo, não existindo um modelo a priori (Pereira, 1983).

Através da análise por componentes principais é possível converter um conjunto original de variáveis em um outro conjunto com uma dimensão idêntica, mas apresentando características relevantes. Os objetivos desta análise consistem em reduzir a dimensão original dos dados e

auxiliar na interpretação das análises realizadas (Mota, 2007). Desta forma, a grande vantagem da utilização desta técnica passa por sintetizar e extrair das tabelas a informação fundamental, explicitando o sistema de interdependências entre as variáveis e os objetos e reduzindo, de forma simultânea, a redundância e o ruído (Sousa e Sousa, 2001).

Segundo Cruz e Regazzi (Cruz e Regazzi, 1997 *in* Mota, 2007), cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais, sendo independentes entre si e estimados com o objetivo de conservar, em ordem de estimação, a grande maioria da informação, em termos de variação total, incluída nos dados iniciais.

A viabilidade da utilização da análise por componentes principais depende da possibilidade de diminuir o número de variáveis analisadas em poucos componentes principais, com a menor perda de informação possível (eliminam-se as variáveis que contribuem pouco para a discriminação do conjunto de dados analisados). É uma técnica que segue a distância euclidiana (Ribeiro Júnior, 2001 *in* Mota, 2007).

A análise em componentes principais permite encontrar os fatores que melhor explicam as similitudes e contrastes entre indivíduos e variáveis. Esses fatores são hierarquizados por ordem decrescente da sua importância para a explicação dos dados da tabela de partida e consistem num sistema de eixos ortogonais onde é possível a visualização gráfica das projeções dos constituintes da matriz de dados (Sousa e Sousa, 2001).

3.5.1.2. Análise de correspondências múltiplas (AFCM)

A Análise de Correspondências (AC) é mais uma das técnicas da estatística multivariada que se enquadra no domínio da análise fatorial. A AC permite a visualização e a diminuição de dados contidos em tabelas de grandes dimensões, cruzando os indivíduos com as variáveis qualitativas que os caracterizam (Sousa e Sousa, 2001). Assim, a análise de correspondências tem como principal objetivo o estudo da correspondência entre as variáveis.

Segundo Carvalho e Struchiner (Carvalho e Struchiner, 1992 *in* Alves *et al.*, 2007), a AC permite a visualização gráfica das correspondências mais importantes existentes dentro de um grande conjunto de variáveis entre si, tanto categóricas como contínuas categorizadas. A AC tem como base principal, uma matriz de dados, constituída por números positivos ou nulos, que são representados por uma tabela de partida, a tabela de contingências, sendo estes dados transferidos para uma forma gráfica que apresenta as linhas e as colunas da matriz de dados. No cruzamento da linha i com a coluna j , encontra-se um valor positivo $K(i,j)$ que dá o número de vezes que a propriedade j foi observada no indivíduo i (Pereira, 1983).

No método de análise das correspondências há possibilidade de projetar simultaneamente os indivíduos e as propriedades nos mesmos eixos fatoriais, permitindo obter conclusões sobre a estrutura de relações entre os conjuntos I e J. É também possível agrupar os indivíduos, ou as

propriedades, visto que o vetor de descrição é semelhante e não há alteração dos resultados da análise.

Existem duas variantes da análise fatorial das Correspondências: Correspondências Binárias (ACOR) e Correspondências Múltiplas (AFCM). A primeira é utilizada quando se pretende tratar tabelas de contingência ou tabelas em que um conjunto de indivíduos é caracterizado por um conjunto de variáveis com valores reais positivos e homogêneos e, a segunda é utilizada quando se tratam tabelas em que o conjunto de indivíduos é caracterizado por variáveis qualitativas e quantitativas, após a elaboração de uma recodificação numa tabela disjuntiva completa ou num quadro, ou matriz, de Burt (Sousa e Sousa, 2001).

Considerando uma tabela com o formato $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n]$, a matriz quadrada $B = Z'Z$ é designada por matriz de Burt associada a uma tabela disjuntiva completa (Fernández, 2011).

Importa referir que a distinção referida entre a Análise de Correspondências Binárias e Múltiplas não tem expressão algorítmica, ou seja, se for submetido um quadro disjuntivo completo (ou de Burt), após a recodificação de um quadro, ou matriz, de dados de variáveis quantitativas e qualitativas, os resultados são análogos aos que são obtidos quando se procede a uma análise AFCM diretamente sobre os dados originais (Sousa e Sousa, 2001).

Partindo dos princípios geométricos da AC, é possível representar um Mapa de Correspondências para facilitar a visualização das relações existentes entre as variáveis (Lourenço, 1997 *in* Alves *et al.*, 2007). O Mapa de Correspondências representa, dentro do espaço Euclidiano, as distâncias existentes entre os pontos linha e/ou coluna que resultam da associação entre as variáveis da tabela de contingência.

A Análise Fatorial das Correspondências apresenta, relativamente a outros métodos fatoriais, a vantagem de poder tratar qualquer tipo de quadro de entrada que contém números positivos e é um método gerado particularmente para tabelas de contingência, que resultam de contagens (Sousa e Sousa, 2001).

3.5.1.3. Análise de correspondências binárias (ACOR)

Como já foi referido, a análise fatorial das Correspondências Binárias (ACOR) é utilizada quando se pretende tratar tabelas de contingências ou tabelas cujo conjunto de indivíduos pode ser caracterizado por um conjunto de variáveis com valores reais positivos e homogêneos (Sousa e Sousa, 2001).

3.5.2. *Análise classificatória*

O objetivo desta classificação traduz-se no agrupamento de amostras com características semelhantes (variáveis idênticas) em vários grupos para encontrar, na área de estudo, solos com características idênticas.

A classificação ascendente hierárquica é realizada com base numa matriz de dados, segundo o modo Q, que consiste na classificação de indivíduos ou linhas da matriz, ou segundo o modo R, que consiste na classificação das propriedades ou colunas da matriz (Sousa e Sousa, 2001).

Muitas vezes, pretende-se, a partir de um dado conjunto de n indivíduos, agrupar esses n indivíduos em várias classes, ou subgrupos, de modo a que haja homogeneidade interna em cada classe ou subgrupo, ou seja, de modo a que a constituição dos subgrupos apresente indivíduos “semelhantes” e, que haja heterogeneidade entre os vários subgrupos, de modo a que os indivíduos de subgrupos diferentes sejam “dissemelhantes”. Nos métodos de Análise Discriminante uma determinada subdivisão é conhecida num conjunto de dados que está disponível, sendo o objetivo a procura de direções no espaço que demonstrem a separação desses subgrupos. No entanto, na maior parte dos casos não existe uma classificação desse tipo disponível, não sendo possível identificar as diferentes classes de indivíduos existentes nos dados originais (Cadima, 2010).

Os métodos que possibilitam determinar essas classes ou subgrupos são os designados métodos de Análise Classificatória.

De entre os métodos de Análise Classificatória existem dois grandes grupos de métodos: Métodos Hierárquicos e Métodos Não Hierárquicos.

Nos métodos hierárquicos o agrupamento em classes é realizado através de várias etapas, em que se determina, a partir de n subgrupos, compostos por um único indivíduo cada, sucessivas fusões de subgrupos considerados mais “semelhantes” entre si. Cada fusão de um subgrupo, reduz, em uma unidade, o número de subgrupos.

Nos métodos não-hierárquicos o número de k classes que se pretende constituir é fixado e geralmente procede-se a uma classificação inicial dos n indivíduos em k classes, podendo-se também determinar k “sementes” em torno das quais se pretende construir as classes. Fazem-se transferências de indivíduos de uma classe para outra, ou associações dos indivíduos às “sementes” das classes, para estabelecer uma classificação adequada com base na obtenção de classes mais internamente homogêneas e externamente heterogêneas (Cadima, 2010).

Como será utilizado o método hierárquico, de seguida procede-se a uma descrição mais detalhada deste método.

3.5.2.1. Métodos Hierárquicos

A partir de um conjunto de n indivíduos, os métodos de classificação hierárquicos baseiam-se numa matriz $n \times n$ (matriz de semelhança ou dissemelhança) em que o elemento genérico (i, j) é uma medida de “semelhança” (ou “dissemelhança”) entre os indivíduos i e j . Como já se referiu em métodos anteriores, nesse tipo de análise também existe uma matriz X ($n \times p$) de observações multivariadas associadas aos indivíduos, sendo a origem da matriz de semelhanças/dissemelhanças. Contudo, essa matriz pode ser dispensável, sendo apenas necessário conhecer a matriz $n \times n$ de semelhanças ou dissemelhanças para se proceder a uma Análise de Classificação Hierárquica (Cadima, 2010).

Inicialmente consideram-se os n indivíduos como constituindo n classes diferentes e, por etapas, vai-se fundindo um par de classes em cada etapa, havendo fusão das duas classes consideradas mais semelhantes entre si, podendo, no final, haver fusão de todos os indivíduos numa única classe.

Geralmente, as sucessivas fusões de subgrupos num método de classificação hierárquico é representada graficamente através de um dendrograma, que consiste na representação dos subgrupos em forma de árvore (Figura 3.56).



Figura 3.56 - Exemplo de um dendrograma resultante de uma Classificação Hierárquica (Cadima, 2010)

Pode ser feito um corte no dendrograma a qualquer nível de aglomeração gerando uma classificação em k subgrupos ($1 \leq k \leq n$). Um par de indivíduos que seja incluído numa mesma classe em qualquer etapa do processo não poderá mais ser separado em etapas posteriores, visto que as fusões ocorrem em classes já existentes (Cadima, 2010).

O processo descrito consiste apenas numa das formas de realizar uma Análise Classificatória Hierárquica, designada por Análise Classificatória Hierárquica Aglomeradora ou Ascendente. Neste processo pode-se também proceder de forma análoga, mas em sentido inverso, como por exemplo, começar pela classe da totalidade dos indivíduos e realizar a desagregação de classes anteriormente existentes separando os subgrupos mais heterogéneos. A este processo dá-se a designação de Análise Classificatória Hierárquica Desagregadora ou Descendente, que devido à sua grande complexidade computacional é menos habitual.

O procedimento geral descrito pode dar origem a diferentes classificações:

- O conceito de semelhança/dissemelhança entre 2 indivíduos;
- O conceito de semelhança/dissemelhança entre 2 subgrupos ou método aglomerador ou de fusão.

As dissimilaridades d_{ij} entre os indivíduos i e j são medidas que mostram as menores ou maiores diferenças entre os valores que esses indivíduos registaram num conjunto de p variáveis. Contudo, não é obrigatória a existência de observações subjacentes de p variáveis, sendo possível a atribuição das medidas de dissimilaridade, de forma subjetiva, por parte do investigador (Cadima, 2010). Segundo o mesmo autor, uma medida de dissimilaridade d_{ij} entre um indivíduo i e um indivíduo j deverá satisfazer certas propriedades. Esta deve ser, quase sempre, positiva:

$$\checkmark \quad d_{ij} \geq 0, \forall i, j = 1 : n \quad (12)$$

$$\checkmark \quad d_{ii} = 0, \forall i = 1 : n \quad (13)$$

Também se exige a simetria, na grande maioria das aplicações:

$$\checkmark \quad d_{ij} = d_{ji}, \forall i, j = 1 : n \quad (14)$$

Em vez de apenas dissimilaridade, pode-se falar em distância no caso de além das anteriores condições também se verificar a desigualdade triangular:

$$\checkmark \quad d_{ij} \leq d_{ik} + d_{jk}, \forall i, j, k \quad (15)$$

3.5.2.2. Classificação Hierárquica Ascendente (CHA)

Através de uma análise entre variáveis quantitativas, qualitativas e quantitativa-qualitativa com o uso de determinados critérios e algoritmos/coeficientes é possível avaliar as semelhanças/dissimilaridades e a “distância” entre as variáveis.

Os diferentes critérios de distância geralmente utilizados são: o $\cos \theta$, coeficiente de correlação, distância do χ^2 , Distância Euclidiana, Distância de Gower, Distância de Steinhaus e Distância de Kulczynski (Sousa e Sousa, 2001), Coeficiente de Concordância, Coeficiente de Jaccard, Distância de Minkowski e Distância Métrica de Canberra. Os algoritmos de aglomeração/agregação de classes são: salto mínimo, salto máximo, distância média, distância média pesada, agrupamento flexível de Lance e Williams (Sousa e Sousa, 2001), vizinho mais próximo, vizinho mais distante, Método da Inércia Mínima (ou Método de Ward) e o Método dos Centróides (Cadima, 2010).

A Distância Euclidiana é o critério de distância geralmente mais utilizado para a análise de variáveis quantitativas. Para distâncias d_{ij} entre indivíduos i e j , construídas a partir de valores de p variáveis, traduzidos nos vetores $x_{(i)}$ e $x_{(j)}$, temos:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p [x_{ik} - x_{jk}]^2} \quad (16)$$

Para a análise de variáveis quantitativas e a análise conjunta de variáveis qualitativas-quantitativas utiliza-se o critério de distância geralmente aplicado na análise conjunta de variáveis quantitativas-qualitativas, o coeficiente de Gower. Para distâncias d_{ab} entre indivíduos a e b (Sousa e Sousa, 2001):

$$d_{ab} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \frac{|x_{ak} - x_{bk}|}{R_k} \quad (17)$$

Este coeficiente toma a diferença entre concordâncias e discordâncias, relativamente ao número total de variáveis observadas e toma valores entre -1 e 1. Pode tomar valores negativos, caso haja mais discordâncias do que concordâncias nos valores das variáveis para os indivíduos *a* e *b*.

Quanto à estratégia de aglomeração das classes, será utilizada a distância média, em que a distância de um grupo a outro corresponde à média de todas as distâncias entre elementos dos dois grupos.

Para duas classes, G e H:

$$D_{GH} = \frac{1}{n_G * n_H} \sum_{i=1}^{n_G} \sum_{j=1}^{n_H} d_{ij} \quad (18)$$

3.6. Estimação por krigagem

O processo de krigagem corresponde à designação genérica atribuída ao conjunto de processos utilizados na estimação. Através dos estimadores de krigagem é possível estimar os valores médios de uma variável em localizações não amostradas, partindo de observações pontuais (Isaaks & Srivastava, 1989).

O processo de krigagem tem como base a interpolação por média móvel ponderada, embora os pesos atribuídos às amostras (λ_i) sejam determinados a partir de uma análise espacial baseada no variograma experimental, para minimizar a variância estimada, ao contrário de outros métodos de interpolação por distância. A utilização do variograma experimental na atribuição dos pesos tem em consideração as características estruturais e de homogeneidade do processo a estimar já que o variograma mede a continuidade e a homogeneidade de um processo espacial em que apenas é conhecido um conjunto de amostras (Soares, 2000; Goovaerts, 1997).

Através do variograma é possível descrever quantitativamente a variação no espaço de um atributo contínuo Z, uma variável indicatriz (Soares, 1989) ou um fenómeno regionalizado A estrutura é definida com base na comparação simultânea de valores tomados em dois pontos, segundo uma determinada direção.

Em termos matemáticos pode-se definir o variograma $\lambda(h)$ como:

$$\lambda(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{N(h)} [z(u) - z(u+h)]^2 \quad (19)$$

O variograma corresponde assim à esperança do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância *h*, em que *N(h)* corresponde ao número de

pares para uma distância h e $z(u)$, correspondendo ao valor da amostra num determinado local.

Com uso desta fórmula nas principais direções de continuidade do processo consegue-se calcular as variações médias dos corpos ao longo de cada uma das direções. Deste modo, quando a variabilidade é sensivelmente igual em todas as direções, o modelo é considerado como isotrópico, dependendo apenas do comprimento do vetor h . No caso de a variabilidade não ser igual em todas as direções, o modelo é designado por anisótropo (Soares, 2000). Os principais modelos matemáticos de variograma são o esférico, exponencial, gaussiano e potencial.

O estimador de krigagem pretende alcançar o melhor estimador linear possível, partindo da combinação linear dos valores observados do fenómeno. O estimador é:

- Linear, porque as suas estimativas correspondem a combinações lineares ponderadas dos dados existentes;
- Não enviesado, visto que procura que a média dos erros de estimação (desvios existentes entre o valor real e o valor estimado) seja nula;
- O melhor visto que os erros de estimação apresentam uma variância (variância de estimação) mínima.

Goovaerts (1997) propôs, para diferenciar alguns métodos de krigagem, a admissão de que a função aleatória (x) se decompõe em duas componentes aditivas, uma designada por tendência ou deriva (x) e uma componente residual (x) :

$$Z(x) = M(x) + R(x) \quad (20)$$

Adotando uma média nula para a componente residual, o valor da função (x) será igual à tendência (x) . Para Goovaerts (1997), o modelo adotado para a tendência possibilita a distinção de três estimadores de krigagem linear mais comuns: krigagem simples, normal ou ordinária e a universal.

A krigagem simples adota a hipótese de estacionaridade da média, sendo a média m a mesma para toda a região de estudo. Esta hipótese permite a realização da estimação de uma localização desconhecida através dos resíduos:

$$Y(x_i) = Z(x_i) - m \quad (21)$$

O estimador de $Z(x)$ na localização x_0 à custa de P amostras vizinhas é dado por:

$$[Z(x_0)] = m + \sum_{i=1}^P \lambda_i * [z(x_i) - m] \quad (22)$$

A krigagem normal não assume a hipótese de estacionaridade da média, assumindo a média m na localização a estimar como desconhecida. O estimador de $Z(x)$ na localização x_0 é dado por:

$$[Z(x_0)] = \sum_{i=1}^p \lambda_i * z(x_i) \quad (23)$$

Em qualquer formulação de krigagem, os ponderadores λ_i são obtidos através da resolução de um sistema de krigagem expresso com base nas covariâncias para as distâncias entre as amostras e entre as amostras e a localização a estimar (Soares, 2000).

Na modelação geoestatística de uma variável categórica utiliza-se o formalismo da indicatriz simples (2 modalidades) ou multifásico (mais de duas modalidades). A indicatriz corresponde a uma variável binária, que toma valores entre 0 e 1, diferenciando diversas classes morfológicas ou diferenciando intervalos de variáveis contínuas. O formalismo da indicatriz baseia-se na transformação dos valores categóricos em uma variável binária do tipo zeros e uns (0, 1).

Assim, com essa reclassificação é possível transformar os dados originais numa população binária pertencente à classe X e ao seu complementar X^c numa área A , em que o conjunto é representado por $A = X \cup X^c$ (Figura 3.57) (Soares, 1989; 2000).

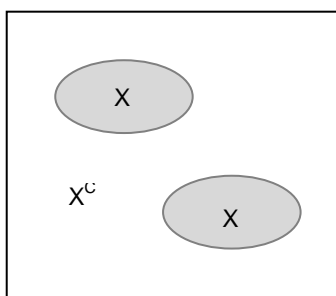


Figura 3.57 - Esquema do formalismo da indicatriz

A partir do conjunto de N amostras espacialmente localizadas em A , define-se em cada ponto x_i uma variável indicatriz $I(x_i)$, $i = 1, \dots, N$, da seguinte forma:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i \in X, \text{ com } i=1, \dots, N \\ 0 & \text{se } x_i \in X^c \end{cases}$$

$I(x_i)$ representa uma variável aleatória localizada em x_i , codificada em 0 e 1, de acordo com a probabilidade de pertença a X ou a X^c .

O processo de estimação geoestatística de uma população binária pode ser decomposto em duas etapas principais (Soares, 1989):

- Para cada um dos pontos x de uma malha regular em A (Figura 3.35), estimação da probabilidade de pertença à fase X , (mapa de probabilidades locais de $x \in X$ em A);
- Transformação do mapa de probabilidades locais num mapa binário no qual são reproduzidas as formas X e X^c (Figura 3.57), para garantir a estacionaridade da média estimada.

4. Metodologia e aplicação à área do Vanzinho

4.1 Metodologia

Para a identificação e estudo dos elementos de instabilidade geológica-geotécnica presentes na área de estudo é proposta uma metodologia que consiste em cinco etapas (Figura 4.1):

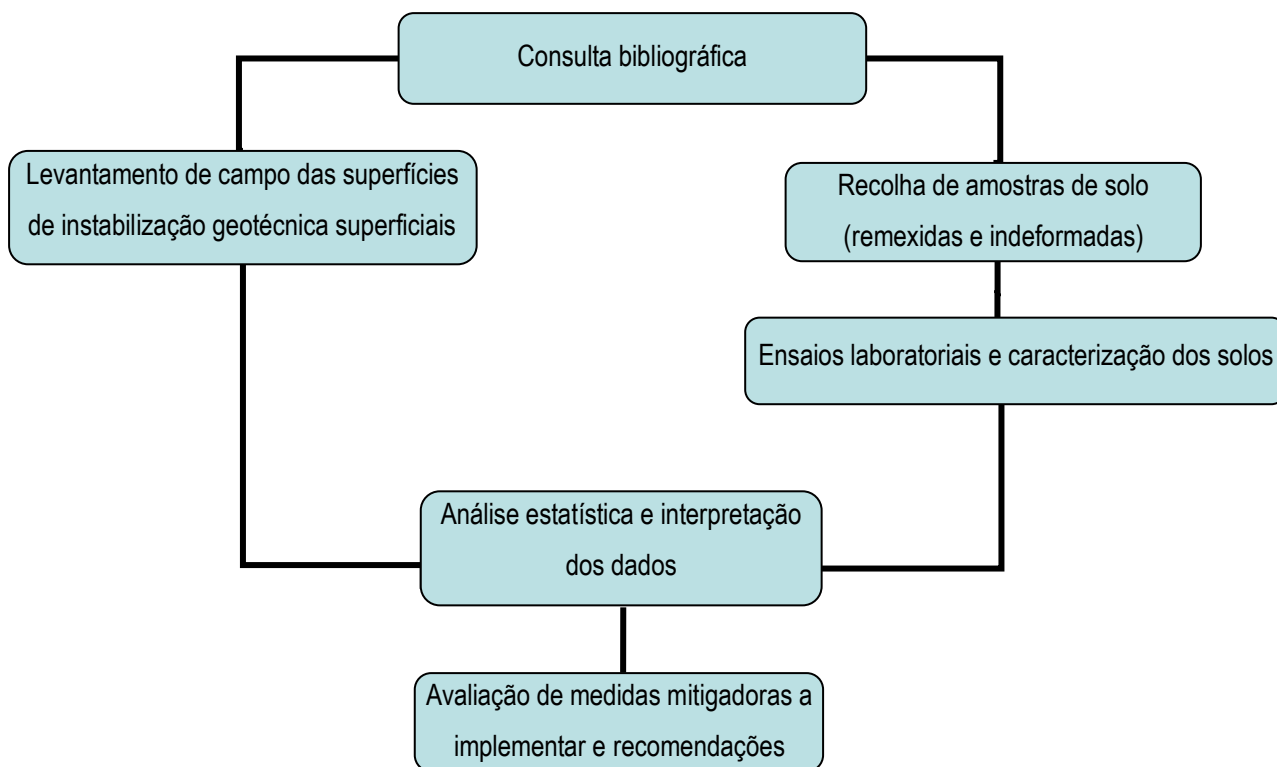


Figura 4.1 - Representação esquemática da metodologia utilizada

Etapa 1 – Levantamento de campo das superfícies de instabilidade geotécnica superficiais

Esta etapa consistiu na consulta bibliográfica sobre as intervenções já realizadas na área de estudo, ou próximas, de modo a se estabelecer uma situação de referência, integrando posteriormente a informação num sistema de informação geográfica (SIG), servindo de base para os levantamentos de campo a realizar.

Consistiu também na observação e registo dos sinais de instabilidade detetadas na área de estudo, nomeadamente a identificação de:

- Fendas de tração, escorregamentos e zonas de assentamento/empolamento;
- Evidências de processos de erosão hídrica, tais como, erosão por salpico, erosão laminar, sulcos e ravinamentos/barrancos;
- Locais com escorrência superficial.

O levantamento destas superfícies de instabilidade consistiu:

1. Na observação das evidências de instabilidade na área de estudo;
2. No registo cartográfico das anomalias observadas;
3. No registo fotográfico e descritivo das ocorrências identificadas;
4. Na medição de vários parâmetros morfológicos, tais como: profundidade, comprimento e largura das evidências de erosão hídrica (sulcos, ravinas/barrancos).

Para o levantamento das superfícies de instabilidade foi utilizado o seguinte material:

- Cartas atualizadas da área de estudo a várias escalas (1:1000, 1:2500, 1:5000), com identificação das zonas de instabilidade identificadas, curvas de nível, limites dos terrenos adquiridos pela SPRAçores, limite da Bacia Hidrográfica da Ribeira do Rosal, entre outros;
- Máquina fotográfica;
- Bússola de geólogo;
- Fita métrica de 100 m.

Etapa 2 – Recolha de amostras de solo (remexidas e indeformadas)

Nesta etapa procedeu-se à recolha de amostras remexidas para posterior caracterização física do solo da área de estudo e ensaios de identificação em laboratório e à recolha de amostras indeformadas para posterior caracterização mecânica (resistência ao corte do solo) em laboratório.

Para a recolha de amostras foi utilizado o seguinte material:

- Plantas atualizadas da área de estudo a várias escalas (1:1000, 1:2500, 1:5000), com as zonas de instabilidade identificadas, curvas de nível, limites dos terrenos adquiridos pela SPRAçores (Sociedade de Promoção e Gestão Ambiental, SA), limite da Bacia Hidrográfica da Ribeira do Rosal, entre outros;
- Enxada;
- Martelo de geólogo;
- Trado mecânico do Centro de Monitorização e Investigação das Furnas (CMIF);
- Caixas de corte para recolha das amostras indeformadas;
- Sacos de plástico e canetas para identificação das amostras recolhidas.

Etapa 3 – Ensaios laboratoriais e caracterização dos solos

Esta etapa consistiu na realização, análise e interpretação de ensaios laboratoriais para a caracterização física e mecânica dos solos segundo as normas definidas. Incluiu ainda a

integração e categorização dos elementos recolhidos num sistema de informação geográfica, tal como a classificação dos solos segundo a Classificação Unificada de Solos e a Classificação de Solos para Fins Rodoviários (Classificação AASHTO).

Etapa 4 – Análise estatística e interpretação dos dados

Esta etapa incluiu os seguintes passos:

1. Análise estatística univariada e multivariada dos parâmetros dos solos;
2. Análise hierárquica;
3. Estimção espacial da tipologia de solos obtida através da análise hierárquica.

A análise multivariada será aplicada, para previsão de processos de erosão superficial, utilizando apenas variáveis relacionadas com os parâmetros físicos dos solos, tais como: granulometrias, teor em água, densidade das partículas, textura e outros, como a distância da amostragem às linhas de água. Os parâmetros morfológicos e hidrológicos utilizados por outros autores numa análise multivariada de dados sobre solos (Ghosh & Bhattacharya, 2012; Kummer *et al.*, 2010; Agnesi *et al.*, 2007), tais como: declives, morfologia das bacias de drenagem de cada ravina e caudais de entrada em cada ravinamento, não foram utilizados porque o levantamento topográfico disponibilizado encontra-se à escala 1:25000, o que podia influenciar os resultados obtidos.

Etapa 5 – Avaliação das medidas mitigadoras a implementar e recomendações

São mencionadas as medidas mitigadoras já implementadas na área de estudo e, tendo por base a experiência publicada, propõem-se algumas medidas corretivas e mitigadoras tendo em vista a redução, mitigação e eliminação da erosão dos solos na área de estudo.





4.2. Aplicação da metodologia à área do Vanzinho

A metodologia de trabalho consistiu em cinco etapas, das quais se descrevem neste capítulo as etapas um, dois, três e quatro. A etapa cinco será apresentada no capítulo seguinte.

4.2.1. Etapa 1 - Levantamento de campo das superfícies de instabilidade geotécnica superficial

Para o levantamento das ocorrências de instabilidade foi necessário, com base na informação bibliográfica e por observação direta dos terrenos, definir os critérios a utilizar para a classificação das superfícies de instabilidade geológico-geotécnicas observadas, com vista a sistematizar e uniformizar os dados recolhidos. Os critérios para definir as superfícies de instabilidade são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Nomenclatura utilizada para o registo dos elementos de instabilidade geotécnica

Nomenclatura	Código	Descrição sumária	Medidas corretivas usuais	Ilustração	Ocorrências
Escorregamento/ deslizamento	(E)	Movimento de massa de rocha ou solo bem evidente num plano inclinado.	Reperfilamento e drenagem do talude (pé do talude e/ou crista).		13
	Laminar (L)	Corresponde à remoção de uma camada uniforme de solo e posterior transporte das partículas que se encontram em suspensão. Pouco evidente.	Revegetação; diversores ou desvio da direção do fluxo superficial; preenchimento com material drenante.		21
	Sulco (S)	Desenvolve-se nas zonas irregulares do solo e corresponde a canais com profundidades até 30 cm. Precede a erosão por ravina/barranco. Evidente.	Revegetação; diversores ou desvio da direção do fluxo superficial; preenchimento com material grosseiro (rocha) ou com troncos de madeira ou bambu.		3
	Ravina/ Barranco (RB)	Sucedem a erosão por sulco ampliando os seus efeitos. O grau de instabilidade depende da friabilidade dos solos. Ocorre em solos com grandes declives. Muito evidente.	Revegetação; diversores ou desvio da direção do fluxo superficial; valas de drenagem a montante da ravina; barragens de controlo no interior da ravina para retenção da carga sólida.		15

Os trabalhos de reconhecimento e cartografia das superfícies de instabilidade decorreram, numa primeira fase, entre os dias 17 de Dezembro de 2013 e 10 de Janeiro de 2014; a segunda fase decorreu entre os dias 1 e 25 de Abril de 2014. Consistiram na identificação de formas de erosão hídrica e escorregamentos/deslizamentos conforme descrito na tabela 4.1.

Após a identificação das principais formas de erosão hídricas da zona de estudo, para cada ravina/barranco, foram preenchidas folhas de registo, com os seguintes elementos: morfometria (comprimento (a), largura (b, b1, b2, ...)) e profundidade (h, h1, h2, ...), a geologia, a vegetação presente e as medidas mitigadoras já implementadas (a existência de estruturas de retenção/desvio, construção de diques no interior das ravinas e a revegetação com endémicas). As folhas de registo encontram-se no Anexo II.

Para cada ravina/barranco identificada foi atribuída a designação de RB, para os escorregamentos/deslizamentos identificados foi atribuída a designação E, para os sulcos identificados foi atribuída a designação de S e para as possíveis formas de erosão laminar foi

atribuída a designação de L. Na tabela 4.2 encontra-se uma síntese dos elementos morfométricos medidos para cada ravina/barranco identificado na área de estudo e a sua localização conforme as parcelas existentes no Vanzinho (CMIF).

Para algumas ravinas/barrancos identificadas foi possível medir várias larguras (b, b1, b2, ...) ao longo do perfil de erosão. Foi também possível medir várias profundidades no interior de cada ravina e a respetiva distância à origem da ravina/barranco (“cabeça”). Para as várias profundidades medidas no interior de cada ravina/barranco (h, h1, h2, ...), em diferentes pontos, foi determinada a altimetria pelo recurso à cartografia fornecida pela Secretaria Regional dos Recursos Naturais em formato vetorial (levantamento topográfico à escala 1:25000). Com esses dados foi possível elaborar perfis longitudinais das ravinas/barrancos.

Tabela 4.2 - Ravinas/barrancos identificados na área de estudo e respetivos elementos morfométricos

Localização		Linha de erosão (Ravina/Barranco)	Orientação	Comprimento máximo (m)	Largura máxima (m)	Profundidade máxima (m)
Parcela	NW do Vanzinho	RB1	N80°W	21.88	6.67	2.42
		RB2	N30°E	25.77	7.90	2.46
		RB3	N32°E	40.51	14.52	3.85
		RB4	N70°W	18.37	7.39	5.00
	39 A	RB5	N80°W	6.60	-	-
	39 B	RB6	N	10.22	4.02	0.92
		RB7	N40°E	8.03	9.20	1.4
	39 C	RB8	N60°E	7.52	5.10	-
		RB9	N80°E	11.85	6.90	1.10
	38 B	RB10	N20°E	76.50	12.55	4.15
		RB11	N	115.0	24.91	6.00
		RB12	N	30.0	13.45	3.50
		RB13	N25°E	44.0	13.20	4.16
		RB14	N20°E	3.00	6.50	-
	39 G	RB15	N	6.50	12.00	3.00

Nota: Em alguns casos não foi possível aceder ao interior da ravina (grande profundidade, existência de silva-brava (*Rubus ulmifolius*)).

Na figura 4.2 estão representadas as superfícies de instabilidade identificadas na área de estudo. Grande parte da área de estudo está dividida em várias parcelas (39A a 39I e 38B), pertencendo também a zona a NW das parcelas à área de estudo.

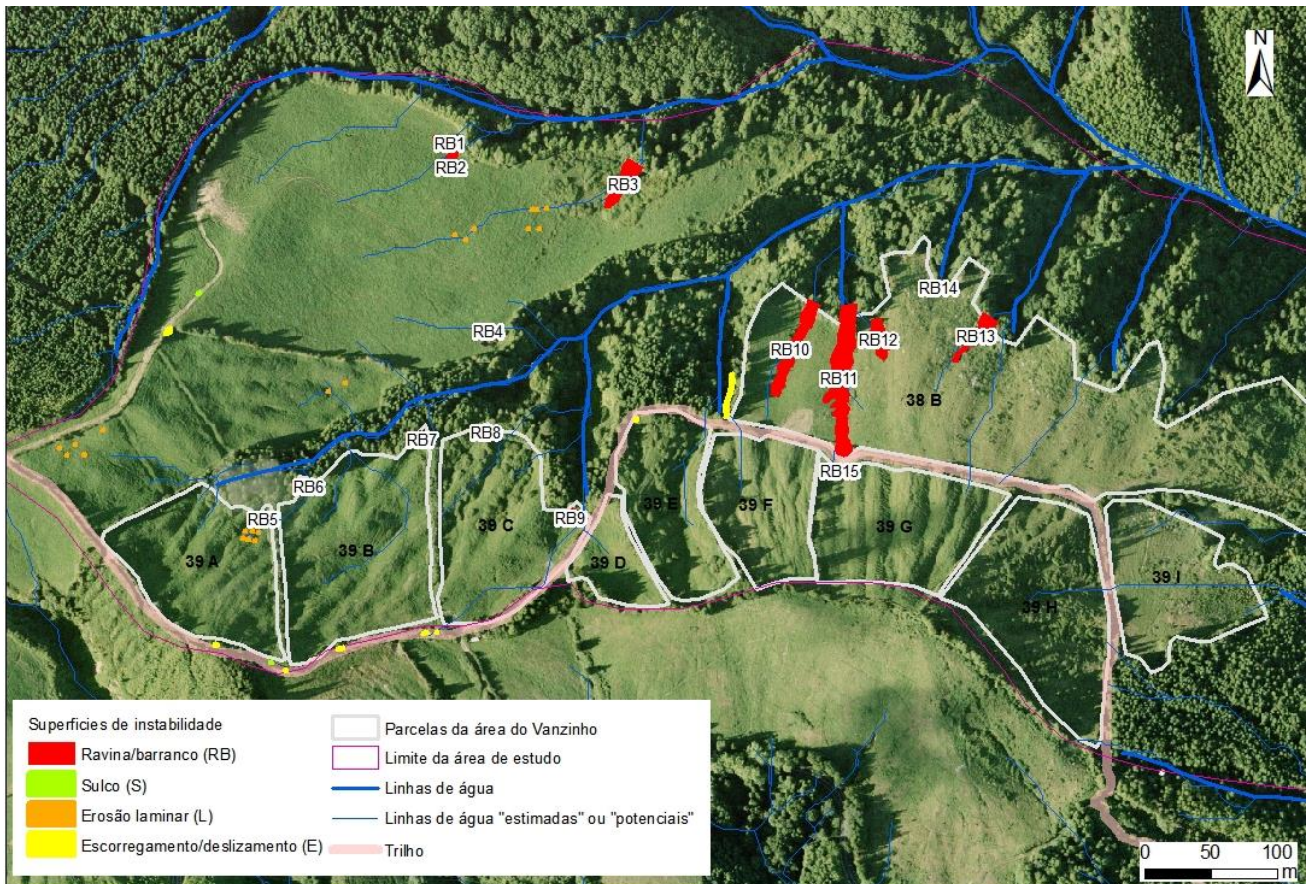


Figura 4.2 - Superfícies de instabilidade identificadas na área de estudo, na escala 1:3500

No gráfico 4.1 está representado um exemplo de um perfil longitudinal, ao longo da ravina/barranco RB11, a mais extensa identificada na área de estudo. Com base nos perfis determinados foi ainda possível determinar o declive no interior de algumas ravinas/barrancos. Na extensão 0-79 metros, a ravina RB 11 apresenta um declive de 46° enquanto na extensão final, 79-115 metros, o declive é de 78° . No anexo III encontram-se os perfis longitudinais das ravinas e os elementos morfométricos de cada ravina, com mais pormenor.

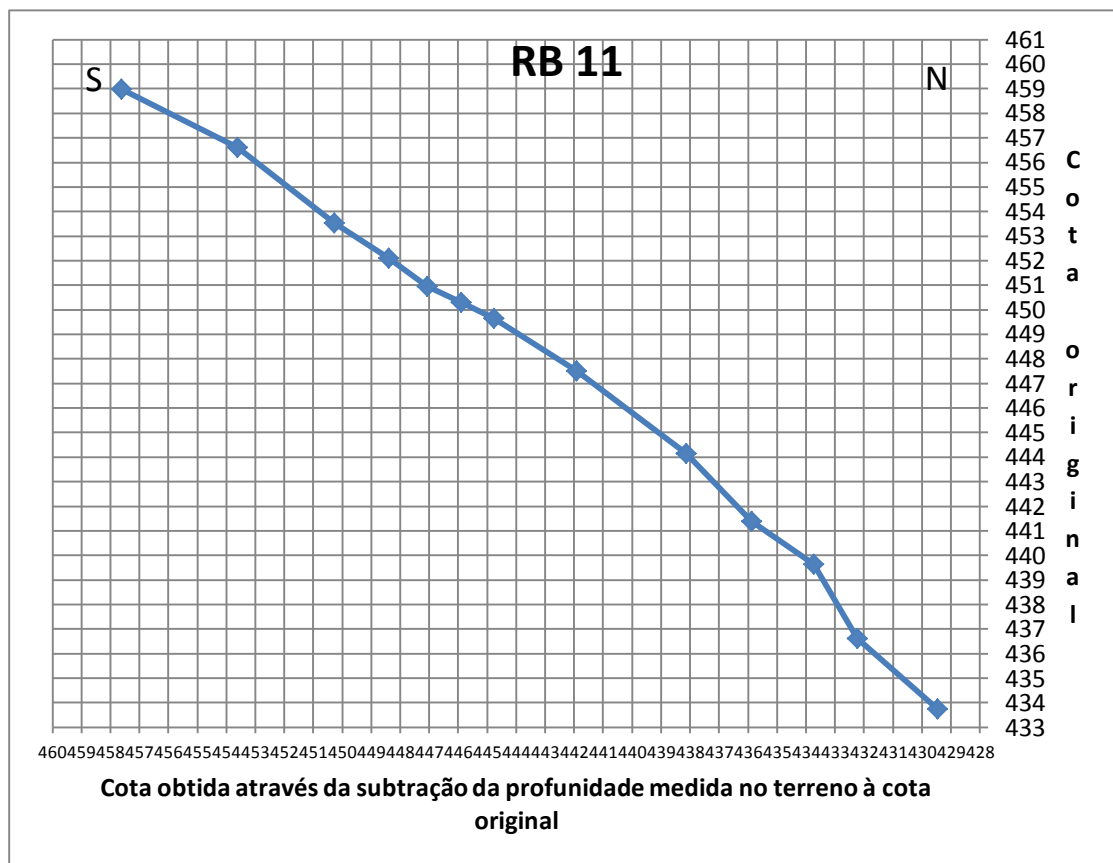


Gráfico 4.1 - Perfil longitudinal da ravina/barranco RB 11

Tendo por base a ferramenta informática *ArcGIS*, obtiveram-se as linhas de água presentes na figura 4.2, sendo que algumas (as de traço mais fino) não constam das cartas base utilizadas neste trabalho (são designadas por linhas de água “potenciais”). São linhas de água correspondentes às localizações e direções no terreno onde o fluxo de água superficial, após precipitações intensas, se concentra e segue o seu caminho, acompanhando o declive do terreno. Como se pode verificar na mesma figura, as ravinas/barrancos desenvolvidas na área de estudo, encontram-se inseridas nessas linhas de água estimadas (ou “potenciais”) ou no limiar destas.

As figuras 4.3 a 4.10 apresentam as ravinas/barrancos identificadas na área de estudo.



Figura 4.3- Ravinas/barrancos identificados na zona NW da área de estudo. a) RB 1; b) RB 2 (27/12/13)



Figura 4.4 - Ravinas/barrancos na zona NW da área de estudo. a) RB 3; b) RB 4. Intervenção com desvios de troncos de criptoméria (*Cryptomeria japonica*) (03/01/14)



Figura 4.5 - Ravina/barranco identificada na parcela 39 A (RB 5), sem intervenção (10/01/14)



Figura 4.6 - Ravina/barranco identificada na parcela 39 B. a) RB 6; b) RB 7. Dissipadores de energia a montante (não visíveis na figura) com troncos de incenso (*Pittosporum undulatum*) (10/01/14)



Figura 4.7 - Ravinas/barrancos identificadas na parcela 39 C, sem intervenção. a) RB 8; b) RB 9 (10/01/14)

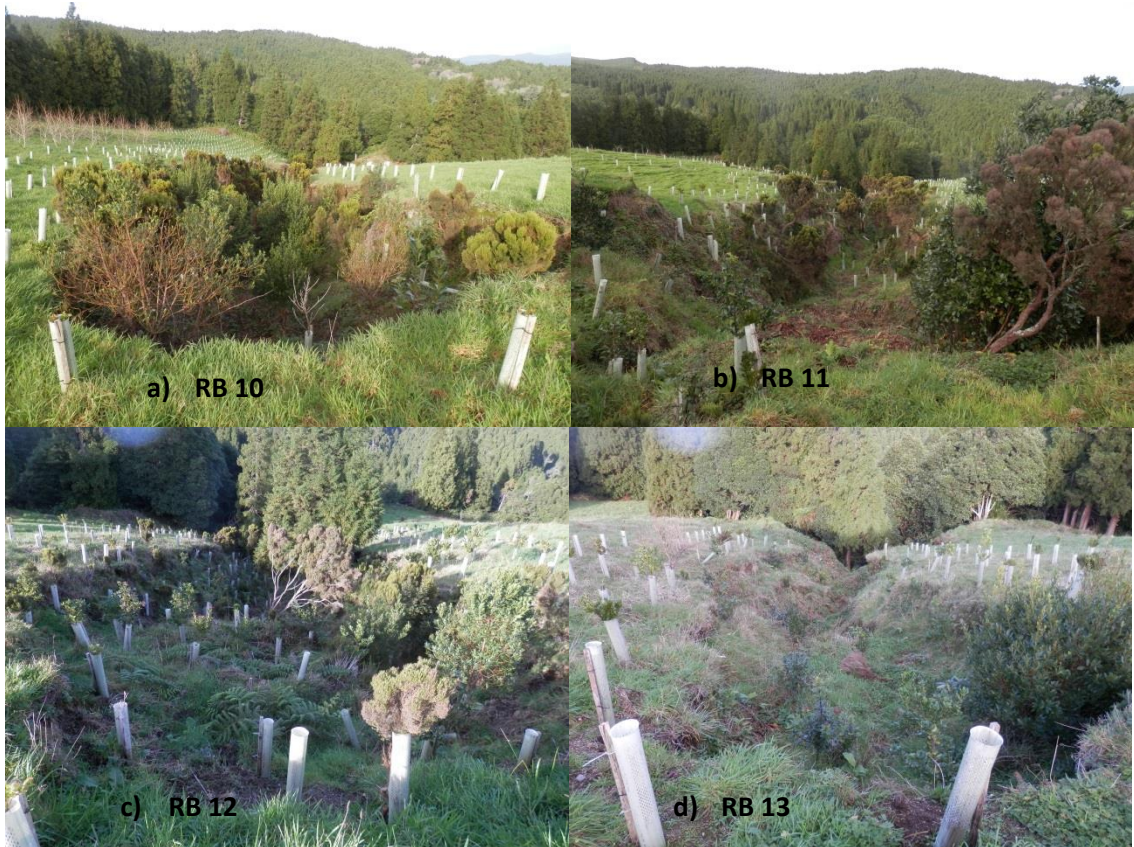


Figura 4.8 - Ravinas/barrancos identificadas na parcela 38 B, com intervenção (plantação de endêmicas e desvios com troncos de criptoméria - *Cryptomeria japonica*). a) RB 10; b) RB 11; c) RB 12; d) RB 13 (10/01/14)



Figura 4.9 - Ravina/barranco identificada na parcela 38 B (RB 14), sem intervenção (10/01/14)



Figura 4.10 - Ravina/barranco identificada na parcela 39 G (RB 15), sem intervenção (10/01/14)

Os sulcos encontrados são de pequena dimensão, como se pode ver na figura 4.11.

