

REGINA MARIA PAIVA BOLARINHO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DO SALTO
DO FOJO COM RECURSO A MÉTODOS
DETERMINÍSTICOS**



UNIVERSIDADE DOS AÇORES
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

2014

REGINA MARIA PAIVA BOLARINHO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DO SALTO
DO FOJO COM RECURSO A MÉTODOS
DETERMINÍSTICOS**

Tese realizada para a obtenção do grau de mestre em Geologia do Ambiente e Sociedade, na especialidade de Instabilidade de Taludes, de acordo com o regulamento de mestrados da Universidade dos Açores.

Tese realizada sob orientação científica de:

Professor Doutor João Luís Roque Baptista Gaspar

Professor Associado com Agregação da Universidade dos Açores

Doutor Rui Tiago Fernando Marques

*Doutorado em Geologia, na especialidade de Riscos Geológicos
pela Universidade dos Açores*



UNIVERSIDADE DOS AÇORES
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

2014

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
AGRADECIMENTOS	XVII
RESUMO.....	XXI
ABSTRACT	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.4 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL	4
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 TERMINOLOGIA E CONCEITOS GERAIS	7
2.2 TIPOLOGIAS DE MOVIMENTOS DE VERTENTE	9
2.2.1 Desabamento	9
2.2.2 Balançamento	9
2.2.3 Deslizamento	10
2.2.3.1 Deslizamento Rotacional	11
2.2.3.2 Deslizamento Translacional com Rotura Compósita	11

2.2.3.3	Deslizamento Translacional com Rotura Planar.....	12
2.2.4	Expansão Lateral	12
2.2.5	Escoada.....	13
2.3	MORFOLOGIA E DIMENSÕES DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE ...	15
2.3.1	Morfologia.....	15
2.3.2	Dimensões	17
2.4	ATIVIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE	19
2.4.1	Estado de Atividade.....	19
2.4.2	Distribuição de Atividade.....	20
2.4.3	Estilo de Atividade	21
2.5	VELOCIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE	23
2.6	FATOR DE SEGURANÇA	25
2.6.1	Resistência ao Corte	25
2.6.2	Tensão de Corte	27
2.7	CAUSAS DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	29
2.7.1	Fatores Responsáveis pela Diminuição da Resistência ao Corte	29
2.7.2	Fatores Responsáveis pelo Aumento da Tensão de Corte.....	30
2.7.3	Fatores Condicionantes e Fatores Desencadeantes da Instabilidade	31
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
3.1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	33
3.2	ENQUADRAMENTO GEODINÂMICO	36
3.3	ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO E TECTÓNICO	37
3.4	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	43
4.	ANÁLISE DOCUMENTAL DE EVENTOS DE INSTABILIDADE GEOMORFOLÓGICA.....	47
4.1	RECOLHA DE DOCUMENTAÇÃO	47
4.2	LIMITAÇÕES E DIFICULDADES.....	48
4.3	EVENTOS DE INSTABILIDADE GEOMORFOLÓGICA.....	49

5.	CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DE VERTENTE	59
5.1	ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA	59
5.2	CARACTERIZAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA DO TALUDE	63
5.2.1	Camada Geológica A	67
5.2.2	Camada Geológica B	67
5.2.3	Camada Geológica C	68
5.2.4	Camada Geológica D	69
5.2.5	Camada Geológica E	69
5.2.6	Limitações e Dificuldades	70
5.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS MATERIAIS	71
5.3.1	Metodologia e Amostragem	71
5.3.2	Caracterização Física	72
5.3.2.1	Análise Granulométrica	72
5.3.2.2	Limites de Atterberg	80
5.3.2.3	Classificação dos Solos	86
5.3.2.4	Densidade das Partículas	89
5.3.3	Caracterização Mecânica	90
6.	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO TALUDE	99
6.1	INTRODUÇÃO AOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE	99
6.2	MÉTODO DAS FATIAS	102
6.2.1	Método Ordinário das Fatias	104
6.2.2	Método de Bishop Simplificado	106
6.2.3	Método de Janbu Simplificado	107
6.2.4	Método de Spencer	110
6.2.5	Método de Morgenstern – Price	112
6.2.6	Método <i>General Limit Equilibrium</i>	115
6.2.7	Método de <i>Corps of Engineers</i>	116
6.2.8	Método de Lowe – Karafiath	118