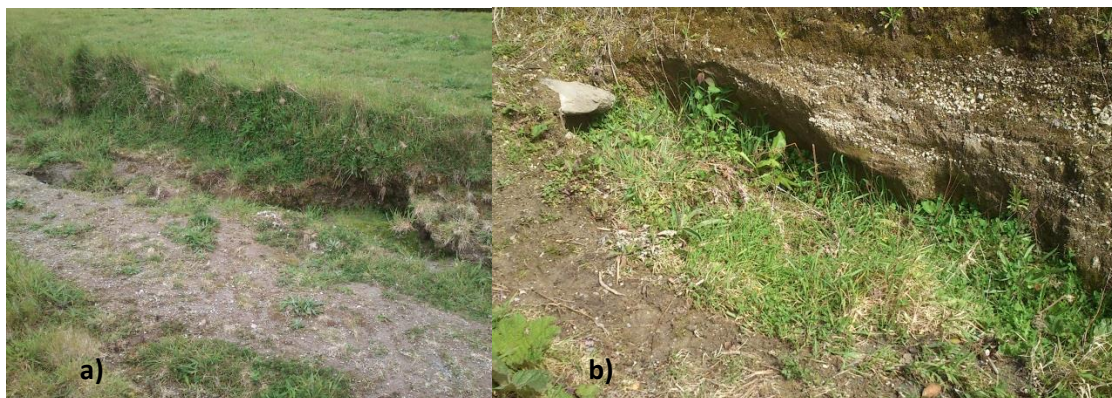


Figura 4.11 - Sulcos identificados na zona a NW do Vanzinho (a) e no caminho do trilho, próximo da parcela 39 A (b) (10/01/14)

Foram identificadas várias formas de erosão laminar, especialmente na zona a NW do Vanzinho, correspondentes a zonas em que se observa uma ligeira falta de material (solo vegetal) e existe um tipo de vegetação diferente. Na figura 4.12 observa-se um exemplo dessa forma de erosão.



Figura 4.12 - Forma de erosão laminar na zona NW do Vanzinho (10/01/14)

Quanto aos escorregamentos/deslizamentos identificados, a grande maioria são de pequena dimensão, excetuando-se o escorregamento da parcela 38 B, junto à linha de água, e os do caminho do trilho, a Este do mapa, próximos da estrada regional (estrada não está visível no mapa). Nas figuras 4.13 a 4.18 podem observar-se os escorregamentos encontrados na área de estudo e na tabela 4.3 é feita uma breve descrição de cada um.



Figura 4.13 - Escorregamento na zona NW do Vanzinho (10/01/14)

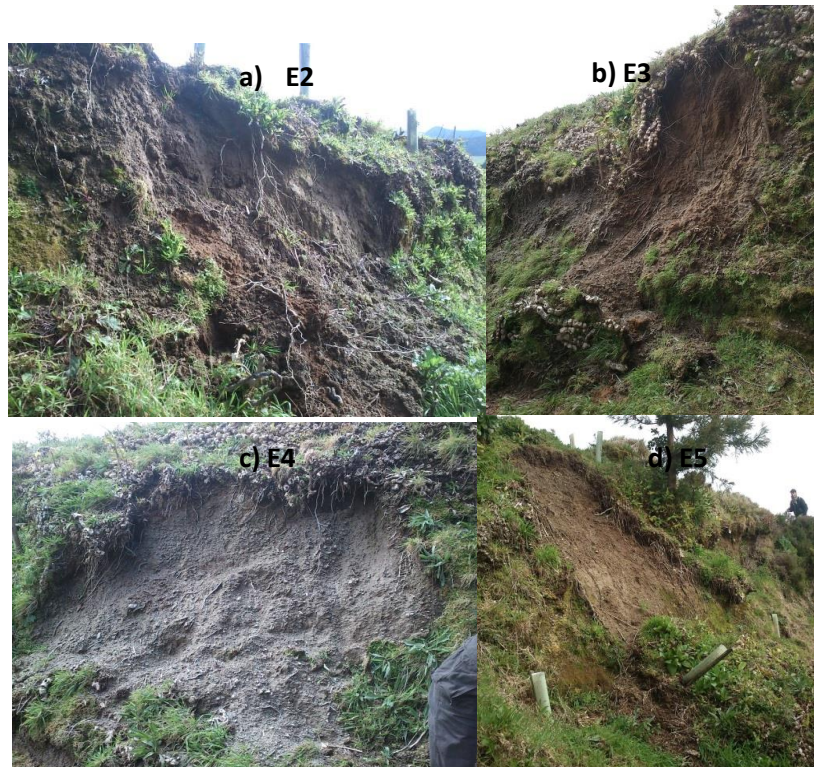


Figura 4.14 - Escorregamentos ao longo do caminho do trilho. De W para E: a) Vertente esquerda na parcela 39 A; b) Vertente direita na zona das parcelas 39 A-B; c) Vertente direita na zona das parcelas 39 A-B; d) vertente esquerda na parcela 39 B (10/01/14)

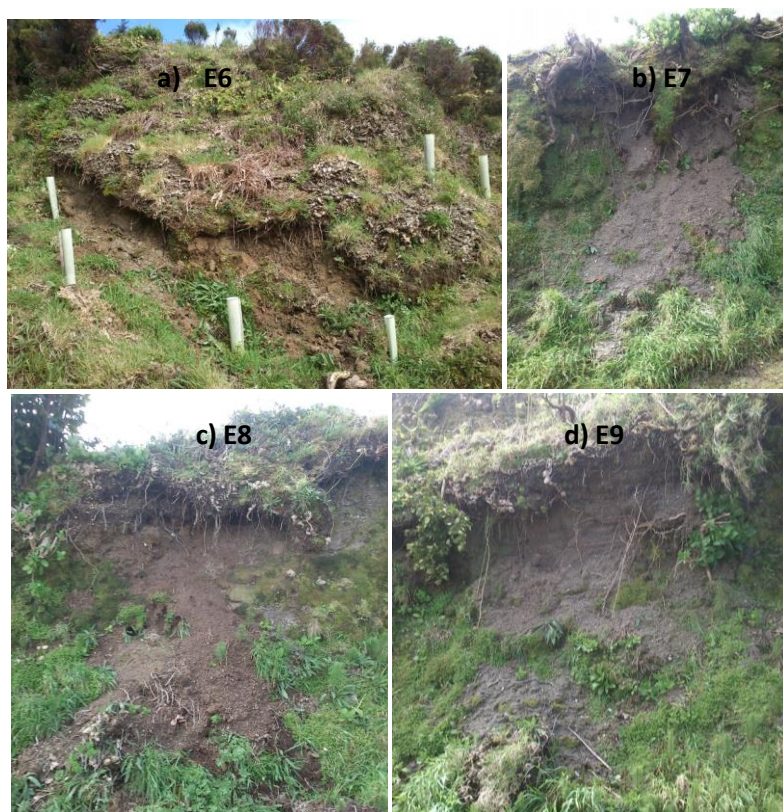


Figura 4.15 - Escorregamentos ao longo do caminho do trilho. De W para E: a) Vertente esquerda na parcela 39 B; b) Vertente direita na zona da parcela 39 B; c) Vertente direita na zona da parcela 39 B; d) Vertente direita na zona da parcela 39 B (10/01/14)



Figura 4.16 - Escorregamento ao longo do caminho do trilho (de W para E) na vertente direita da parcela 39 E (10/01/14)



Figura 4.17 - Escorregamento junto à linha de água numa vertente da parcela 38 B (7/04/14)



Figura 4.18 - Escorregamentos no final do caminho do trilho próximo da estrada regional a E (10/01/14)

Além destes escorregamentos/deslizamentos individuais identificados há que destacar a existência de alguns escorregamentos nas margens de algumas ravinas/barrancos. Na figura 4.19 podem observar-se alguns destes escorregamentos.



Figura 4.19 - Escorregamentos nas margens das ravinas/barrancos. a) RB 1; b) RB 11 (10/01/14)

Tabela 4.3 - Síntese descritiva dos escorregamentos/deslizamentos identificados na área de estudo

Escorregamento	Declive do talude (°)	Altura do talude (m)	Descrição do escorregamento
E1	90°	2.34	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-escuro desagregado, pedra-pomes dispersa, raízes de plantas e pequenos troncos.
E2	90°	2.43	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-escuro solto, pedra-pomes dispersa, raízes de plantas, musgo e relva.
E3	90°	2.45	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-escuro solto, pedra-pomes dispersa, raízes de plantas e de conteiras, musgo e relva.
E4	90°	2.42	Pequeno escorregamento na zona intermédia do talude, solo cinzento-claro solto, muita pedra-pomes dispersa, raízes de plantas e conteiras, pequenos troncos e relva.
E5	90°	5.15	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, raízes de plantas e conteiras, hortênsias, uva da serra e relva.
E6	90°	5.55	Pequeno escorregamento na zona intermédia do talude, solo castanho-claro solto, raízes de plantas e conteiras, fetos, urze e relva.
E7	90°	2.30	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, pedra-pomes, raízes de plantas e conteiras, hortênsias, musgo e relva.
E8	90°	2.20	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, pedra-pomes, raízes de plantas e conteiras, hortênsias, musgo e relva.
E9	90°	2.20	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, pedra-pomes, raízes de plantas e conteiras, hortênsias, musgo e relva.
E10	90°	3.94	Pequeno escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, pedra-pomes dispersa, raízes de plantas, urze, musgo e relva.
E11	90°	-	Escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, raízes de plantas, troncos e relva.

Escorregamento	Declive do talude (°)	Altura do talude (m)	Descrição do escorregamento
E12	50-60°	-	Grande escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, raízes de plantas, troncos e relva.
E13	50-60°	-	Grande escorregamento no topo do talude, solo vegetal castanho-claro solto, raízes de plantas, troncos e relva.

4.2.2. Etapa 2 – Recolha de amostras de solo (remexidas e indeformadas)

Esta etapa decorreu na segunda fase de trabalho de campo, entre os dias 11 e 14 de abril de 2014 e consistiu: (i) na recolha de amostras remexidas para posterior caracterização física do solo e respetivos ensaios de identificação em laboratório; (ii) recolha de amostras indeformadas para posterior caracterização mecânica (resistência ao corte do solo) em laboratório.

Para proceder a uma caracterização física e mecânica dos solos da área de estudo na zona do Vanzinho (Furnas, São Miguel, Açores), para cada estação de amostragem foram recolhidas amostras com pesos compreendidos entre 1 e 3 kg, sendo ainda selecionadas duas localizações em que fosse possível cravar o molde da caixa de corte para recolha de duas amostras indeformadas, uma no interior de um ravinamento e outra fora dos ravinamentos (estas amostras tinham como objetivo avaliar a relação existente, ou não, entre a coesão dos solos e a existência de ravinamentos). A grande maioria das amostras remexidas foi recolhida com recurso a um trado mecânico (28 amostras), sendo que apenas quatro amostras foram recolhidas com o auxílio de uma enxada (AM1, AM2, AM15A e AM15A Piroclastos/AM15A PI).

Das 32 amostras remexidas foi efetuada uma triagem expedita, de modo a identificar amostras idênticas entre si, tendo como objetivo a redução de custos de transporte para o laboratório do Departamento de Engenharia Civil (DEC), da FCT/UNL. Assim, das 32 amostras, 7 amostras não foram transportadas para o laboratório do DEC e procedeu-se a uma breve descrição macroscópica, não sendo ensaiadas como as restantes amostras.

Os ensaios de caracterização física e mecânica realizados encontram-se enunciados na seguinte tabela (Tabela 4.4):

Tabela 4.4 - Tipo de ensaios de laboratório realizados sobre as amostras de solo

Ensaio de laboratório	Tipologia
Ensaio de identificação	Análise granulométrica
Propriedades físicas	Teor em água
	Limites de consistência
	Densidade das partículas (aparente)
Propriedades mecânicas	Ensaio de corte direto

Os ensaios de corte direto foram realizados no laboratório da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do Instituto Politécnico de Beja, em Beja. Os ensaios para determinação do teor em água, peso volúmico aparente, Limites de Atterberg e análise granulométrica foram realizados nos laboratórios do DEC da FCT-UNL (23 amostras) e no laboratório da Açorgeo, em São Miguel (amostras T22 e T25).

Os ensaios efetuados às amostras de solo recolhidas seguiram as documentações normativas descritas no capítulo 3.

As amostras foram recolhidas nos dias 11 e 14 de abril de 2014, período em que foram registadas amplitudes térmicas de 5,9 °C, sendo a temperatura máxima absoluta de 17,5 °C e mínima de 11,6 °C, (freguesia das Furnas, estação meteorológica da RHRAA, 2014). No período de recolha das amostras, entre 11 e 14 de abril de 2014, as temperaturas máximas absolutas registadas foram de 12,7 °C e de 15,1 °C respetivamente, e as temperaturas mínimas registadas foram 10,3 °C e 11,6 °C, respetivamente (RHRAA, 2014).

As amostras indeformadas (Figura 4.20) tiveram como propósito a realização de ensaios de corte direto rápido (não consolidado, não drenado) e, as amostras remexidas (Figura 4.21) foram utilizadas para os restantes ensaios acima referidos (Tabela 4.5).

A amostragem foi essencialmente superficial, sendo as amostras recolhidas, com recurso a trado mecânico, a 48 cm de profundidade (T1 a T28). As restantes amostras foram recolhidas a profundidades que variaram entre os 60 cm os 2,16 m.



Figura 4.20 - Recolha de amostra indeformada, com caixa de corte, na zona a NW do Vanzinho (amostra AM2) (11/04/2014)



Figura 4.21 - Recolha de amostra remexida com trado mecânico, na zona a NW do Vanzinho (amostra T2) (11/04/2014)

A localização das amostras recolhidas encontra-se discriminada na tabela 4.5 e na figura 4.22, (Coordenadas MP, sistema UTM, Datum S. Brás) bem como a profundidade da amostragem. A amostragem foi direcionada já que houve identificação prévia dos problemas de instabilidade geológica/geotécnica da área de estudo. Houve recolha de amostras no interior das ravinas/barrancos (AM2, T24 e T25), na proximidade das ravinas/barrancos identificadas, ao longo do caminho do trilho existente (T14, T15, AM 15^a, AM 15 PI, T16, T17, T21, T22) e na proximidade das linhas de água (as de traço mais fino), determinadas com a ferramenta informática *ArcGIS*, presentes na figura 4.2.

Tabela 4.5 - Localização das amostras recolhidas

Amostra	Coordenadas MP (m)	Profundidade da amostra (m)
AM1	645869; 4178641	0,60
AM2	645720; 4178679	2,16
T1	645706; 4178670	0,48
T2	645651; 4178708	0,48
T3	645732; 4178606	0,48
T4	645876; 4178616	0,48
T5	645946; 4178650	0,48
T6	645748; 4178521	0,48
T7	645593; 4178577	0,48
T8	645721; 4178518	0,48
T9	645702; 4178526	0,48
T10	645637; 4178660	0,48
T11	645662; 4178528	0,48
T12	645659; 4178502	0,48
T13	645610; 4178489	0,48
T14	645555; 4178299	0,48
T15	645590; 4178291	0,48
AM15A	645595; 4178289	1,55
AM15A Piroclastos	645596; 4178288	0,85
T16	645647; 4178300	0,48
T17	645710; 4178311	0,48
T18	645571; 4178364	0,48

Amostra	Coordenadas MP (m)	Profundidade da amostra (m)
T19	645604; 4178398	0,48
T20	645720; 4178419	0,48
T21	645817; 4178393	0,48
T22	645866; 4178473	0,48
T23	645942; 4178485	0,48
T24	645987; 4178532	0,48
T25	646019; 4178457	0,48
T26	646077; 4178510	0,48
T27	646180; 4178468	0,48
T28	646109; 4178399	0,48

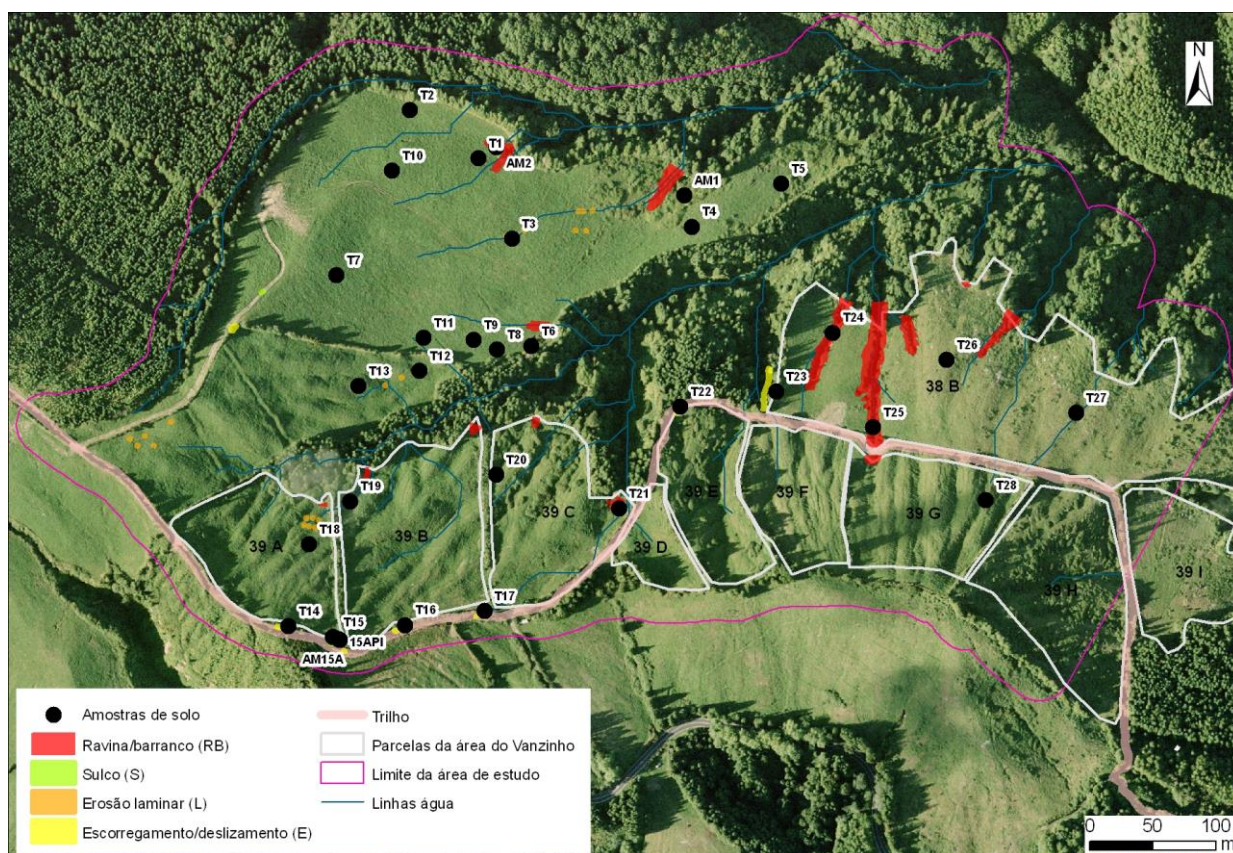


Figura 4.22 - Localização das amostras recolhidas. Mapa na escala 1:3500 (Coordenadas MP, sistema UTM, Datum S. Brás)

As figuras 4.23 e 4.24 mostram o aspeto geral de alguns locais de amostragem na região NW do Vanzinho e as figuras 4.25, 4.26 e 4.27 mostram o aspeto geral de alguns locais de amostragem nas parcelas 39 A, 39 B e 38 B.

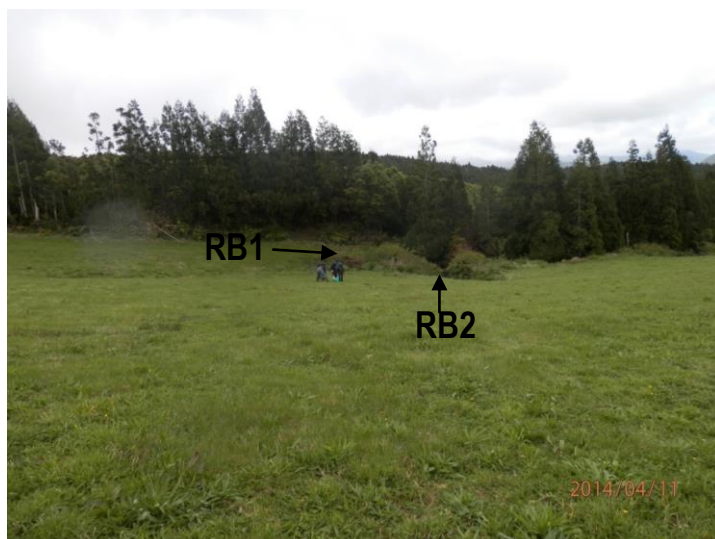


Figura 4.23 - Localização das ravinas RB1 e RB2 e da recolha da amostra T1 (Vanzinho) (11/04/2014)



Figura 4.24 - Localização da ravina RB3 e da recolha das amostras T4 e T5 (11/04/2014)



Figura 4.25 - Vista geral (de E para W) do talude do caminho do trilho, contíguo à parcela 39 A, aquando da recolha da amostra T14 (14/04/2014)



Figura 4.26 - Vista geral (de W para E) do talude do caminho do trilho, contíguo à parcela 39 B, aquando da recolha da amostra T17 (14/04/2014)



Figura 4.27 - Vista geral (de W para E) da parcela 38 B (14/04/2014)

4.2.3. Etapa 3 - Ensaios laboratoriais e caracterização dos solos

Após a recolha das amostras foram realizados ensaios laboratoriais para a caracterização física e mecânica dos solos da área de estudo. Os ensaios foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil (Geologia de Engenharia) da FCT/UNL, da Açorgeo e no Instituto Politécnico de Beja – ESTIG (ensaios de resistência ao corte).

Os diferentes ensaios seguiram as normas descritas anteriormente, sendo os ensaios efetuados nos laboratórios da FCT-UNL, ESTIG (apenas amostras indeformadas) e Açorgeo Lda.

Os resultados obtidos, sintetizados em gráficos e tabelas, são discutidos e os dados completos encontram-se em anexo.

As amostras não ensaiadas e que portanto, apresentam apenas uma breve descrição macroscópica, são discriminadas na seguinte tabela (Tabela 4.6). A descrição macroscópica referente às amostras ensaiadas e não ensaiadas encontra-se no Anexo IV. Importa referir que no momento da triagem das amostras, a grande maioria encontrava-se húmida a muito húmida o que pode ter influenciado essa mesma triagem.

Tabela 4.6 - Amostras não ensaiadas e semelhança macroscópica com as restantes amostras

Amostras não ensaiadas	Descrição macroscópica
T5	Semelhante à amostra T4
T9	Semelhante à amostra T27
T10	Semelhante à amostra T7
T12	Semelhante à amostra T3
T19	Semelhante à amostra T24
T20	Semelhante à amostra T24
T28	Semelhante à amostra T26

Teor em água

Das 32 amostras determinou-se o teor em água natural em 25 amostras (Tabela 4.7 e Anexo V).

Tabela 4.7 - Teores em água das 25 amostras ensaiadas

Amostra	Teor em água (%)	Amostra	Teor em água (%)
AM1	55,71	AM 15A	52,14
AM2	63,74	AM 15A PI	25,68
T1	63,70	T16	41,20
T2	35,63	T17	45,99
T3	39,18	T18	40,62
T4	32,36	T21	43,89
T6	48,21	T22	17,60
T7	33,35	T23	39,85
T8	41,39	T24	44,04
T11	45,29	T25	27,12
T13	63,69	T26	32,84
T14	41,09	T27	35,65
T15	34,19		

Como é possível verificar, apenas três amostras apresentam teores em água inferiores a 30% (AM 15A PI, T22 e T25). Existem três amostras com teores em água elevados, superiores a 60% (AM2, T1 e T13). As amostras apresentam maioritariamente um teor de humidade elevado o que poderá estar relacionado com a pluviosidade verificada na área nos dias que precederam a amostragem.

Densidade das partículas (aparente)

Foram efetuados ensaios para cada uma das 25 amostras e os resultados enquadram-se com os valores esperados ($700-1,200 \text{ kg/m}^3$) para solos deste tipo, com pedra-pomes (Shiplely & Sarna-Wojcicki, 1982 *in* Polacci, 2012). O anexo VI contém os respetivos resultados dos ensaios.

Através da densidade das partículas é possível calcular o peso volúmico aparente (Tabela 4.8), variando este entre $7,3 \text{ kN/m}^3$ (T6) e $11,8 \text{ kN/m}^3$ (T22). Os pesos volúmcicos aparentes (γ_a) mais elevados justificam-se devido à existência de uma maior quantidade de material lítico nas amostras. O depósito vulcânico inclui, normalmente, pedra-pomes e líticos (partículas de rocha mais densa) e cristais. Amaral (2011) obteve valores de peso volúmico aparente seco normalmente inferiores a $9,8 \text{ kN/m}^3$ (mínimo de 5 kN/m^3 e máximo de $12,5 \text{ kN/m}^3$).

Tabela 4.8 - Peso volúmico aparente seco das amostras

Amostra	Peso volúmico (kN/m³)	Amostra	Peso volúmico (kN/m³)
AM1	8,5	AM 15A	8,6
AM2	9,4	AM 15A PI	7,6
T1	9,1	T16	9,2
T2	9,2	T17	9,2
T3	8,7	T18	8,8
T4	9,9	T21	8,5
T6	7,3	T22	11,8
T7	9,9	T23	8,3
T8	9,7	T24	8,4
T11	8,1	T25	11,1
T13	7,5	T26	9,2
T14	9,1	T27	8,1
T15	11,1		

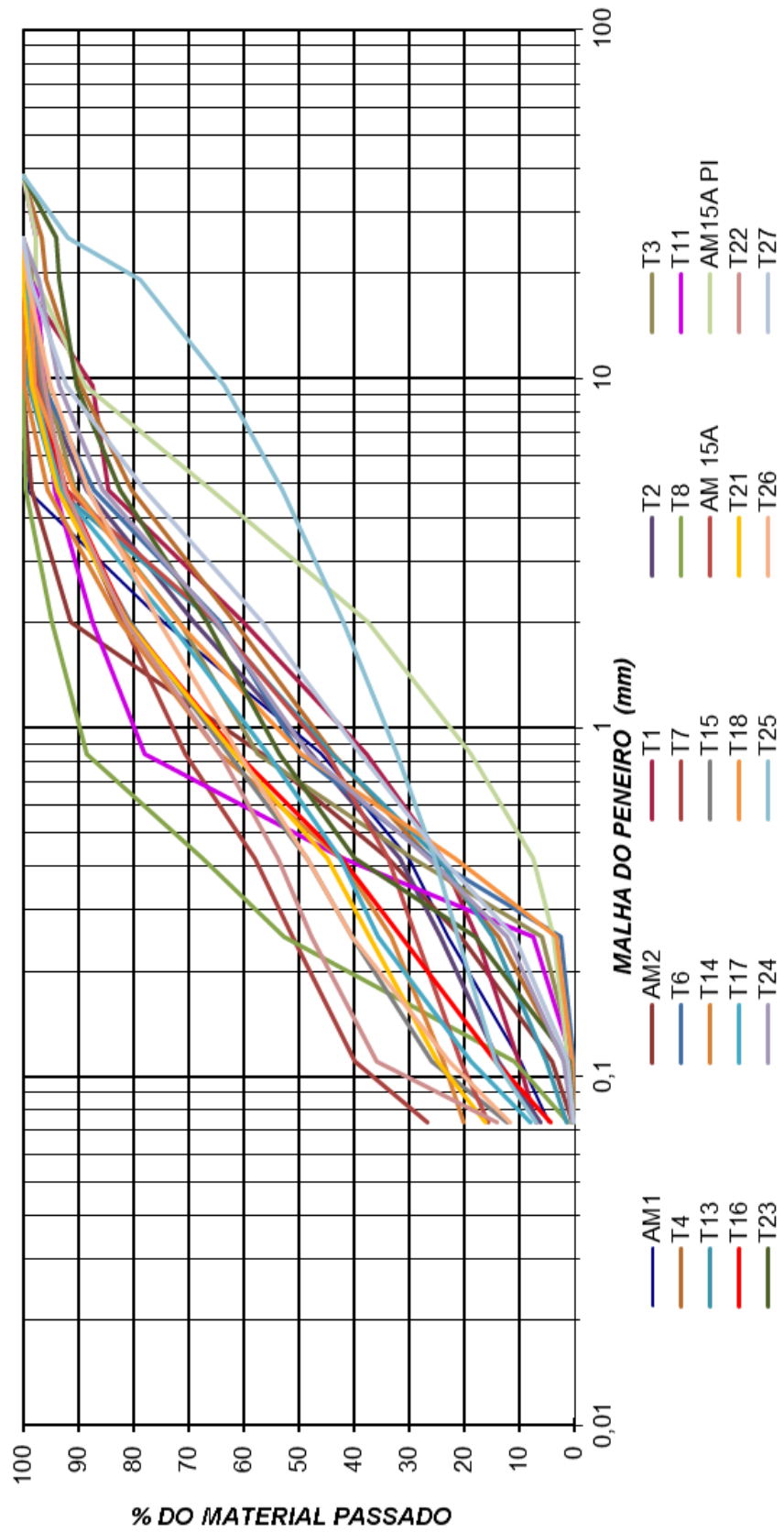
Análise granulométrica (crivagem)

Como referido no capítulo anterior foi realizada uma análise granulométrica por crivagem para cada uma das 25 amostras.

O gráfico 4.2 apresenta as diferentes curvas granulométricas obtidas e o Anexo VII apresenta, com maior detalhe, os dados referentes aos ensaios granulométricos realizados.

As curvas granulométricas foram obtidas contabilizando apenas o material grosseiro ensaiado, material retido no peneiro #200 (não se realizou o ensaio para a fração fina – sedimentação da fração passada no peneiro #200).

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



Médio	Grosso	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	Calhau
Silte		Areia				Seixo		

Gráfico 4.2 - Curvas granulométricas das amostras

A seguinte tabela (Tabela 4.9) apresenta a percentagem de seixos e areias-siltes presente em cada amostra de solo.

Tabela 4.9 - Percentagem do material retido e passado no peneiro #10 e material passado no peneiro #200 para as 25 amostras ensaiadas

Material retido/passado (%)	AM1	AM2	T1	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T11	T13	T14	T15
Retido # 10	25,50	8,50	39,80	30,90	28,30	38,30	35,80	18,10	5,20	12,60	34,60	17,40	19,30
Retido # 200	69,80	90,97	53,30	62,97	71,66	61,37	64,09	55,14	93,56	87,00	64,03	62,40	68,54
Passado # 200	4,70	0,53	6,90	6,13	0,04	0,33	0,11	26,76	1,24	0,40	1,37	20,20	12,16

Material retido/passado (%)	AM 15A	AM 15A PI	T16	T17	T18	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
Retido # 10	34,90	62,50	18,80	26,40	28,00	18,80	18,70	33,30	35,20	58,10	24,70	43,20
Retido # 200	49,54	37,22	76,86	65,49	71,86	65,12	67,09	66,48	64,44	34,96	63,45	56,7
Passado # 200	15,56	0,28	4,34	8,11	0,14	16,08	14,21	0,22	0,36	6,94	11,85	0,10

As diversas curvas granulométricas referentes às 25 amostras ensaiadas permitem verificar que os solos não apresentam calhaus. A percentagem de seixos ou cascalho é reduzida na amostra T8 (5,2%) enquanto que as amostras T25 e AM 15A PI apresentam as percentagens maiores de presença de seixo/cascalho (58,1% e 62,5%, respetivamente). A fração granulométrica das areias predomina na grande maioria das amostras, sendo classificadas como areias médias-grosseiras. Há o predomínio de seixo/cascalho na amostra AM 15A PI. A percentagem de silte/argila é baixa, como era expectável (as amostras que apresentam as percentagens de silte/argila superior a 10% são as amostras AM 15A, T7, T14, T15, T21, T22 e T26, com 15,56%, 26,76%, 20,20%, 12,16%, 16,08%, 14,21% e 11,85%, respetivamente) (Anexo VII).

Limites de consistência

Realizaram-se ensaios a todas as amostras de solo (25 amostras) determinando-se os limites de Liquidez e de Plasticidade em apenas três amostras (AM1, AM2 e AM 15A), dado que as restantes 22 amostras ensaiadas foram consideradas não plásticas. Antes do início dos ensaios, cada amostra permaneceu 24 horas no interior de um recipiente hermeticamente fechado, de forma a proporcionar uma redistribuição e homogeneização do teor de água. A tabela 4.10 resume os resultados obtidos na determinação dos limites de consistência, encontrando-se os respetivos registos no Anexo VIII.

Tabela 4.10 - Limites de consistência determinados

Amostra	AM1	AM2	AM 15A
Limite de Liquidez (%)	48	40	44
Limite de Plasticidade (%)	34	38	41
Índice de Plasticidade (%)	14	2	3

A determinação dos limites de consistência veio confirmar que os solos da área de estudo são maioritariamente não plásticos e as amostras que foi possível determinar limites de Liquidez e de Plasticidade mostram solos com plasticidade baixa-média, visto que o IP é igual ou inferior a 14 %. As amostras AM2 e AM 15A apresentam valores de IP muito baixos (2 e 3, respetivamente), sendo solos de baixa plasticidade enquanto a amostra AM1 apresenta um IP igual a 14, o que lhe confere uma plasticidade média.

Classificação de Solos

Com base nos resultados das análises granulométricas realizadas às 25 amostras de solo e dos limites de consistência determinados é possível proceder a uma classificação dos solos da área de estudo com base na Classificação Unificada de Solos (Unificada) e na Classificação AASHTO (Tabela 4.11).

De acordo com a Classificação Unificada, as amostras são todas do tipo “S” (areia). Algumas amostras apresentam a designação “M”, posterior ao “S” (% de silte superior a 5%).

De acordo com a Classificação AASHTO, a grande maioria das amostras apresenta uma classificação A-1-b. Duas amostras (AM 15A e T25) são classificadas como materiais granulares do tipo A-1-a, duas amostras (T7 e T22) são classificadas como materiais granulares do tipo A-2-4 e uma amostra (T8) é classificada como material granular do tipo A-3, sendo considerados materiais granulares de comportamento excelente a bom como subleito de uma rodovia.

Tabela 4.11 - Classificação das amostras de acordo com a Classificação Unificada e a Classificação AASHTO

Classificação	AM1	AM2	T1	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T11	T13	T14	T15
Unificada	SW	SW	SP SM com seixo	SW SM	SP	SP com seixo	SP	SM	SP	SP	SP	SM	SM
AASHTO	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-2-4	A-3	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b

Classificação	AM 15A	AM 15A PI	T16	T17	T18	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
Unificada	SM	SP	SP	SP SM	SP	SM	SM	SP com seixo	SP	SP SM com seixo	SP SM	SP com seixo
AASHTO	A-1-b	A-1-a	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-2-4	A-1-b	A-1-b	A-1-a	A-1-b	A-1-b

De seguida, a tabela 4.12 apresenta uma breve síntese dos resultados obtidos para cada amostra dos ensaios realizados, incluindo a classificação dos solos de acordo com os sistemas Unificado e AASHTO. Nas figuras 4.28 e 4.29, está representada a distribuição das amostras recolhidas, na área de estudo (Vanzinho), segundo os Sistemas de Classificação Unificada e AASHTO, respetivamente.

Tabela 4.12 - Resultados obtidos para as amostras ensaiadas

Amostra	γ aparente (kN/m ³)	w (%)	W _L (%)	W _p (%)	I _p	% de material passado no peneiro				Classificação de solos	
						#4	#10	#40	#200	Unificada	AASHTO
AM1	8,5	55,71	48	34	14	99,09	74,47	30,07	4,70	SW	A-1-b
AM2	9,4	63,74	40	38	2	98,47	91,49	33,71	0,53	SW	A-1-b
T1	9,1	63,70	-	NP	NP	84,54	60,17	24,09	6,90	SP SM com cascalho/seixo	A-1-b
T2	9,2	35,63	-	NP	NP	88,47	69,10	31,60	6,13	SW SM	A-1-b
T3	8,7	39,18	-	NP	NP	90,52	71,66	29,45	0,04	SP	A-1-b
T4	9,9	32,36	-	NP	NP	80,51	61,67	26,08	0,33	SP com cascalho/seixo	A-1-b
T6	7,3	48,21	-	NP	NP	87,18	64,22	25,89	0,11	SP	A-1-b
T7	9,9	33,35	-	NP	NP	92,63	81,85	57,97	26,76	SM	A-2-4
T8	9,7	41,39	-	NP	NP	99,46	94,78	67,47	1,24	SP	A-3
T11	8,1	45,29	-	NP	NP	94,34	87,44	42,06	0,40	SP	A-1-b
T13	7,5	63,69	-	NP	NP	93,80	65,37	24,68	1,37	SP	A-1-b
T14	9,1	41,09	-	NP	NP	95,75	82,58	42,56	20,20	SM	A-1-b
T15	11,1	34,19	-	NP	NP	93,82	80,72	48,53	12,16	SM	A-1-b
AM15A	8,6	52,14	44	41	3	92,09	65,11	33,70	15,56	SM	A-1-b
AM15A PI	7,6	25,68	-	NP	NP	65,79	37,45	7,52	0,28	SP	A-1-a
T16	9,2	41,20	-	NP	NP	92,25	81,24	42,34	4,34	SP	A-1-b
T17	9,2	45,99	-	NP	NP	93,33	73,61	42,42	8,11	SP SM	A-1-b
T18	8,8	40,62	-	NP	NP	91,00	71,99	21,60	0,14	SP	A-1-b
T21	8,5	43,89	-	NP	NP	93,77	81,18	45,00	16,08	SM	A-1-b
T22	11,8	17,60	-	NP	NP	92,45	81,34	53,81	14,21	SM	A-2-4
T23	8,3	39,85	-	NP	NP	82,45	66,75	39,87	0,22	SP com cascalho/seixo	A-1-b
T24	8,4	44,04	-	NP	NP	85,62	64,82	26,57	0,36	SP	A-1-b
T25	11,1	27,12	-	NP	NP	53,02	41,86	25,50	6,94	SP SM com cascalho/seixo	A-1-a
T26	9,2	32,84	-	NP	NP	88,26	75,30	48,58	11,85	SP SM	A-1-b
T27	8,1	35,65	-	NP	NP	78,09	56,75	23,99	0,10	SP com cascalho/seixo	A-1-b

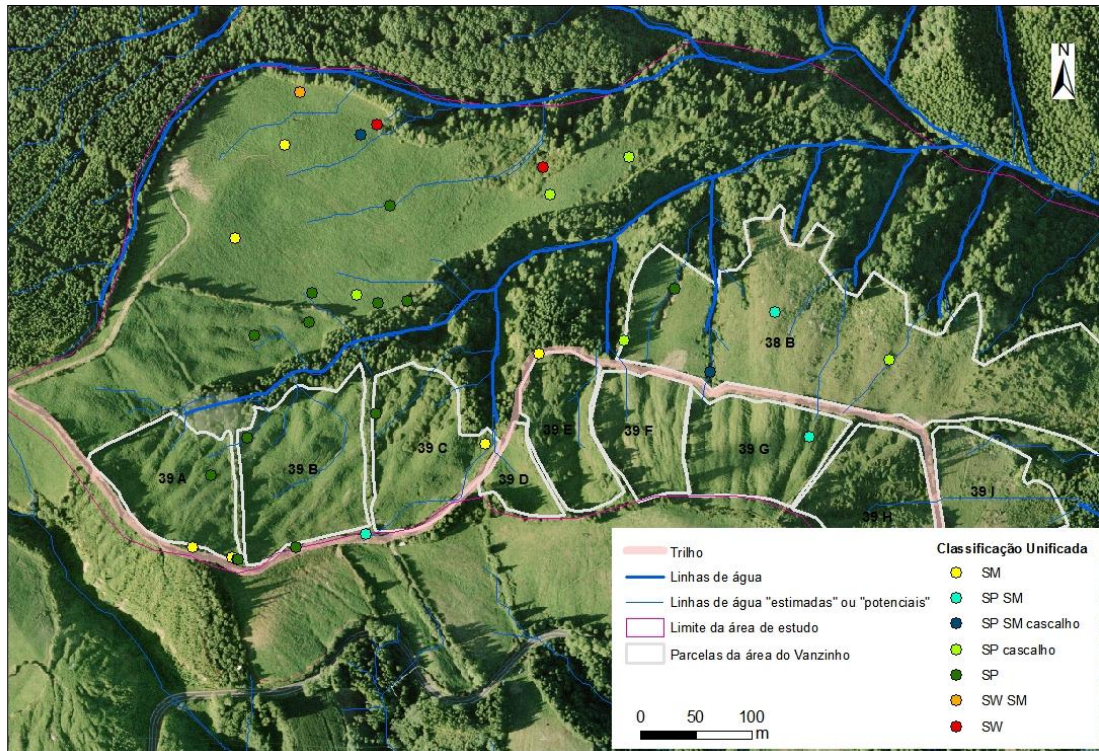


Figura 4.28 - Localização das amostras classificadas segundo o Sistema de Classificação Unificada. Mapa na escala 1:3500

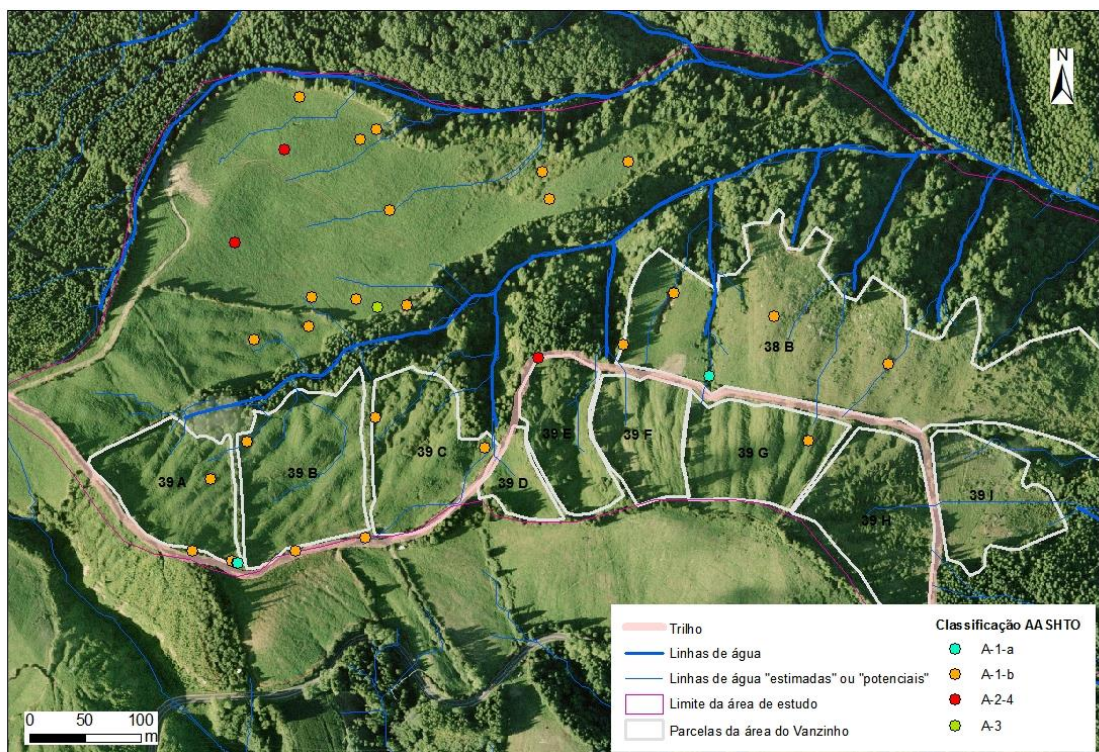


Figura 4.29 - Localização das amostras classificadas segundo o Sistema de Classificação AASHTO. Mapa na escala 1:3500

Quando compactados, os solos da área de estudo de acordo com a Classificação Unificada de Solos podem apresentar as seguintes propriedades (Tabela 3.12):

- Cerca de 50% dos solos são permeáveis quando compactados e cerca de 40% são semipermeáveis a impermeáveis;
- Compressibilidade baixa a muito baixa quando compactados e saturados;
- Boa resistência ao corte quando compactados e saturados;
- Trabalhabilidade razoável como material de construção.