6.2.9	Método de Janbu Generalizado	119
6.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	121
6.3.1	Parâmetros de Entrada	121
6.3.2	Resultados.....	122
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		135
ANEXOS		A-1
ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA		A-1
ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE ATTERBERG.....		A-39
ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DAS PARTÍCULAS		A-59

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Estrutura Organizacional da Tese.....	4
--	---

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Abrangência dos termos movimentos de vertente, movimentos de terreno e movimentos de massa, adaptado de Zêzere (2000).....	8
Figura 2.2 - Esquema ilustrativo do Desabamento de Cruden e Varnes (1996), adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).....	9
Figura 2.3 - Esquema ilustrativo do Balançamento de Cruden e Varnes (1996), adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).....	10
Figura 2.4 - Esquema ilustrativo do Deslizamento rotacional de Cruden e Varnes (1996), adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).....	11
Figura 2.5 - Esquema ilustrativo do Deslizamento translacional com rotura planar de Cruden e Varnes (1996), adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).....	12
Figura 2.6 - Esquema ilustrativo de uma expansão lateral de Cruden e Varnes (1996), adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).....	13
Figura 2.7 - Esquema ilustrativo de uma escoada de Cruden e Varnes (1996), adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).....	14
Figura 2.8 - Secção longitudinal de um movimento de vertente “tipo”, onde se encontra representada a morfologia do movimento. A legenda dos números encontra-se na tabela 2.2 (WP- WLI 1993a).....	15
Figura 2.9 - Secção longitudinal de um movimento de vertente “tipo”, onde se encontra representada as dimensões de um movimento. A legenda dos números encontra-se na tabela 2.3 (WP- WLI 1993a).....	17
Figura 2.10 - Estado de atividade dos movimentos de vertente (adaptado de WP-WLI, 1993a).Legenda: 1 – Ativo; 2 – Suspenso; 3 – Reativado; 4 – Dormente; 5 – Abandonado; e 6 – Relíquia.....	20

Figura 2.11 - Distribuição da atividade dos movimentos de vertente (adpatado de WP-WLI, 1993b). Legenda: 1 – movimento de vertente em avanço; 2 – movimento de vertente em retrogressão; 3 – movimento de vertente em alargamento; 4 – movimento de vertente em diminuição; e 5 – movimento de vertente em confinamento	21
Figura 2.12 - Estilo de atividade dos movimentos de vertente (Adaptado de WP-WLI, 1993a). Legenda: 1 – movimento simples; 2 – movimento múltiplo; 3 – movimento sucessivo; 4 – movimento complexo; e 5 – movimento compósito	22
Figura 2.13 – Esquema representativo das tensões envolvidas numa vertente (Zêzere, 2005)	25
Figura 2.14 Esquema representativo dos fatores dos movimentos de vertente (adaptado de Popescu, 1994)	31

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Localização geográfica do arquipélago dos Açores. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84	34
Figura 3.2 - Localização da área do Salto do Fojo na ilha de São Miguel. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S	35
Figura 3.3 - Enquadramento geodinâmico do arquipélago dos Açores (Marques, 2013)	36
Figura 3.4 - Unidades geomorfológicas da ilha de S. Miguel (adaptado de Zbyszewsky, 1961, <i>in</i> Ferreira, 2000)	37
Figura 3.5 – Mapa hipsométrico do Salto do Fojo. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S	38
Figura 3.6 – Mapa de declive do Salto do Fojo. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S	39
Figura 3.7 – (a) Perfil longitudinal A-B do Salto do Fojo e (b) respetiva representação gráfica. O mapa está apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S	40
Figura 3.8 - Carta morfo-tectónica da área de estudo (formas vulcânicas e estruturas tectónicas adaptadas dos trabalhos de Carmo, 2013 e Carmo <i>et al.</i> , 2015). Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S	41
Figura 3.9 - Fotografia tirada do miradouro do Pico do Ferro onde podem ser observados os domos resultantes das erupções de 1439-43 (Pico do Gaspar) e de 1630 (fotografia tirada a 3-11-2013).....	44

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Primeira Página do Diário dos Açores de 31 de dezembro de 1920.....	50
Figura 4.2 - Primeira Página do Diário dos Açores de 25 de setembro de 1940.....	51