De acordo com a Classificação de Solos para Fins Rodoviários (AASHTO), os solos da área de estudo quando compactados, podem apresentar um comportamento excelente a bom como subleito de uma rodovia. No entanto, sendo estes solos constituídos maioritariamente por pedra-pomes, são solos muito porosos e apresentam fraca resistência, o que inviabiliza a utilização como subleito de uma rodovia. Quanto à resistência ao corte, esta será má.

Ensaio de corte direto

Como já foi mencionado, foram recolhidas 2 amostras indeformadas para a realização dos ensaios de corte direto, nas condições não consolidados e não drenados (para avaliar a relação existente, ou não, entre a coesão dos solos e a existência de ravinamentos). As cargas aplicadas foram 1,5 kgf (0,15 kN), 3 kgf (0,3 kN) e 6 kgf (0,6 kN), tendo sido aplicada uma velocidade de corte de 0.016 mm/min.

De seguida são apresentados em formato de tabelas e gráficos os resultados obtidos para as duas amostras de solo ensaiadas (AM2 e AM 15A), encontrando-se no Anexo IX os dados completos. O gráfico 4.3 mostra a obtenção da envolvente de rotura segundo o critério de Mohr-Coulomb e a tabela 4.13 os valores registados de c e φ e as figuras 4.30 e 4.31 mostram o aspeto da amostra AM2 antes do ensaio e após o ensaio (após sair da estufa).

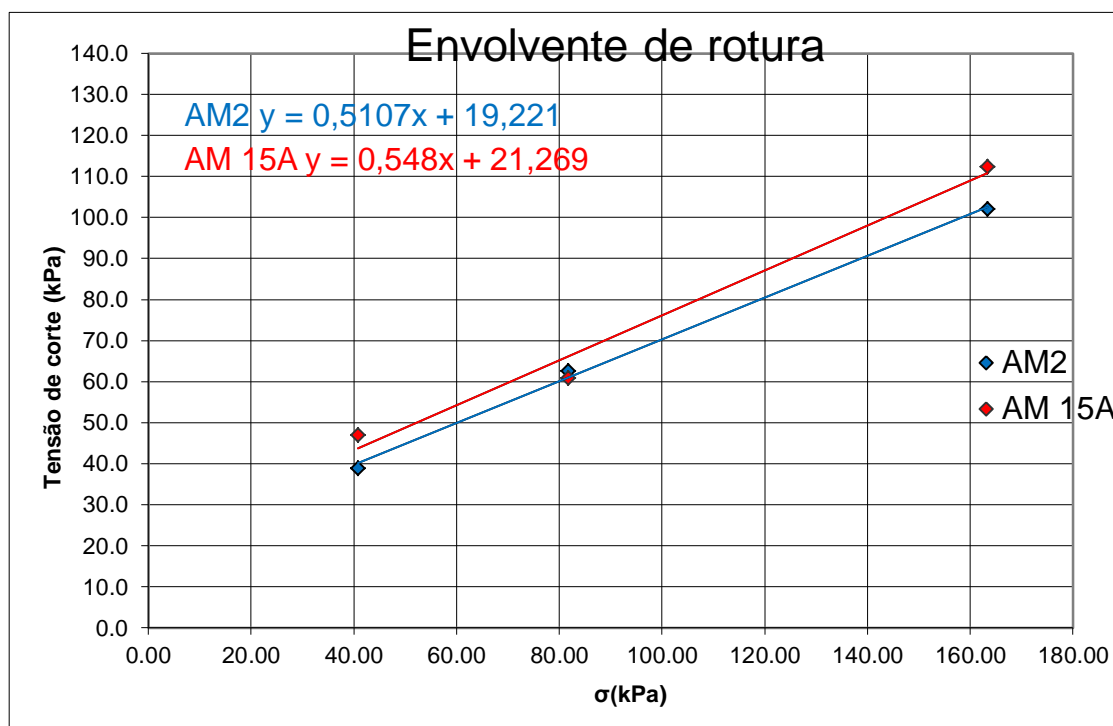


Gráfico 4.3 - Envolvente de rotura segundo o critério de Mohr-Coulomb para os diferentes materiais analisados

A tensão tangencial aumenta progressivamente com o deslocamento horizontal até atingir o valor máximo, embora não passe por um valor de pico nítido, tal como acontece, por exemplo, nas areias densas (Vallejo *et al.*, 2002). Quanto o valor máximo é atingido, os valores mantêm-se constantes, por vezes com um ligeiro aumento durante o avançar do deslocamento horizontal.

Importa referir que a identificação do ponto de rotura do solo nem sempre foi uma tarefa fácil. Assim, foi assumido como critério de definição do ponto de rotura do solo quando a inclinação da curva de tensão/deformação fosse quase nula ou o andamento passasse a processar-se de uma forma constante.

Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios de corte direto

Amostras	AM 2	AM 15A
c (kPa)	19	21
φ(°)	29	31

Nas amostras ensaiadas a coesão variou entre 19 kPa (AM2) e 21 kPa (AM 15A).

Na figura 4.30 é possível observar a amostra AM2 na caixa de corte, preparada para dar início ao ensaio de corte.

O solo ensaiado encontrava-se descomprimido, apresentando fraca coesão.

Para a amostra AM2, classificada segundo a Classificação Unificada de Solos como uma areia bem graduada (SW), obteve-se um ângulo de atrito interno de 29°, o que a permite classificar como areia solta (Vallejo *et al.*, 2002). Quanto à amostra AM 15A, classificada segundo a Classificação Unificada de Solos como uma areia com silte (SM), obteve-se um ângulo de atrito de 31°, permitindo classificá-la como areia uniforme a média, medianamente compacta (Vallejo *et al.*, 2002).



Figura 4.30 - Amostra AM2 na caixa de corte antes da realização do ensaio de corte direto (24/06/2014)

Os resultados obtidos nos ensaios de corte direto relativamente ao ângulo de atrito interno (φ °) são concordantes com os resultados obtidos por Amaral (2011), embora o valor obtido para a amostra AM2 seja ligeiramente inferior relativamente ao valor mais baixo obtido por esse autor (30.8) em condições de ensaio diferentes (ensaio consolidado drenado - CD). No entanto, os valores de φ (°), compreendidos entre 29° (AM2) e 31° (AM 15A), estão em conformidade com os sugeridos para solos constituídos pelas classes granulométricas de areias e siltes (Vallejo *et al.*, 2002). Bommer *et al.*, (2002) realizaram ensaios de corte direto e ensaios triaxiais não consolidados não drenados em amostras de solo (*Tierra Blanca*) de depósitos que cobrem uma grande parte superior da ilha de São Salvador (Bahamas). Estes depósitos correspondem a cinzas pomíticas compostas por piroclastos ácidos e depósitos epiclásticos e são classificadas como areias siltosas ou siltes arenosos. Os resultados destes ensaios mostram coesões (25-30 kPa) e ângulos de atrito interno ligeiramente superiores (35-40°) às obtidas neste trabalho.

Os valores de c (kPa) obtidos neste trabalho, não estão em linha com os resultados obtidos por Amaral (2011) e Amaral *et al.*, (2009a). Entre as causas para essas diferenças podem estar a presença de material lítico nas amostras, a profundidade da amostragem, a posterior compactação dos solos após os trabalhos de terraplenagens e a evidência da existência de lapilli de acreção (aumenta os valores de coesão).

A figura 4.31 representa a amostra AM2, no final do ensaio, onde se nota a superfície de rotura.



Figura 4.31 - Aspeto da amostra AM2 após o final do ensaio e após sair da estufa

Para finalizar, os resultados dos ensaios laboratoriais vêm confirmar a existência de solos com baixa densidade aparente seca (inferior à densidade da água) e de granularidade média (areias médias), com predomínio de seixo ou cascalho em algumas amostras e existência de silte noutras (areias siltosas). Os solos apresentam fraca coesão e são classificados como areia solta, a areia uniforme a média, medianamente compacta. A maioria das amostras é não plástica.

4.2.4. Etapa 4 - Análise estatística e interpretação dos dados

Procedeu-se a uma análise estatística univariada e multivariada dos dados utilizando o *software Andad* (Sousa e Sousa, 2001), segundo a seguinte metodologia:

Etapa 1 – Análise estatística univariada das propriedades dos solos;

Etapa 2 – Análise estatística multivariada de dados com o objetivo de:

- Avaliar a relação entre variáveis;
- Realização de uma classificação hierárquica entre grupos de amostras.

Etapa 3 – Estimacão espacial da tipologia de solos obtida pela análise hierárquica.

4.2.4.1 Análise estatística univariada das propriedades do solo

Com uma análise estatística univariada pretende-se estudar cada variável de forma isolada e de forma descritiva. As técnicas estatísticas da análise univariada apresentam como objetivo principal a descrição e síntese de cada uma das variáveis presentes em estudo, através de

medidas de síntese (média, mediana, variância, etc.) e das representações gráficas dos dados (histogramas e *box-plots*).

As variáveis em análise são quantitativas em número de 10 (Tabela 4.14). A tabela 4.15 apresenta os resultados dos ensaios obtidos para as 25 amostras.

A variável *distância às linhas de água* (LAVA) e *distância às linhas de água potenciais* (LAPO/LAPOVA) corresponde às linhas de água, de traço mais fino, já apresentadas anteriormente na figura 4.2.

Tabela 4.14 - Variáveis quantitativas utilizadas na análise univariada

	Código
Teor em água (%)	Teor em água
Densidade aparente seca (Kg/m³)	Densidade aparente seca
Material grosseiro (%) - Material retido no peneiro #10	MAT1
Material médio (%) - Material retido no peneiro #40	MAT2
Material fino (%) - Material retido no peneiro #200	MAT3
Material muito fino (%) - Material passado no peneiro #200	MAT4
Material médio + grosseiro (%) - Material retido no peneiro #40	MAT5
Material fino + muito fino (%) - Material passado no peneiro #40	MAT6
Distância às linhas de água (m)	LAVA
Distância às linhas de água "potenciais" (m)	LAPO

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios realizados às 25 amostras

Amostras	Densidade aparente (kg/m³)	Teor em água (%)	MAT1(%)	MAT2(%)	MAT3(%)	MAT4(%)	MAT5(%)	MAT6(%)	LAVA(m)	LAPO(m)
AM1	870	55.71	25.53	44.39	25.37	4.70	69.92	30.07	60.30	15.71
AM2	960	63.74	8.51	57.78	33.17	0.53	66.29	33.70	37.0	8.56
T1	930	63.70	39.79	36.07	17.21	6.93	75.86	24.14	50.40	9.21
T2	940	35.63	30.92	37.50	25.47	6.11	68.42	31.58	19.40	18.83
T3	890	39.18	28.34	42.21	29.41	0.04	70.55	29.45	100.6	0.02
T4	1010	32.36	38.32	17.96	25.75	0.33	56.28	26.08	47.80	37.46
T6	740	48.21	35.78	38.33	25.79	0.11	74.11	25.90	26.30	16.50
T7	1010	33.35	18.15	23.88	31.21	26.76	42.03	57.97	90.50	66.30
T8	990	41.39	5.22	27.31	66.23	1.24	32.53	67.47	28.70	19.0
T11	830	45.29	12.56	45.38	41.65	0.40	57.94	42.05	55.80	6.14
T13	760	63.69	34.63	40.69	23.30	1.37	75.32	24.67	45.60	8.64
T14	930	41.09	17.42	40.03	22.36	20.20	57.45	42.56	120.5	82.04
T15	1130	34.19	19.28	32.19	36.37	12.16	51.47	48.53	135.9	65.20
AM 15A	880	52.14	34.89	31.41	18.13	15.56	66.30	33.69	138.9	64.30
AM 15A PI	770	25.68	62.55	29.93	7.24	0.28	92.48	7.52	139.7	64.20
T16	940	41.20	18.76	38.90	38.00	4.34	57.66	42.34	140.8	48.40
T17	940	45.99	26.39	31.19	34.31	8.11	57.58	42.42	152.1	2.86
T18	900	40.62	28.01	50.40	21.46	0.14	78.41	21.60	60.00	16.50
T21	870	43.89	18.82	36.18	28.92	16.08	55.00	45.00	22.60	4.43
T22	1200	17.60	18.66	27.53	39.60	14.21	46.19	53.81	39.30	35.50
T23	850	39.85	33.25	26.88	39.65	0.22	60.13	39.87	15.11	14.30
T24	860	44.04	35.18	38.24	26.21	0.36	73.42	26.57	37.10	0.88
T25	1130	27.12	58.14	16.37	18.55	6.94	74.51	25.49	37.90	1.91
T26	940	32.84	24.70	26.72	36.74	11.85	51.42	48.59	55.30	18.50
T27	830	35.65	43.25	32.77	23.89	0.10	76.02	23.99	59.40	1.97

Nas figuras seguintes apresentam-se os histogramas e os *box-plot* das variáveis analisadas, agrupadas por tipologia. Assim, na figura 4.32 apresentam-se os estatísticos das variáveis *densidade aparente seca* (kg/m³) e *teor de água* (%).

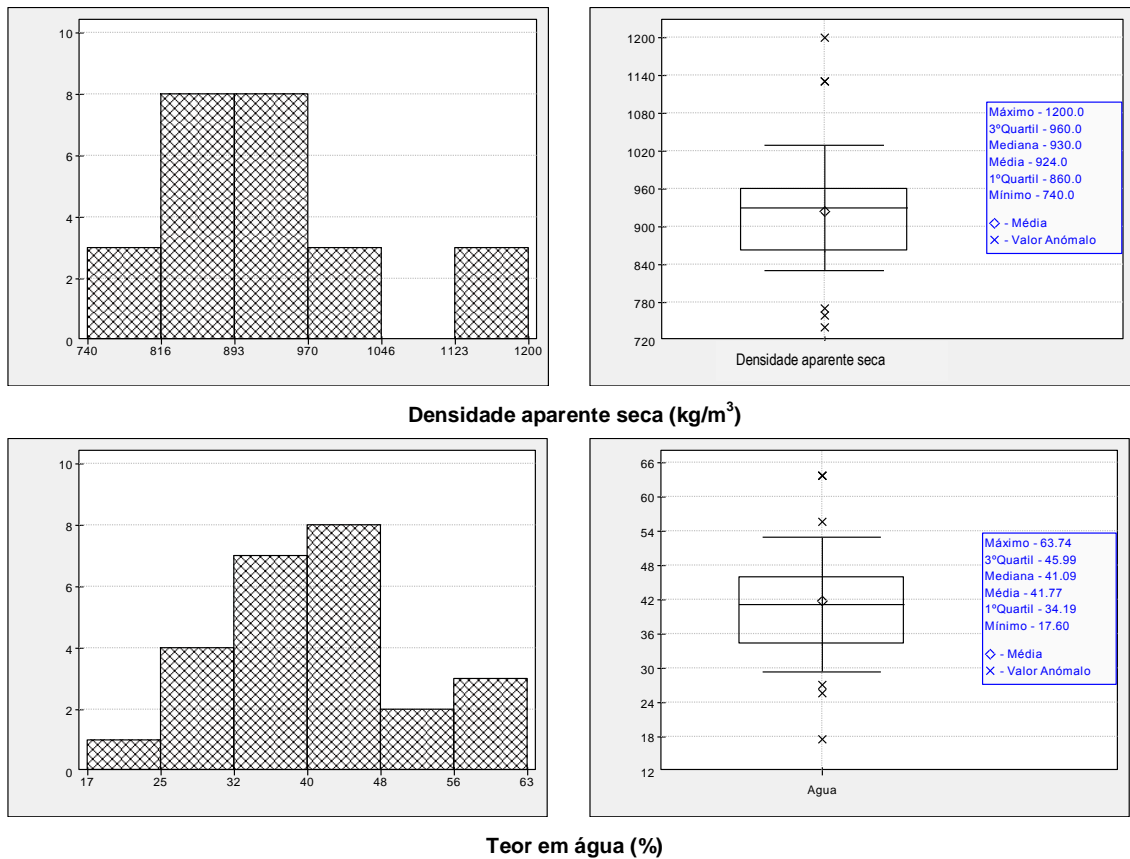
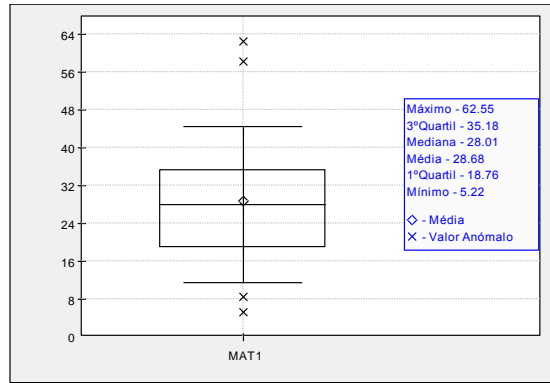
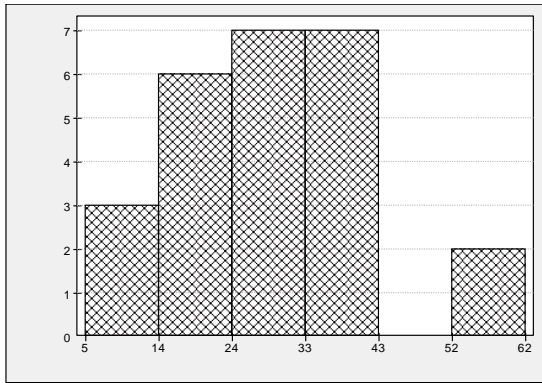


Figura 4.32 - Estatísticos das variáveis *densidade* e *teor em água*

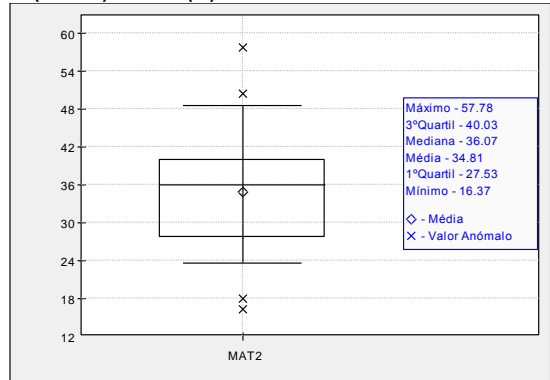
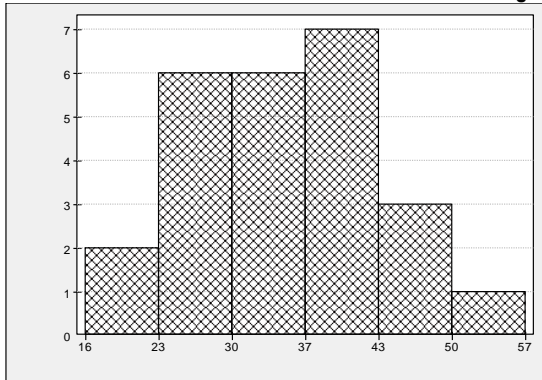
Relativamente à variável *densidade aparente seca*, existe predominância de materiais com valores de densidade muito baixa (75% das amostras apresentam densidade igual ou inferior a 960 Kg/m³) e apenas três amostras apresentam densidade um pouco mais elevada (1123-1200 kg/m³), o que poderá estar correlacionado com a presença de material lítico que normalmente tem densidade superior à pedra-pomes.

Em termos genéricos os materiais apresentam *teor em água* elevado (50% da população, entre 34% e cerca de 46%).

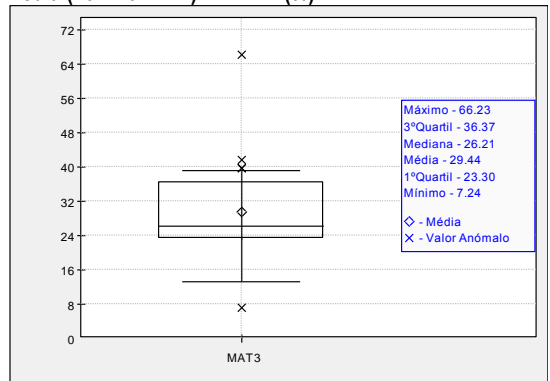
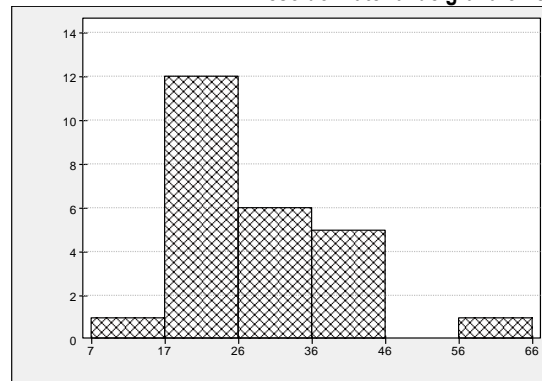
Na figura seguinte apresenta-se a distribuição das percentagens do material retido nas diferentes classes granulométricas (Figura 4.33).



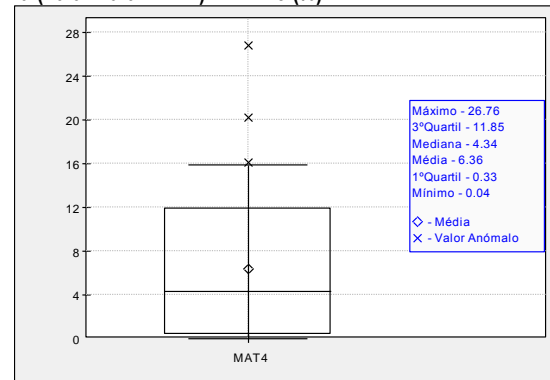
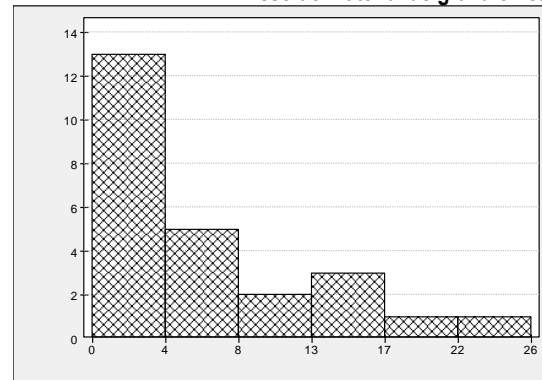
Peso do material grosseiro (> 2mm) - MAT1 (%)



Peso do material de granulometria média (>0.42 a 2mm) - MAT 2 (%)



Peso do material de granulometria fina (>0.074 a 0.42mm) - MAT 3 (%)



Peso do material de granulometria muito fina (<0.074mm) - MAT 4 (%)

Figura 4.33 - Estatísticas das variáveis de classes granulométricas (MAT1, MAT2, MAT3, MAT4)

Relativamente à representatividade das classes de granulometria nos solos pode referir-se, pela análise conjunta dos gráficos anteriores, que:

- Os solos apresentam maior quantidade de materiais de granulometria grosseira (MAT1) e média (MAT2), ou seja, 50% das amostras apresentam cerca de 36% de material entre 0.42mm a 2mm e cerca de 28% de material com granulometria superior a 2mm;
- Os solos apresentam cerca de 26% material de granulometria fina (MAT 3) (entre 0.074mm e 0.42mm) e reduzidas quantidades de material muito fino (MAT 4) (inferior a 0.074mm).

Para simplificar a descrição sobre a granulometria dos materiais amostrados, apresenta-se na figura seguinte a distribuição das percentagens de material retido, em duas novas classes MAT5 e MAT6, que representam:

- A classe MAT5 – os materiais grosseiros e médios (acima de 0.42mm)
- A classe MAT6 – os materiais finos e muito finos, ou sejam, com granulometria inferior a 0.42mm.

Na figura 4.34 apresenta-se o comportamento estatístico das duas novas variáveis.

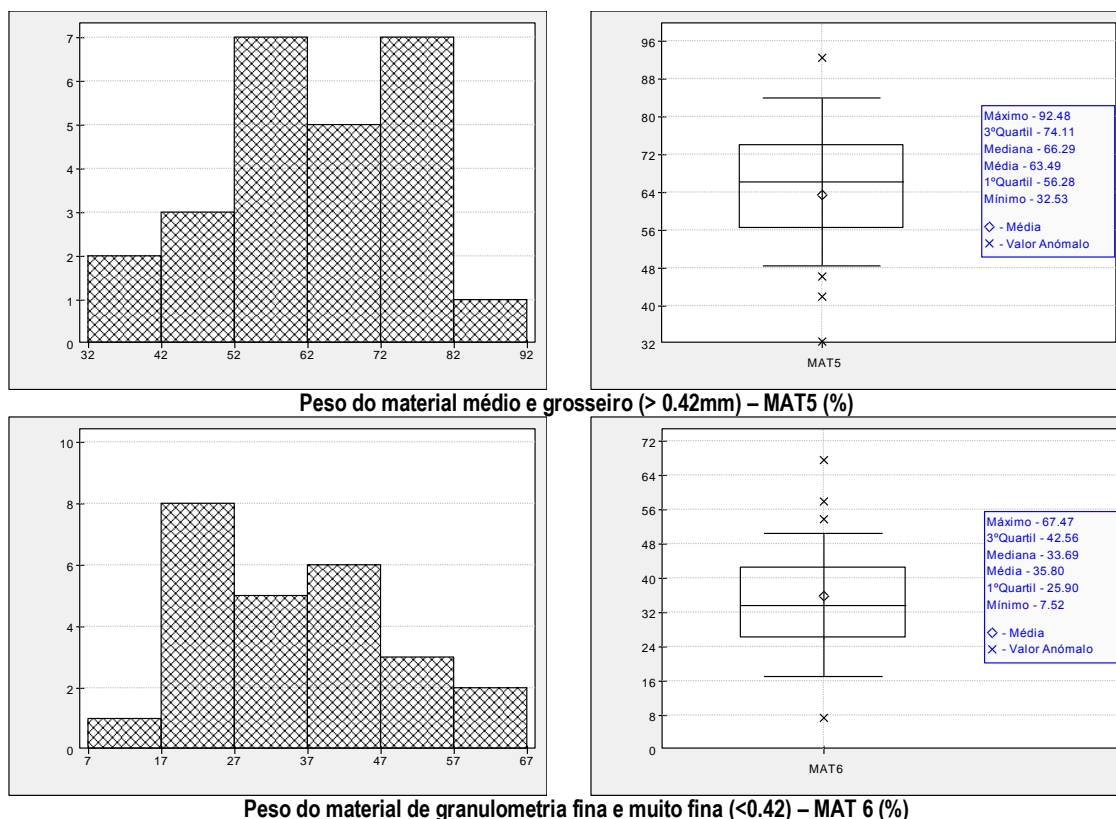


Figura 4.34 - Estatísticos das variáveis de novas classes granulométricas (MAT5 e MAT6)

Relativamente à granulometria, pode então concluir-se que: cerca de 50 % das amostras apresentam 2/3 do seu peso em materiais de granulometria média-grosseira (superior a 0.42mm) sendo o restante material de granulometria fina a muito fina (inferior a 0.42mm).

A distribuição das variáveis *distância às linhas de água potenciais (LAPO)* e *distância às linhas de água (LAVA)*, apresenta-se na figura 4.35.

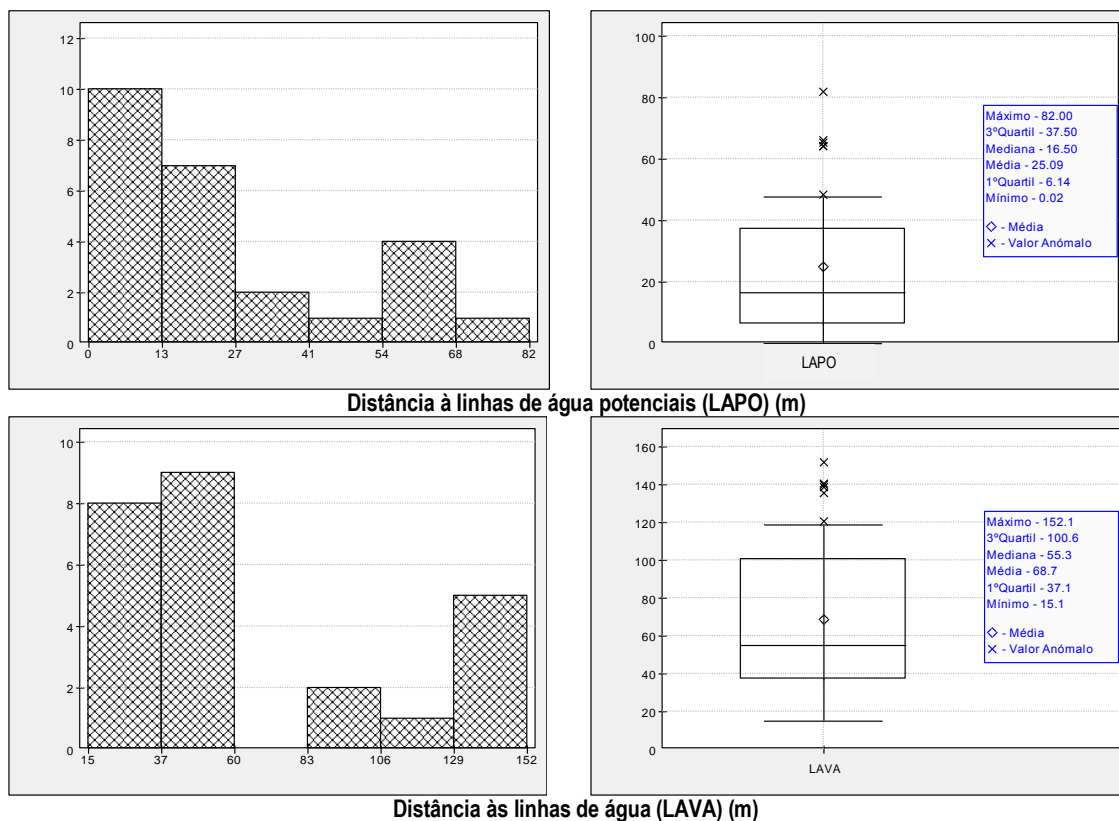


Figura 4.35 - Estatísticos das variáveis distância das amostras às linhas de água

Relativamente à localização das amostras recolhidas pode dizer-se que:

Cerca de 50% das amostras foram recolhidas a uma distância máxima de 16.5m das linhas de água potenciais (LAPO), ou seja, de linhas de água que, embora não sejam visíveis no terreno, representam linhas de acumulação potencial de águas.

Cerca de 20% das amostras (5 amostras) foram recolhidas a distância superior a 54m de zonas de acumulação de águas (linhas de água potenciais).

Por outro lado, considerando apenas a distância às linhas de água existentes na área, existe uma predominância de amostras (17 amostras em 25) recolhidas entre os 15m e os 60m de distância e cerca de 50% das amostras apresentam distâncias às linhas de água com valores compreendidos entre os 37 m e os 100 m.

4.2.4.2. Análise estatística multivariada de dados

Os métodos de análise multivariada de dados utilizados foram:

- Análise em Componentes Principais (ACP), que permitiu descrever o comportamento das variáveis quantitativas;
- Análise Fatorial de Correspondências Múltiplas e Binárias (AFCM e ACOR) para descrição do comportamento de variáveis qualitativas (ou nominais) e quantitativas;
- Análise Hierárquica para descrever relações existentes entre grupos de variáveis.

As variáveis quantitativas e qualitativas encontram-se descritas nas tabelas 4.16 e 4.17, respetivamente.

Tabela 4.16 - Variáveis quantitativas em estudo e códigos de classes (análise ACP e ACOR)

	Códigos de classes
Teor em água (%)	Água
Densidade aparente seca (kg/m³)	Peso
Material médio + grosseiro (%) - Material retido no peneiro #40	MAT5
Material fino + muito fino (%) - Material passado no peneiro #40	MAT6
Distância às linhas de água existentes (m)	LAVA
Distância às linhas de água “potenciais” (m)	LAPO

Tabela 4.17 - Variáveis qualitativas em estudo e códigos de classes (análise ACP, ACOR e AFCM)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cor (COR)	Castanha clara	Castanha escura	Castanha cinza	Cinza	-	-	-	-	-	-	-
Class. Unificada (UNI)	SW	SP	SW SM	SP SM c/cascalho	SP c/cascalho	SP SM	SM	-	-	-	-
AASHTO (ASHO/ASH)	-	-	-	-	-	-	-	A-1-b	A-1-a	A-3	A-2-4
Matriz (mat)	Fina - muito fina	Fina	Fina - média	-	-	-	-	-	-	-	-
Textura (MAIO/MAI)	Média	Grosseira	Fina	-	-	-	-	-	-	-	-

Estudo das variáveis quantitativas (método ACP)

Na análise em componentes principais foi realizada uma análise até ao eixo 4 porque até este eixo está representada cerca de 94% da população. As interpretações seguintes são realizadas com base nos agrupamentos determinados. Variáveis localizadas em eixos opostos representam propriedades com comportamentos inversos.

De seguida observa-se o comportamento no eixo 1 (representa 44% da população amostrada) e no eixo 2 (representa 26% da população amostrada).

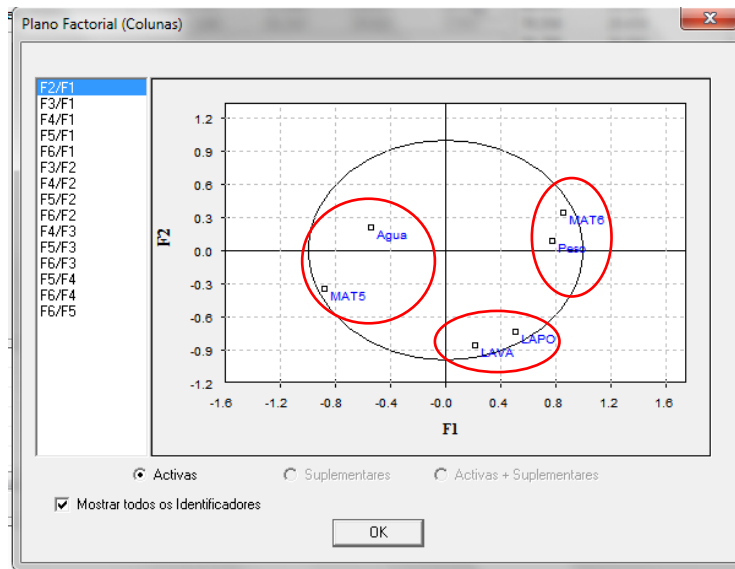


Figura 4.36 - Análise em componentes principais para as variáveis quantitativas (eixos 1 e 2)

Analisaram-se seis variáveis quantitativas: *Agua*, *Peso*, *MAT5*, *MAT6*, *LAVA* e *LAPO*. Pela análise da figura acima (Figura 4.36) podem tecer-se os seguintes comentários:

- Os solos com maior a percentagem de fração fina (*MAT6*) apresentam maior densidade (*Peso*) e localizam-se mais próximos das linhas de água (*LAVA* e *LAPO*);
- Os materiais mais grosseiros (*MAT5*) localizam-se na proximidade das linhas de água sendo os teores em água maiores;
- Para maiores teores em água (*Agua*), menor é a densidade aparente (*Peso*) e menor a proximidade às linhas de água (*LAVA* e *LAPO*).

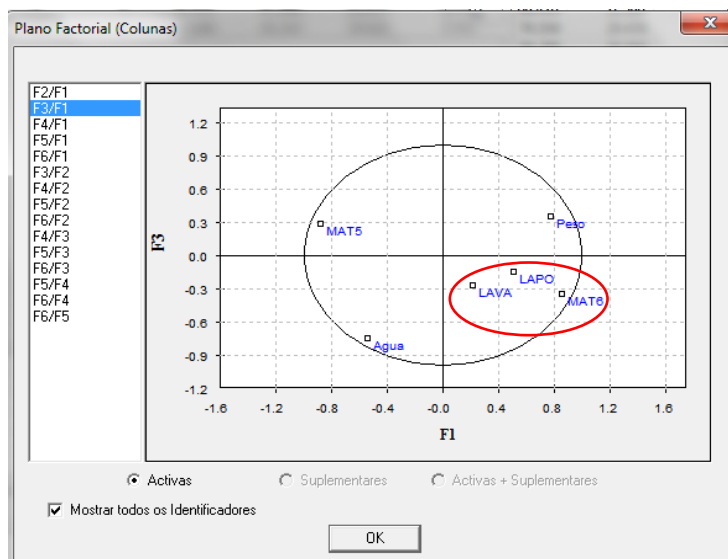


Figura 4.37 - Análise em componentes principais para as variáveis quantitativas (eixos 1 e 3)

Relativamente ao comportamento no eixo 3 (que representa 16% da população amostrada) observa-se que (Figura 4.37):

- Os solos com maior quantidade de material fino (MAT6) localizam-se a maior distância das linhas de água (LAVA e LAPO) e quanto maior a percentagem de fração fina nos solos (MAT6) maior a sua densidade (Peso);
- Por outro lado observa-se que os materiais mais grosseiros (MAT5) se localizam na proximidade das linhas de água (LAVA e LAPO) e, como seria de esperar, pela sua proximidade às linhas de água, apresentam teores em água mais elevados.

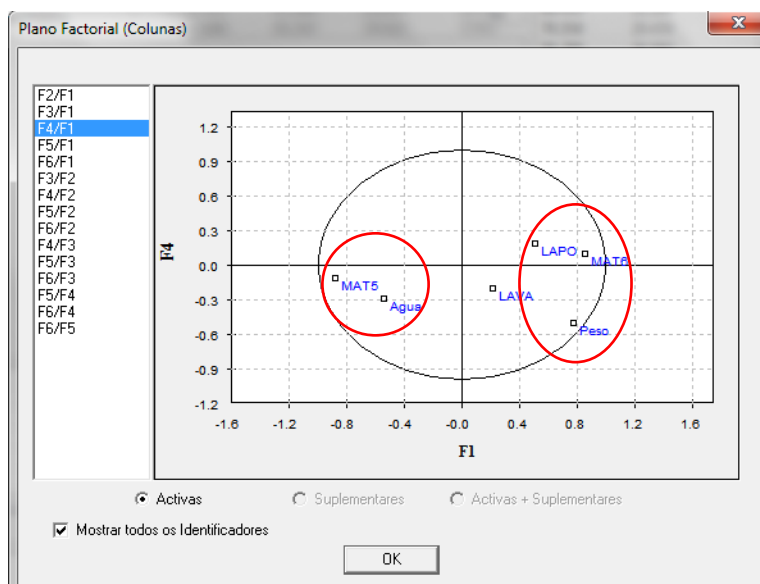


Figura 4.38 - Análise em componentes principais para as variáveis quantitativas (eixos 1 e 4)

O eixo 4 apresenta apenas 7% da população amostrada. Pela análise da figura acima (Figura 4.38) verifica-se que:

- Em algumas amostras o material grosseiro (MAT5) está associado a teores em água elevados;
- Para uma pequena percentagem de amostras há uma maior percentagem de material fino (MAT6) localizado a maiores distâncias das linhas de água “potenciais” (LAPO) e com maior densidade.
- Observa-se ainda que algumas amostras com uma pequena quantidade de material fino (MAT6) apresentam um elevado teor em água, baixas densidades aparentes secas (Peso) e localizam-se na proximidade das linhas de água (LAVA, LAPO).

Na análise conjunta de variáveis quantitativas e qualitativas, foi realizada uma análise até ao eixo 4 dado que com este eixo está representada cerca de 76% da população. De seguida observa-se o comportamento no eixo 1 (representa 37% da população amostrada) e no eixo 2 (representa 17% da população amostrada).

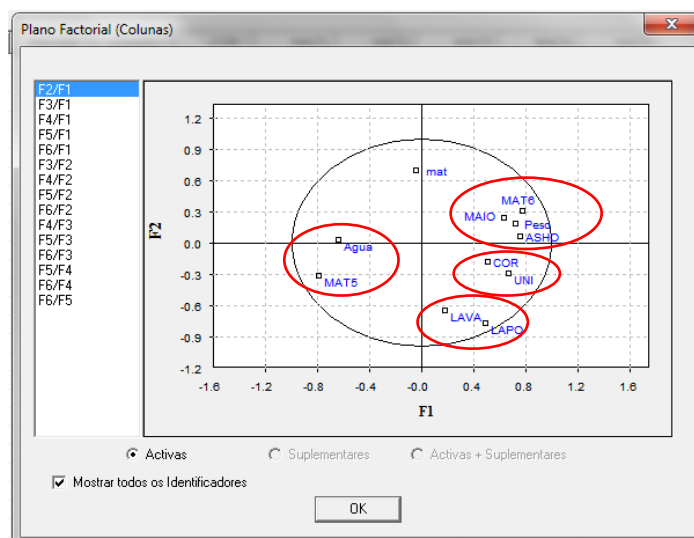


Figura 4.39 - Análise em componentes principais para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 2)

As variáveis quantitativas e qualitativas, respetivamente, em análise são: *Agua*, *Peso*, *MAT5*, *MAT6*, *LAVA*, *LAPO* e, *COR*, *UNI*, *ASHO*, *matriz* e *MAIO*.

Pela análise da figura 4.39 verifica-se que:

- Como já se viu anteriormente, os solos com teores em água mais elevados apresentam maior percentagem de grosseiros (MAT5), localizando-se mais próximos das linhas de água (LAPO e LAVA); a matriz destes solos é média-grosseira (mat);

- Os solos com maior predominância de material fino (MAT6) apresentam uma textura mais fina (MAIO), maiores densidades (Peso) e uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASHO);
- Os solos com cor acinzentada localizam-se mais afastados das linhas de água (LAPO e LAVA), e apresentam uma classificação Unificada do tipo SM (UNI);
- Os materiais com teores em água mais elevados apresentam menor densidade aparente (Peso), cor acastanhada clara, uma classificação Unificada do tipo SW (UNI), uma classificação AASHTO do tipo A-1-b (ASHO), textura média (MAIO) e menor quantidade da fração fina (MAT6).