Figura 4.3 - Primeira Página do Diário dos Açores de 20 de outubro de 1942	52
Figura 4.4 – “Traço de Água” – vala que direciona as águas pluviais provenientes da Achada das Furnas para a Ribeira da Alegria, desviando-as do talude do Salto do Fojo	53
Figura 4.5 - Primeira Página do Diário dos Açores de 24 de fevereiro de 1946	54
Figura 4.6 - Primeira Página do Diário dos Açores de 11 de outubro de 1948	55
Figura 4.7 - Primeira Página do Correio dos Açores de 28 de janeiro de 1949	56
Figura 4.8 - Primeira Página do Diário dos Açores de 30 de abril de 1996	57

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Fotografia do talude do Salto do Fojo aquando os movimentos de 1996 (fotografia gentilmente partilhada pelo CVARG).....	60
Figura 5.2 – Par de fotografias aéreas para análise estereoscopia do lugar do Salto do Fojo	61
Figura 5.3 – Área da cicatriz e do depósito dos movimentos de vertente de abril de 1996 no Salto do Fojo. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84.....	61
Figura 5.4 – Cicatriz dos movimentos de vertente de abril de 1996 (fotografia gentilmente partilhada pelo CVARG)	62
Figura 5.5 – Depósito dos movimentos de vertente de abril de 1996 (fotografia gentilmente partilhada pelo CVARG)	62
Figura 5.6 – Localização das estações de campo utilizadas para definir a coluna litoestratigráfica geral do Salto do Fojo. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S	63
Figura 5.7 – Colunas litoestratigráficas parciais para as estações de campo.....	65
Figura 5.8 – Fotografia do talude do Salto do Fojo aquando os movimentos de verente de abril de 1996 (Malheiro e Fraga, 1996)	66
Figura 5.9 – Coluna litoestratigráfica geral do Salto do Fojo.....	66
Figura 5.10 – Aspeto geral do afloramento da estação de campo I.....	67
Figura 5.11 - Aspeto geral do afloramento da estação de campo II	68
Figura 5.12 - Aspeto geral do afloramento da estação de campo IV	68
Figura 5.13 - Aspeto geral do afloramento da estação de campo V	69
Figura 5.14 – Aspeto geral do afloramento da estação de campo VI	70
Figura 5.15 – Análise granulométrica - peneiração	73
Figura 5.16 – Análise granulométrica – sedimentação.....	73
Figura 5.17 – Curva granulométrica da amostra SF1	74
Figura 5.18 – Curva granulométrica da amostra SF2	74

Figura 5.19 – Curva granulométrica da amostra SF3 FINO	75
Figura 5.20 – Curva granulométrica da amostra SF3 GROSSO	75
Figura 5.21 – Curva granulométrica da amostra SF4	76
Figura 5.22 – Curva granulométrica da amostra SF5	76
Figura 5.23 – Curva granulométrica da amostra SF6	77
Figura 5.24 – Curva granulométrica da amostra SF7	77
Figura 5.25 – Curva granulométrica da amostra SF8	78
Figura 5.26 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de determinação do LL.....	81
Figura 5.27 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de determinação do LP.....	81
Figura 5.28 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF1 .	81
Figura 5.29 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF2 .	82
Figura 5.30 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF3 FINO	82
Figura 5.31 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF3 GROSSO.....	83
Figura 5.32 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF4 .	83
Figura 5.33 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF5 .	84
Figura 5.34 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF6 .	84
Figura 5.35 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF7 .	85
Figura 5.36 – Diagrama para determinação do Limite de Liquidez da amostra SF8 .	85
Figura 5.37 – Aspecto dos picnómetros durante a realização do ensaio para a determinação da densidade das partículas	89
Figura 5.38 – Aspecto geral da máquina de corte direto utilizada no ensaio	91
Figura 5.39 – Diagrama da variação da tensão-deformação e envolvente de rotura (a) e de volume de uma amostra (b) referente à amostra SF1	92
Figura 5.40 – Diagrama da variação da tensão-deformação e envolvente de rotura (a) e de volume de uma amostra (b) referente à amostra SF4.....	93
Figura 5.41 – Diagrama da variação da tensão-deformação e envolvente de rotura (a) e de volume de uma amostra (b) referente à amostra SF7	94
Figura 5.42 – Envolvente de rotura segundo o critério de Mohr-Coulomb referente à amostra SF1	95
Figura 5.43 – Envolvente de rotura segundo o critério de Mohr-Coulomb referente à amostra SF4	96
Figura 5.44 – Envolvente de rotura segundo o critério de Mohr-Coulomb referente à amostra SF7	96

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Métodos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente. Os métodos utilizados no trabalho encontram-se selecionados a negrito	100
Figura 6.2 – Esquema representativo do método das fatias, em que um talude é dividido em 11 fatias de limites laterais.....	102
Figura 6.3 – Método das fatias de acordo com a forma da superfície de rotura do talude.....	103
Figura 6.4 – Método de Fellenius – Diagrama de forças aplicadas numa fatia. Legenda: w - peso da fatia, h - espessura da fatia; l - largura da fatia medida paralelamente à sua base; b - largura da fatia medida na horizontal; T - força tangencial na base da fatia; N - força normal na base da fatia; α - ao ângulo que a força peso (w) faz com a normal à superfície de rotura (adaptado de Junior, 2005.)	105
Figura 6.5 – Método de Bishop Simplificado - Diagrama de forças aplicadas numa fatia. Legenda; w - peso da fatia, b - largura da fatia medida na horizontal; T - força tangencial na base da fatia; N - força normal na base da fatia; α - ângulo que a força peso (W) faz com a normal à superfície de rotura; X às forças normais entre fatias e Y às forças tangenciais entre fatias; O - centro do círculo de rotura (adaptado de Silva, 2010).	106
Figura 6.6 – Método de Janbu Simplificado – Variação do fator f_0 em função do parâmetro d/L (declive da superfície) e do tipo de solo. A curva foi realizada comparando os resultados obtidos pelo método de Janbu Simplificado e pelo Método de Janbu Generalizado (adaptado de Silva, 2010).....	109
Figura 6.7 – Método de Spencer – Diagrama de forças atuantes na base de uma fatia. Legenda: b - largura da fatia medida na horizontal; l - largura da fatia; T - força tangencial na base da fatia; N - força normal na base da fatia; X às forças normais entre fatias e Y às forças tangenciais entre fatias; h - espessura da fatia; α - ângulo que a força peso (W) faz com a normal à superfície de rotura; e δ - inclinação da força resultante Q (adaptado de Silva, 2010).	111
Figura 6.8 – Exemplo da determinação gráfica do fator de segurança (FS) fazendo variar o ângulo δ (adaptado de Silva, 2013.....	111
Figura 6.9 – Método de Morgenstern-Price – Diagrama de forças atuantes na base de uma fatia. Legenda: b - largura da fatia; T - força tangencial; N - força normal; h - espessura da fatia; α - ângulo que a força peso (W) faz com a normal à superfície de rotura; X - forças normais entre fatias; e Y - forças tangenciais entre fatias (adaptado de Silva, 2013).	112
Figura 6.10 – Funções que relacionam a força normal com a tangencial (adaptado de Junior, 2005).....	114
Figura 6.11 – Exemplo da determinação gráfica do fator de segurança (FS) fazendo variar o ângulo δ , utilizando o método de Morgenstern-Price (adaptado de Silva, 2013).	114
Figura 6.12 – Método de GLE – Determinação gráfica do FS (adaptado de Silva, 2013).....	116

Figura 6.13 – Método de <i>Corps of Engineers 1</i> (adaptado de Silva, 2013).....	117
Figura 6.14 – Exemplo de uma função para o talude à esquerda utilizando o método de <i>Corps of Engineers 1</i> (adaptado de Silva, 2013).....	117
Figura 6.15 – Método de <i>Corps of Engineers 2</i> (Silva, 2013).....	118
Figura 6.16 – Exemplo de uma função para o talude à esquerda utilizando o método de <i>Corps of Engineers 2</i> (adaptado de Silva, 2013).....	118
Figura 6.17 – Exemplo de uma função para o talude à esquerda utilizando o método de Lowe – Karafiath (adaptado de Silva, 2013)	119
Figura 6.18 – Método de Janbu – Forças aplicadas numa fatia de solo, onde W corresponde ao peso da fatia; h à sua espessura; b à sua largura medida na horizontal; T à força tangencial na base da fatia; N à força normal na base da fatia; α ao ângulo que a força peso (w) faz com a normal à superfície de rotura; Y às forças tangenciais entre fatias; e X às forças normais entre fatias (adaptado de Silva, 2010).....	120
Figura 6.19 – Perfil transversal do talude do Salto do Fojo e respectivo modelo geológico, com a representação da malha de centros de rotação e retas tangentes aos círculos considerados como possíveis soluções.....	123
Figura 6.20 – Resultado da aplicação do método de Bishop, Ordinário e de Janbu ao talude do Salto do Fojo.	124
Figura 6.21 – Resultado da aplicação do método de Spencer ao talude do Salto do Fojo.	124
Figura 6.22 – Resultado da aplicação do método de Morgenstern - Price ao talude do Salto do Fojo.....	125
Figura 6.23 – Resultado da aplicação do método de GLE ao talude do Salto do Fojo	125
Figura 6.24 – Resultado da aplicação do método de <i>Corps of Engineers 1</i> ao talude do Salto do Fojo.....	126
Figura 6.25 – Resultado da aplicação do método de <i>Corps of Engineers 2</i> ao talude do Salto do Fojo.....	126
Figura 6.26 – Resultado da aplicação do método de Lowe - Karafiath ao talude do Salto do Fojo.....	127
Figura 6.27 – Resultado da aplicação do método de Janbu Generalizado ao talude do Salto do Fojo.....	127