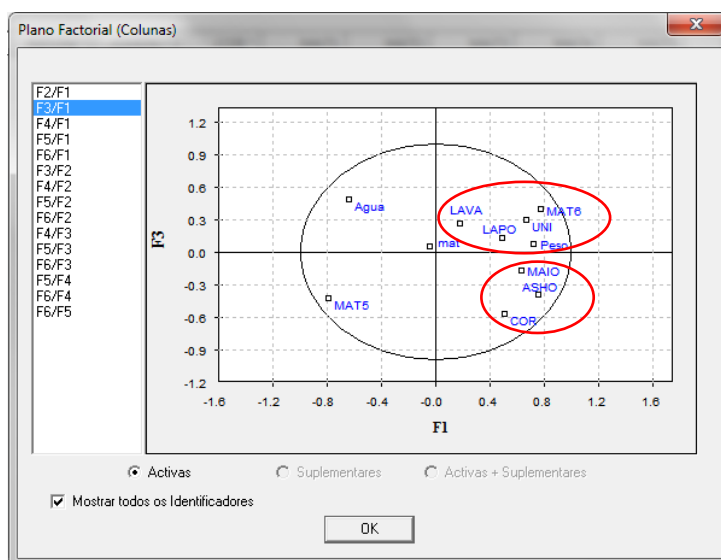


Figura 4.40 - Análise em componentes principais para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 3)

Relativamente ao comportamento no eixo 3 (que representa 11% da população amostrada). Pela análise da figura 4.40 verifica-se que:

- Alguns materiais mais finos (MAT6) encontram-se mais afastados das linhas de água (LAPO e LAVA), apresentam densidades aparentes secas mais elevadas e uma classificação Unificada do tipo SM (UNI);
- Existem materiais com uma textura mais fina que apresentam uma cor acinzentada e uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASHO);
- Existem solos com baixa percentagem de material fino (MAT6) que apresentam elevados teores em água, densidades aparentes secas baixas, cor acastanhada, uma classificação Unificada do tipo SW (UNI) e uma classificação AASHTO do tipo A-1-b (ASHO), sendo a textura média (MAIO). Observa-se também que os solos com as maiores percentagens de teor em água se encontram mais próximos das linhas de água (LAPO e LAVA).

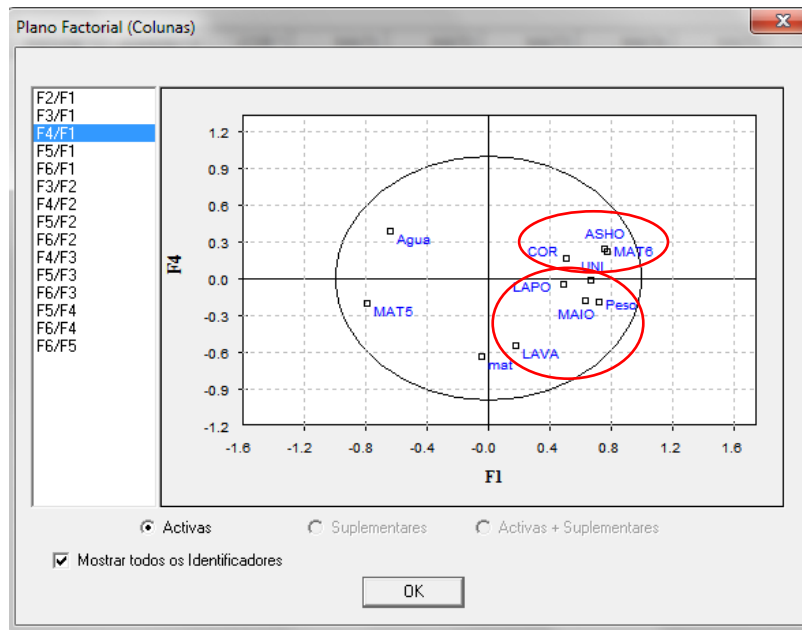


Figura 4.41 - Análise em componentes principais para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 4)

O eixo 4 representa 10% da população amostrada. Verifica-se pela figura 5.46 que, comparativamente à anterior (figura 4.41):

- Alguns solos apresentam maior percentagem de material grosseiro (MAT5), teores em água mais elevados e uma matriz fina-média (mat).

Estudo das variáveis qualitativas (método AFCM)

Na análise de correspondências múltiplas, para as variáveis qualitativas, foi realizada uma análise até ao eixo 4 dado que com este eixo está representada 64% da população, e, utilizaram-se os códigos referidos na tabela 4.17. De seguida observa-se o comportamento no eixo 1 (representa 22% da população amostrada) e no eixo 2 (representa 16% da população amostrada).

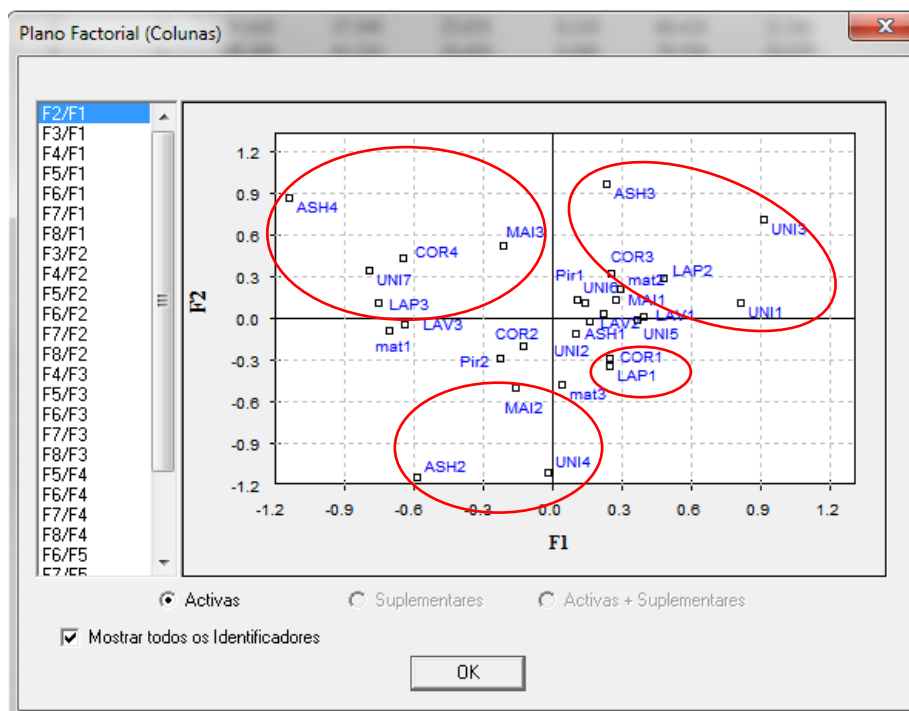


Figura 4.42 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas (eixos 1 e 2)

Na análise de correspondências múltiplas há a adição de uma outra variável qualitativa: presença (Pir2), ou não (Pir1), de materiais líticos nas amostras de solo e as variáveis LAV e LAP apresentam as 3 classes distribuídas do seguinte modo: classe 1 para distâncias <25m, classe 2 para distâncias entre 25-50 m e classe 3 para distâncias > 50m.

Pela análise da figura 4.42 pode observar-se que:

- Os materiais com textura fina (MAI3) apresentam uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASH4), correspondendo a uma classificação Unificada do tipo SM (UNI7), cor acinzentada (COR4), localizando-se a mais de 75 m das linhas de água “potenciais” (LAP3);
- Os solos com textura grosseira (MAI2) apresentam uma classificação AASHTO do tipo A-1-a (ASH2), correspondendo a uma classificação Unificada do tipo (UNI4);
- Os materiais com cor acastanhada clara (COR1) localizam-se até 25 m das linhas de água “potenciais” (LAP1);
- Os materiais com uma classificação AASHTO do tipo A3 (ASH3) correspondem também a uma classificação Unificada dos tipos SW SM (UNI3) e SW (UNI1), apresentam cor acastanhada-acinzentada (COR3), localizando-se até 50 m das linhas de água “potenciais” (LAP2).

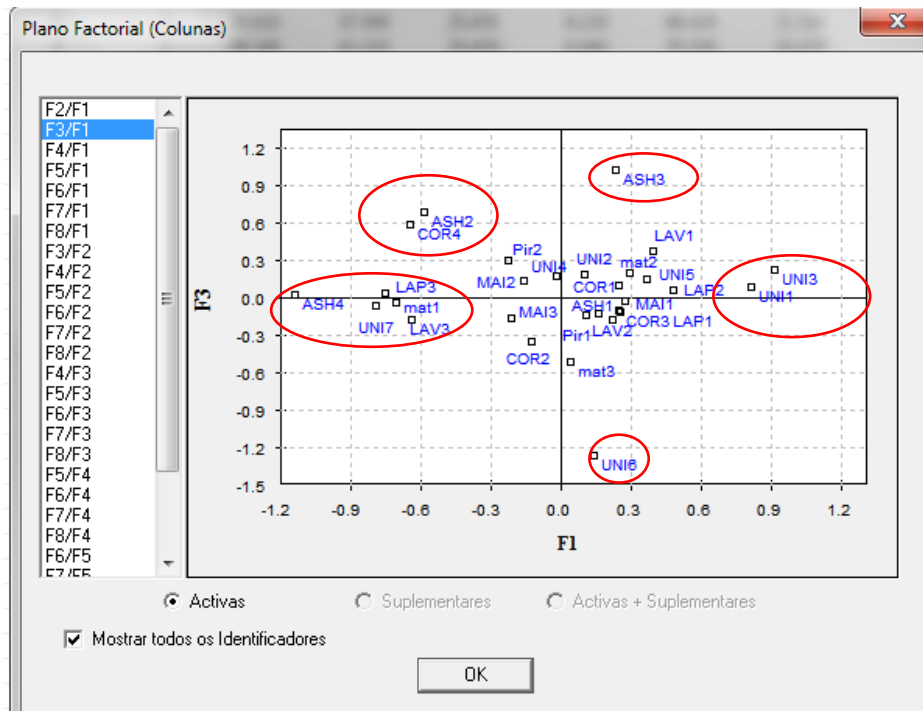


Figura 4.43 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas (eixos 1 e 3)

O eixo 3 representa 13% da população amostrada. Pela análise da figura 4.43 pode observar-se que:

- Algumas amostras de cor acinzentada (COR4) apresentam uma classificação AASHTO do tipo A-1-a (ASH2);
- Existem amostras com matriz fina-muito fina (mat1) apresentam uma classificação Unificada do tipo SM (UNI7) correspondendo a uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASH4) que localizam-se a mais de 75 m das linhas de água (LAP3,LAV3)
- Alguns materiais com textura fina (MAI3) apresentam uma cor acastanhada escura (COR2);
- Existem algumas amostras cuja classificação Unificada é do tipo SP SM (UNI6), não correspondendo a uma classificação AASHTO do tipo A-3 (ASH3) nem a uma classificação Unificada do tipo SW SM (UNI3) e SW (UNI1).

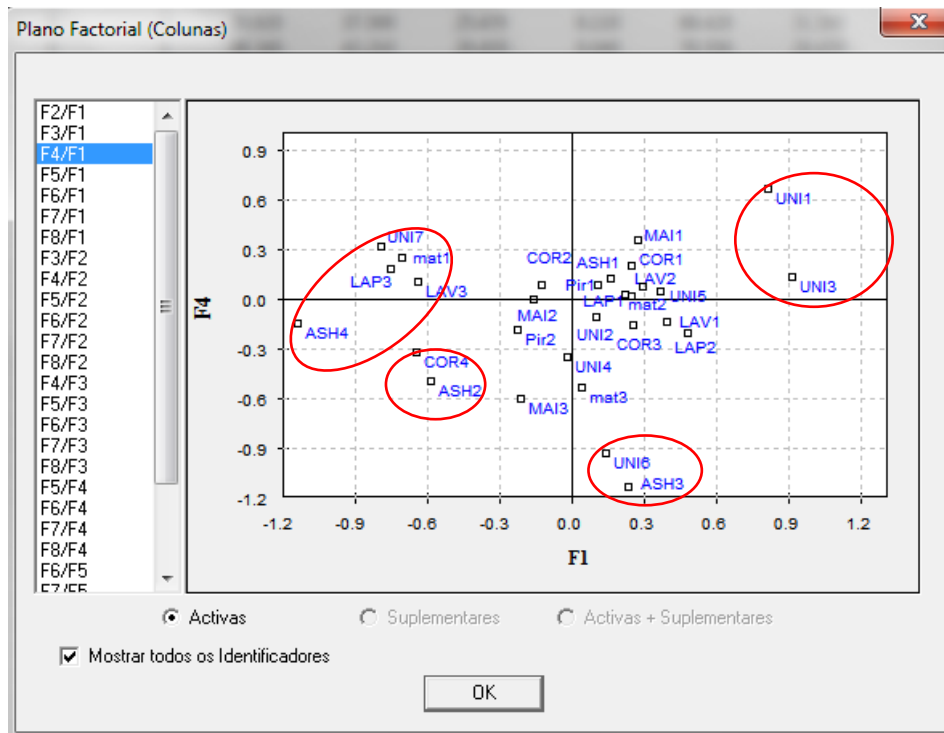


Figura 4.44 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas (eixos 1 e 4)

O eixo 4 representa 12% da população amostrada. Pela análise da figura 4.44 verifica-se que:

- Alguns materiais com uma matriz fina-muito fina (mat1) apresentam uma classificação Unificada do tipo SM (UNI7), localizando-se a mais de 75 m das linhas de água (LAV3, LAP3), não correspondendo a uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASH4);
- Alguns materiais de cor acinzentada (COR4) apresentam uma classificação AASHTO do tipo A-1-a (ASH2) e A-2-4 (ASH4);
- Alguns materiais com uma classificação Unificada do tipo SW (UNI1) e SW SM (UNI3) não correspondem a uma classificação Unificada do tipo SP SM (UNI6) e a uma classificação AASHTO do tipo A-3 (ASH3).

Estudo das variáveis qualitativas e quantitativas (método AFCM)

Utilizaram-se seis variáveis quantitativas divididas em 3 classes de igual frequência: *Peso*, *Água*, *M5*, *M6*, *LAV* e *LAP* (Tabela 4.18)

Tabela 4.18 - Variáveis quantitativas em estudo e códigos de classes (análise AFCM)

	Códigos de classes de igual frequência
Teor em água (%)	Agu1 – 17-36 Agu2 – 37-44 Agu3 – 45-74
Densidade aparente seca (kg/m ³)	Pes1 – 740-870 Pes2 – 871-940 Pes3 – 941-1200
Material médio + material grosseiro (% de material retido no peneiro #40)	M51 – 32-56 M52 – 57-69 M53 – 70-92
Material fino + material muito fino (% de material passado no peneiro #40)	M61 – 7-25 M62 – 26-39 M63 – 40-67
Distância às linhas de água existentes (m)	LAV1 – 15-37 LAV2 – 38-60 LAV3 – 61-152
Distância às linhas de água “potenciais” (m)	LAP1 – 0-8 LAP2 – 9-19 LAP3 – 20-82

Apresentam-se de seguida os *outputs* obtidos com o *software Andad* (Sousa e Sousa, 2001), para a análise de correspondências múltiplas. Os códigos de classes utilizados são referidos na tabela 4.18, sendo realizada uma análise até ao eixo 4 dado que com este eixo está representada 85% da população. O eixo 1 representa 43% da população amostrada e o eixo 2 representa 25% da população amostrada.

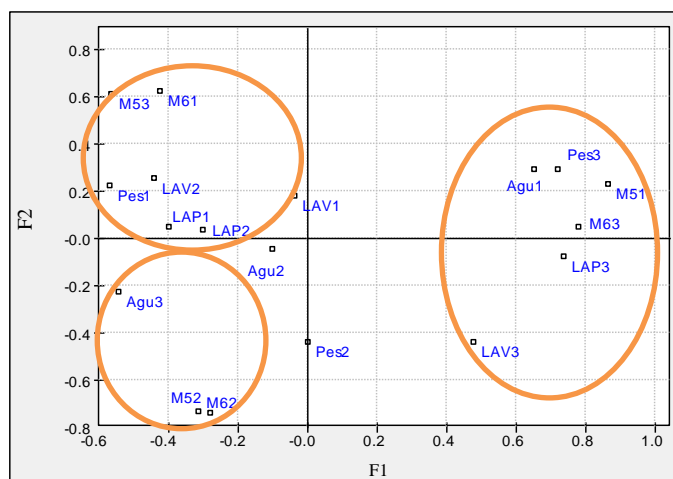


Figura 4.45 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 2)

Pela análise da figura 4.45 verifica-se que:

- O material mais grosseiro (M53) apresenta percentagens na ordem dos 70-92 % e uma menor quantidade de material fino (M61), com valores na ordem dos 7-25 %, sendo as

- densidades aparentes (Pes1) mais baixas (740-870 kg/m³) e localizando-se entre 38-60 m das linhas de água (LAV2), e até 19 m das linhas de água “potenciais” (LAP1, LAP2);
- As classes médias do material grosseiro (M52) e do material fino (M62) apresentam teores em água que variam entre 45-74% (Agu3);
 - Os solos com teores em água baixos (Agu1 com valores entre 17-36%) apresentam maiores densidades aparentes secas (Pes3 com valores entre 941-1200 kg/m³), associado a uma maior quantidade de material mais fino (M63), com percentagens compreendidas entre 40-67 %, apresentando uma menor quantidade de grosseiros (M51 com percentagens compreendidas entre 32-56%); este material localiza-se entre 61-152 m das linhas de água (LAV3) e entre 20-82 m das linhas de água “potenciais” (LAP3);

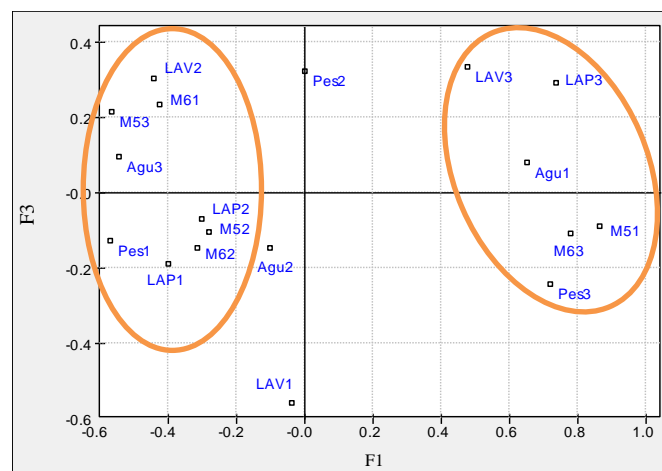


Figura 4.46 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 3)

O eixo 3 representa apenas 9% da população amostrada. Pela análise da figura 4.46 verifica-se que:

- Existem alguns solos com teores em água mais elevados (Agu3, com valores entre 45-74%) que apresentam maior quantidade de material grosseiro (M53 com percentagens compreendidas entre 70-9%), menor quantidade de material fino (M61 com percentagens compreendidas entre 7-25%) e localizam-se entre 38-60 m das linhas de água (LAV2); alguns solos apresentam densidades aparentes baixas (Pes1, com pesos entre 740-870 g), grandes quantidades de material grosseiro (M52), com percentagens entre 57-69%, e material fino (M62), com percentagens entre 26-39%, localizando-se até 19 m das linhas de água “potenciais” (LAP1, LAP2);

- Alguns materiais com teores em água mais baixos (Agu1 com valores entre 17-36 %) estão localizados a maiores distâncias das linhas de água (LAV3, com distâncias entre 61-152 m e LAP3, com distâncias entre 20-82 m); estes materiais apresentam também densidade aparente mais elevada (Pes3), são poucos grosseiros (M51), com percentagens compreendidas entre 32-56% e, detêm uma grande quantidade de finos (M63 com percentagens compreendidas entre 40-67%).

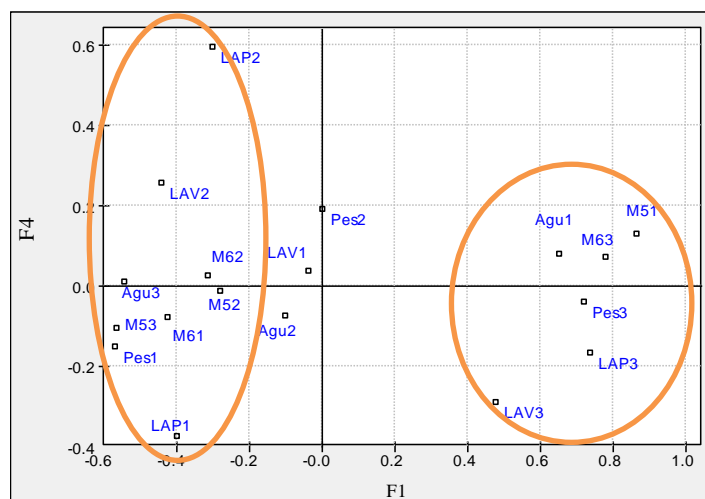


Figura 4.47 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 4)

O eixo 4 representa apenas 7% da população amostrada. Pela análise da figura 4.47 verifica-se que:

- Existem alguns solos com densidades aparentes baixas (Pes1) que apresentam teores em água (Agu3) elevados, constituídos por grandes quantidades de material grosseiro (M52, M53), comparativamente com o material fino (M61, M62); este material localiza-se até 60 m das linhas de água (LAV2) e até 19 m das linhas de água “potenciais” (LAP1, LAP2);
- Alguns solos com menores percentagens de teor em água (Agu1) apresentam densidade aparente baixa (Pes3), sendo o material muito fino (M63), apresentando pouco material grosseiro (M51); estes solos localizam-se muito afastados das linhas de água (LAV3 com distâncias até 152 m e, LAP3 com distâncias até 82 m).

Foi realizado um segundo ensaio com a AFCM e neste caso foram incluídas todas as variáveis apresentadas nas tabelas 4.17 e 4.18 (qualitativas e quantitativas, respetivamente). O ensaio foi realizado até ao eixo 4, dado que com este eixo está representada 71% da população. O eixo 1 representa 34% da população amostrada e o eixo 2 representa 15% da população amostrada.

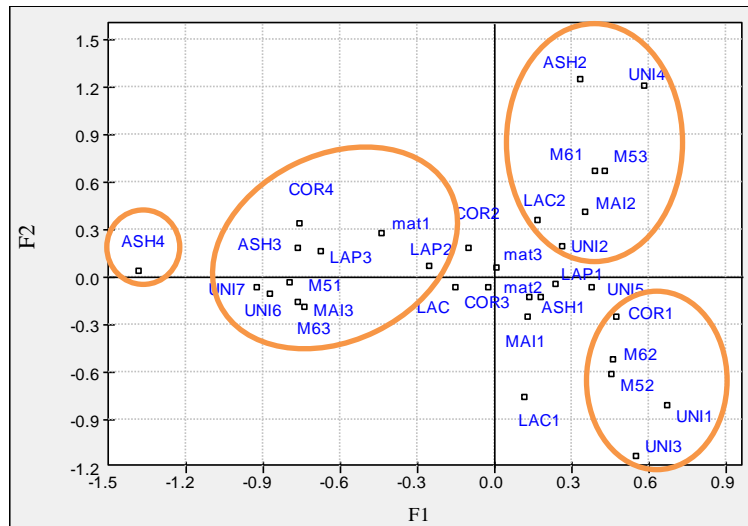


Figura 4.48 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 2)

Pela análise da figura 4.48 verifica-se que:

- Os solos com uma classificação Unificada do tipo SM (UNI6) e SP SM (UNI7) apresentam pouca quantidade de grosseiros (M51), grande quantidade de finos (M63) e textura fina (MAI3);
- Estes solos têm também uma classificação AASHTO do tipo A-3 (ASH3) e A-2-4 (ASH4, mais finos do que as classes ASH1 e ASH2), matriz fina-muito fina (mat1), cor acinzentada (COR4), localizando-se entre os 9-82 m das linhas de água “potenciais” (LAP2, LAP3);
- Os solos com classe média de finos-grosseiros (M62, M52) apresentam cor castanha clara (COR1) e uma classificação Unificada do tipo SW (UNI1) e SW SM (UNI3);
- Os solos mais grosseiros (M53) e menos finos (M61) apresentam uma textura grosseira (MAI2), uma classificação Unificada do tipo SP (UNI2) e SP SM com cascalho (UNI4) e, uma classificação AASHTO do tipo A-1-b (ASH2), localizando-se entre 38-60 m das linhas de água (LAV2).

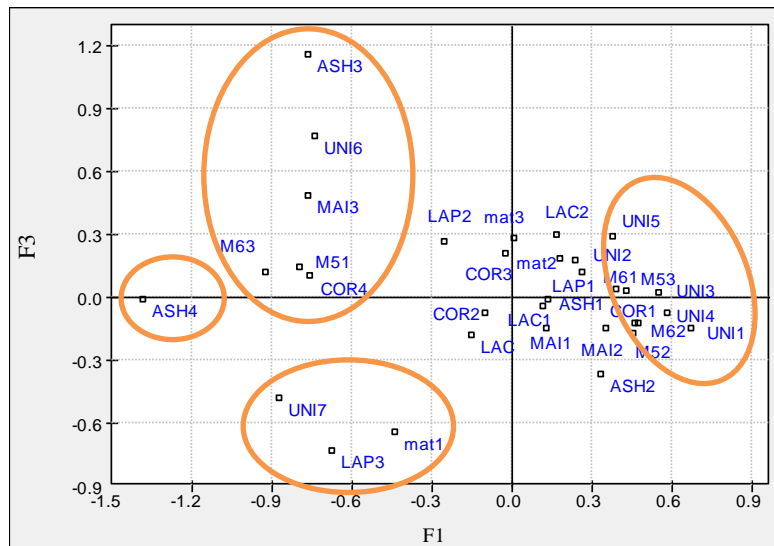


Figura 4.49 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 3)

O eixo 3 representa 12% da população amostrada. Pela análise da figura 4.49 verifica-se que:

- Algumas amostras mais finos (M63) e menos grosseiras (M51) apresentam uma classificação AASHTO do tipo A-3 (ASH3), uma classificação Unificada do tipo SP SM (UNI6), cor acinzentada (COR4) e textura fina (MAI3);
- Existe material com matriz fina-muito fina (mat1) que apresenta uma classificação Unificada do tipo SM (UNI7) e localiza-se mais afastado das linhas de água “potenciais” (LAP3 com distâncias entre 20-82 m); este material corresponde também a uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASH4);
- Algumas amostras correspondentes às classes médias de material grosseiro (M52) e fino (M62) apresentam uma classificação Unificada do tipo SW (UNI1) e SP SM com cascalho (UNI4), cor castanha clara (COR1) e textura média-grosseira (MAI1, MAI2);
- Existe material com mais grosseiros (M53) e poucos finos (M61) que apresentam uma classificação Unificada do tipo SP (UNI2) e SP com cascalho (UNI5).

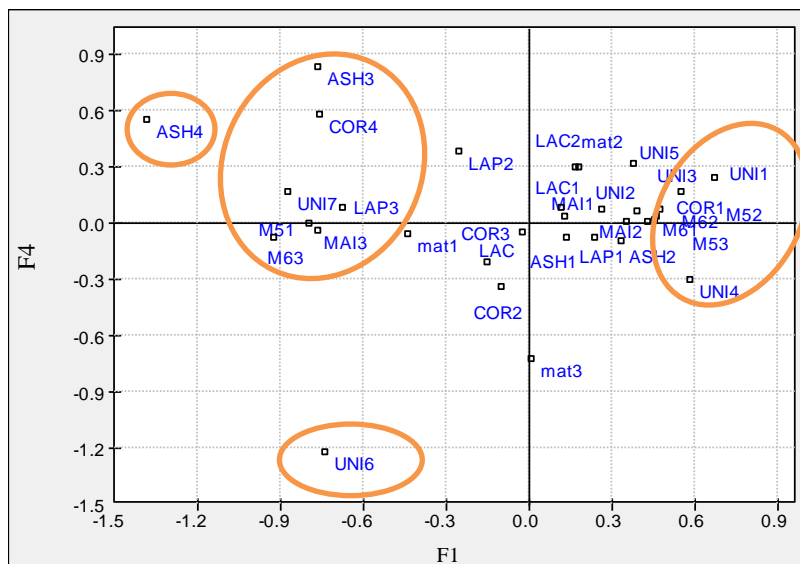


Figura 4.50 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis qualitativas e quantitativas (eixos 1 e 4)

O eixo 4 representa apenas 9% da população amostrada. Pela análise da figura 4.50 verifica-se que:

- Alguns materiais com uma classificação AASHTO do tipo (ASH3) e (ASH4), apresentam também uma classificação Unificada do tipo SM (UNI7), cor acinzentada (COR4) e localizam-se entre 9-82 m das linhas de água “potenciais” (LAP3);
- Alguns materiais com maior quantidade de finos (M63) e menor quantidade de grosseiros (M51) apresentam textura fina (MAI3) e uma classificação Unificada do tipo SP SM (UNI6);
- Existem materiais que apresentam uma classificação Unificada do tipo SW (UNI1) e SW SM (UNI3); alguns destes solos também são classificados como SP SM com cascalho (UNI4).

Estudo das variáveis qualitativas e quantitativas (método ACOR)

Na análise conjunta de variáveis quantitativas e qualitativas, foi realizada uma análise até ao eixo 3 dado que com este eixo está representada 91% da população, e, os códigos utilizados foram referidos nas tabelas 4.16 e 4.17. O eixo 1 representa 55% da população amostrada e o eixo 2 representa 24% da população amostrada.

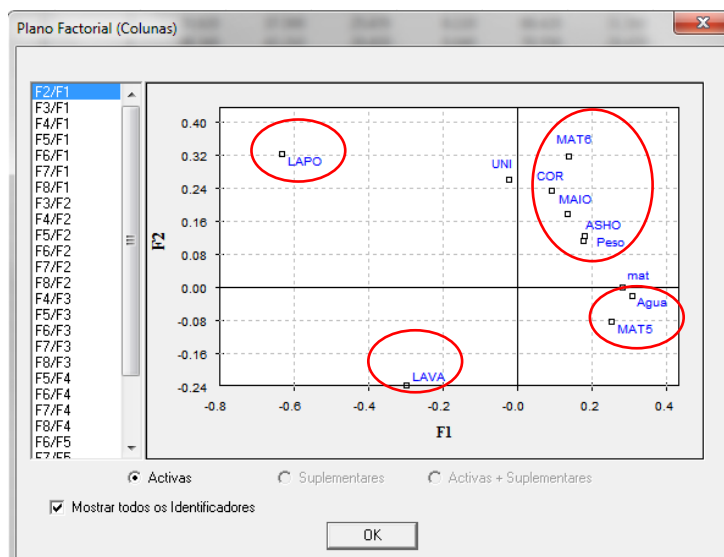


Figura 4.51 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 2)

Pela análise da figura acima (Figura 4.51) verifica-se que:

- Os materiais grosseiros (MAT5) apresentam maiores teores em água (Agua);
- Os materiais finos (MAT6) apresentam maiores densidades aparentes (Peso), uma cor acinzentada (COR), textura fina (MAIO) e uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASHO);
- Por contrapartida, estes materiais finos, acinzentados, com maiores densidades aparentes, apresentam uma classificação Unificada do tipo SP SM e/ou SM (UNI), localizando-se mais próximos das linhas de água (LAVA, LAPO).

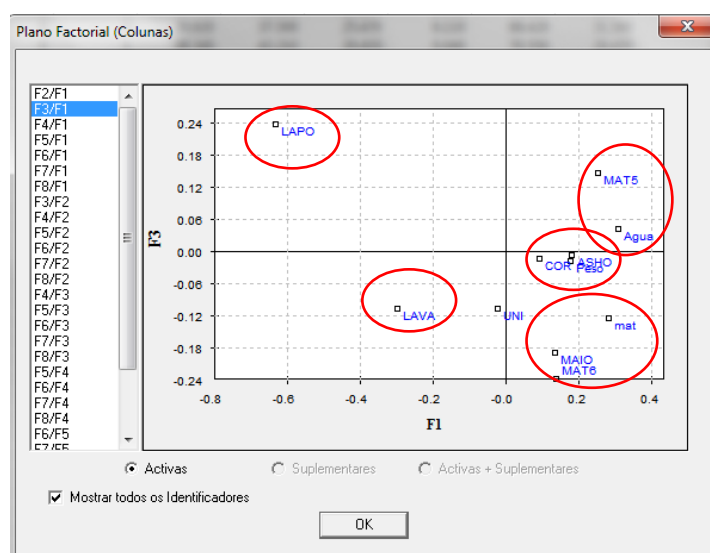


Figura 4.52 - Análise entre correspondências múltiplas para as variáveis quantitativas e qualitativas (eixos 1 e 3)

O eixo 3 representa 12% da população amostrada. Pela análise da figura 4.52, observa-se que:

- Uma vez mais, alguns materiais grosseiros (MAT5) apresentam maiores teores em água (Água) e os materiais finos (MAT6), matriz fina-média, maiores densidades aparentes (Peso), cor acinzentada (COR), uma classificação AASHTO do tipo A-2-4 (ASHO) e textura fina (MAIO).

Classificação dos solos através da Classificação Hierárquica Ascendente (CHA)

Com o intuito de agrupar amostras de solo com características semelhantes foi utilizado o método da Classificação Hierárquica Ascendente, tendo sido utilizado o coeficiente de Gower (distância de Gower) dado que esta análise inclui todas as variáveis (6 quantitativas e 5 qualitativas). A análise realizada permitiu a identificação de dois tipos de amostras (solos do tipo 1 a amarelo e solos do tipo 2 a azul) (Figura 4.53).

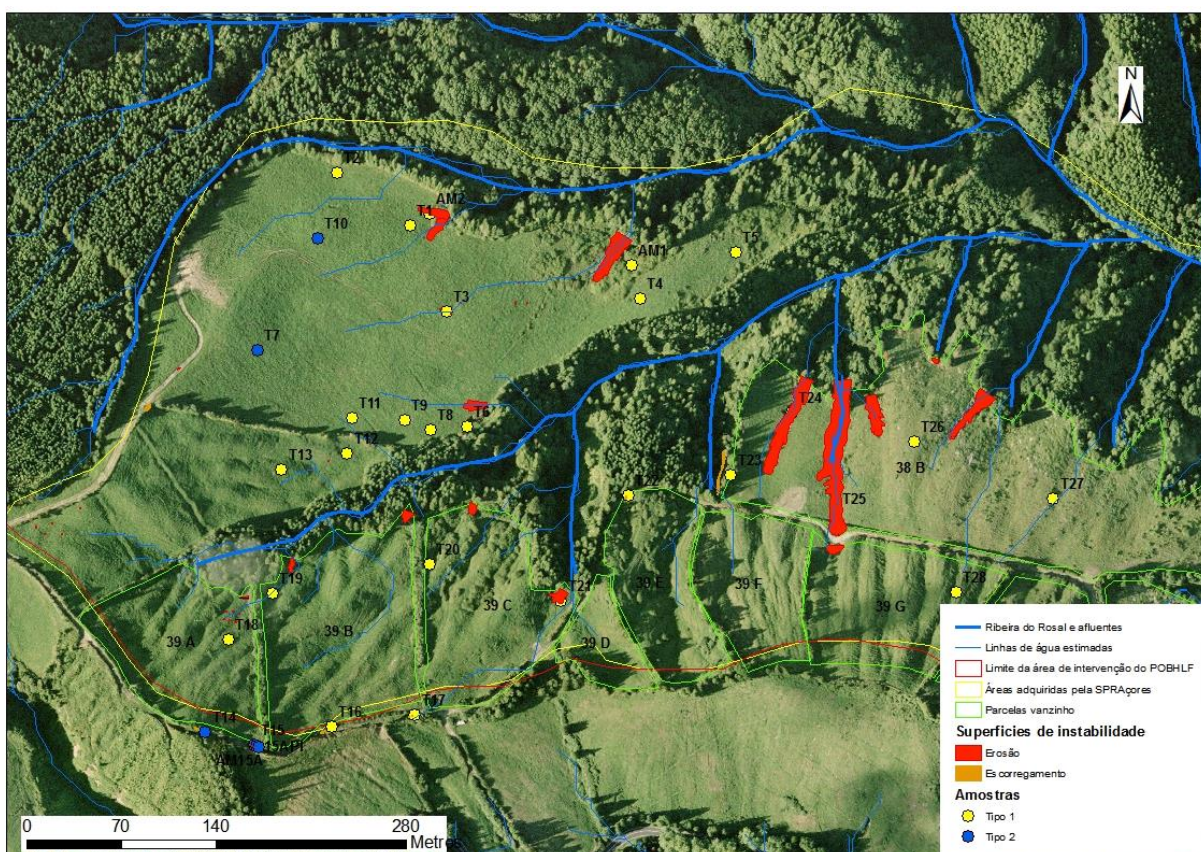


Figura 4.53 - Localização da tipologia de solos classificados por CHA com base em 6 variáveis quantitativas e em 5 variáveis qualitativas (solos do tipo 1 a amarelo; solos do tipo 2 a azul). Mapa na escala 1:3000

A análise dos resultados permitiu concluir que apenas uma variável permite distinguir as amostras: distância das amostras às linhas de água “potenciais” (LAPO), o que leva a crer que os solos da área do Vanzinho se encontram remexidos.

- Solos do tipo 1 (AM1, AM2, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T8, T9, T11, T12, T13, T16, T17, T18, T19, T20, T21, T23, T24, T25, T26, T27, T28) - as amostras localizam-se mais próximas das linhas de água “potenciais”;
- Solos do tipo 2 (T7, T10, T14, T15, AM 15A, AM15 PIR) - as amostras localizam-se mais distantes das linhas de água “potenciais”.

Dados os resultados pouco conclusivos da análise anterior, foi efetuada a mesma classificação, excluindo a variável LAPO e incluindo apenas quatro variáveis (duas qualitativas e duas quantitativas): classificação AASHTO, textura (MAIO), material médio-grosseiro (MAT5) e material fino-muito fino (MAT6). Estas quatro variáveis apresentaram-se como sendo as mais relevantes na região NW da área de estudo (área mais crítica relativamente aos problemas de erosão hídrica atuais). O resultado obtido traduziu-se também na obtenção de tipos principais de solos (solos do tipo 1 a amarelo e solos do tipo 2 a azul) (Figura 4.54):

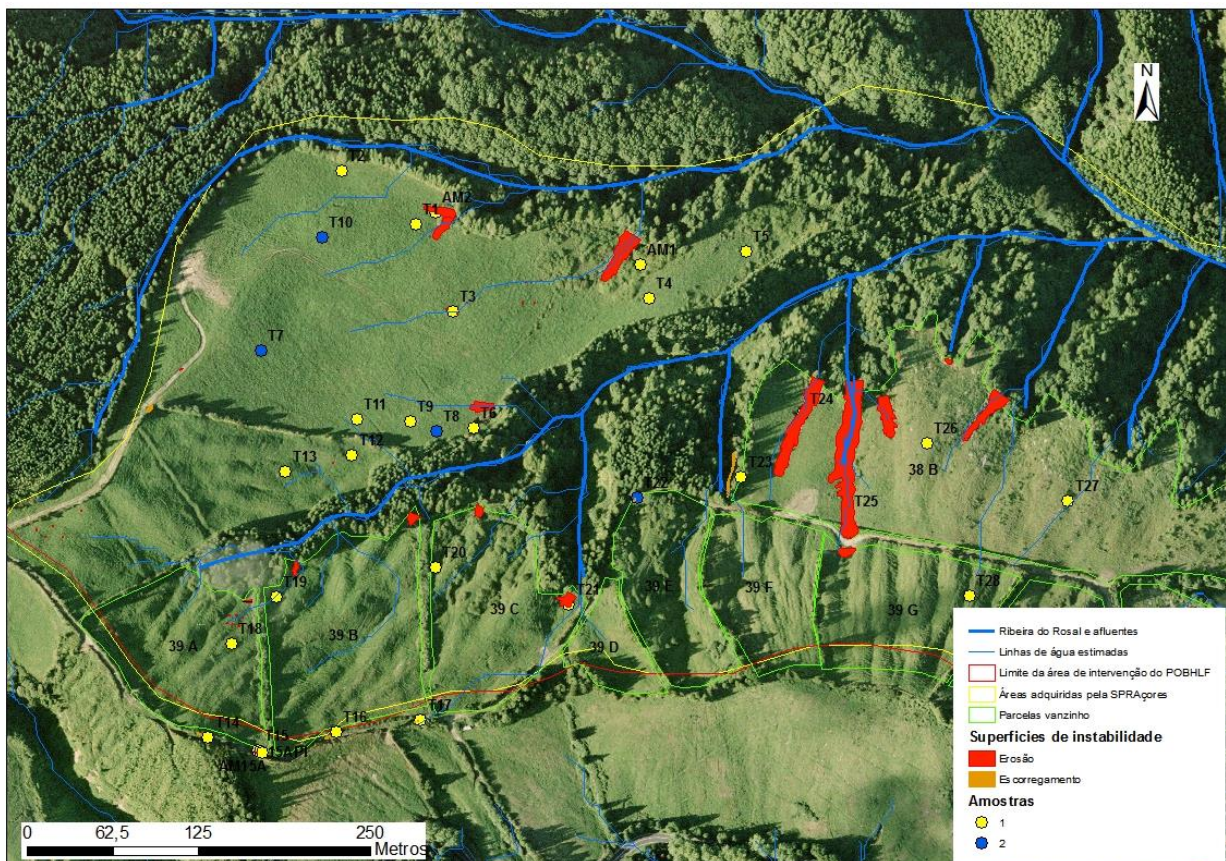


Figura 4.54 - Localização da tipologia de solos classificados por CHA com base nas variáveis - AASHTO, textura e granulometrias (grosseira e fina). Solos do tipo 1 a amarelo; solos do tipo 2 a azul. Mapa na escala 1:3000

Conclui-se que as tipologias de solo resultantes desta análise apresentam as seguintes características que os distinguem:

- Solos do tipo 1 (AM1, AM2, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T9, T11, T12, T13, T14, T15, AM 15A, AM15 PIR, T16, T17, T18, T19, T20, T21, T23, T24, T25, T26, T27, T28) - representam as amostras com a granulometria mais grosseira (MAT5) e com uma menor quantidade de material fino-muito fino (MAT6). Apresentam também, uma textura maioritariamente média-grosseira (MAIO) e uma classificação AASHTO do tipo A-1-b e A-1-a, classificação mais “grosseira” da classificação AASHTO;
- Solos do tipo 2 (T7, T8, T10 e T22) - representam as amostras com a granulometria mais fina (MAT6) e com uma menor quantidade de material médio-grosseiro (MAT5). Apresentam também, uma textura maioritariamente fina (MAIO) e uma classificação AASHTO do tipo A-3 e A-2-4, classificação mais “fina” da classificação AASHTO, comparativamente com as classificações A-1-b e A-1-a.

Importa referir que, em síntese, o que distingue os dois tipos de solos caracterizados é apenas a granulometria e a textura das amostras.

4.2.4.3. Estimação espacial da tipologia de solos através da krigagem da indicatriz

Com base na segunda CHA determinada realizou-se uma krigagem multifásica (método da krigagem da indicatriz) para estimar as áreas que apresentam solos com características semelhantes às amostras do grupo 1 e do grupo 2.

Das 25 amostras de solo, vinte e uma pertencem ao grupo 1 e apenas quatro ao grupo 2. As amostras do grupo 1 foram classificadas com o código 0 e as amostras do grupo 2 com o código 1.

Na figura 4.55 apresenta-se o variograma da variável indicatriz e na tabela 4.19 os parâmetros de variograma utilizados na krigagem. É de referir que, para o ajustamento do modelo teórico do variograma, o primeiro ponto foi ignorado dado que apenas contem um par de pontos.

Tabela 4.19 - Parâmetros de variograma da variável indicatriz (0 para o grupo 1 e 1 para o grupo 2)

Modelo	Direção	Amplitude (a) (m)	C0	C1	C0 + C1
Exponencial	Omnidirecional	75	0	0.109	0.109

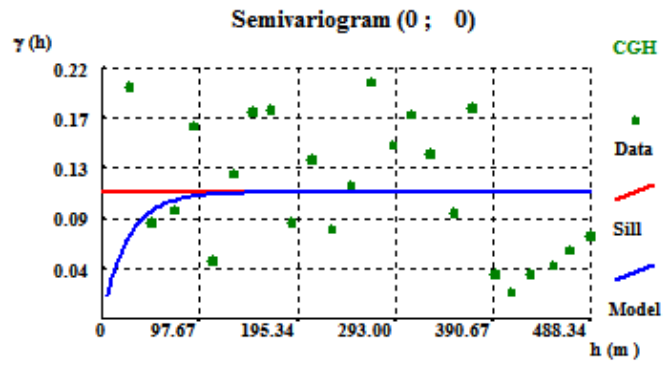


Figura 4.55 - Variograma da variável indicatriz

Na figura 4.56 apresenta-se o mapa de probabilidades estimado e na figura 4.57, o correspondente mapa da tipologia de solos do tipo 1 (grupo 1, a laranja) e do tipo 2 (grupo 2, a verde).

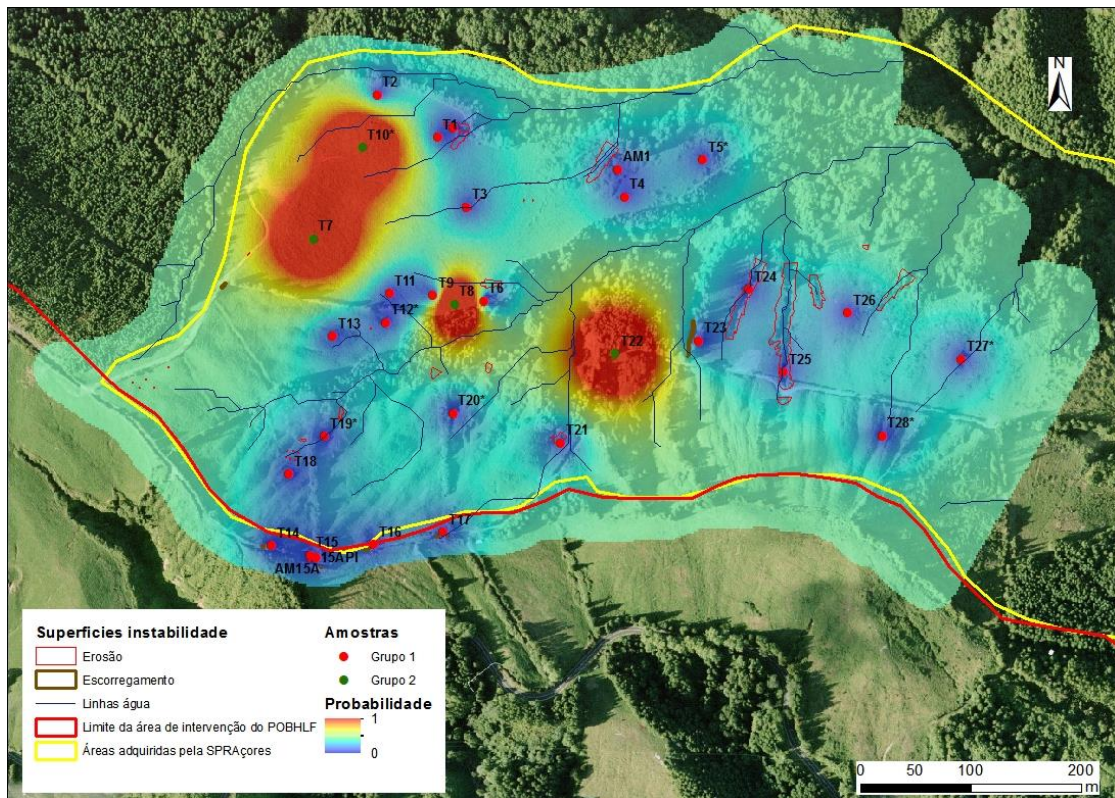


Figura 4.56 - Mapa de probabilidades de ocorrência de solos do tipo 1 ou do tipo 2. Mapa na escala 1:3500

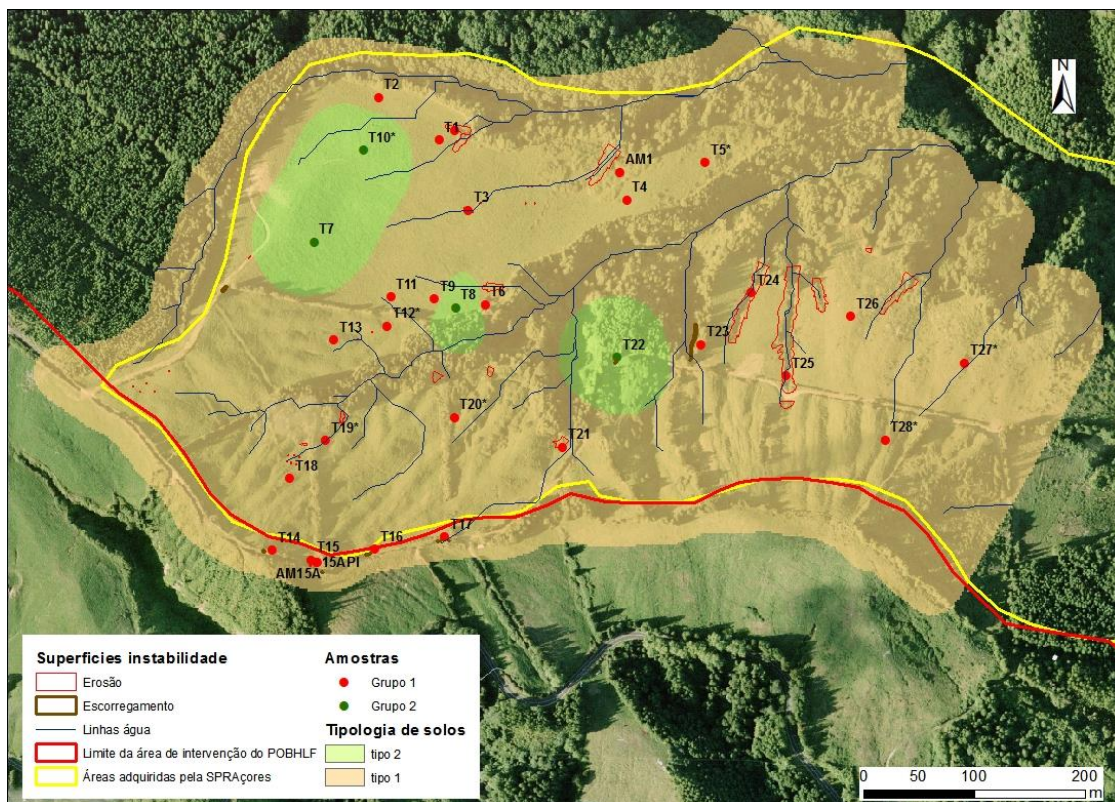


Figura 4.57 - Mapa da tipologia de solos do tipo 1 e do tipo 2. Mapa na escala 1:3500

Embora os solos da zona do Vanzinho se encontrem remexidos, e como tal, apresentam características semelhantes em quase toda a área (em cerca de 90% da área), os solos do tipo 2 que ocorrem pontualmente na zona central e NW apresentam uma ligeira diferença devido à sua granulometria mais fina e menor quantidade de material médio-grosseiro.

Conclui-se que, embora as características físicas dos solos não evidenciem uma relação direta com os ravinamentos identificados, verifica-se que os materiais mais grosseiros encontram-se na proximidade das linhas de água. Este facto pode ser explicado pelo transporte, em suspensão, dos materiais grosseiros menos densos (densidade inferior à densidade da água), através das águas de escorrência superficial.

5. Controlo/Mitigação de processos erosivos lineares e estabilidade de taludes: medidas implementadas e a implementar na área do Vanzinho

No presente capítulo apresentam-se as medidas de controlo e mitigação já aplicadas na área do Vanzinho pelo CMIF, que tiveram como objetivo a redução dos efeitos da erosão do solo. No final do capítulo são apresentadas algumas medidas mitigadoras e de controlo futuras a implementar na área do Vanzinho com vista a minimizar alguns dos fenómenos de instabilidade geotécnica atualmente ainda observados.

5.1. Medidas mitigadoras e de controlo de erosão superficial implementadas na área de estudo

Foi realizado um levantamento de campo que incidiu na identificação das medidas mitigadoras já implementadas na área de estudo cuja finalidade passa pela redução dos efeitos da erosão do solo observada. Estas medidas correspondem a:

- Restituição de flora nativa;
- Construção de diversores ou dissipadores de energia;
- Construção de bacias de retenção de caudal sólido.

5.1.1. Restituição de flora nativa

Foi possível observar no terreno que os ravinamentos existentes nas pastagens da área de estudo foram alvo de intervenções de restituição de flora nativa. Estes ravinamentos resultaram da intensificação da agricultura com adubações não controladas e estrumes conduzidos pelas ribeiras, da arroteia de matos e floresta natural e terraplenagens realizadas nas antigas áreas naturais, para a criação de pastos.

Foram plantados arbustos de flora endémica nos taludes marginais das ravinas, tais como: o folhado (*Viburnum treleasei*), a urze (*Erica azorica*) e a uva-da-serra (*Vaccinium cylindraceum*). Nas zonas mais estáveis, próximas do leito das ravinas, foram plantadas espécies arbóreas da flora endémica de pequeno porte, como o azevinho (*Ilex azorica*), o pau-branco (*Picconia azorica*), a faia-da-terra (*Morella faya*) e o sanguinho (*Frangula azorica*).

Oito ravinamentos já foram intervencionadas e reabilitados. Nas figuras 5.1 e 5.2 podem observar-se dois casos de intervenção.

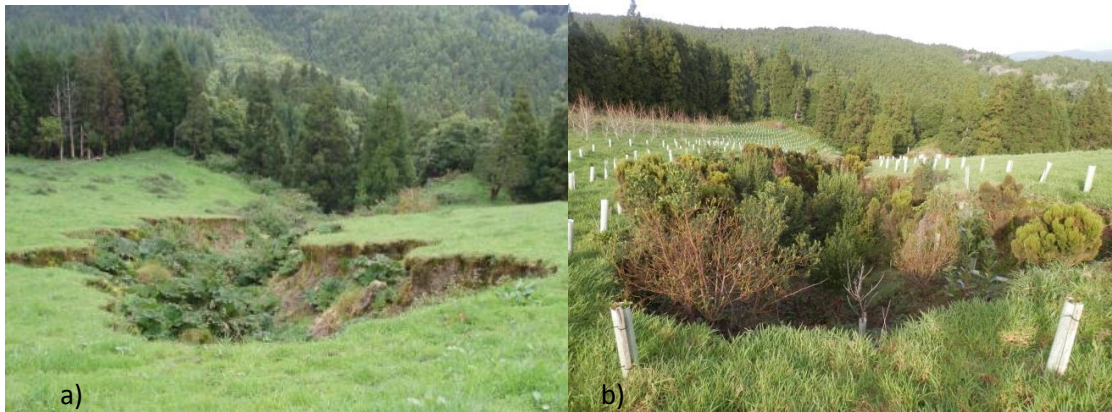


Figura 5.1 - a) Ravina/barranco RB 10 existente na parcela 38 B antes da intervenção (Fonte: Arquivo fotográfico do Furnas LandLab); b) Intervenção com plantação de endêmicas da ravina RB10 (10/01/14)



Figura 5.2 - Intervenção, com plantação de endêmicas, na ravina/barranco RB 11 existente na parcela 38 B (10/01/14)

5.1.2. Construção de diversores ou dissipadores de energia

Na área de estudo foram edificadas vários diversores ou dissipadores de energia, com a reutilização de madeira proveniente das espécies infestantes abatidas nas áreas envolventes (por exemplo, *Pittosporum undulatum*, utilizadas nas parcelas 39 B e 39 C e *Cryptomeria japónica*, utilizadas na parcela 38 B e Vanzinho, desde 2011). Estas diversões (Figuras 5.3 a 5.6) têm a forma de V e foram construídas a montante das ravinas.

Identificou-se também a plantação de espécies herbáceas nativas, os juncos, características de zonas de encharcamento. Após o apodrecimento dos dissipadores existentes, os juncos vão desempenhar as mesmas funções mas de uma forma permanente, não sendo necessária manutenção.



Figura 5.3 - Dissipadores de energia em forma de V, construídos a montante da ravina RB 10, na parcela 38 B (10/01/14)



Figura 5.4 - Dissipadores de energia construídos a montante da ravina RB 3, no Vanzinho (10/01/14)



Figura 5.5 - Dissipadores de energia construídos a montante da ravina RB 4, no Vanzinho (10/01/14)



Figura 5.6 - Dissipadores de energia (*Pittosporum undulatum*) construídos a montante da ravina RB 6, na parcela 39 B (10/01/14)

Na figura 5.7 está representada a localização dos diversores construídos na área de estudo (Vanzinho), bem como o tipo de intervenção aplicada em cada ravina identificada.

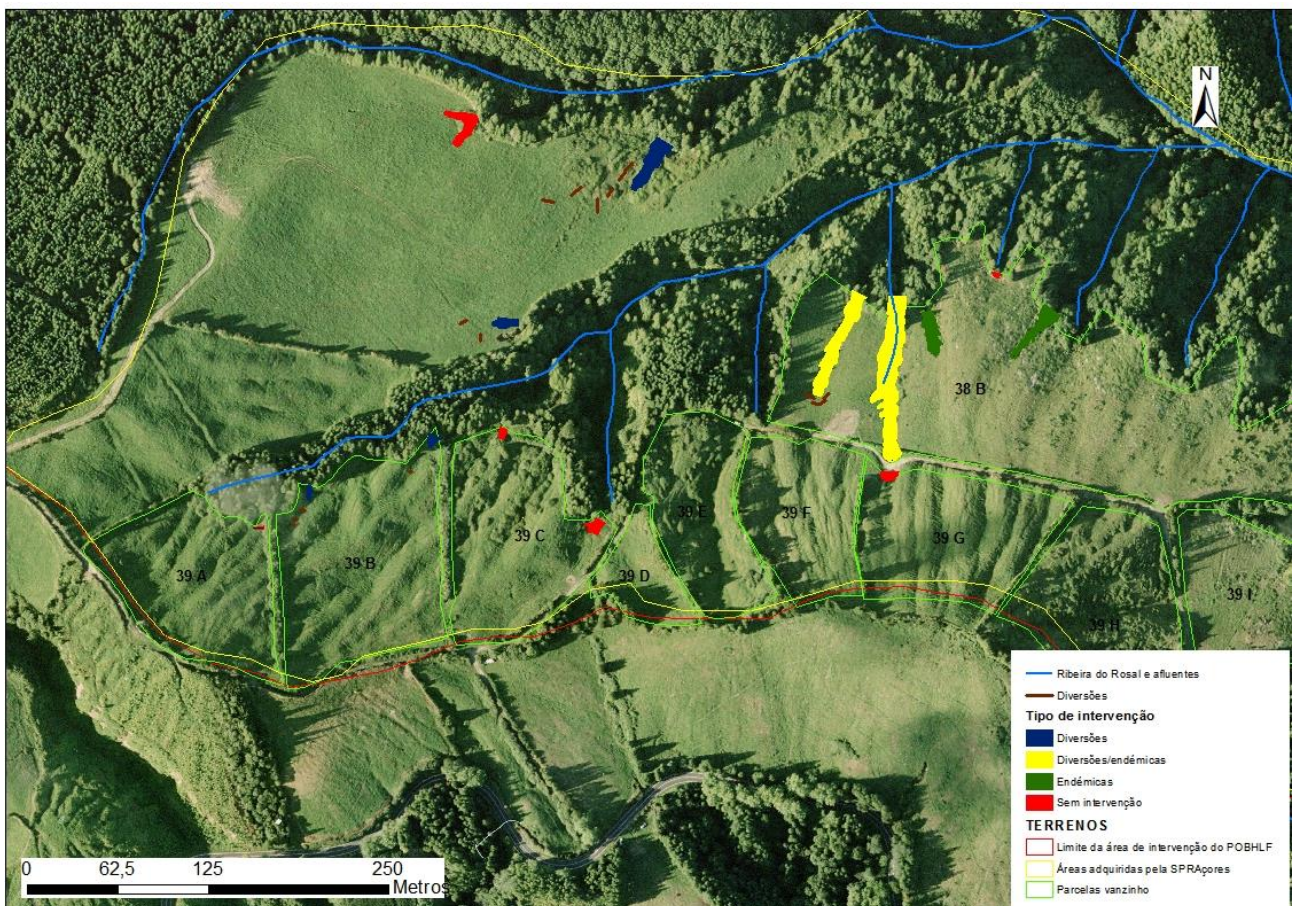


Figura 5.7 - Localização dos diversores construídos na área de estudo (Vanzinho) e o tipo de intervenção aplicada em cada ravina. Mapa na escala 1:3000

5.1.3. Bacias de retenção de caudal sólido

Foram encontradas sete bacias de retenção (Figuras 5.8 a 5.10), ao longo do percurso da Ribeira do Rosal (a branco na Figura 5.11), ribeira que desagua na Lagoa das Furnas, com o objetivo de captar o caudal sólido que é arrastado pela água, evitando a entrada de uma grande parte dos sedimentos na Lagoa das Furnas.

As bacias de retenção existentes foram construídas com gabiões de pedra e permitem a percolação da água, retendo a montante grande parte do caudal sólido. Imposta referir que são removidos, todos os anos, cerca de 20.000 m³ de caudal sólido de todas as bacias de retenção construídas nos leitos das ribeiras afluentes à Lagoa das Furnas (Furnas *Landlab*, 2012). Uma das bacias de retenção encontradas ao longo do leito da Ribeira do Rosal encontra-se destruída (Figura 5.9).



Figura 5.8 - Bacia de retenção ao longo da Ribeira do Rosal, a sul da Lagoa das Furnas (19/12/13)



Figura 5.9 - Bacia de retenção (destruída) ao longo da Ribeira do Rosal, a sul da Lagoa das Furnas (19/12/13)



Figura 5.10 - Bacia de retenção ao longo da Ribeira do Rosal, a sul da Lagoa das Furnas (19/12/13)

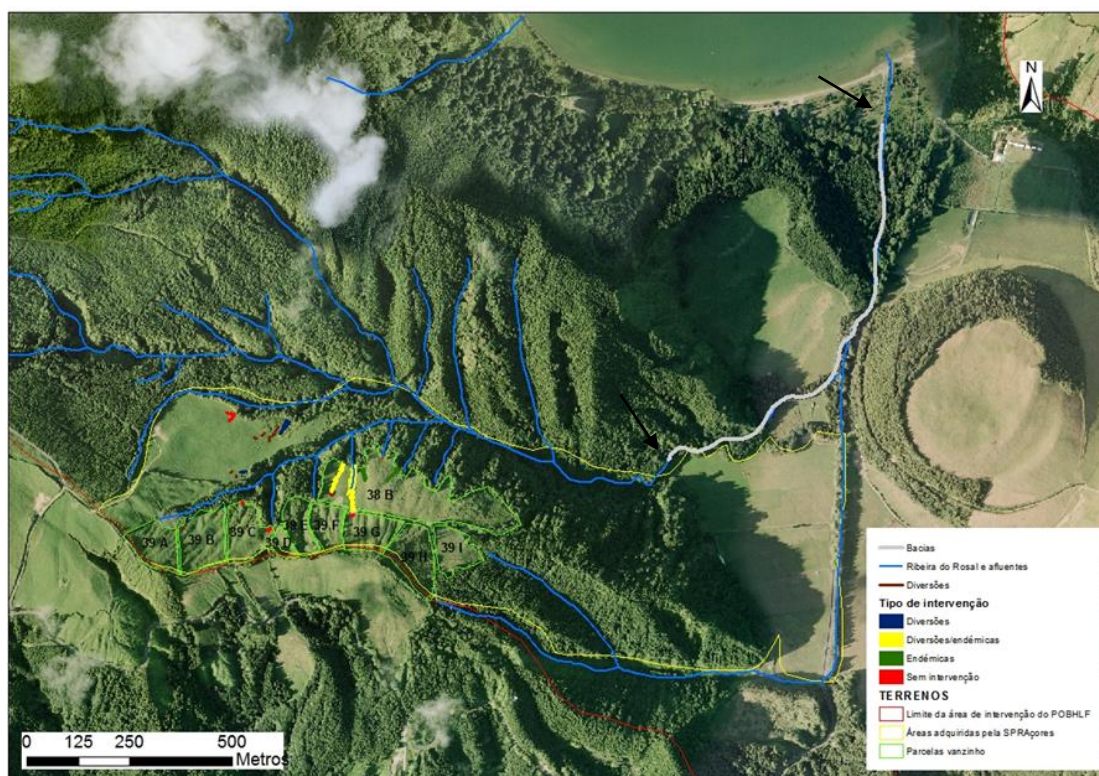


Figura 5.11 - Localização do trecho da Ribeira Rosal onde se encontram as bacias de retenção (a cinza claro)

Relativamente aos escorregamentos/deslizamentos, não se identificou a aplicação de qualquer medida de estabilização dos taludes afetados. No entanto, no local do escorregamento identificado no talude da parcela 38 B foi construída uma estrutura de proteção (Figura 5.12) para impedir a aproximação de pessoas da zona instável.



Figura 5.12 - Estrutura de proteção construída na proximidade do escorregamento identificado na parcela 38 B (25/04/14)

5.2. Medidas de mitigação/controlo propostas

Os parâmetros/critérios necessários para a seleção e o dimensionamento das medidas de mitigação a implementar nos ravinamentos e nos taludes instáveis da área de estudo estão relacionados com fatores intrínsecos e extrínsecos aos solos:

- Parâmetros intrínsecos:
 - Parâmetros físicos: a granulometria, a densidade e o teor em água;
 - Parâmetros mecânicos: a coesão e o ângulo de atrito interno;
- Parâmetros extrínsecos:
 - Parâmetros morfológicos: os elementos morfométricos dos ravinamentos, os declives dos mesmos, o declive dos terrenos e a inclinação dos taludes;
 - Parâmetros hidrológicos: pluviosidade, bacias de drenagem dos ravinamentos e respetivos caudais.

As medidas de mitigação recomendadas para a área de estudo seguem os parâmetros/critérios físicos e morfológicos. Para o dimensionamento destas medidas são necessários os parâmetros hidrológicos, sendo assim recomendado a determinação destes parâmetros em trabalhos futuros.

Assim, e com base nas medidas de controlo e regularização de ravinamentos e taludes mencionadas no capítulo 3, são propostas algumas medidas para controlar e regularizar os ravinamentos ativos e os taludes instáveis área de estudo (Tabela 5.1):

Tabela 5.1 - Resumo das medidas propostas para controlar e regularizar os ravinamentos ativos e os taludes instáveis da área de estudo

	Valas de drenagem	Dissipadores de energia	Diques ou barragens de controlo	Rock lining ou sulcos de drenagem	Reperfilamento	Plantio	Drenagem superficial
Superfícies de erosão	X	X	X	X	-	X	-
Taludes	-	-	-	-	X	X	X

Na figura 5.13 apresenta-se o tipo de medida a aplicar e a localização das medidas propostas para o tipo de solos da área de estudo.

O dimensionamento das medidas propostas para os solos da área de estudo tem por base os seguintes critérios e/ou especificações técnicas:

- Construção, a montante dos ravinamentos identificados na zona do Vanzinho, de valas de drenagem, preenchidas com material drenante (brita), podendo ser complementado com o uso de geotêxtis a cobrir a superfície da vala de drenagem. Estas valas de drenagem devem ser côncavas e seguir a topografia do terreno, tendo como objetivo redirecionar as águas captadas para as linhas de água mais próximas, evitando que o escoamento de água superficial, vindo a montante das ravinas, atinja a “cabeça” das mesmas. Neste caso propõem-se duas hipóteses: construção de uma vala de drenagem a montante das ravinas RB 1 e RB 2 e uma outra vala de drenagem a montante da ravina RB 3 ou, caso a primeira hipótese não seja eficiente, a construção de duas valas de drenagem a montante das ravinas RB 1 e RB 2 e duas valas de drenagem a montante da ravina RB 3 (linhas amarelas a tracejado). O espaçamento, no segundo caso, deve seguir o espaçamento proposto na Tabela 3.7, para um declive médio de 10%, em solos pomíticos (20 m);
- Construção de barragens de controlo no interior dos ravinamentos com um espaçamento (S) entre barragens com base na fórmula empírica apresentada (1):

$$\frac{H * 1.2}{G}$$

Os declives e alturas calculadas para as barragens encontram-se em anexo (Anexo X). Como a madeira é um recurso disponível na área de estudo, sugere-se a construção de barragens de madeira com dois alinhamentos de estacas ou, com sacos de

areia/solo (medidas mais económicas). Estas barragens retêm grande parte dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial;

- Nas zonas onde há evidências de pequenos sulcos ou pequenos alinhamentos erosivos, pode-se adotar o método de *rock lining* para evitar a evolução do processo erosivo;
- A montante dos ravinamentos não intervencionados, e das valas de drenagem a construir, propõe-se a construção de diversores ou dissipadores de energia (com 5 m de comprimento) em madeira resistente (troncos), sendo alguns em forma V, para dissipar a energia do fluxo de água e dispersar o fluxo de água (a madeira deve ser revestida com um impermeabilizante para aumentar a durabilidade da mesma). Estes diversores devem seguir a direção das linhas de água estimadas (linhas de água de traço mais fino), zonas onde há acumulação de fluxo nas ocasiões de precipitação intensa;
- Para complementar as medidas referidas, propõe-se ainda o plantio de culturas endémicas (em exemplo das ravinas da parcela 38 B), nos ravinamentos cuja medida não foi ainda implementada (em todos os ravinamentos, à exceção das ravinas da parcela 38 B, onde esta medida já foi aplicada). O plantio deve ser realizado ao longo do leito dos ravinamentos e nas margens dos mesmos, para que as raízes segurem os solos;
- Para os escorregamentos identificados ao longo do caminho do trilho, propõe-se o reperfilamento dos taludes ao longo desse caminho (devido ao seu elevado declive), a aplicação de um sistema de drenagem superficial eficaz, transversalmente ao longo do caminho, com valetas ou meias canas tanto na crista do talude como no pé do talude, para redirecionar as águas da chuva. Para complementar estas medidas deve, igualmente, ser feito o plantio de culturas endémicas de pequeno porte nos taludes do caminho do trilho;

- Para os escorregamentos identificados no caminho do trilho, mais a E, próximos da estrada regional (não se encontram representados nas figuras anteriores), propõe-se a adoção de um sistema de drenagem superficial eficaz, com valetas ou canais no pé do talude e a construção de uma proteção ao longo dessa faixa de caminho (típico muro de pedra seca), para evitar a chegada de material, proveniente de escorregamentos futuros, ao caminho do trilho. Para complementar estas medidas, caso seja possível, deve igualmente ser feito o plantio de culturas endémicas de pequeno porte nesses taludes. Embora o escorregamento do talude da parcela 38 B apresente condições instáveis (pouca acessibilidade ao talude, infra escavação em algumas zonas da crista do talude e elevado declive do talude), além da proteção aplicada, na zona envolvente próxima da crista do talude, para evitar o acesso de pessoas, é essencial o reperfilamento do talude, a aplicação de sistemas de drenagem e o deslocamento do caminho do trilho contíguo (a Sul).

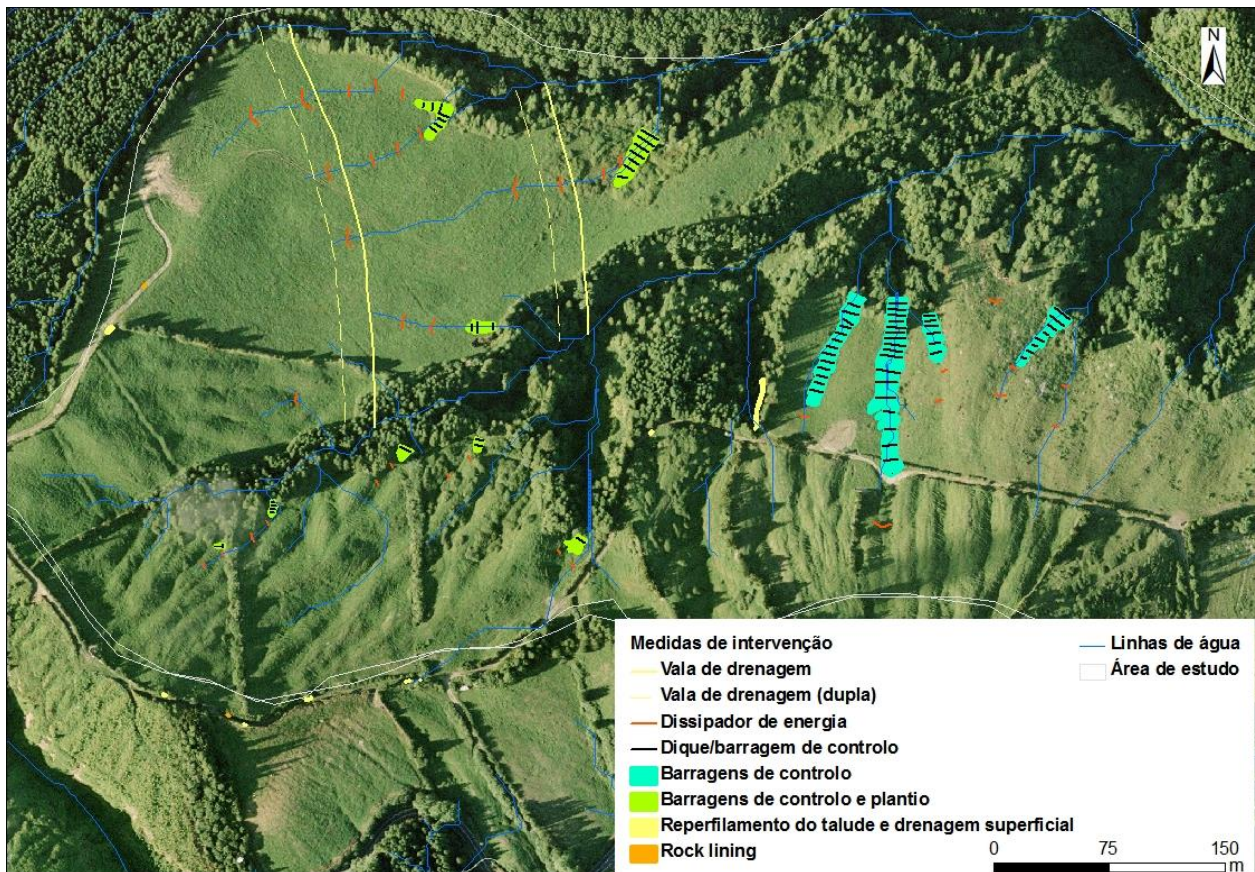


Figura 5.13 - Medidas de controlo e regularização a aplicar na área de estudo. Mapa na escala 1:2750

6. Considerações finais e recomendações

Na presente dissertação foi proposta uma metodologia com base na análise multivariada de dados que teve por objetivo a identificação de potenciais correlações existentes entre as propriedades físico-mecânicas dos solos nos terrenos do Vanzinho (Castelo Branco, Furnas, ilha de São Miguel, Açores) e as superfícies de instabilidade geotécnica (ravinamentos e escorregamentos) existentes com vista a promover medidas de controlo e mitigação em áreas potenciais de instabilidade.

Verificou-se que a variabilidade das características físicas e mecânicas dos solos não foram determinantes para relacionar o tipo de solo com as superfícies de instabilidade geológico-geotécnica identificadas, provavelmente devido ao facto de a área ter sido objeto de intervenção antrópica no passado, ou seja, sujeita a trabalhos de terraplenagem para a criação de pastos, pelo que os solos se apresentaram com características idênticas em quase toda a extensão da área, e sem comportamento espacial relevante.

Através da estimação espacial da tipologia de solos verificou-se que os solos apresentam características semelhantes em quase toda a área do Vanzinho (em cerca de 90% da área). Estes solos, que se distribuem na quase totalidade da área apresentam granulometria média a grosseira e são constituídos maioritariamente por pedra-pomes. Os solos de granulometria mais fina apenas ocorrem pontualmente na zona central e NW.

A maioria dos ravinamentos localizam-se na proximidade das linhas de água. A determinação das zonas de acumulação de água, com base na topografia da região, confirma a evolução dos ravinamentos ao longo dessas zonas de acumulação de água, pelo que as características hidrológicas da região apresentam relevância no processo evolutivo dos ravinamentos. No entanto essa evolução parece não estar dependente das características físicas e mecânicas dos solos embora os materiais grosseiros (pedra-pomes) e com densidade inferior à da água possam ser transportados em suspensão, no caso de precipitações intensas.

A metodologia seguida baseou-se em cinco etapas, as quais conduziram aos seguintes resultados:

1 - Na primeira etapa foi realizado um levantamento de campo com vista a identificar os ravinamentos e escorregamentos existentes.

A maioria dos ravinamentos já se encontram intervencionados com a edificação de dissipadores de energia ou diversores em madeira (para desviar a direção das águas de escorrência superficial da “cabeça” dos ravinamentos) e o plantio de espécies endémicas mais suscetíveis de “segurar” o solo superficial.

Os escorregamentos existentes na zona do Vanzinho são na maioria de pequena dimensão, sendo a sua causa provável o elevado declive dos taludes e a saturação dos mesmos após períodos de pluviosidade intensa. Os escorregamentos mais preocupantes, de maior dimensão, encontram-se nos taludes mais a E da área de estudo (próximos da estrada regional) e no talude contíguo à parcela 38B do Vanzinho. Os escorregamentos não foram alvo de qualquer intervenção de estabilidade, havendo apenas uma intervenção ligeira no talude contíguo à parcela 38B (construção de uma proteção em madeira).

2 - Na segunda etapa, foram recolhidas 32 amostras de solo (remexidas e indeformadas) para posterior caracterização físico-mecânica dos terrenos.

A malha de amostragem utilizada foi uma malha sistemática e direcionada, com vista a representar toda a extensão da área de estudo bem como os materiais nas zonas de maior instabilidade geotécnica (tais como amostras recolhidas no interior dos ravinamentos, na proximidade dos escorregamentos e das zonas preferenciais de acumulação de água).

3 - Na terceira etapa realizaram-se os ensaios laboratoriais para caracterizar, do ponto de vista físico-mecânico, os solos da região

Do ponto de vista físico, os materiais amostrados apresentam pesos volúmicos secos enquadrados dentro dos valores expectáveis para piroclastos de queda de natureza pomítica e constituídos por cinzas vulcânicas, variando entre 7.3 kN/m^3 (T6) e 11.8 kN/m^3 (T22). A densidade das partículas sólidas é, regra geral, baixa, devido à elevada porosidade dos solos, predominantemente compostos por pedra-pomes traquítica.

Em termos granulométricos, os resultados dos ensaios de identificação confirmam que os depósitos apresentam um predomínio de frações mais grosseiras (areias médias a grosseiras), sendo o material friável, maioritariamente constituído por pedra-pomes e, em certos casos, alteradas e facilmente desagregáveis. O material fino existente, devido às suas características, corresponde maioritariamente a silte e está presente, regra geral, em pequena quantidade.

A análise dos limites de Atterberg mostrou que, na globalidade, os depósitos amostrados são considerados maioritariamente não plásticos.

Os solos da área de estudo foram classificados de acordo com dois Sistemas de Classificação de solos: segundo a Classificação Unificada de Solos, as amostras são todas do tipo "S" (areia), apresentando algumas amostras material fino em quantidade significativa, tendo a designação SM (areia com silte) e outras apresentam cascalho/seixo; de acordo com a Classificação AASHTO, a grande maioria das amostras é classificada como A-1-b, ou seja, solos granulares, constituídos maioritariamente por partículas da dimensão das areias.

Do ponto de vista mecânico, determinaram-se os parâmetros de resistência ao corte através de ensaios de corte direto na condição de não consolidado, não drenado, obtendo-se ângulos de atrito interno na ordem dos 30°, estando em conformidade com os valores sugeridos para solos constituídos pelas classes granulométricas de areias e siltes; os valores de coesão obtidos dos ensaios de corte, da ordem dos 20 kPa, são superiores aos valores publicados para os Açores no mesmo tipo de solos. Este facto pode ser explicado por várias razões, entre elas:

- a) Existem evidências da existência de lapilli de acreção, formado durante a erupção de 1630 após a ocorrência de precipitação (ligação entre as partículas mais finas/cinzas siliciosas com a humidade, aumentando os valores de coesão dos solos);
- b) As amostras foram recolhidas a profundidades elevadas (cerca de 1,55 m e cerca de 2,16 m);
- c) Os solos que sofreram terraplenagens podem ter sido compactados após os trabalhos de nivelamento do terreno;

4 - Na quarta etapa procedeu-se a uma análise estatística univariada e multivariada de variáveis, quantitativas e qualitativas, através de dados obtidos dos ensaios laboratoriais e outras variáveis (tais como a distância dos locais de amostragem às linhas de água).

Através da análise da estatística univariada observa-se que o material com granulometria média (areia média) encontra-se em maior quantidade nas amostras em estudo, seguido do material mais grosseiro (areia grosseira com cascalho/seixo), que representa cerca de 2/3 do material fino-muito fino presente nas amostras (e que ocorre em quantidades reduzidas). Observa-se uma predominância de materiais com valores de densidade muito baixa (cerca de 75% das amostras apresentam densidade igual ou inferior a 960 Kg/m³ e apenas três amostras apresentam densidade um pouco mais elevada (1123-1200 kg/m³)). Em termos genéricos os materiais apresentam teor em água elevado (cerca de 50%).

A análise estatística multivariada (análise fatorial em componentes principais, análise fatorial entre correspondências múltiplas e análise fatorial entre correspondências binárias) determinou que (Tabela 6.1):

Tabela 6.1 – Principais conclusões da análise multivariada de dados

	Teor em água (%)	Densidade aparente seca (Kg/m³)	Proximidade às linhas de água (m)
Material médio-grosseiro (> 0.42mm)	Mais elevado	Menor densidade	Maior proximidade
Material fino-muito fino (< 0.42mm)	Mais baixo	Maior densidade	Menor proximidade

Pela análise da tabela 7.1 pode-se constatar que o material grosseiro, menos denso e maioritariamente constituído por pedra-pomes, é mais facilmente transportado pelas águas de escorrência superficial em suspensão, acumulando-se junto às linhas de água.

Com a análise classificatória, realizada com todas variáveis quantitativas e qualitativas, agruparam-se as amostras com características semelhantes, não sendo os resultados obtidos conclusivos quanto às características físicas do material. A causa desta interpretação pode estar relacionada com as terraplenagens efetuadas no passado.

Realizou-se uma nova análise considerando apenas variáveis que traduzissem as propriedades físicas dos materiais, tais como, a classificação AASHTO, textura, fração do material médio-grosseiro e a fração do material fino-muito fino. Nesta análise obtiveram-se dois grupos de amostras, cuja tipologia se distingue pelas seguintes propriedades:

- Tipo 1 - materiais com granulometria grosseira, menor quantidade de material fino a muito fino, textura maioritariamente média-grosseira, categorizado pela classificação AASHTO como sendo do tipo A-1-b e A-1-a (ou seja “solos grosseiros”, segundo a classificação AASHTO);
- Tipo 2 - materiais com granulometria fina, maior quantidade de material fino a muito fino, textura fina, categorizado pela classificação AASHTO como sendo do tipo A-3 e A-2-4 (solos mais fina, segundo a classificação AASHTO).

Foi realizada uma estimação espacial da tipologia dos solos, através do método da krigagem da indicatriz, que permitiu observar que em cerca de 90% da área estudada os solos apresentam granulometria média-grosseira (solos do tipo 1). Os solos finos e muito finos (solos do tipo 2) ocorrem pontualmente na zona central e NW da área, em apenas cerca de 10% dos terrenos.

5 - Na quinta etapa, tendo por base as condições paleogeográficas e os solos existentes na área do Vanzinho, propõem-se um conjunto de medidas de controlo/regularização para redução e mitigação dos fenómenos erosivos, principalmente nos ravinamentos. Entre estas, destacam-se, para as superfícies de erosão:

- A construção, a montante dos ravinamentos, de valas de drenagem, preenchidas com material drenante (brita), podendo ser complementado com o uso de geotêxteis a cobrir a superfície da vala de drenagem;
- A construção de barragens de controlo no interior dos ravinamentos;

- A construção de diversores ou dissipadores de energia, a montante dos ravinamentos e das valas de drenagem, em madeira resistente (troncos), que deve ser revestida com um impermeabilizante para aumentar a durabilidade da mesma;
- O plantio de culturas endémicas nos ravinamentos das outras parcelas, à imagem do que foi feito nas ravinas da parcela 38 B;
- A adoção do método de *rock lining* nas zonas onde existam evidências de sulcos ou alinhamentos erosivos.

Para os taludes com altura até 6 m:

- O reperfilamento dos taludes dos escorregamentos existentes ao longo do caminho do trilho;
- A aplicação de um sistema de drenagem superficial, transversalmente ao longo do caminho, com valetas ou meias canas tanto na crista do talude como no pé do talude;
- O plantio de culturas endémicas de pequeno porte nos taludes;

Para os taludes com altura superior a 10 m:

- A adoção de um sistema de drenagem superficial, com valetas ou canais no pé dos taludes existentes no caminho do trilho, na zona mais a E da área de estudo, na proximidade da estrada regional;
- A construção de uma proteção ao longo dessa faixa de caminho (muro de suporte em rocha);
- O plantio de culturas endémicas de pequeno porte, caso haja acessibilidade;
- O reperfilamento do talude da parcela 38 B, a aplicação de sistemas de drenagem e o deslocamento da estrada contígua;

Além destas medidas, recomenda-se também, em trabalhos futuros, a determinação de parâmetros que possam auxiliar na seleção e no dimensionamento das medidas de controlo/regularização recomendadas:

- Medições periódicas de parâmetros hidrológicos, tais como caudais e registo da precipitação, na área do Vanzinho;
- Determinação das bacias hidrográficas individuais para cada ravinamento ativo (tal como o estudo realizado por Ghosh & Bhattacharya, (2012)) e a determinação de

parâmetros, tais como: a área de drenagem de cada bacia individual, a pluviosidade registada em cada bacia e respetivos caudais;

- Manutenção periódica das medidas estruturais implementadas;
- Estudo mais pormenorizado do talude contíguo à parcela 38 B (recolha de mais amostras de solo para determinação dos parâmetros mecânicos e do Fator de Segurança).

O levantamento topográfico adequado para a área de estudo deve estar à escala 1:1000, com vista a determinar, com o menor erro possível, parâmetros hidrológicos, tais como, a área de drenagem da bacia de cada uma das ravinas e os respetivos caudais. A determinação dos caudais e o registo da pluviosidade para cada bacia torna-se essencial para relacionar a ocorrência de ravinamentos com a distribuição espacial dos mesmos. No caso de estudo, a estação meteorológica/udométrica mais próxima, encontra-se na Lagoa das Furnas, portanto, distante da zona do Vanzinho, não havendo possibilidade para determinar estes parâmetros durante este estudo.

Assim, além da utilização dos parâmetros físicos-mecânicos utilizados neste estudo, seria importante considerar também parâmetros hidrológicos (tais como os referidos na tabela 6.2), já utilizados em estudos similares (Ghosh & Bhattacharya, (2012); Agnesi *et al.*, (2007)) e que obtiveram resultados satisfatórios para a identificação de áreas suscetíveis de instabilidade geotécnica em solos.

Tabela 6.2 - Parâmetros a utilizar futuramente numa análise multivariada de dados sobre solos

Parâmetros intrínsecos aos solos		Parâmetros extrínsecos aos solos
Parâmetros físicos	Parâmetros mecânicos	Parâmetros hidrológicos
Granulometria	Coesão	Caudais
Densidade	Ângulo de atrito interno	Pluviosidade
Teor em água	-	Bacias de drenagem dos ravinamentos

7. Referências bibliográficas

- Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Conoscenti, C., Costanzo, D., Maerker, M. & Rotigliano, E. (2007). *Multivariate analysis of gully-erosion processes: susceptibility assessment and temporal validation in a watershed of north-central Sicily, Italy*. PRIN 2007 Project “Definition of an integrated model for the predictive evaluation of the water erosion phenomena in the Mediterranean environment”, 5 p.
- Alho, A. (2006). *Erosão e Estabilização Biológica de Taludes*. Espaços Verdes – projectos e construção, Lda., 101 p.
- Almeida, J. (2013). Capítulo 2. *Análise Exploratória de Dados - Análise Univariada*, 18 p.
- Almeida, J. (2013). Capítulo 3. *Análise Exploratória de Dados - Análise Bivariada*, 17 p.
- Almeida, L. (2005). *Atlas Geoquímico dos solos das Bacias Hidrográficas dos rios Douro e Mondego*. Dissertação de Mestrado em Geoquímica, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 117 p.
- Alves, L., Belderrain, M., Scarpel, R. (2007). *Tratamento Multivariado de Dados por Análise de Correspondência e Análise de Agrupamentos*. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós Graduação do ITA – XIII ENCITA/2007. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 7 p.
- Amaral, P. (2011). *Caracterização Geotécnica e Hidrológica de Depósitos Vulcânicos: Modelação da Estabilidade de Taludes no Concelho da Povoação (ilha de S. Miguel – Açores)*. Dissertação de Doutoramento no Ramo de Geologia, Especialidade de Vulcanologia. Universidade dos Açores, 277 p.
- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J., Queiroz, G., Marques, F. (2010). *Contribuição da sucção matricial na avaliação dinâmica da estabilidade de vertentes naturais: o caso de estudo do talude da Estrada Regional no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel, Açores)*. Actas/Proceedings do V Congresso Nacional de Geomorfologia Porto, pp 81-86.
- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J., Marques, F., Queiroz, G., Ramos, T., Gonçalves, M. (2009a). *Caracterização hidrológica e geotécnica de solos vulcânicos pomíticos com vista à integração em modelos determinísticos para a avaliação da estabilidade de vertentes no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores)*. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Volume VI, APGEOM, Braga, pp 127-132.
- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J., Queiroz, G., Marques, F. (2009b). *Aplicação de um modelo hidrológico e geotécnico à instabilidade de vertentes desencadeada por precipitação intensa no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores)*. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Volume VI, pp 133-138.

- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J., Marques, F., Queiroz, G. (2008). *Geotechnical and hydrological characterization of pyroclastic soils in Povoação County (S. Miguel island, Azores) for modelling rainfall-triggered shallow landslides*. Poster, European Geosciences Union General Assembly 2008, Vienna, Austria.
- Amaral, P. (2005). *Monitorização de vertentes instáveis no concelho da Povoação, ilha de S. Miguel (Açores): Ensaios com base na utilização de uma estação total*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 151 p.
- American Society for Testing and Materials (2006). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System): ASTM D 2487 – 06*.
- American Society for Testing and Materials (2004). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions: D 3080 – 04*.
- American Society for Testing and Materials (2000). (Modified): *Classification of Soil and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes: AASHTO M-145-91*.
- Azevedo, E. M. V. B., Rodrigues, A.C. (2001). *Plano Regional da Água; Relatório da Fase I; Caracterização e Diagnóstico da situação actual; Temas: Clima, Hidrografia e Recursos Hídricos*. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores.
- Blong, R. (s.d.). *Discontinuous gullies on the Volcanic Plateau*. University of Waikato. pp 87-99. [Consultado a 27 de Junho de 2014]. URL: http://www.hydrologynz.co.nz/downloads/JoHNZ_1966_v5_2_Blong.pdf
- Bommer, J., Rolo, R., Mitroulia, A., Berdousis, P. (s.d.). *Geotechnical Properties and Seismic Slope Stability of Volcanic Soils*. 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper Reference 695. 10 p. [Consultado a 27 de Junho de 2014] URL: <http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/ElsalvadorEQ/EQbommersoils.pdf>
- Booth, B., Croasdale, R., Walker, G.P.L., (1978). *A quantitative study of five thousand years of volcanism on Sao Miguel, Azores*. Phil. Transactions of the Royal Society of London, Series A, v. 288, pp 271-319.
- Brissos, J. (2013). *Avaliação de risco de instabilidade de arribas no troço Sines - Zambujeira do Mar (SW Alentejano)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 159 p.
- Brum Ferreira, A. (2005). *Geodinâmica e Perigosidade Natural nas Ilhas dos Açores*. Finisterra, XL, 79, 2005, pp 103-120.
- Cadima, J. (2010). *Estatística Multivariada: Capítulo 4 - Análises Classificatórias (Clustering)*. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, pp 117-140.

- Carmo, R. (2004). *Geologia estrutural da região Povoação-Nordeste (ilha de S. Miguel, Açores)*. Dissertação de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade em Vulcanologia. Universidade dos Açores, Departamento de Geociências, 121 p.
- Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos (CVARG). *Sismos históricos registados no Arquipélago dos Açores*. [Consultado a 18 de Agosto de 2014]. URL: <http://www.cvarg.azores.gov.pt/>.
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1999). *Metodologia 6300 – Amostragem do solo*. Projeto CETESB-GTZ, 11/1999, 44 p.
- CLIMAAT (2005). Precipitação acumulada (mm), ilha de São Miguel. Universidade dos Açores. [Consultado a 1 de Agosto de 2014]. URL: <http://www.climaat.angra.uac.pt/>.
- Cole, P., Guest, J., Queiroz, G., Wallenstein, N., Pacheco, J., Gaspar, J., Ferreira, T., Duncan, A. (1999). *Styles of volcanism and volcanic hazards on Furnas volcano, São Miguel, Azores*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 92 (1999), pp 39–53.
- Cole, P., Queiroz, G., Wallenstein, N., Gaspar, J., Duncan, A., Guest, J. (1995). *An historic subplinian/phreatomagmatic eruption: the 1630 AD eruption of Furnas volcano, São Miguel, Azores*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 69 (1995), pp 117-135.
- Cordeiro, S. (2011). *Monitorização de Fluoretos na Água Captada para Consumo Humano no Concelho de Ponta Delgada (São Miguel – Açores)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade dos Açores. Ponta Delgada, 133 p.
- Costa, A. (2006). *Atlas Hidrogeológico das águas minerais dos Açores*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Universidade dos Açores. Departamento de Geociências, 146 p.
- Coutinho, J. (1999). *Agregados para Argamassas e Betões*. Materiais de Construção I. Faculdade de Engenharia do Porto. Porto, 132 p.
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996). *Landslide types and processes*. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides: investigation and mitigation (Special Report). Washington, DC, USA: National Research Council, Transportation and Research Board Special Report 247, pp 36-75.
- Cruz, J., Amaral, C., Figueiredo, J. (2004). *Água subterrânea no maciço do Nordeste (arquipélago dos Açores, Portugal): composição química e processos mineralizadores*. Boletín Geológico y Minero, 115, Núm. Especial, pp 379-390.
- Cruz, V. & Brito, A.G. (2002). *Contribuição da hidrogeologia para o planeamento e a gestão sustentável da água no arquipélago dos Açores*, 15 p.
- Desta, L. & Aduagna, B. (2012). *A Field Guide on Gully Prevention and Control*. Nile Basin Initiative. Ethiopia , 67 p.

- DROTRH, (2001). *Plano Regional da Água - Relatório Técnico - Versão para Consulta Pública*. Secretaria Regional do Ambiente, Direção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, 414 p.
- Duncan, A.M., Queiroz, G., Guest, J.E., Cole, P.D. (1999). *The Povoação Ignimbrite, Furnas Volcano, São Miguel/Azores*. J. Volcanol. Geotherm. Res.,92, pp 55-65.
- Fernandes, J. (2004). *Caracterização Climática das Ilhas de São Miguel e Santa Maria com Base no Modelo Cielo*. Relatório de estágio realizado no âmbito e apoio do projecto CLIMAAT. Universidade dos Açores, Terceira, 85 p.
- Fernández, S. (2011). *Análisis Correspondencias Simples y Múltiples*. Faculdade de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad Autonoma de Madrid. Madrid, 56 p.
- Filizola, H., Filho, G., Canil, C., Souza, M., Gomes, M. (2011). *Controle dos Processos Erosivos Lineares (ravinas e voçorocas) em Áreas de Solos Arenosos*. Embrapa Meio Ambiente, Circular Técnica, 22, 1ª edição eletrônica, 7 p.
- Forjaz, V.H., (1999). *Alguns vulcões de S.Miguel. I Parte*. Observatório Vulcanológico e Geotérmico, Ponta Delgada, 160 p.
- Forjaz, V.H., (1984). *Esboço tectónico da região dos Açores*. Universidade dos Açores, Ponta Delgada. Doc. Int. Dep. Geociências, 1 p.
- França, Z., Cruz, J., Nunes, J., Forjaz, V. (2003). *Geologia dos Açores: Uma perspectiva actual*. Açoreana 10 (1), 101 p.
- Freire, P., (2006). *Águas Minerais da ilha de São Miguel (Açores): Caracterização Hidrogeológica e Implicações para a Monitorização Vulcanológica*. Dissertação de Mestrado. Universidade dos Açores, 173 p.
- Galas, N. (2006). *Uso de Vegetação para Contenção e Combate à Erosão em Taludes*. Trabalho de Conclusão de Curso para Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Anhembí Morumbi. São Paulo, 64 p.
- Gaspar, J. L., Queiroz, G., Ferreira, T., Wallenstein, N., Coutinho, R., Trota, A., Valadão, P., Alves, P. (2001). *Plano Municipal de Emergência do Concelho da Povoação, Ilha de S.Miguel*. Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos. Universidade dos Açores.
- Gaspar, J. L., Ferreira, T., Queiroz, G., Wallenstein, N., Pacheco, J. M., Guest, J. E., Duncan A. M., Cole, P. (1995). *Evolução morfoestrutural do vulcão das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores)*. Memória nº4 do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, pp 999-1003.
- Ghosh, S. & Bhattacharya, K. (2012). *Multivariate erosion risk assessment of lateritic badlands of Birbhum (West Bengal, India): A case study*. J. Earth Syst. Sci. 121, No. 6, December 2012, pp. 1441-1454.

- Gomes, C. (2011). *O Conceito de Carácter da Paisagem e a sua Aplicação na Gestão de Áreas Protegidas: Caso de Estudo dos Açores*. Tese de Doutoramento em Arquitectura Paisagística. Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa, 382 p.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford Univ. Press, New York, XIV +, 483 p.
- Gourc, J., Palmeira, E. (s.d.). Geossintéticos em Drenagem e Filtração. [Consultado a 1 de Agosto de 2014]. URL: <http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>, 2 p.
- Guest, J., Gaspar, J., Cole, P., Queiroz, G., Duncan, A., Wallenstein, N., Ferreira, T., Pacheco, J. (1999). *Volcanic geology of Furnas Volcano, São Miguel, Azores*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 92 (1999), pp 1–29.
- Heede, B., Research Forester (1960). *A Study of Early Gully-Control Structures in the Colorado Front Range*. US Department of Agriculture, 38 p.
- Highland, L.; Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. US Geological Survey, Circular 1325, 129 p.
- Imeson, A. & Curfs, M. (s.d.). *Erosão do solo*. Projecto Lucinda, 14 p. [Consultado a 27 de Junho de 2014]. URL: http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/booklets/B1_Booklet_Final_PT.pdf
- INE, Instituto Nacional de Estatística I.P. (2012). Recenseamento geral da população e da habitação (Região Autónoma dos Açores) - Censos 2011. Disponível em URL: <http://www.ine.pt>.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford Univ. Press, New York, 561 p.
- Instituto Superior Técnico (2009). Apoio ao Segundo Trabalho - Ensaio Triaxial: Descrição do ensaio e tratamento dos resultados. Mecânica dos Solos e das Rochas 2008-2009. Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Lisboa, 10 p.
- Jones, G., Chester, D., Shooshtarian, F. (1999). *Statistical analysis of the frequency of eruptions at Furnas Volcano, São Miguel, Azores*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 92, pp 31–38.
- Keller, G. & Sherar, J. (2003). *Chapter 14: Stabilization of Gullies*. USDA Forest Service/USAID. Low-Volume Roads Engineering Best Management Practices Field Guide, pp 141-146.
- Kummer, L., Melo, V.F., Barros, Y. & Azevedo, J.C. (2010). *Uso da Análise de Componentes Principais para agrupamento de amostras de solos com base na granulometria e em características químicas e mineralógicas*. Scientia Agraria, Curitiba, v.11, n.6, Nov./Dec. 2010, pp 469-480.

Laboratório de Paisagem das Furnas (2012). *Projeto de Recuperação Ecológica e Paisagística da Bacia Hidrográfica da Lagoa das Furnas*. [Consultado a 12 de Setembro de 2014]. URL: <http://www.furnaslandlab.azores.gov.pt/>.

Lamas, P. (2013). *Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes: Parte A*. Mestrados em Engenharia Geológica do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Monte de Caparica, 57 p.

Landcaveric, (2014). Exemplo do caso de erosão laminar [Consultado a 4 de Agosto de 2014]. URL: <http://www.landcarevic.net.au/resources/publications/books/manual/landcare-field-guide/soil-erosion/sheet-erosion>.

LNEC (1969). *Norma Portuguesa NP – 143: Determinação dos limites de consistência*. Lisboa.

LNEC (1968). *Especificação E 218: Prospeção geotécnica de terrenos: colheita de amostras*.

LNEC (1968). *Especificação E 219: Prospeção Geotécnica de Terrenos: Vocabulário*.

LNEC (1966). *Especificação E 195: Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*.

LNEC (1965). *Norma Portuguesa NP – 84: Determinação do teor em água*. Lisboa.

Madeira, J. (2007). *A Erupção dos Capelinhos e o Vulcanismo nos Açores*. Boletim do Núcleo Cultural da Horta, 16. Ilha do Faial, pp 29-44.

Marques, R. (2014). *Avaliação da suscetibilidade de movimentos de vertente e desenvolvimento de um sistema de alarme para eventos de instabilidade hidro-geomorfológica no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores)*. Tese de doutoramento. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. Ponta Delgada.

Mingoti, S. A. (2005). *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: UFMG. 297 p.

Modelo CIELO, (1996). Universidade dos Açores. Modelo elaborado por Azevedo. [Consultado a 1 de Agosto de 2014]. URL: <http://www.climaat.angra.uac.pt/>.

Moore, R.B. (1991). *Geologic Map of São Miguel, Azores, at scale 1:50000*. U.S.G.S. Miscellaneous investigations series, map I-2007.

Moore, R.B., (1990). *Volcanic geology and eruption frequency, São Miguel, Azores*. Bull. Volcanol., 52, pp 602-614.

Morais, C. (2005). *Escalas de Medida, Estatística Descritiva e Inferência Estatística*. Escola Superior de Educação, Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 29 p.

Mota, A. (2007). *Comparação de duas Metodologias Multivariadas no Estudo de Similaridade entre Fragmentos de Floresta Atlântica*. Dissertação de Mestrado em Biometria. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Brasil, 45 p.

Natural Resource Management of the Northern Territory Government (s.d.). *Gully Rehabilitation & Stabilisation*. Land Notes – Natural Resource Management. Australia, 5 p. [Consultado a 27 de Junho de 2014]. URL: <http://wildlife.lowecol.com.au/files/Gully-Rehabilitation.pdf>

Ngapo, Robson, B., Douglas, J., Pickles, S., McKay, D. (2013). *Erosion and sediment control for forestry operations: Guidelines*. Bay of Plenty Regional Council. New Zealand, 66 p.

Nogueira, W., Alves, G., Negreiros, J. (2011). *Modelação Espacial da Concentração de Sulfatos na Bacia Hidrográfica do Tejo*, 8 p.

Nunes, J., Forjaz, V.H., Oliveira, C.S. (2004). Catálogo Sísmico da Região dos Açores, versão 1.0 (1850-1998). SÍSMICA 2004 – 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, pp 349-358.

Palha, C. (2008). *Solos, Caracterização, classificação e utilização*. Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho, 45 p.

Pereira, H. (1983). *Métodos Gerais de Análise de Dados*. Encontros sobre métodos quantitativos aplicados às variáveis regionalizadas. Instituto Nacional de Investigação Científica. Lisboa, pp 45-69.

Polacci, M. (2012). *Ash Characterization*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Pisa. Itália, 48 p.

Ponce Álvares, M. & Pimenta, M. (1998). *Erosão Hídrica e Transporte Sólido em Pequenas Bacias Hidrográficas*. Atas do 4º Congresso da Água, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. 9 p. [Consultado a 1 de Agosto de 2014]. URL: <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/149.pdf>

Projectista, 2014. Dimensões dos gabiões e diferentes malhas (arame, bordadura, atar e tirantes) utilizados pela entidade Santos Moura Porto, Lda. [Consultado a 12 de Setembro de 2014]. URL: <http://www.projectista.pt>.

Queiroz, G., Gaspar, J.L., Cole, P.D., Guest, J.E., Wallenstein, N., Duncan, A.M., Pacheco, J., (1995). *Erupções vulcânicas no vale das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores) na primeira metade do século XV*. Açoreana, 8 (1), pp 159-165.

Ramos, M. (2008). *Matos do Parque Natural de Montesinho - Erosão Hídrica e Dinâmica do Carbono: Um estudo à micro-escala com Simulação de Chuva*. Tese de Mestrado em Gestão e Conservação da Natureza. Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança, 85 p.

Rede Hidrometeorológica dos Açores, RHRAA. Secretaria Regional da Agricultura e Ambiente Direção Regional do Ambiente. [Consultado a 25 de Agosto de 2014]. URL: <http://servicos-sraa.azores.gov.pt/morhi/>.

Ricardo, R.P., Madeira, M.V., Medina, J.M.B., Marques, M.M., Furtado, A.F.S. (1977). *Esboço pedológico da ilha de S.Miguel (Açores)*. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 37, pp 275-385.

Rowland-Smith, A. (2007). *The 1630 AD Eruption of Furnas Volcano, São Miguel, Azores (Portugal): Chemical Variations and Magmatic Processes*. Thesis for the degree of Master of Science, Department of Geology, Faculty of Miami University. Oxford, Ohio, 36 p.

Roxo, S. (2011). *Integração de informação secundária na modelação geoestatística da qualidade de solos em locais potencialmente contaminados. Aplicação à área subjacente de uma antiga refinaria*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Georrecursos). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 64 p.

Santos, E. (2006). *Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas aos Solos Tropicais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil: Transportes. Universidade de São Paulo, São Paulo, 99 p.

Santos, L. (2013). *Calcretos no Alentejo - Contributo para a sua caracterização geotécnica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 74 p.

Santos, M., Pacheco, D., Santana, F., Rodrigues, A. (2004). *A Eutrofização das Lagoas das Sete-Cidades e Furnas (S. Miguel – Açores): Análise evolutiva entre 1988 e 2002*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 7º Congresso da Água, 16 p.

Sampaio, E. (2006). *Mineralogia do solo*. Departamento de Geociências da Universidade de Évora. Évora, 21 p.

Silva, C. (2010). *Análise da Evolução da Ocupação e Uso do Solo no Concelho de Angra do Heroísmo: Influência nos Movimentos de Terreno e de Vertente*. Dissertação de Mestrado em Arquitectura Paisagista. Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 86 p.

Silveira, D. (2002). *Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 149 p.

Simões, D. (2013). *Modelação Espacial da Erosão Hídrica do Solo Aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)*. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica em Recursos Agro-Florestais e Ambientais, Especialização em Análise de Informação Geográfica. Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco. Castelo Branco, 74 p.

Shin, E. & Rao G. (s.d.). Geossintéticos no Controle de Erosão. [Consultado a 1 de Agosto de 2014]. URL: <http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>, 2 p.

Soares, A. (2000). *Geoestatística Aplicada às Ciências da Terra e do Ambiente*. IST Press, Lisboa, 206 p.

Soares, A. (1989). *Morfologia Geoestatística de Recursos Minerais*. Dissertação de Doutoramento, LMPM/IST-UTL. Lisboa, 136 p.

Sousa, P. (2011). *Limite de Liquidez – Correlações e Comparações entre os Métodos de Fall Cone e da Concha de Casagrande*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Monte de Caparica, 111 p.

Sousa, P. & Sousa, J. (2001). *Programa ANDAD (Versão 7.10) - Manual do utilizador*. CVRM – Centro de Geosistemas do IST. Lisboa.

Trigo R.M., Osborn T.J., Corte-Real J.M. (2002). *The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms*. Climate Research, 20, pp 9-17.

Trota, A.N. & Pereira, M.J. (2013). *História Natural dos Açores. 2ª edição*. Universidade dos Açores, Ponta Delgada. 113 p.

Trota, A. N. (2009) - *Estudos de deformação crustal nas ilhas de S. Miguel e Terceira (Açores): Avaliação da actividade vulcânica na área do Fogo/Congro (S.Miguel)*. Dissertação no Ramo de Geologia, especialidade Geodesia. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 305 p.

Valadão, P. (2002). *Contribuição para o estudo de movimentos de vertente nos Açores*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 120 p.

Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall, Madrid, 715 p.

Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. Schuster, R. L.; Krizek, R. J. (Eds.), Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report, 176, Washington, D. C, pp 11-33.

Wallenstein, N. (1999). *Estudo da história 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. Universidade dos Açores, Departamento de Geociências. Ponta Delgada, 266 p.

Wordpress, (2014). Fases do processo de erosão por salpico. [Consultado a 4 de Agosto de 2014]. URL: <http://cienciasressurp.wordpress.com/>.

Working Party on World Landslide Inventory, WP/WLI (1993). *A suggested method for describing the activity of a landslide*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 47, Paris, pp 53-57.

Zbyszewski, G. (1961). *Étude géologique de l'île de S. Miguel (Açores)*. Comun. Serv. Geol. Portugal, 45, pp 5-79.

Zbyszewski, G., Almeida, F.M., Ferreira, O.V., Assunção, C.T. (1958). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000; notícia explicativa da folha "B" da ilha de S. Miguel (Açores)*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa, 37 p.

Zbyszewski, G., Ferreira, O.V., Assunção, C.T. (1959a). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000; notícia explicativa da folha "A" da ilha de S. Miguel (Açores)*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa, 22 p.

Zêzere, J. (2005). *Dinâmica de vertentes e risco geomorfológico*. Centro de Estudos Geográficos, Relatório n.º41, Lisboa, 128 p.

Anexos

ANEXO I – Mapas de isopacas e de isopletas

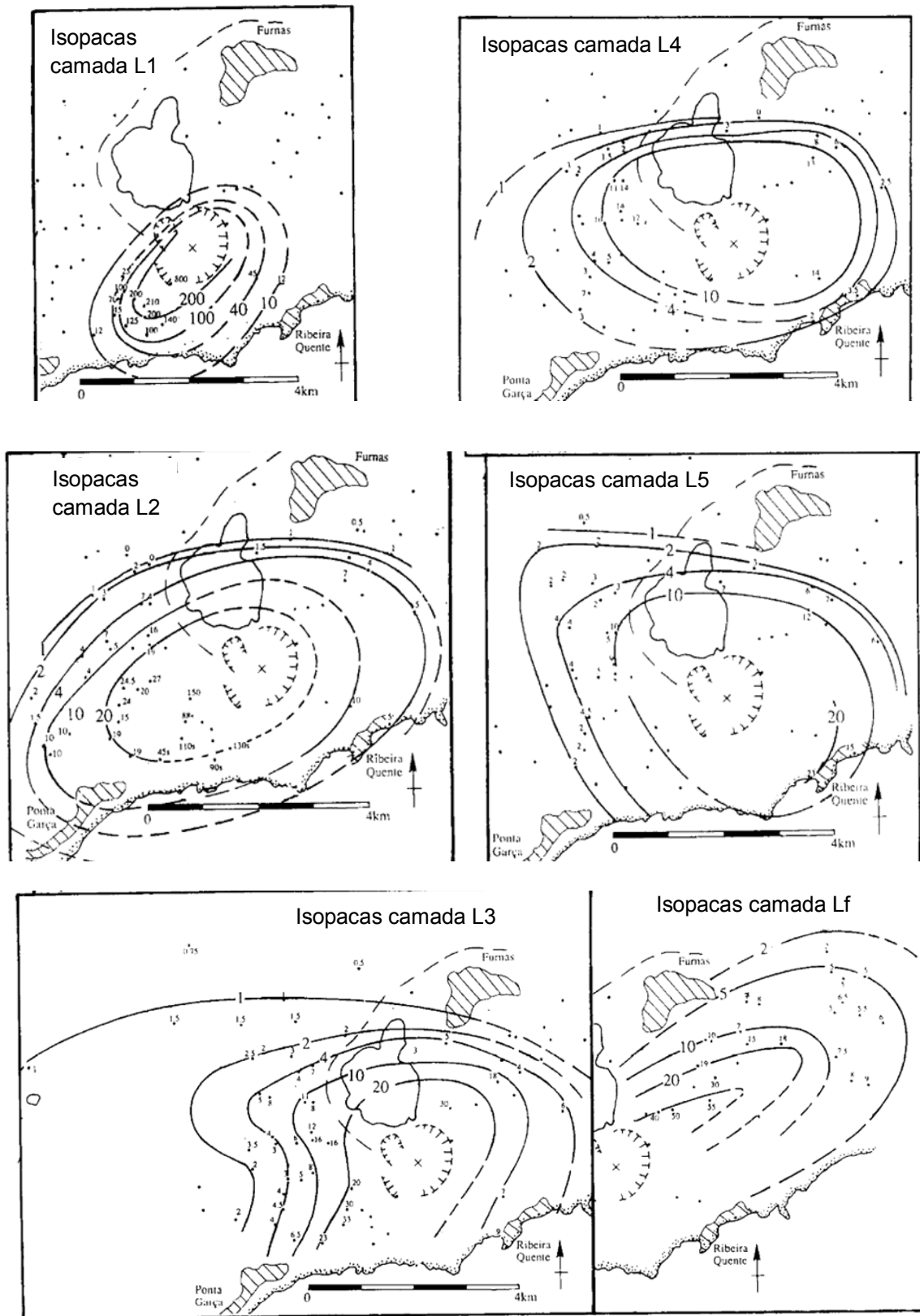


Figura 1 - Mapas de isopacas das camadas de piroclastos da erupção de 1630 (Cole et al., 1995)

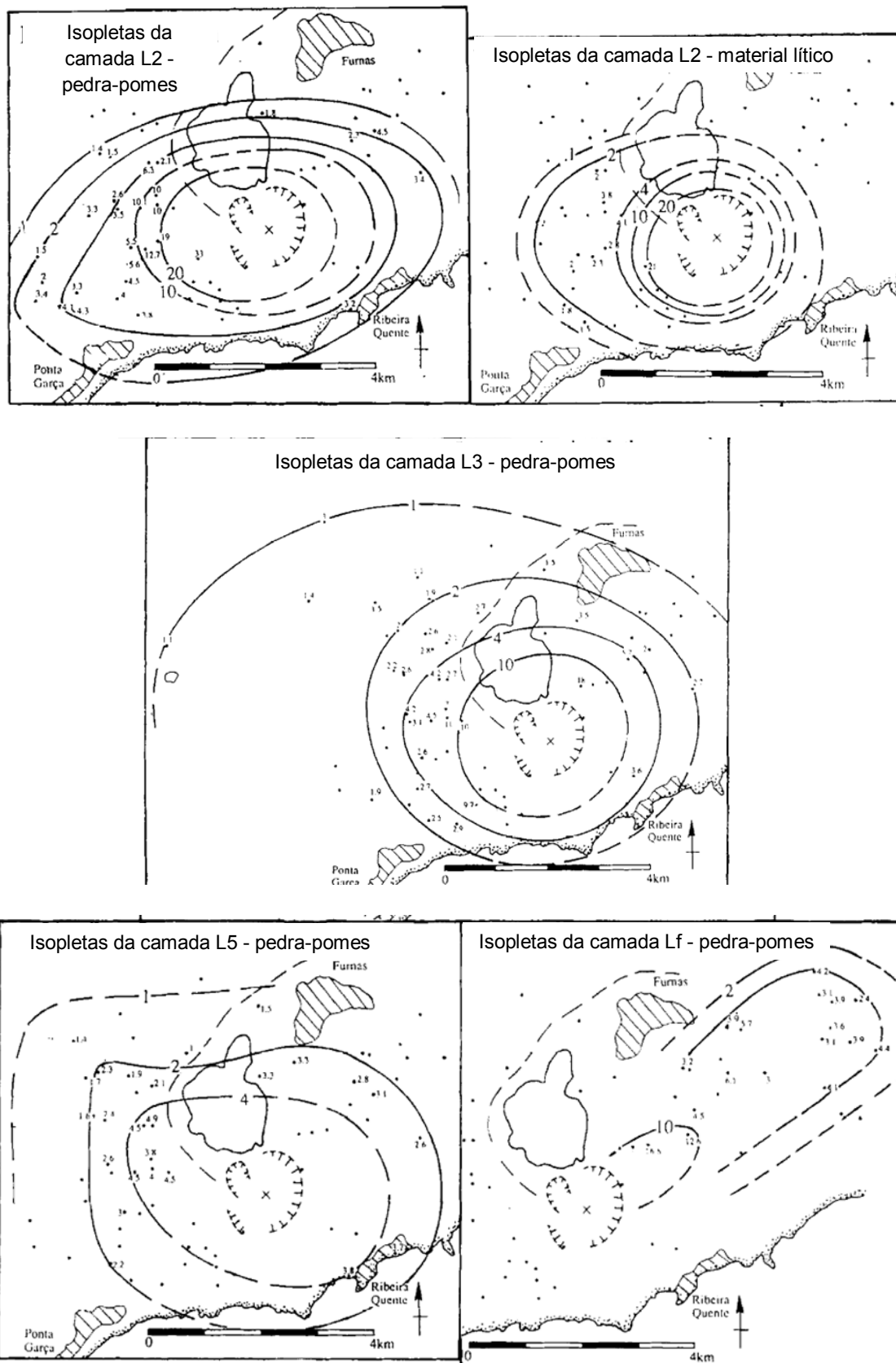


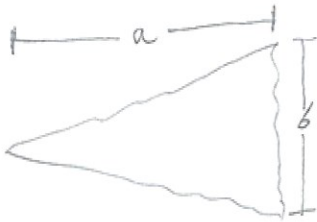
Figura 2 - Mapas de isopletas das camadas de piroclastos da erupção de 1630 (Cole et al., 1995)

Anexo II - Folhas de registro

FOLHA DE REGISTO

Data 27 Dez. 13

RB 1: direção N 80° W
van Zinho



Elementos morfométricos

a (m): 21,88

b (m): $b_1 = 3,37; b_2 = 2,40; b_3 = 6 = 6,67$

a/3 (m): 7,29

h1 (m): 1,93

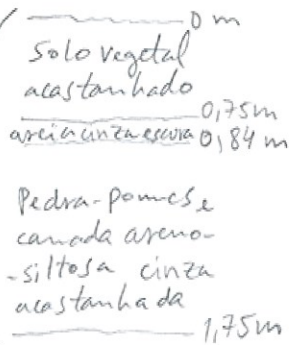
h2 (m): 2,42

h3 (m): —

Geologia/Tectónica

(não está à escala)

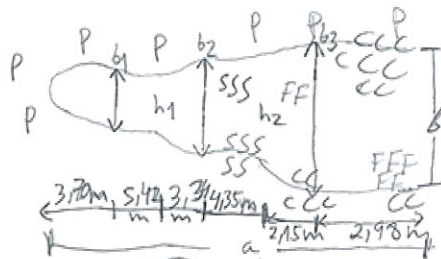
Na "cabeça" da
ravina



Vegetação

P: pasto
C: conteiras
F: Fetos
S: silvado

←
Medições
(m)



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala)

Esqueletos

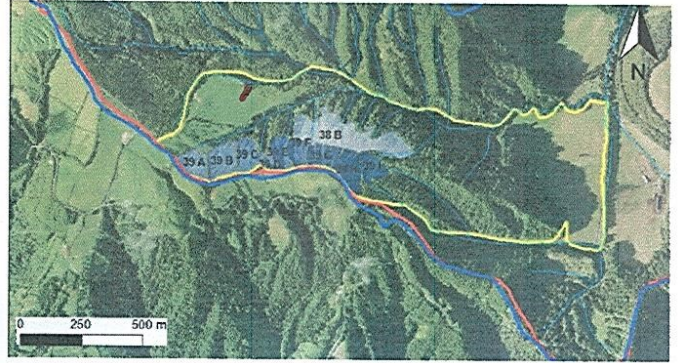
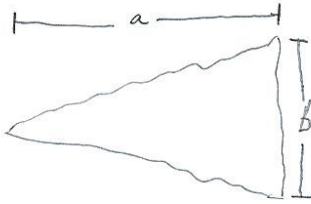


Outros: Sem medidas implementadas. Recolha de amostra
indeformada (AM1) e amostra deformada (AM2).

FOLHA DE REGISTO

Data 27 Dez, 13

RB 2: direção N30°E
Van Zinho



Elementos morfométricos

a (m): 25,77

b (m): 7,90, $b_1 = 5,57$

a/3 (m): 8,59

h1 (m): 1,02

h2 (m): 2,29

h3 (m): 2,46

Geologia/Tectónica

(não está à escala)

Solo vegetal 0 m
acastanhado 0,26 m

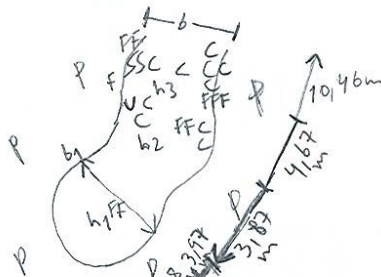
Na "cabeça" da
Ravina

Pedra-pomes e
camada solo areno-
siltoso, cinza 0,67 m
solo arenoso, castanho
escuro, com pedra-pomes 1,02 m

Vegetação

P: Pasto
C: conteira
F: Feto
U: Urze
S: Silvado

↳ medições (m)



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala)

Escorregamentos



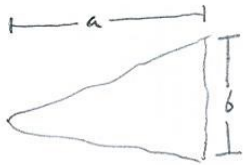
→ linha de água →

Outros: Sem medidas implementadas.

FOLHA DE REGISTO

Data 3 Jan. 14

RB4 : direção N70°W
VanZinho



Elementos morfométricos

a (m): 18,37
 b (m): 4,59 ; b1 = 7,39
 a/3 (m): 6,12
 h1 (m): 0,8
 h2 (m): 1,3
 h3 (m): >5

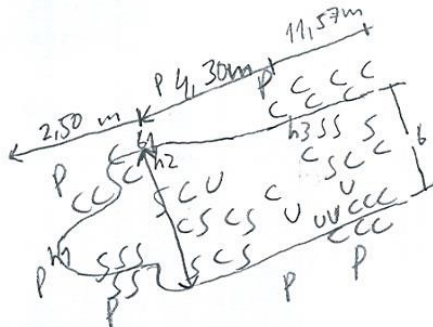
Geologia/Tectónica

Sem dados

Vegetação

P: pasto
 C: conteira
 U: urze
 S: silvado

← medições (m)



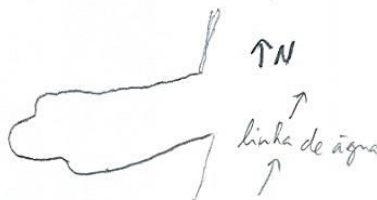
Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N): dissipadores de energia, a montante da ravina em madeira (trancos de criptoméria).

Esboço : (não está à escala)

— dissipadores de energia

5,32m

4,78m

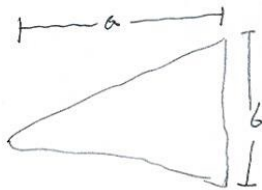


Outros: Interior da ravina inacessível.

FOLHA DE REGISTO

Data 3 Jan. 14

RBS : direção N80°W
 parcela 39A



Elementos morfométricos

a (m): 6,60

b (m): -

a/3 (m): 2,20

h1 (m): -

h2 (m): -

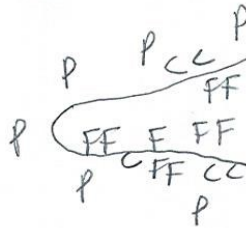
h3 (m): -

Geologia/Tectónica

Sem dados

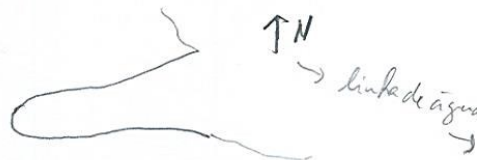
Vegetação

C: conteiras
 F: Fetos



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala)

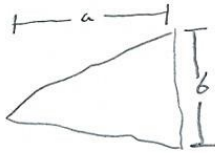


Outros: Sem medidas implementadas. Interior da ravina
inacessível.

FOLHA DE REGISTO

Data 3 Jan. 14

RBB: direção N
Pareda 39B



Elementos morfométricos

- a (m): 10,22
- b (m): 2,12; b₁ = 4,02
- a/3 (m): 3,40
- h1 (m): 0,92
- h2 (m): 0,77
- h3 (m): -

Geologia/Tectónica

(não está à escala)

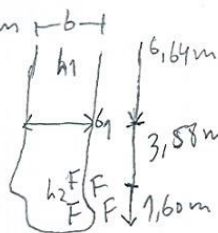
Na "cabeça" da
ranina

- solo vegetal 0 m
- acastanhado 0,14m
- solo areno-siltoso acinzentado 0,28m
- solo siltoso castanho escuro 0,43m
- solo areno-siltoso cinza-acastanhado 1,14m

Vegetação

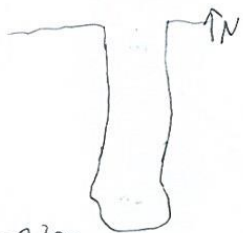
F: Fetos

← Medições (m)



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N): dissipado res de energia, a montante da Esboço: (não está à escala) → linha de água → ranina, em madeira (trancos de incenso).

— dissipadores de energia



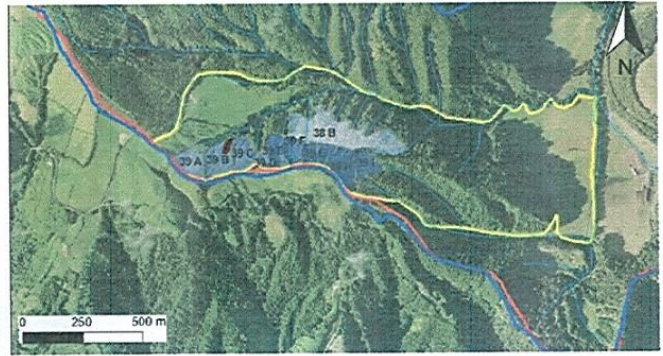
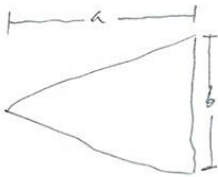
1,67 m
2,14 m
3,30 m

Outros: _____

FOLHA DE REGISTO

Data 3 Jan. 14

RB7 : direção N40°E
Parcela 39B



Elementos morfométricos

a (m): 81,03

b (m): 9,20 ; b1 = 6,38

a/3 (m): 27,67

h1 (m): 1,46

h2 (m): -

h3 (m): -

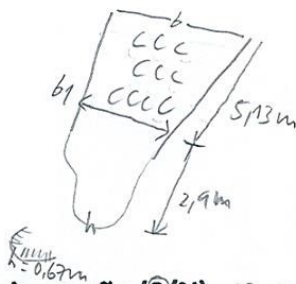
Geologia/Tectónica

Sem dados

Vegetação

C: contêras

→ medições (m)



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N): dissipadores de energia, a montante da ravina,

Esboço: (não está à escala)

— dissipadores de energia

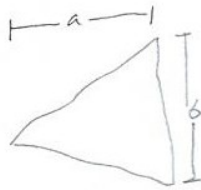


Outros: 1,65m

FOLHA DE REGISTO

Data 3 Jan. 14

RB8 : direção N60°E
Parcela 39C



Elementos morfométricos

a (m): 7,52

b (m): 5,10

a/3 (m): 2,50

h1 (m): -

h2 (m): -

h3 (m): -

Geologia/Tectónica

Sem dados

Vegetação

c: couceiras
k: criptoméria



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala)

→ linha de água →

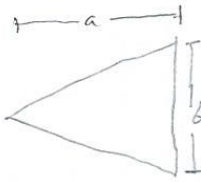


Outros: Sem medidas implementadas.

FOLHA DE REGISTO

Data 10 Jan. 14

R B9; direção N40°E, N80°E, N60°E
Parcela 39c



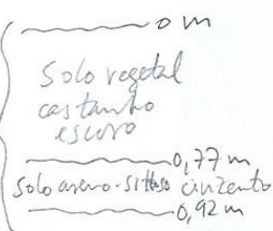
Elementos morfométricos

- a (m): 11,85
- b (m): 6,90 ; b1 = 5,89
- a/3 (m): 3,95
- h1 (m): 0,87
- h2 (m): 0,87
- h3 (m): 1,10

Geologia/Tectónica

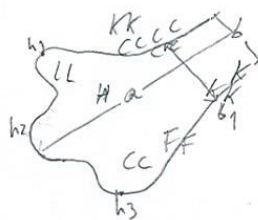
(não está à escala)

Na "cabeça" da
ravina (h3)



Vegetação

- C: conteiras
- k: criptoméria
- H: Millex = azerinho
- L: labacas
- F: Feto



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala)

Escorregamentos

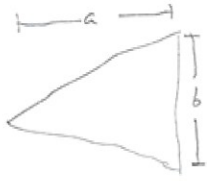


Outros: sem medidas implementadas.

FOLHA DE REGISTO

RB 10: direção N20°E
Parcela 38B

Data 10 Jan. 14



Elementos morfométricos

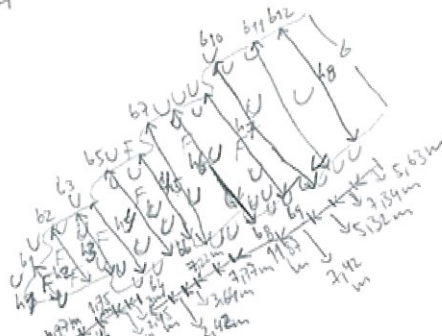
- a (m): 74,5
- b (m): 11,3; b1=7,14; b2=6,40; b3=7,92; b4=8,73;
- a/3 (m): 24,83 b5=7,65; b6=9,60; b7=12,55; b8=7,37
- h1 (m): 0,95 b9=6,86; b10=10,60; b11=7,77; b12=12,24
- h2 (m): 1,98
- h3 (m): 2,72
- h4 (m)=3,18; h5(m)=3,85; h6(m)=4,12; h7(m)=2,85
- h8 (m)=4,15

Geologia/Tectónica

- (Não está à escala)
- solo vegetal 0 m
 - castanho claro 0,2 m
- Na "babeça" da Ravina
- Solo areno-silteoso
 - castanho-cinzentado
 - com pedras pomes e líticas
 - 1,03 m

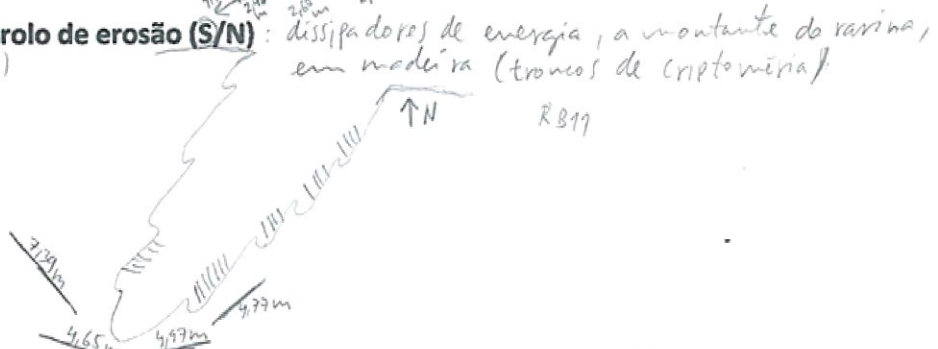
Vegetação

- F: Felos
- U: Urze
- ← Nutações



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

- Esboço: (não está à escala)
- dissipadores de energia
 - ▨ escorregamentos



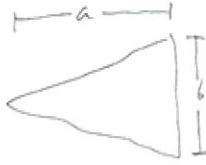
dissipadores de energia, a montante da ravina, em madeira (trancos de criptoméria)

Outros: Plantio de endémicas no interior e margens da ravina. Existência de escorregamentos nas margens da ravina.

FOLHA DE REGISTO

Data 10 Jan. 14

RB 11: direção N
Parcela 38 B



Elementos morfométricos

- a (m): 115
 b (m): 10,60; b1=12,65; b2=11,91; b3=13,75; b4=17,50; b5=16,36; b6=24,91; b7=11,50; b8=14,94; b9=8,61; b10=14,1; b11=7,75; b12=9,92; b13=8,82; b14=10,10m; b15=9,34m; b16=12,95m; b17=9,93m.
 a/3 (m): 38,30
 h1 (m): 1,37
 h2 (m): 3,00
 h3 (m): 3,26
 h4 (m): 3,70; h5 (m): 3,90; h6 (m): 4,40; h7 (m): 4,87
 h8 (m): 5,60; h9 (m): 6,00; h10 (m): 5,50; h11 (m): 5,90
 h12 (m): 4,40; h13 (m): 4,30.

Geologia/Tectónica

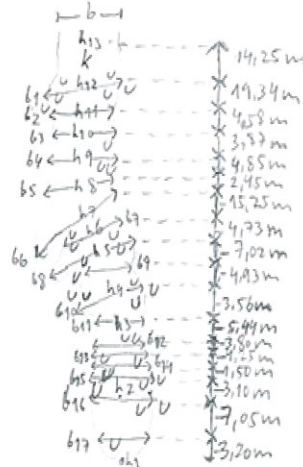
(Não está à escala)

Na "cabeça" da Ravina

- solo vegetal castanho escuro 0,30 m
- solo arenoso-siltoso castanho-acinzentado 0,58 m
- solo siltoso castanho escuro 1,15 m

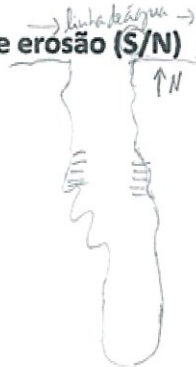
Vegetação

- U: urze
- k: criptoméria
- ← Redições (m)



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala) RB10
 [] escorregamentos



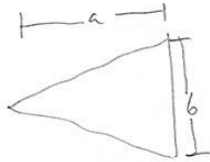
baragem de retenção no interior da ravina (em madeira). RB12

Outros: Plantio de endémicas no interior e margens da ravina. Existência de escorregamentos nas margens da ravina.

FOLHA DE REGISTO

Data 10 Jan. 14

RB12: direção N
Parcela 38B



Elementos morfométricos

- a (m): 30,0
- b (m): 6,9; $b_1=4,67$; $b_2=8,90$; $b_3=7,90$; $b_4=10,4$;
 $b_5=7,9$; $b_6=11,0$; $b_7=13,45$
- a/3 (m): 10,0
- h1 (m): 0,45
- h2 (m): 2,70
- h3 (m): 3,10 $h_4(m): 3,93$; $h_5(m): 3,50$; $h_6(m): 2,53$

Geologia/Tectónica

(Não está à escala) $\left\{ \begin{array}{l} \text{solo vegetal castanho escuro} \\ 0m \\ 0,12m \end{array} \right.$

Na "cabeça" da Ravina. $\left\{ \begin{array}{l} \text{solo arenoso-siltoso} \\ \text{acinzentado} \\ \\ \\ 0,96m \end{array} \right.$

Vegetação

- U: urze
 - F: Fatos
 - K: Kriptoméria
- ← Redutões (m)



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala) RB11

Escorregamento

RB13

Outros: Plantio de endemias no interior e margens da ravina. Existência de escorregamentos nas margens da ravina.

FOLHA DE REGISTO

Data 10 Jan. 14

RB13: direção N25°E
Parcela 38B



Elementos morfométricos

a (m): 44,0
 b (m): 13,2; b1=5,62; b2=3,91; b3=6,32; b4=10,88
 a/3 (m): 14,66 b5=3,95; b6=4,7; b7=4,45
 h1 (m): 0,86
 h2 (m): 2,00
 h3 (m): 2,02
 h4(m)=1,5; h5(m)=1,83; h6(m)=3,63; h7(m)=4,76

Geologia/Tectónica

(Não está à escala)

na "cabeça" da
Ravina

Solo vegetal castanho claro 0,10m
 Solo arenoso acinzentado 0,30m
 Solo grosseiro, arenoso-silteoso, com pedras pontas e material lítico, cinzento escuro 0,97m

Vegetação

U: urze
 F: Fitos
 K: criptonévia
 ← Medições (m)



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala)

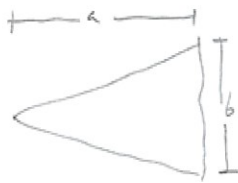
RB12



Outros: Plantio de endémicas no interior e margens da ravina.

FOLHA DE REGISTO

RB 14: direção N20°E
Parcela 38 B



Data 10 Jan 14



Elementos morfométricos

a (m): 3,0

b (m): 6,50

a/3 (m): 1,0

h1 (m): -

h2 (m): -

h3 (m): -

Geologia/Tectónica

Sem dados

Vegetação

c: conteiras



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

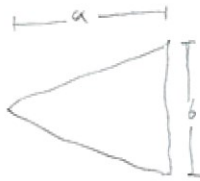
Esboço: (não está à escala)



Outros: Sem medidas implementadas. Acesso ao interior da várzea inacessível.

FOLHA DE REGISTO

RB15 : direção N
Parcela 396



Data 10 Jun. 14



Elementos morfométricos

a (m): 6,50

b (m): 12,0

a/3 (m): 2,16

h1 (m): 3,0

h2 (m): -

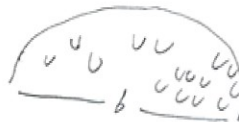
h3 (m): -

Geologia/Tectónica

Sem dados

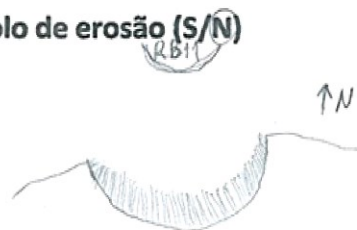
Vegetação

U: urze



Estruturas de retenção/controlo de erosão (S/N)

Esboço: (não está à escala)



Outros: Plantio de endémicas no interior da ravina.

ANEXO III – Perfis longitudinais das ravinas da zona do Vanzinho e algumas da parcela 38 B

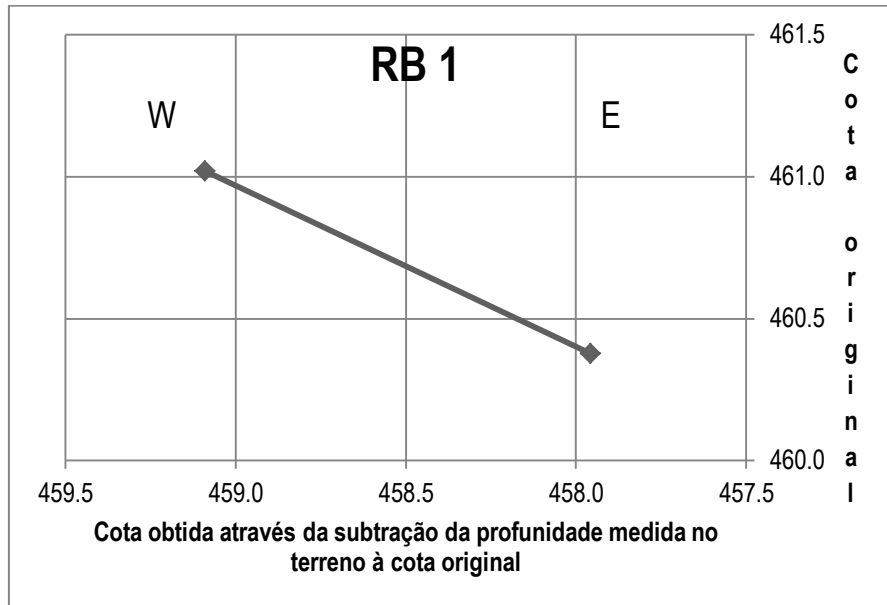


Gráfico 1 - Perfil longitudinal da ravina RB 1

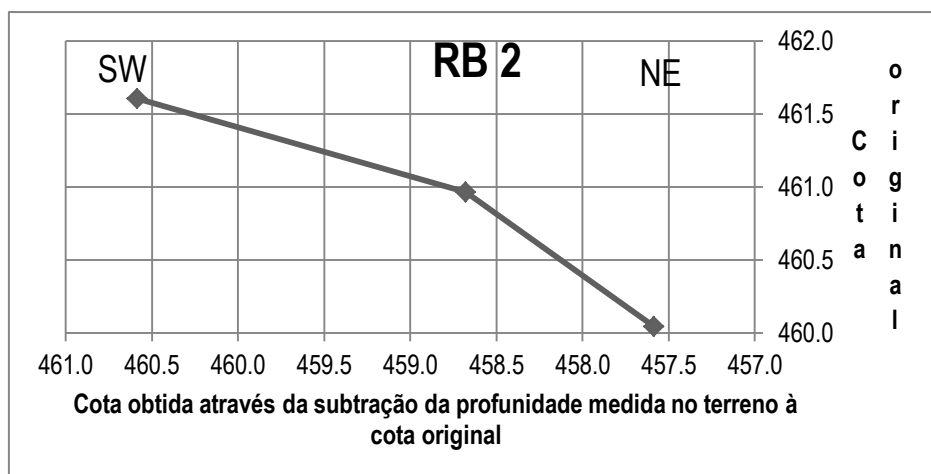


Gráfico 2 - Perfil longitudinal da ravina RB 2

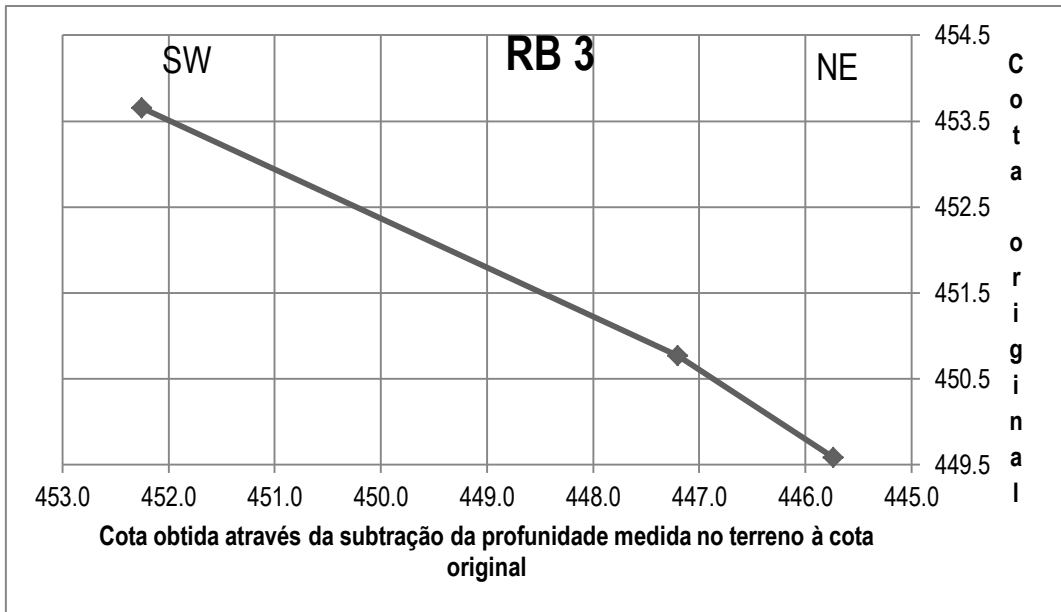


Gráfico 3 - Perfil longitudinal da ravina RB 3

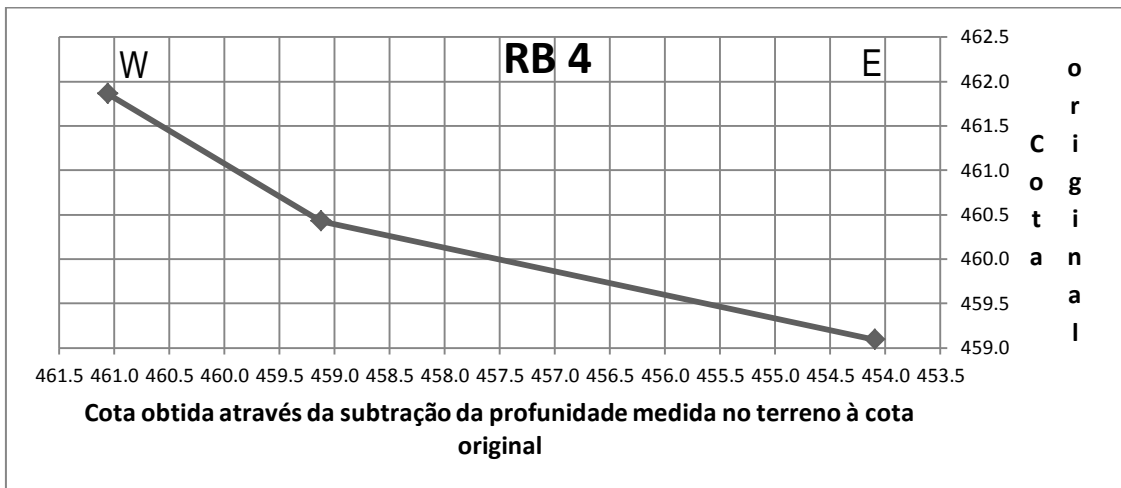


Gráfico 4 - Perfil longitudinal da ravina RB 4

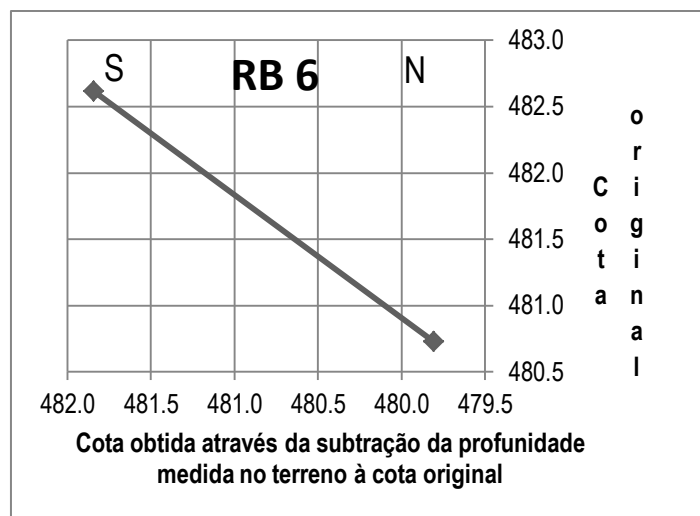


Gráfico 5 - Perfil longitudinal da ravina RB 6

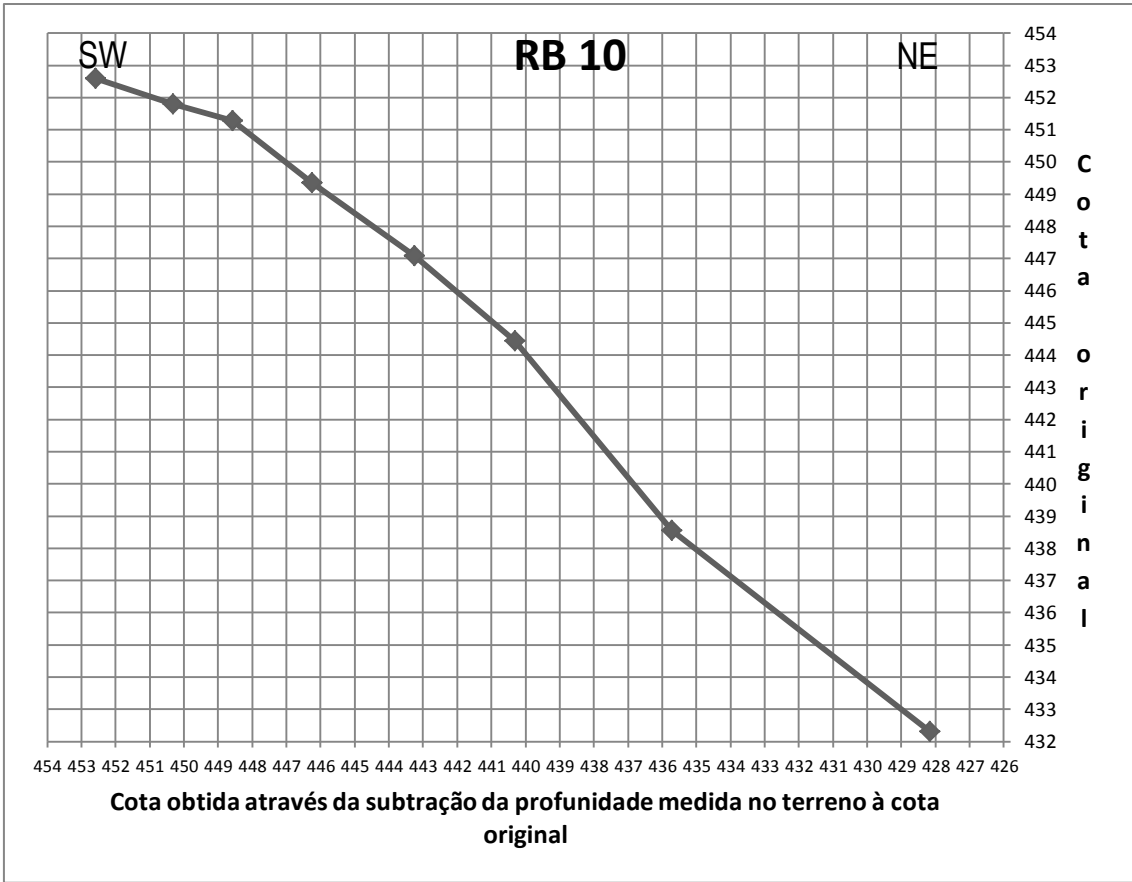


Gráfico 6 - Perfil longitudinal da ravina RB 10

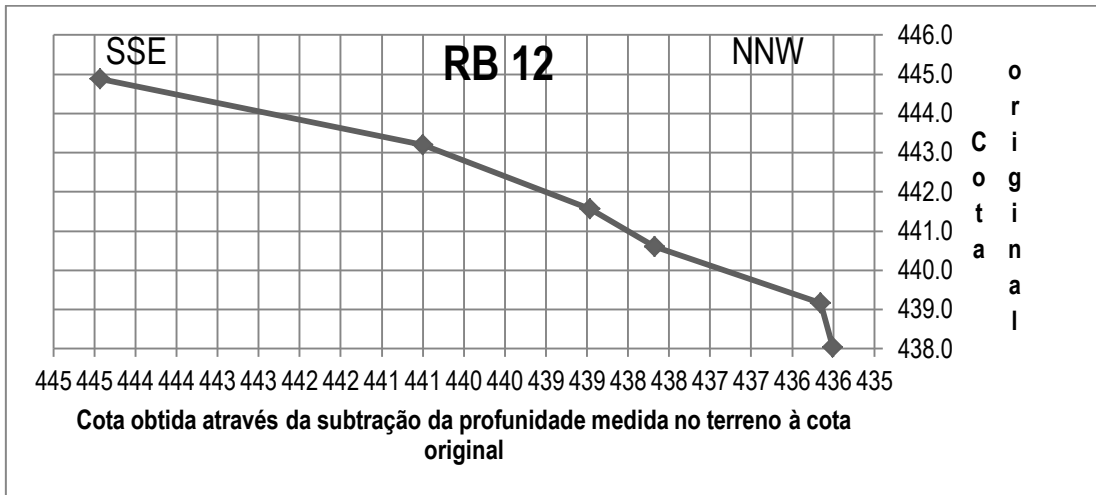


Gráfico 7 - Perfil longitudinal da ravina RB 12

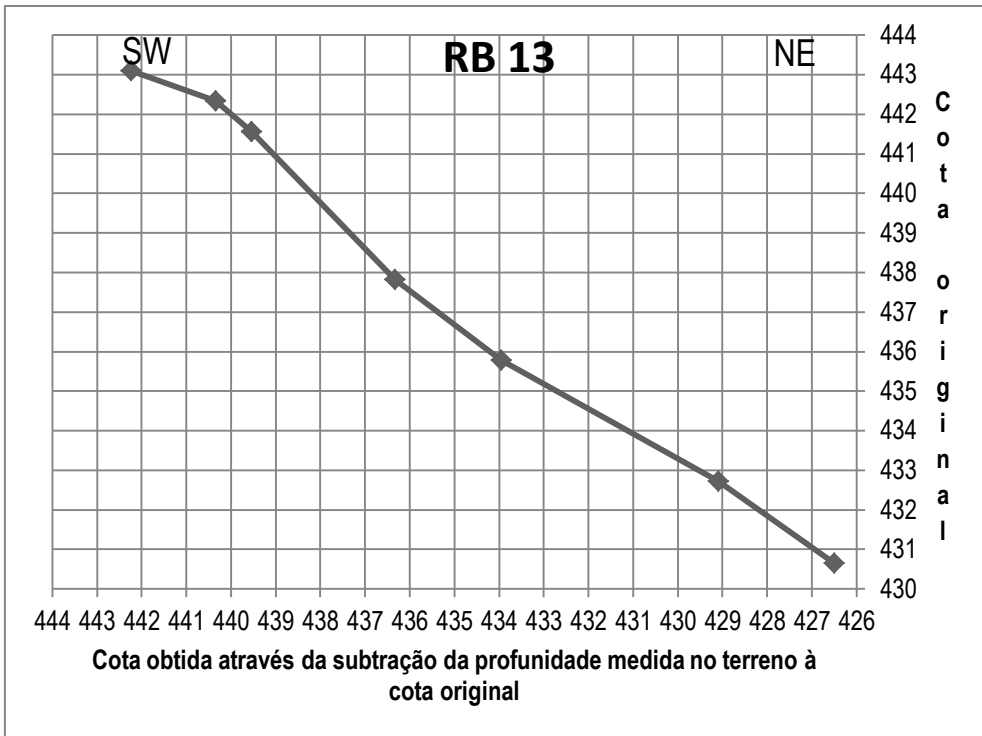


Gráfico 8 - Perfil longitudinal da ravina RB 13

Anexo IV - Descrição macroscópica das amostras recolhidas

Amostras	Descrição macroscópica
AM1	Solo castanho claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
AM2	Solo castanho claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T1	Solo castanho-escuro com textura média-grosseira, matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T2	Solo castanho-acinzentado escuro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T3	Solo castanho claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T4	Solo castanho claro com textura média-grosseira, matriz média e alguma pedra-pomes muito grosseira
T5	Solo castanho claro com textura média-grosseira, matriz média e alguma pedra-pomes muito grosseira
T6	Solo castanho-acinzentado com textura média (areias), matriz média e alguma pedra-pomes muito grosseira
T7	Solo castanho-acinzentado de textura média-grosseira, matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T8	Solo cinzento claro com textura fina, matriz fina e pouca pedra-pomes de grão médio
T9	Solo castanho-acinzentado claro com textura média-grosseira, matriz média e alguma pedra-pomes grosseira
T10	Solo castanho-acinzentado de textura média-grosseira, matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T11	Solo castanho claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T12	Solo castanho claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T13	Solo castanho-escuro com textura média (areias), matriz fina-média e alguma pedra-pomes muito grosseira
T14	Solo castanho-escuro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes de grão médio
T15	Solo cinzento claro com textura média (areias), matriz fina-média e alguma pedra-pomes grosseira
AM 15A	Solo castanho claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
AM 15A PI	Solo cinzento claro com textura grosseira, matriz média e alguma pedra-pomes grosseira e material lítico
T16	Solo castanho-escuro com textura média (areias), matriz fina-média e alguma pedra-pomes grosseira e material lítico
T17	Solo castanho-escuro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T18	Solo castanho-escuro com textura média (areias), matriz fina-média e alguma pedra-pomes grosseira e piroclastos (traquito)
T19	Solo castanho-acinzentado claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes muito grosseira e material lítico
T20	Solo castanho-acinzentado claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes muito grosseira e material lítico
T21	Solo castanho-escuro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira e material lítico
T22	Solo cinzento claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes muito grosseira e material lítico
T23	Solo castanho claro com textura média-grosseira, matriz média e alguma pedra-pomes muito grosseira e material lítico
T24	Solo castanho-acinzentado claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes muito grosseira e material lítico
T25	Solo castanho claro com textura média-grosseira, matriz fina e alguma pedra-pomes muito grosseira e material lítico
T26	Solo castanho-acinzentado claro com textura média (areias), matriz fina e alguma pedra-pomes grosseira
T27	Solo castanho-acinzentado claro com textura média-grosseira, matriz média e alguma pedra-pomes grosseira
T28	Solo castanho-acinzentado claro com textura média (areias), matriz média e alguma pedra-pomes grosseira

Anexo V - Determinação do teor em água

Tabela 1 - Determinação do teor em água da amostra AM1

Cápsula T	
$W_{\text{cápsula}}$	10.53
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	41.47
$W_{\text{solo húmido}}$	30.94
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	19.87
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	11.07
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	55.71

Tabela 2 - Determinação do teor em água da amostra AM2

Cápsula nº5	
$W_{\text{cápsula}}$	9.24
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	42.97
$W_{\text{solo húmido}}$	33.73
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	20.60
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	13.13
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	63.74

Tabela 3 - Determinação do teor em água da amostra T1

Cápsula B	
$W_{\text{cápsula}}$	10.16
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	33.16
$W_{\text{solo húmido}}$	23.00
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	14.05
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	8.95
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	63.70

Tabela 4 - Determinação do teor em água da amostra T2

Cápsula A	
$W_{\text{cápsula}}$	4.73
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	30.08
$W_{\text{solo húmido}}$	25.35
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	18.69
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	6.66
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	35.63

Tabela 5 - Determinação do teor em água da amostra T3

Cápsula X	
$W_{\text{cápsula}}$	20.77
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	55.30
$W_{\text{solo húmido}}$	34.53
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	24.81
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	9.72
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	39.18

Tabela 6 - Determinação do teor em água da amostra T4

Cápsula W	
$W_{\text{cápsula}}$	20.30
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	54.33
$W_{\text{solo húmido}}$	34.03
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	25.71
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	8.32
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	32.36

Tabela 7 - Determinação do teor em água da amostra T6

Cápsula nº4	
$W_{\text{cápsula}}$	8.43
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	35.39
$W_{\text{solo húmido}}$	26.96
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	18.19
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	8.77
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	48.21

Tabela 8 - Determinação do teor em água da amostra T7

Cápsula Y	
$W_{\text{cápsula}}$	20.98
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	56.61
$W_{\text{solo húmido}}$	35.63
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	26.72
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	8.91
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	33.35

Tabela 9 - Determinação do teor em água da amostra T8

Cápsula Q	
$W_{\text{cápsula}}$	23.02
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	82.32
$W_{\text{solo húmido}}$	59.30
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	41.94
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	17.36
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	41.39

Tabela 10 - Determinação do teor em água da amostra T11

Cápsula nº10	
$W_{\text{cápsula}}$	8.83
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	45.37
$W_{\text{solo húmido}}$	36.54
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	25.15
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	11.39
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	45.29

Tabela 11 - Determinação do teor em água da amostra T13

Cápsula R	
$W_{\text{cápsula}}$	10.81
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	43.40
$W_{\text{solo húmido}}$	32.59
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	19.91
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	12.68
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	63.69

Tabela 12 - Determinação do teor em água da amostra T14

Cápsula nº8	
$W_{\text{cápsula}}$	8.83
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	39.80
$W_{\text{solo húmido}}$	30.97
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	21.95
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	9.02
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	41.09

Tabela 13 - Determinação do teor em água da amostra T15

Cápsula nº6	
$W_{\text{cápsula}}$	8.79
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	45.96
$W_{\text{solo húmido}}$	37.17
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	27.70
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	9.47
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	34.19

Tabela 14 - Determinação do teor em água da amostra AM15 A

Cápsula V	
$W_{\text{cápsula}}$	10.94
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	46.51
$W_{\text{solo húmido}}$	35.57
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	23.38
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	12.19
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	52.14

Tabela 15 - Determinação do teor em água da amostra AM 15A PI

Cápsula nº2	
$W_{\text{cápsula}}$	8.53
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	37.85
$W_{\text{solo húmido}}$	29.32
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	23.33
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	5.99
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	25.68

Tabela 16 - Determinação do teor em água da amostra T16

Cápsula nº1	
$W_{\text{cápsula}}$	8.96
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	53.75
$W_{\text{solo húmido}}$	44.79
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	31.72
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	13.07
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	41.20

Tabela 17 - Determinação do teor em água da amostra T17

Cápsula Z	
$W_{\text{cápsula}}$	20.53
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	66.97
$W_{\text{solo húmido}}$	46.44
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	31.81
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	14.63
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	45.99

Tabela 18 - Determinação do teor em água da amostra T18

Cápsula U	
$W_{\text{cápsula}}$	10.50
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	49.93
$W_{\text{solo húmido}}$	39.43
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	28.04
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	11.39
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	40.62

Tabela 19 - Determinação do teor em água da amostra T21

Cápsula S	
$W_{\text{cápsula}}$	9.44
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	44.32
$W_{\text{solo húmido}}$	34.88
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	24.24
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	10.64
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	43.89

Tabela 20 - Determinação do teor em água da amostra T22

Cápsulas R65 e R66	
$W_{\text{cápsula}}$	11.11/11.11
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	117.38/118.19
$W_{\text{solo húmido}}$	106.27/107.08
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	89.78/91.66
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	16.49/15.42
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	18.37/16.82 (média=17.60)

Tabela 21 - Determinação do teor em água da amostra T23

Cápsula nº7	
$W_{\text{cápsula}}$	9.01
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	38.07
$W_{\text{solo húmido}}$	29.06
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	20.78
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	8.28
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	39.85

Tabela 22 - Determinação do teor em água da amostra T24

Cápsula nº9	
$W_{\text{cápsula}}$	12.58
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	59.32
$W_{\text{solo húmido}}$	46.74
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	32.45
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	14.29
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	44.04

Tabela 23 - Determinação do teor em água da amostra T25

Cápsulas R51 e R63	
$W_{\text{cápsula}}$	11.11/11.11
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	92.06/93.16
$W_{\text{solo húmido}}$	80.95/82.05
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	63.71/64.51
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	17.24/17.54
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	27.06/27.19 (média= 27.12)

Tabela 24 - Determinação do teor em água da amostra T26

Cápsula nº3	
$W_{\text{cápsula}}$	8.42
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	35.28
$W_{\text{solo húmido}}$	26.86
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	20.22
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	6.64
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	32.84

Tabela 25 - Determinação do teor em água da amostra T27

Cápsula C	
$W_{\text{cápsula}}$	4.45
$W_{\text{cápsula+solo húmido}}$	25.68
$W_{\text{solo húmido}}$	21.23
$W_{\text{solo seco}} = W_s$	15.65
$W_w = W_{\text{solo húmido}} - W_{\text{solo seco}}$	5.58
$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$	35.65

Anexo VI - Determinação da densidade aparente das partículas para as 25 amostras ensaiadas

Tabela 26 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra AM1

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1892.5 g
W amostra	1019.0 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5g/cm ³
<i>d</i>	0.87 g/cm ³ (*1000 = 870 kg/m ³)

Tabela 27 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra AM2

W tubo PVC	14.4 g
W tubo PVC + amostra	498.57 g
W amostra	484.14 g
H tubo PVC	10 cm
r tubo PVC	4 cm
V tubo PVC	502.40 g/cm ³
<i>d</i>	0.96 g/cm ³ (*1000 = 960 kg/m ³)

Tabela 28 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T1

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1969.2 g
W amostra	1095.7 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.93 g/cm ³ (*1000 = 930 kg/m ³)

Tabela 29 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T2

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1982.7 g
W amostra	1109.2 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.94 g/cm ³ (*1000 = 940 kg/m ³)

Tabela 30 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T3

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1921.7 g
W amostra	1048.2 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.89 g/cm ³ (*1000 = 890 kg/m ³)

Tabela 31 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T4

W tubo PVC	14.4 g
W tubo PVC + amostra	519.75 g
W amostra	505.32 g
H tubo PVC	10 cm
r tubo PVC	4 cm
V tubo PVC	502.4 g/cm ³
<i>d</i>	1.01 g/cm ³ (*1000 = 1010 kg/m ³)

Tabela 32 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T6

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1746.5 g
W amostra	873.0 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.74 g/cm ³ (*1000 = 740 kg/m ³)

Tabela 33 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T7

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	2062.5 g
W amostra	1189.0 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	1.01 g/cm ³ (*1000 = 1010 kg/m ³)

Tabela 34 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T8

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	2044.3 g
W amostra	1170.8 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.99 g/cm ³ (*1000 = 990 kg/m ³)

Tabela 35 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T11

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1853.0 g
W amostra	979.5 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.83 g/cm ³ (*1000 = 830 kg/m ³)

Tabela 36 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T13

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1770.8 g
W amostra	897.3 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.76 g/cm ³ (*1000 = 760 kg/m ³)

Tabela 37 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T14

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1971.2 g
W amostra	1097.7 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.93 g/cm ³ (*1000 = 930 kg/m ³)

Tabela 38 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T15

W tubo PVC	14.4 g
W tubo PVC + amostra	580.8 g
W amostra	566.4 g
H tubo PVC	10 cm
r tubo PVC	4 cm
V tubo PVC	502.4 g/cm ³
<i>d</i>	1.13 g/cm ³ (*1000 = 1130 kg/m ³)

Tabela 39 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra AM 15A

W tubo PVC	14.4 g
W tubo PVC + amostra	455.8 g
W amostra	441.4 g
H tubo PVC	10 cm
r tubo PVC	4 cm
V tubo PVC	502.4 g/cm ³
<i>d</i>	0.88 g/cm ³ (*1000 = 880 kg/m ³)

Tabela 40 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra AM 15A PI

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1780.1 g
W amostra	906.6 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.77 g/cm ³ (*1000 = 770 kg/m ³)

Tabela 41 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T16

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1986.0 g
W amostra	1112.5 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.94 g/cm ³ (*1000 = 940 kg/m ³)

Tabela 42 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T17

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1979.2 g
W amostra	1105.7 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.94 g/cm ³ (*1000 = 940 kg/m ³)

Tabela 43 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T18

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1928.0 g
W amostra	1054.5 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.90 g/cm ³ (*1000 = 900 kg/m ³)

Tabela 44 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T21

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1893.6 g
W amostra	1020.1 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.87 g/cm ³ (*1000 = 870 kg/m ³)

Tabela 45 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T22

W tubo PVC	229.5 g
W tubo PVC + amostra	2068.9 g
W amostra	1839.4 g
H tubo PVC	30.5 cm
r tubo PVC	3.625 cm
V tubo PVC	1258.4 g/cm ³
<i>d</i>	1.20 g/cm ³ (*1000 = 1200 kg/m ³)

Tabela 46 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T23

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1868.7 g
W amostra	995.2 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.85 g/cm ³ (*1000 = 850 kg/m ³)

Tabela 47 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T24

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1890.4 g
W amostra	1016.9 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.86 g/cm ³ (*1000 = 860 kg/m ³)

Tabela 48 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T25

W tubo PVC	229.5 g
W tubo PVC + amostra	1645.6 g
W amostra	1416.1 g
H tubo PVC	30.5 cm
r tubo PVC	3.625 cm
V tubo PVC	1258.4 g/cm ³
<i>d</i>	1.13 g/cm ³ (*1000 = 1130 kg/m ³)

Tabela 49 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T26

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1983.2 g
W amostra	1109.7 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.94 g/cm ³ (*1000 = 940 kg/m ³)

Tabela 50 - Determinação da densidade aparente das partículas da amostra T27

W tubo PVC	873.5 g
W tubo PVC + amostra	1856.6 g
W amostra	983.1 g
H tubo PVC	15 cm
r tubo PVC	5 cm
V tubo PVC	1177.5 g/cm ³
<i>d</i>	0.83 g/cm ³ (*1000 = 830 kg/m ³)

Anexo VII - Análise granulométrica

Amostra AM1

Tabela 51 - Peneiração da amostra AM1

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	368.2 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	94.0 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	274.2 g

Tabela 52 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	0	3.35	90.66
% do material retido	0	0	0	0	0.9	24.6
% acumuladas (retidas)	0	0	0	0	0.9	25.5
% do material passado	100.00	100.00	100.00	100.0	99.1	74.5

Tabela 53 - Fração passada no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	104.40	59.04	26.50	48.12	18.78
% do material retido	38.08	21.53	9.67	17.55	6.85
% referentes ao total	28.36	16.04	7.20	13.07	5.10
% acumuladas (retidas)	53.89	69.93	77.12	90.19	95.30
% do material passado	46.11	30.07	22.88	9.81	4.70

Amostra AM2

Tabela 54 - Peneiração da amostra AM2

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	557.7 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	47.5 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	510.2 g

Tabela 55 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	0	8.52	38.93
% do material retido	0	0	0	0	1.5	7.0
% acumuladas (retidas)	0	0	0	0	1.5	8.5
% do material passado	100.00	100.00	100.00	100.0	98.5	91.5

Tabela 56 - Fração passada no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	194.17	128.08	72.10	93.41	19.5
% do material retido	38.05	25.10	14.13	18.31	3.82
% referentes ao total	34.82	22.97	12.93	16.75	3.50
% acumuladas (retidas)	43.33	66.29	79.22	95.97	99.47
% do material passado	56.67	33.71	20.78	4.03	0.53

Amostra T1

Tabela 57 - Peneiração da amostra T1

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	352.6 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	140.3 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	212.3 g

Tabela 58 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	43.95	10.45	85.92
% do material retido	0	0	0	12.5	3.0	24.4
% acumuladas (retidas)	0	0	0	12.5	15.5	39.8
% do material passado	100.00	100.00	100.00	87.5	84.5	60.2

Tabela 59 - Fração passada no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	78.95	48.26	22.36	26.52	11.74
% do material retido	37.19	22.73	10.53	12.49	5.53
% referentes ao total	22.39	13.69	6.34	7.52	3.33
% acumuladas (retidas)	62.22	75.91	82.25	89.77	93.10
% do material passado	37.78	24.09	17.75	10.23	6.90

Amostra T2

Tabela 60 - Peneiração da amostra T2

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	497.2 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	153.8 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	343.5 g

Tabela 61 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	15.02	42.40	96.34
% do material retido	0	0	0	3.0	8.5	19.4
% acumuladas (retidas)	0	0	0	3.0	11.5	30.9
% do material passado	100.00	100.00	100.00	97.0	88.5	69.1

Tabela 62 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	106.55	79.88	36.10	52.49	38.07
% do material retido	31.02	23.26	10.51	15.28	11.08
% referentes ao total	21.43	16.07	7.26	10.56	7.66
% acumuladas (retidas)	52.33	68.40	75.66	86.22	93.87
% do material passado	47.67	31.60	24.34	13.78	6.13

Amostra T3

Tabela 63 - Peneiração da amostra T3

PESO TOTAL DA AMOSTRA	P _t =	906.2 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	P ₁ =	256.8 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	P ₂ = (P _t - P ₁) =	649.4 g

Tabela 64 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	18.45	18.11	49.34	170.90
% do material retido	0	0	2.0	2.0	5.4	18.9
% acumuladas (retidas)	0	0	2.0	4.0	9.5	28.3
% do material passado	100.00	100.00	98.0	96.0	90.5	71.7

Tabela 65 - Fração passada no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	129.45	253.03	213.34	51.05	2.12
% do material retido	19.94	38.97	32.85	7.86	0.33
% referentes ao total	14.29	27.92	23.54	5.63	0.23
% acumuladas (retidas)	42.63	70.55	94.09	99.73	99.96
% do material passado	57.37	29.45	5.91	0.27	0.04

Amostra T4

Tabela 66 - Peneiração da amostra T4

PESO TOTAL DA AMOSTRA	P _t =	1779.9 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	P ₁ =	682.2 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	P ₂ = (P _t - P ₁) =	1097.7 g

Tabela 67 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	60.58	12.7	110.20	163.40	335.28
% do material retido	0	3.4	0.7	6.2	9.2	18.8
% acumuladas (retidas)	0	3.4	4.1	10.3	19.5	38.3
% do material passado	100.00	96.6	95.9	89.7	80.5	61.7

Tabela 68 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	319.75	313.73	219.86	215.79	22.73
% do material retido	29.13	28.58	20.03	19.66	2.07
% referentes ao total	17.96	17.63	12.35	12.12	1.28
% acumuladas (retidas)	56.29	73.92	86.27	98.39	99.67
% do material passado	43.71	26.08	13.73	1.61	0.33

Amostra T6

Tabela 69 - Peneiração da amostra T6

PESO TOTAL DA AMOSTRA	P _t =	947.8 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	P ₁ =	339.1 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	P ₂ = (P _t - P ₁) =	608.7 g

Tabela 70 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	8.9	26.00	86.60	217.60
% do material retido	0	0	0.9	2.7	9.1	23.0
% acumuladas (retidas)	0	0	0.9	3.7	12.8	35.8
% do material passado	100.00	100.00	99.1	96.3	87.2	64.2

Tabela 71 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	136.30	227.00	220.50	23.20	0.72
% do material retido	22.39	37.29	36.22	3.81	0.12
% referentes ao total	14.38	23.95	23.26	2.45	0.08
% acumuladas (retidas)	50.16	74.11	97.37	99.82	99.89
% do material passado	49.84	25.89	2.63	0.18	0.11

Amostra T7

Tabela 72 - Peneiração da amostra T7

PESO TOTAL DA AMOSTRA	P _t =	464.1 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	P ₁ =	84.2 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	P ₂ = (P _t - P ₁) =	379.9 g

Tabela 73 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	13.99	20.22	50.01
% do material retido	0	0	0	3.0	4.4	10.8
% acumuladas (retidas)	0	0	0	3.0	7.4	18.1
% do material passado	100.00	100.00	100.00	97.0	92.6	81.9

Tabela 74 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	52.51	58.32	31.16	52.89	60.8
% do material retido	13.82	15.35	8.20	13.92	16.01
% referentes ao total	11.31	12.57	6.71	11.40	13.10
% acumuladas (retidas)	29.46	42.03	48.74	60.14	73.24
% do material passado	70.54	57.97	51.26	39.86	26.76

Amostra T8

Tabela 75 - Peneiração da amostra T8

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	474.4 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	24.8 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	449.6 g

Tabela 76 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	0	2.57	22.19
% do material retido	0	0	0	0	0.5	4.7
% acumuladas (retidas)	0	0	0	0	0.5	5.2
% do material passado	100.00	100.00	100.00	100.00	99.5	94.8

Tabela 77 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	29.76	99.78	69.99	197.84	46.38
% do material retido	6.62	22.19	15.57	44.00	10.31
% referentes ao total	6.27	21.03	14.75	41.70	9.78
% acumuladas (retidas)	11.49	32.53	47.28	88.98	98.76
% do material passado	88.51	67.47	52.72	11.02	1.24

Amostra T11

Tabela 78 - Peneiração da amostra T11

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	984.7 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	123.7 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	861.0 g

Tabela 79 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	22.1	0	15.04	18.58	67.98
% do material retido	0	2.2	0	1.5	1.9	6.9
% acumuladas (retidas)	0	2.2	2.2	3.8	5.7	12.6
% do material passado	100.00	97.8	97.8	96.2	94.3	87.4

Tabela 80 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	93.27	353.61	340.14	69.50	0.52
% do material retido	10.83	41.07	39.51	8.07	0.06
% referentes ao total	9.47	35.91	34.54	7.06	0.05
% acumuladas (retidas)	22.03	57.94	92.49	99.55	99.60
% do material passado	77.97	42.06	7.51	0.45	0.40

Amostra T13

Tabela 81 - Peneiração da amostra T13

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	892.9 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	309.2 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	583.7 g

Tabela 82 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	4.59	4.10	46.68	253.86
% do material retido	0	0	0.5	0.5	5.2	28.4
% acumuladas (retidas)	0	0	0.5	1.0	6.2	34.6
% do material passado	100.00	100.00	99.5	99.0	93.8	65.4

Tabela 83 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	190.65	172.67	87.57	86.48	34.03
% do material retido	32.66	29.58	15.00	14.82	5.83
% referentes ao total	21.35	19.34	9.81	9.69	3.81
% acumuladas (retidas)	55.98	75.32	85.13	94.81	98.63
% do material passado	44.02	24.68	14.87	5.19	1.37

Amostra T14

Tabela 84 - Peneiração da amostra T14

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	344.4 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	60.0 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	284.4 g

Tabela 85 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	0.59	14.03	45.36
% do material retido	0	0	0	0.2	4.1	13.2
% acumuladas (retidas)	0	0	0	0.2	4.2	17.4
% do material passado	100.00	100.00	100.00	99.8	95.8	82.6

Tabela 86 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	62.39	75.46	32.13	32.30	12.56
% do material retido	21.94	26.53	11.30	11.36	4.42
% referentes ao total	18.12	21.91	9.33	9.38	3.65
% acumuladas (retidas)	35.53	57.44	66.77	76.15	79.80
% do material passado	64.47	42.56	33.23	23.85	20.20

Amostra T15

Tabela 87 - Peneiração da amostra T15

PESO TOTAL DA AMOSTRA	P _t =	567.9 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	P ₁ =	109.5 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	P ₂ = (P _t - P ₁) =	458.4 g

Tabela 88 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	18.12	16.96	74.41
% do material retido	0	0	0	3.2	3.0	13.1
% acumuladas (retidas)	0	0	0	3.2	6.2	19.3
% do material passado	100.00	100.00	100.00	96.8	93.8	80.7

Tabela 89 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	102.20	80.58	45.58	82.73	78.25
% do material retido	22.29	17.58	9.94	18.05	17.07
% referentes ao total	18.00	14.19	8.03	14.57	13.78
% acumuladas (retidas)	37.28	51.47	59.49	74.06	87.84
% do material passado	62.72	48.53	40.51	25.94	12.16

Amostra AM 15A

Tabela 90 - Peneiração da amostra AM 15A

PESO TOTAL DA AMOSTRA	P _t =	499.7 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	P ₁ =	174.3 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	P ₂ = (P _t - P ₁) =	325.3 g

Tabela 91 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	12.47	27.06	134.80
% do material retido	0	0	0	2.5	5.4	27.0
% acumuladas (retidas)	0	0	0	2.5	7.9	34.9
% do material passado	100.00	100.00	100.00	97.5	92.1	65.1

Tabela 92 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	101.64	55.32	24.94	39.61	26.06
% do material retido	31.24	17.00	7.67	12.18	8.01
% referentes ao total	20.34	11.07	4.99	7.93	5.22
% acumuladas (retidas)	55.23	66.30	71.29	79.22	84.44
% do material passado	44.77	33.70	28.71	20.78	15.56

Amostra AM 15A PI

Tabela 93 - Peneiração da amostra AM 15A PI

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	1923.9 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	1203.3 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	720.6 g

Tabela 94 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	44.31	0	172.25	441.65	545.12
% do material retido	0	2.3	0	9.0	23.0	28.3
% acumuladas (retidas)	0	2.3	2.3	11.3	34.2	62.5
% do material passado	100.00	97.7	97.7	88.7	65.8	37.5

Tabela 95 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	357.73	218.16	69.07	52.85	17.31
% do material retido	49.64	30.27	9.59	7.33	2.40
% referentes ao total	18.59	11.34	3.59	2.75	0.90
% acumuladas (retidas)	81.14	92.48	96.07	98.82	99.72
% do material passado	18.86	7.52	3.93	1.18	0.28

Amostra T16

Tabela 96 - Peneiração da amostra T16

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	422.2 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	79.2 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	343.0 g

Tabela 97 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	5.82	26.90	46.51
% do material retido	0	0	0	1.4	6.4	11.0
% acumuladas (retidas)	0	0	0	1.4	7.7	18.8
% do material passado	100.00	100.00	100.00	98.6	92.3	81.2

Tabela 98 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	85.16	79.08	46.08	71.54	42.83
% do material retido	24.83	23.05	13.43	20.86	12.49
% referentes ao total	20.17	18.73	10.91	16.94	10.14
% acumuladas (retidas)	38.93	57.66	68.57	85.52	95.66
% do material passado	61.07	42.34	31.43	14.48	4.34

Amostra T17

Tabela 99 - Peneiração da amostra T17

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	831.5 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	219.4 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	612.0 g

Tabela 100 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	5.23	8.73	41.52	163.93
% do material retido	0	0	0.6	1.0	5.0	19.7
% acumuladas (retidas)	0	0	0.6	1.7	6.7	26.4
% do material passado	100.00	100.00	99.4	98.3	93.3	73.6

Tabela 101 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	149.57	109.76	55.96	140.06	89.28
% do material retido	24.44	17.93	9.14	22.88	14.59
% referentes ao total	17.99	13.20	6.73	16.85	10.74
% acumuladas (retidas)	44.38	57.58	64.31	81.15	91.89
% do material passado	55.62	42.42	35.69	18.85	8.11

Amostra T18

Tabela 102 - Peneiração da amostra T18

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	895.3 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	250.8 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	644.6 g

Tabela 103 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	10.24	7.46	62.85	170.20
% do material retido	0	0	1.1	0.8	7.0	19.0
% acumuladas (retidas)	0	0	1.1	2.0	9.0	28.0
% do material passado	100.00	100.00	98.9	98.0	91.0	72.0

Tabela 104 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	201.40	249.80	164.40	26.21	1.51
% do material retido	31.25	38.76	25.51	4.07	0.23
% referentes ao total	22.50	27.90	18.36	2.93	0.17
% acumuladas (retidas)	50.50	78.40	96.77	99.69	99.86
% do material passado	49.50	21.60	3.23	0.31	0.14

Amostra T21

Tabela 105 - Peneiração da amostra T21

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	435.4 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	81.9 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	353.4 g

Tabela 106 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	0	6.23	20.91	54.80
% do material retido	0	0	0	1.4	4.8	12.6
% acumuladas (retidas)	0	0	0	1.4	6.2	18.8
% do material passado	100.00	100.00	100.00	98.6	93.8	81.2

Tabela 107 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	84.66	72.85	34.22	53.04	38.66
% do material retido	23.95	20.61	9.68	15.01	10.94
% referentes ao total	19.45	16.73	7.86	12.18	8.88
% acumuladas (retidas)	38.27	55.00	62.86	75.04	83.92
% do material passado	61.73	45.00	37.14	24.96	16.08

Amostra T22

Tabela 108 - Peneiração da amostra T22

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	2001.9 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	373.5 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	1628.4 g

Tabela 109 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	25.52	52.46	73.10	222.40
% do material retido	0	0	1.3	2.6	3.7	11.1
% acumuladas (retidas)	0	0	1.3	3.9	7.5	18.7
% do material passado	100.00	100.00	98.7	96.1	92.5	81.3

Tabela 110 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	339.19	212.01	119.34	238.66	434.75
% do material retido	20.83	13.02	7.33	14.66	26.70
% referentes ao total	16.94	10.59	5.96	11.92	21.72
% acumuladas (retidas)	35.60	46.19	52.15	64.07	85.79
% do material passado	64.40	53.81	47.85	35.93	14.21

Amostra T23

Tabela 111 - Peneiração da amostra T23

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	1681.0 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	559.0 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	1122.0 g

Tabela 112 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	101.63	8.51	51.03	133.77	264.03
% do material retido	0	6.0	0.5	3.0	8.0	15.7
% acumuladas (retidas)	0	6.0	6.6	9.6	17.5	33.3
% do material passado	100.00	94.0	93.4	90.4	82.5	66.7

Tabela 113 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	221.50	230.38	368.18	284.12	14.18
% do material retido	19.74	20.53	32.81	25.32	1.26
% referentes ao total	13.18	13.70	21.90	16.90	0.84
% acumuladas (retidas)	46.43	60.13	82.04	98.94	99.78
% do material passado	53.57	39.87	17.96	1.06	0.22

Amostra T24

Tabela 114 - Peneiração da amostra T24

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	1033.7 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	363.7 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	670.0 g

Tabela 115 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	29.65	37.01	82.02	215.00
% do material retido	0	0	2.9	3.6	7.9	20.8
% acumuladas (retidas)	0	0	2.9	6.4	14.4	35.2
% do material passado	100.00	100.00	97.1	93.6	85.6	64.8

Tabela 116 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	170.57	224.73	147.37	106.69	16.91
% do material retido	25.46	33.54	22.00	15.92	2.52
% referentes ao total	16.50	21.74	14.26	10.32	1.64
% acumuladas (retidas)	51.69	73.43	87.68	98.01	99.64
% do material passado	48.31	26.57	12.32	1.99	0.36

Amostra T25

Tabela 117 - Peneiração da amostra T25

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	1923.4 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	1118.2 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	805.2 g

Tabela 118 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	153.05	254.48	293.96	202.16	214.56
% do material retido	0	8.0	13.2	15.3	10.5	11.2
% acumuladas (retidas)	0	8.0	21.2	36.5	47.0	58.1
% do material passado	100.00	92.0	78.8	63.5	53.0	41.9

Tabela 119 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	184.51	130.33	85.00	131.73	140.1
% do material retido	22.91	16.19	10.56	16.36	17.40
% referentes ao total	9.59	6.78	4.42	6.85	7.28
% acumuladas (retidas)	67.73	74.50	78.92	85.77	93.06
% do material passado	32.27	25.50	21.08	14.23	6.94

Amostra T26

Tabela 120 - Peneiração da amostra T26

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	829.4 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	204.8 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	624.6 g

Tabela 121 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	6.16	34.39	56.85	107.43
% do material retido	0	0	0.7	4.1	6.9	13.0
% acumuladas (retidas)	0	0	0.7	4.9	11.7	24.7
% do material passado	100.00	100.00	99.3	95.1	88.3	75.3

Tabela 122 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	118.69	102.95	68.60	145.76	90.35
% do material retido	19.00	16.48	10.98	23.34	14.47
% referentes ao total	14.31	12.41	8.27	17.57	10.89
% acumuladas (retidas)	39.01	51.42	59.69	77.26	88.15
% do material passado	60.99	48.58	40.31	22.74	11.85

Amostra T27

Tabela 123 - Peneiração da amostra T27

PESO TOTAL DA AMOSTRA	$P_t =$	907.1 g
PESO DO MATERIAL RETIDO NO PENEIRO nº 10	$P_1 =$	392.3 g
PESO DO MATERIAL PASSADO NO PENEIRO nº10	$P_2 = (P_t - P_1) =$	514.8 g

Tabela 124 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10
Malha (mm)	38.10	25.40	19.10	9.52	4.76	2.00
Peso do material retido (g)	0	0	11.08	58.76	128.87	193.56
% do material retido	0	0	1.2	6.5	14.2	21.3
% acumuladas (retidas)	0	0	1.2	7.7	21.9	43.2
% do material passado	100.00	100.00	98.8	92.3	78.1	56.8

Tabela 125 - Fração retida no peneiro de 2.00 mm (n.º10)

Nº do peneiro	20	40	60	140	200
Malha (mm)	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
Peso do material retido (g)	162.93	134.28	117.48	89.22	9.99
% do material retido	31.65	26.08	22.82	17.33	1.94
% referentes ao total	17.96	14.80	12.95	9.84	1.10
% acumuladas (retidas)	61.21	76.01	88.96	98.80	99.90
% do material passado	38.79	23.99	11.04	1.20	0.10

Anexo VIII - Determinação dos limites de consistência

Tabela 126 - Determinação do Limite de Liquidez da amostra AM1 (0.6-0.7 m de profundidade)

NÚMERO DA CÁPSULA		1	2	3	4
A	Peso da cápsula + Toma húmida (g)	31.37	20.45	22.57	18.24
B	Peso da cápsula + Toma seca (g)	27.95	17.07	18.76	15.35
C = A - B	Água na toma (g)	3.42	3.38	3.81	2.89
D	Peso da Cápsula (g)	21.01	10.56	10.38	8.81
E = B - D	Toma Seca (g)	6.94	6.51	8.38	6.54
W=100 x C/E	Teor de Humidade (%)	49.28	51.92	45.47	44.19
P	Número de Golpes	21	14	37	44
K	Coefficiente	1.022	1.075	0.949	0.926
WL = KW	Limite de Liquidez (%)	48.20	48.29	47.93	47.72
WL - MÉDIA (%)		48.04			

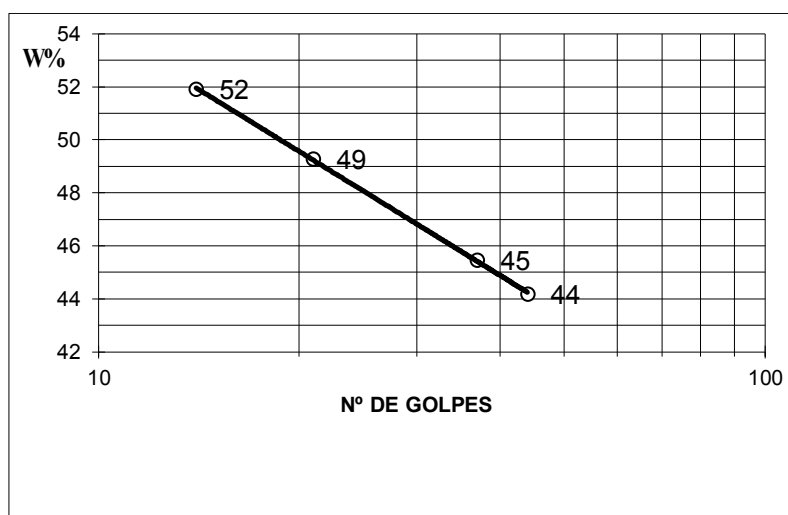


Gráfico 9 - Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra AM1

Tabela 127 - Determinação do Limite de Plasticidade da amostra AM1

NÚMERO DA CÁPSULA		1	2	3	4
A	Peso da cápsula + Toma húmida (g)	8.05	7.96	10.10	12.86
B	Peso da cápsula + Toma seca (g)	7.24	7.10	8.72	11.87
C = A - B	Água na toma (g)	0.81	0.86	1.38	0.99
D	Peso da Cápsula (g)	4.66	4.50	4.71	8.97
E = B - D	Toma Seca (g)	2.58	2.60	4.01	2.90
W=100 x C/E	Teor de Humidade (%)	31.40	33.08	34.41	34.14
WP - MÉDIA (%)		34.14			

Tabela 128 - Determinação do Limite de Liquidez da amostra AM2 (2.16 m de profundidade)

NÚMERO DA CÁPSULA		1	2	3	4
A	Peso da cápsula + Toma húmida (g)	30.57	27.22	23.03	21.22
B	Peso da cápsula + Toma seca (g)	27.53	24.50	19.54	18.42
C = A - B	Água na toma (g)	3.04	2.72	3.49	2.80
D	Peso da Cápsula (g)	20.70	18.20	10.53	10.97
E = B - D	Toma Seca (g)	6.83	6.30	9.01	7.45
W=100 x C/E	Teor de Humidade (%)	44.51	43.17	38.73	37.58
P	Número de Golpes	12	15	29	35
K	Coefficiente	1.095	1.066	0.980	0.956
WL = KW	Limite de Liquidez (%)	40.64	40.49	39.51	39.32
WL - MÉDIA (%)		40.00			

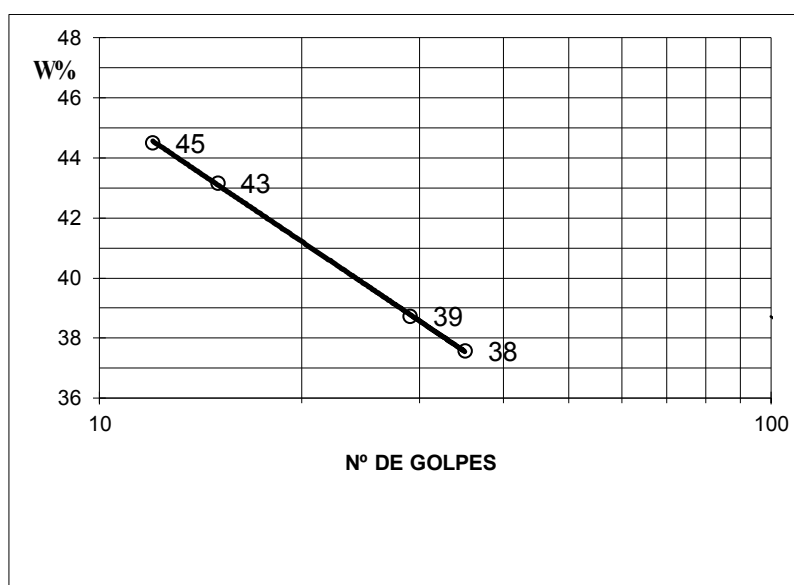


Gráfico 10 - Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra AM2

Tabela 129 - Determinação do Limite de Plasticidade da amostra AM2

NÚMERO DA CÁPSULA		1	2	3	4
A	Peso da cápsula + Toma húmida (g)	7.01	6.86	6.66	10.72
B	Peso da cápsula + Toma seca (g)	6.31	6.22	6.08	10.01
C = A - B	Água na toma (g)	0.70	0.64	0.58	0.71
D	Peso da Cápsula (g)	4.61	4.57	4.55	8.12
E = B - D	Toma Seca (g)	1.70	1.65	1.53	1.89
W=100 x C/E	Teor de Humidade (%)	41.18	38.79	37.91	37.57
WP - MÉDIA (%)		37.91			

Tabela 130 - Determinação do Limite de Liquidez da amostra AM 15A (1.55 m de profundidade)

NÚMERO DA CÁPSULA		1	2	3	4
A	Peso da cápsula + Toma húmida (g)	8.98	16.65	25.88	16.67
B	Peso da cápsula + Toma seca (g)	7.55	15.37	24.50	15.07
C = A - B	Água na toma (g)	1.43	1.28	1.38	1.60
D	Peso da Cápsula (g)	4.70	12.60	21.13	11.03
E = B - D	Toma Seca (g)	2.85	2.77	3.37	4.04
W=100 x C/E	Teor de Humidade (%)	50.18	46.21	40.95	39.60
P	Número de Golpes	10	17	40	48
K	Coefficiente	1.119	1.050	0.938	0.915
WL = KW	Limite de Liquidez (%)	44.84	44.01	43.64	43.30
WL - MÉDIA (%)		43.83			



Gráfico 11 - Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra AM 15A

Tabela 131 - Determinação do Limite de Plasticidade da amostra AM 15A

NÚMERO DA CÁPSULA		1	2	3	4
A	Peso da cápsula + Toma húmida (g)	8.20	7.27	17.74	13.45
B	Peso da cápsula + Toma seca (g)	7.20	6.44	16.91	12.50
C = A - B	Água na toma (g)	1.00	0.83	0.83	0.95
D	Peso da Cápsula (g)	4.73	4.43	14.81	10.16
E = B - D	Toma Seca (g)	2.47	2.01	2.10	2.34
W=100 x C/E	Teor de Humidade (%)	40.49	41.29	39.52	40.60
WP - MÉDIA (%)		40.54			

Anexo IX - Ensaio de corte direto

Tabela 132 - Ensaio de corte direto da amostra AM2

Ensaio n.º		1	2	3
Início do ensaio	Largura (cm)	2.00	2.00	2.00
	Altura (cm)	6.00	6.00	6.00
	Volume (cm ³)	72.00	72.00	72.00
	Teor em água (%)	53.7	10.4	52.3
	Baridade seca (g/cm ³)	1.09	1.37	1.03
Fim do ensaio	Teor em água (%)	63.5	60.9	52.5
Fase de consolidação	Secção da caixa (cm ²)	36.00	36.00	36.00
	Carga (kN)	0.15	0.30	0.60
	Tensão de consolidação (kPa)	40.83	81.67	163.33
	Assentamento (cm)	0.00	0.00	0.00
Fase de corte	Velocidade de Corte (mm/min)	0.8	0.8	0.8
	Tempo de Rotura (s)	390	570	420
	Força de Corte (N)	140	226	367
	Tensão de Corte na Rotura (kPa)	38.9	62.7	102.1

Tabela 133 - Ensaio de corte direto da amostra AM 15A

Ensaio n.º		1	2	3
Início do ensaio	Largura (cm)	2.00	2.00	2.00
	Altura (cm)	6.00	6.00	6.00
	Volume (cm ³)	72.00	72.00	72.00
	Teor em água (%)	41.2	49.2	44.7
	Baridade seca (g/cm ³)	1.22	1.12	1.18
Fim do ensaio	Teor em água (%)	41.5	49.6	39.8
Fase de consolidação	Secção da caixa (cm ²)	36.00	36.00	36.00
	Carga (kN)	0.15	0.30	0.60
	Tensão de consolidação (kPa)	40.83	81.67	163.33
	Assentamento (cm)	0.00	0.00	0.00
Fase de corte	Velocidade de Corte (mm/min)	0.8	0.8	0.8
	Tempo de Rotura (s)	330	360	480
	Força de Corte (N)	169	219	405
	Tensão de Corte na Rotura (kPa)	47.0	60.9	112.5

Tabela 134 - Resultados do ensaio de corte direto para a amostra AM 2 com carga de 1.5 kgf

Tempo	Deformação				Força de Corte		τ
	Horizontal		Vertical				
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0.000		0.000	0.0	0.00	0.00
10		0.103		-0.226	0.0	-0.04	-0.01
20		0.200		-0.230	1.0	2.06	0.57
30		0.333		-0.230	1.0	2.06	0.57
40		0.384		-0.228	1.0	2.06	0.57
50		0.423		-0.207	3.0	6.24	1.73
60		0.440		0.570	7.0	14.61	4.06
90		0.630		0.571	7.0	14.61	4.06
120		1.206		0.571	11.0	22.98	6.38
150		1.557		0.571	29.0	60.64	16.84
180		1.895		0.571	38.0	79.45	22.07
210		2.240		0.571	48.0	100.36	27.88
240		2.615		0.571	55.0	114.99	31.94
270		2.991		0.571	61.0	127.53	35.42
300		3.381		0.571	65.0	135.88	37.75
330		3.770		0.572	66.0	137.97	38.33
360		4.152		0.572	66.0	137.97	38.33
390		4.546		0.572	67.0	140.06	38.91
420		4.929		0.572	67.0	140.06	38.91
450		5.318		0.572	67.0	140.06	38.91
480		5.712		0.572	67.0	140.06	38.91
510		6.113		0.572	66.0	137.97	38.33
540		6.502		0.572	65.0	135.88	37.75
570		6.893		0.572	65.0	135.88	37.75
600		7.295		0.572	65.0	135.88	37.75
630		7.693		0.572	64.0	133.79	37.16
660		8.084		0.572	62.0	129.61	36.00
690		8.481		0.572	62.0	129.61	36.00
720		8.886		0.572	62.0	129.61	36.00
750		9.273		0.572	62.0	129.61	36.00
780		9.668		0.572	62.0	129.61	36.00
810		10.065		0.572	62.0	129.61	36.00
840		10.291		0.572	62.0	129.61	36.00
870		10.298		0.572	72.0	150.50	41.81
900		10.298		0.572	88.0	183.91	51.09

Tabela 135 - Resultados do ensaio de corte direto para a amostra AM 2 com carga de 3 kgf

Tempo	Deformação				Força de Corte		τ
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		-0.806		0.002	-10.0	0.00	0.00
10		0.004		-0.822	-10.0	-20.97	-5.82
20		0.043		-0.824	6.0	12.52	3.48
30		0.099		-0.843	13.0	27.17	7.55
40		0.216		-0.865	26.0	54.36	15.10
50		0.357		-0.880	34.0	71.09	19.75
60		0.456		-0.901	37.0	77.36	21.49
90		0.805		-0.941	50.0	104.54	29.04
120		1.187		-0.969	61.0	127.53	35.42
150		1.506		-1.003	71.0	148.42	41.23
180		1.869		-1.034	78.0	163.03	45.29
210		2.256		-1.060	83.0	173.48	48.19
240		2.583		-1.093	86.0	179.74	49.93
270		2.955		-1.120	90.0	188.09	52.25
300		3.326		-1.143	92.0	192.26	53.41
330		3.695		-1.164	94.0	196.44	54.57
360		4.074		-1.191	96.0	200.61	55.73
390		4.438		-1.220	98.0	204.79	56.89
420		4.817		-1.249	101.0	211.05	58.62
450		5.193		-1.277	103.0	215.22	59.78
480		5.581		-1.301	105.0	219.40	60.94
510		5.971		-1.322	106.0	221.48	61.52
540		6.363		-1.340	107.0	223.57	62.10
570		6.755		-1.358	108.0	225.66	62.68
600		7.146		-1.377	108.0	225.66	62.68
630		7.557		-1.397	107.0	223.57	62.10
660		7.940		-1.417	107.0	223.57	62.10
690		8.338		-1.435	107.0	223.57	62.10
720		8.727		-1.455	107.0	223.57	62.10
750		9.120		-1.474	108.0	225.66	62.68
780		9.517		-1.491	108.0	225.66	62.68
810		9.824		-1.508	116.0	242.35	67.32
840		9.834		-1.514	140.0	292.39	81.22
870		9.835		-1.515	164.0	342.40	95.11
900		9.837		-1.489	180.0	375.72	104.37
930		9.837		-1.457	197.0	411.11	114.20
960		9.837		-1.412	210.0	438.15	121.71

Tabela 136 - Resultados do ensaio de corte direto para a amostra AM 2 com carga de 6 kgf

Tempo	Deformação				Força de Corte		τ
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		-0.130		-0.508	-5.0	0.00	0.00
10		-0.011		-0.550	0.0	0.00	0.00
20		-0.086		-0.550	5.0	10.43	2.90
30		0.025		-0.550	5.0	10.43	2.90
40		0.157		-0.550	5.0	10.43	2.90
50		0.254		-0.550	6.0	12.52	3.48
60		0.260		-0.550	7.0	14.61	4.06
90		0.301		-0.559	14.0	29.26	8.13
120		0.487		-0.602	58.0	121.26	33.68
150		0.790		-0.686	92.0	192.26	53.41
180		1.115		-0.722	119.0	248.60	69.06
210		1.443		-0.753	138.0	288.22	80.06
240		1.780		-0.768	151.0	315.32	87.59
270		2.115		-0.778	161.0	336.15	93.38
300		2.455		-0.789	168.0	350.73	97.43
330		2.808		-0.802	173.0	361.15	100.32
360		3.167		-0.814	175.0	365.31	101.47
390		3.557		-0.823	175.0	365.31	101.47
420		3.927		-0.837	176.0	367.39	102.05
450		4.310		-0.849	176.0	367.39	102.05
480		4.704		-0.857	175.0	365.31	101.47
510		5.104		-0.866	174.0	363.23	100.90
540		5.506		-0.879	170.0	354.90	98.58
570		5.917		-0.887	167.0	348.65	96.85
600		6.303		-0.894	164.0	342.40	95.11
630		6.707		-0.899	161.0	336.15	93.38
660		7.105		-0.903	157.0	327.82	91.06
690		7.505		-0.908	154.0	321.57	89.32
720		7.915		-0.910	149.0	311.15	86.43
750		8.336		-0.912	141.0	294.48	81.80
780		8.751		-0.914	136.0	284.05	78.90
810		9.152		-0.914	132.0	275.71	76.59
840		9.556		-0.914	129.0	269.46	74.85
870		9.935		-0.916	126.0	263.20	73.11
900		9.955		-0.919	150.0	313.23	87.01

Tabela 137 - Resultados do ensaio de corte direto para a amostra AM 15A com carga de 1.5 kgf

Tempo	Deformação				Força de Corte		τ
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0.026		-0.001	-9.0	0.00	0.00
10		0.034		-0.001	-5.0	-10.50	-2.92
20		0.027		-0.001	-2.0	-4.22	-1.17
30		0.031		-0.001	0.0	-0.04	-0.01
40		0.095		-0.001	0.0	-0.04	-0.01
50		0.235		-0.001	0.0	-0.04	-0.01
60		0.286		-0.001	1.0	2.06	0.57
90		0.306		-0.001	6.0	12.52	3.48
120		0.465		-0.001	14.0	29.26	8.13
150		0.851		-0.001	18.0	37.63	10.45
180		1.236		-0.001	28.0	58.54	16.26
210		1.550		-0.001	44.0	92.00	25.56
240		1.856		-0.001	59.0	123.35	34.26
270		2.165		-0.001	71.0	148.42	41.23
300		2.514		-0.001	79.0	165.12	45.87
330		2.897		-0.001	81.0	169.30	47.03
360		3.295		-0.001	80.0	167.21	46.45
390		3.711		-0.001	77.0	160.95	44.71
420		4.111		-0.001	74.0	154.68	42.97
450		4.526		-0.001	71.0	148.42	41.23
480		4.904		-0.001	69.0	144.24	40.07
510		5.315		0.000	67.0	140.06	38.91
540		5.711		0.000	67.0	140.06	38.91
570		6.106		0.000	67.0	140.06	38.91
600		6.505		0.000	67.0	140.06	38.91
630		6.906		0.000	67.0	140.06	38.91
660		7.306		0.000	66.0	137.97	38.33
690		7.722		0.000	65.0	135.88	37.75
720		8.117		0.000	65.0	135.88	37.75
750		8.534		0.000	65.0	135.88	37.75
780		8.936		0.000	65.0	135.88	37.75
810		9.335		0.000	65.0	135.88	37.75
840		9.735		0.000	65.0	135.88	37.75
870		10.136		0.000	65.0	135.88	37.75
900		10.475		0.000	69.0	144.24	40.07

Tabela 138 - Resultados do ensaio de corte direto para a amostra AM 15A com carga de 3 kgf

Tempo	Deformação				Força de Corte		τ
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0.011		-1.160	-8.0	0.00	0.00
10		0.006		-1.269	-8.0	-16.78	-4.66
20		0.085		-1.291	-5.0	-10.50	-2.92
30		0.112		-1.300	-1.0	-2.13	-0.59
40		0.122		-1.308	1.0	2.06	0.57
50		0.223		-1.336	10.0	20.89	5.80
60		0.337		-1.352	15.0	31.35	8.71
90		0.645		-1.396	34.0	71.09	19.75
120		0.986		-1.411	46.0	96.18	26.72
150		1.296		-1.427	59.0	123.35	34.26
180		1.596		-1.431	73.0	152.59	42.39
210		1.936		-1.430	84.0	175.56	48.77
240		2.295		-1.415	92.0	192.26	53.41
270		2.655		-1.400	98.0	204.79	56.89
300		3.025		-1.384	102.0	213.14	59.20
330		3.426		-1.372	104.0	217.31	60.36
360		3.805		-1.359	105.0	219.40	60.94
390		4.220		-1.354	105.0	219.40	60.94
420		4.585		-1.352	103.0	215.22	59.78
450		4.970		-1.352	103.0	215.22	59.78
480		5.361		-1.352	103.0	215.22	59.78
510		5.756		-1.352	103.0	215.22	59.78
540		6.165		-1.352	103.0	215.22	59.78
570		6.554		-1.353	103.0	215.22	59.78
600		6.976		-1.356	103.0	215.22	59.78
630		7.375		-1.364	103.0	215.22	59.78
660		7.756		-1.375	103.0	215.22	59.78
690		8.153		-1.386	103.0	215.22	59.78
720		8.554		-1.401	103.0	215.22	59.78
750		8.944		-1.417	103.0	215.22	59.78
780		9.355		-1.436	103.0	215.22	59.78
810		9.392		-1.460	120.0	250.69	69.64
840		9.396		-1.472	148.0	309.06	85.85
870		9.396		-1.464	168.0	350.73	97.43
900		9.396		-1.440	183.0	381.97	106.10

Tabela 139 - Resultados do ensaio de corte direto para a amostra AM 15A com carga de 6 kgf

Tempo	Deformação				Força de Corte		τ
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		-0.025		-0.523	-7.0	0.00	0.00
10		-0.025		-0.580	0.0	0.00	0.00
20		0.036		-0.593	23.0	48.09	13.36
30		0.111		-0.606	40.0	83.64	23.23
40		0.196		-0.622	54.0	112.90	31.36
50		0.303		-0.638	66.0	137.97	38.33
60		0.403		-0.652	77.0	160.95	44.71
90		0.703		-0.688	108.0	225.66	62.68
120		0.994		-0.704	130.0	271.54	75.43
150		1.306		-0.712	135.0	281.97	78.32
180		1.626		-0.714	150.0	313.23	87.01
210		1.945		-0.713	162.0	338.23	93.95
240		2.296		-0.712	171.0	356.98	99.16
270		2.665		-0.712	177.0	369.47	102.63
300		3.034		-0.712	182.0	379.88	105.52
330		3.405		-0.712	186.0	388.21	107.84
360		3.774		-0.719	189.0	394.46	109.57
390		4.155		-0.729	191.0	398.62	110.73
420		4.526		-0.744	192.0	400.70	111.31
450		4.911		-0.758	193.0	402.78	111.88
480		5.294		-0.771	194.0	404.86	112.46
510		5.663		-0.783	193.0	402.78	111.88
540		6.056		-0.789	193.0	402.78	111.88
570		6.437		-0.796	192.0	400.70	111.31
600		6.810		-0.801	193.0	402.78	111.88
630		7.212		-0.806	193.0	402.78	111.88
660		7.594		-0.814	192.0	400.70	111.31
690		7.982		-0.821	190.0	396.54	110.15
720		8.476		-0.831	190.0	396.54	110.15
750		8.774		-0.837	189.0	394.46	109.57
780		8.816		-0.851	214.0	446.47	124.02
810		8.821		-0.864	242.0	504.69	140.19
840		8.823		-0.866	270.0	562.85	156.35
870		8.825		-0.856	289.0	602.29	167.30
900		8.825		-0.827	305.0	635.48	176.52

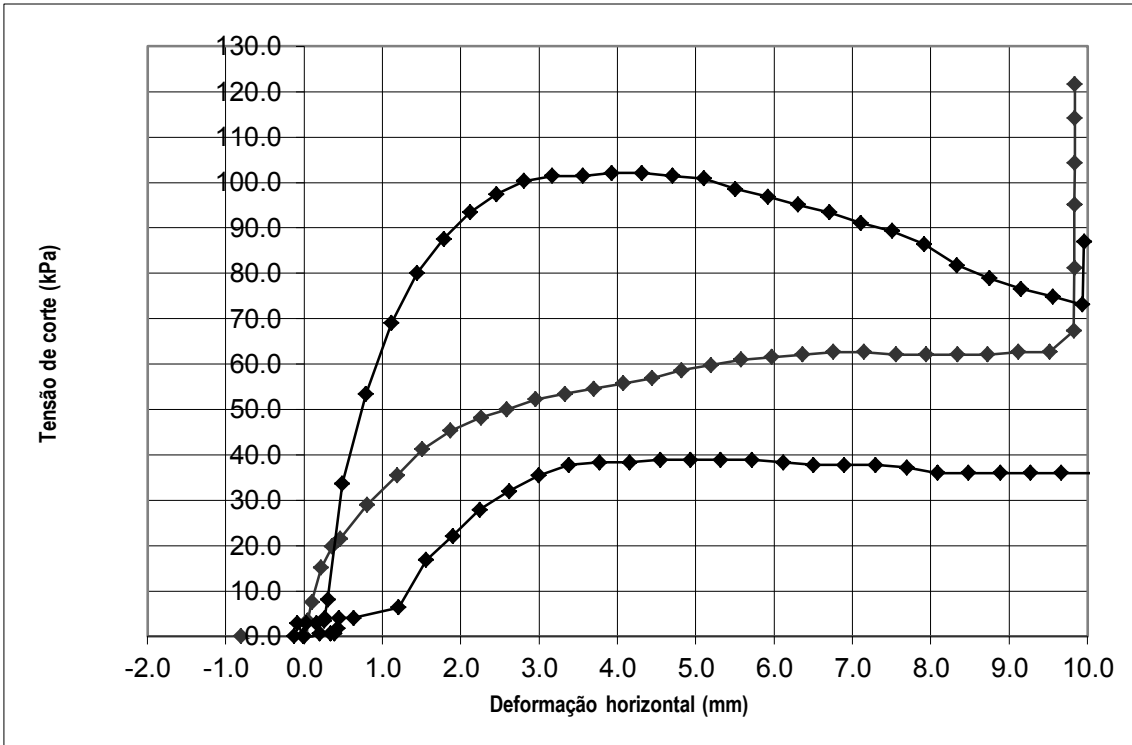


Gráfico 12 - Gráfico Tensão de corte-deformação horizontal para a amostra AM2

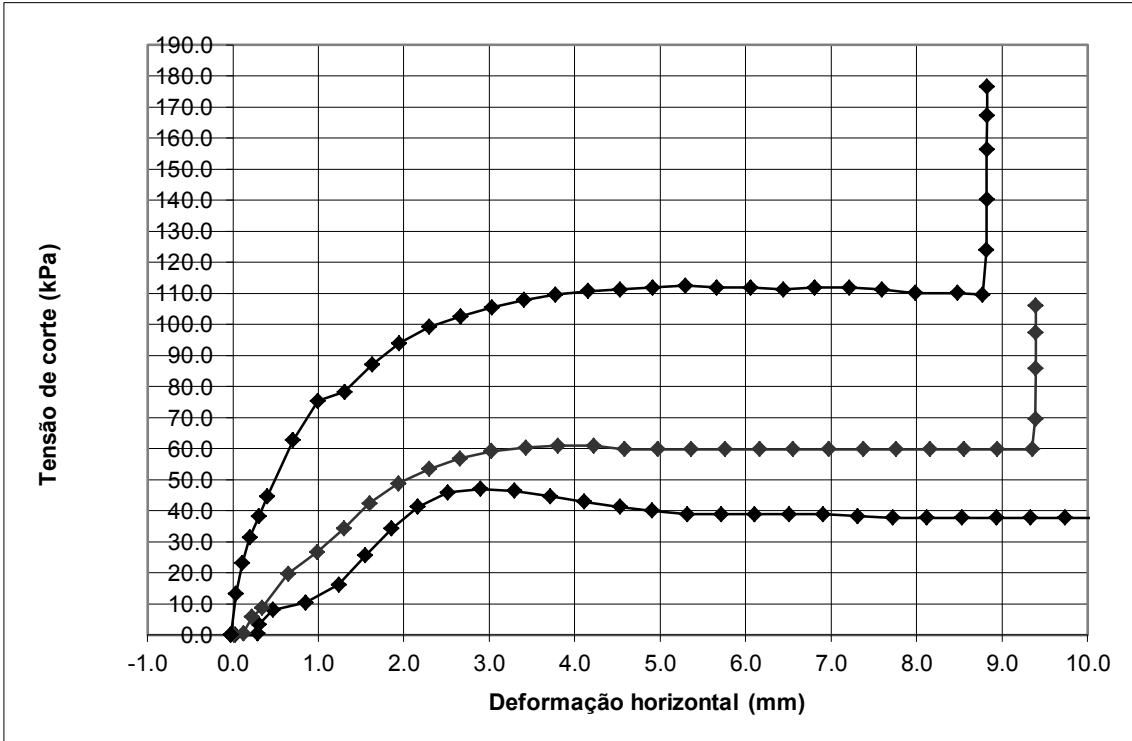


Gráfico 13 - Gráfico Tensão de corte-deformação horizontal para a amostra AM 15A

Anexo X – Cálculo do número e espaçamento entre barragens de controlo (1.2*H/G)

Tabela 140 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB1, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-22	32.5	1	3.69	6
		1.5	5.5	4

Tabela 141 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB2, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-7	19.2	1	6.3	1
		1.5	9.4	1
7-25	48.4	1	2.5	7
		1.5	3.7	5

Nota: Nas linhas com sombreado, o espaçamento das barragens de controlo ultrapassa o comprimento da seção.

Tabela 142 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB3, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-14	32.7	1	3.7	4
		1.5	5.5	3
14-40	46.4	1	2.6	10
		1.5	3.9	6

Nota: Nas linhas com sombreado, o espaçamento das barragens de controlo ultrapassa o comprimento da seção.

Tabela 143 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB4, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-7	42.5	1	3.5	2
		1.5	5.3	2
7-18	15.2	1	13.8	1
		1.5	20.7	1

Nota: Nas linhas com sombreado, o espaçamento das barragens de controlo ultrapassa o comprimento da seção.

Tabela 144 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB6, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-8	53.1	0.5	1.1	7
		1	2.3	4

Nota: Nas linhas com sombreado, o espaçamento das barragens de controlo ultrapassa o comprimento da seção.

Tabela 145 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB10, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-9	18.5	1.5	9.7	1
		2	12.9	1
9-57	56.7	1.5	3.2	15
		2	4.2	11
57-76	47.4	1.5	3.8	5
		2	5.1	4

Nota: Nas linhas com sombreado, o espaçamento das barragens de controlo ultrapassa o comprimento da seção.

Tabela 146 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB11, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-79	46.4	1	4.2	19
		1.5	6.3	12
		2	8.4	9
79-115	78.7	1	1.5	24
		1.5	2.3	11
		2	3	12

Tabela 147 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB12, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-18	36.3	1	3.3	5
		1.5	4.9	3
18-28	41.1	1	2.9	3
		1.5	4.4	2
28-30	82.4	1	1.45	1
		1.5	2.1	1

Tabela 148 - Quantidade e espaçamento entre barragens de controlo a implementar na ravina RB13, com base na fórmula empírica que utiliza o declive da ravina (G) e a altura da barragem (H)

Localização ao longo da ravina (m)	Declive (°)	Altura da barragem de controlo (m)	Espaçamento entre barragens de controlo (m)	Número de barragens de controlo
0-11	32.5	1	3.7	3
		1.5	5.5	2
11-44	47.9	1	2.5	13
		1.5	3.7	9