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Classificação dos deslizamentos (adaptado de Dikau <i>et al.</i> , 1996).....	11
Tabela 2.2 - Nomenclatura das diferentes partes do movimento de vertente “tipo” representado na Figura 2.8 (Maques, 2004).....	16
Tabela 2.3 - Nomenclatura das diferentes dimensões do movimento de vertente “tipo” representado na Figura 2.9 (Marques, 2004)	18
Tabela 2.4 - Escala de velocidades para os movimentos de vertente (adaptado de Cruden e Varnes, 1996)	23
Tabela 2.5 - Definição das prováveis consequências destrutivas dos movimentos de vertente em função da respetiva velocidade (adaptado de Cruden e Varnes, 1996)...	24
Tabela 2.6 - Fatores responsáveis pelar redução da resistência ao corte vs. Fatores responsáveis pelo aumento da tensão de corte (adaptado de Marques, 2004).....	29

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Eventos de instabilidade geomorfológica catalogados na base de dados NATHA para a região do Salto do Fojo	49
--	----

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Coordenadas UTM de cada um dos locais onde foram realizados os logs do Salto do Fojo.....	64
Tabela 5.2 – Relação entre cada camada geológica, as amostras recolhidas e a localização	72
Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de granulometria	79

Tabela 5.4 – Resultados para o Limite de Liquidez.....	86
Tabela 5.5 – Classificação dos Solos (ASTM D 2487 – 85), adaptada por Fernandes (2006).....	87
Tabela 5.6 – Classificação dos solos do Salto do Fojo	88
Tabela 5.7 – Densidade das partículas considerada para cada camada geológica.....	90
Tabela 5.8 – Compilação de valores de densidade de escoadas lávicas basálticas (<i>s.l.</i>)	90
Tabela 5.9 – Valores determinados para a coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) para as camadas A, B e E.....	97
Tabela 5.10 – Parâmetros geotécnicos considerados para a unidade geológica C	97
Tabela 5.11 – Valores utilizados para a coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) para cada uma das amostras.....	97

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Classificação de cada um dos métodos das fatias de acordo com a satisfação das equações de equilíbrio estático	104
Tabela 6.2 – Resultados do FS obtido para cada método com recurso ao programa $SLOPE/W$	128

LISTA DE ACRÓNIMOS

AASHTO	American Association for State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing Materials
CPT	Teste de Penetração de Cone
CVARG	Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos
CPT	Teste de Penetração de Cone
DSCIG-SRCTE	Direcção de Serviços de Cartografia e Informação Geográfica – Secretaria Regional da Ciência, Tecnologia e Equipamentos
EM-DAT	The International Disaster Database
IAEG	International Association of Engineering Geology
IGeoE	Instituto Geográfico do Exército
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
NATHA	Natural Hazards in Azores
UCS	Classificação Unificada dos Solos
WP-WLI	Working Party on World Landslide Inventory

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
b	Largura da fatia medida na horizontal
c	Coesão do material
c'	Coesão efetiva do material
C _c	Coefficiente de curvatura
C _u	Coefficiente de uniformidade
D ₁₀	Diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partícula
D ₃₀	Diâmetro abaixo do qual se situam 30% em peso das partícula
D ₆₀	Diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partícula
FS	Fator de segurança
FS _i	Fator de segurança arbitrado
f ₀	Fator de correção de Janbu
IP	Índice de Plasticidade
K _c	Aceleração crítica
l	Largura da fatia medida paralelamente à fatia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Força normal na base da fatia
Q	Resultante das forças entre fatias
r_u	Coefficiente de pressão de água normalizado
T	Força tangencial na base da fatia
u_w	Pressão neutra da água
W	Peso específico
X	Forças normais entre fatias
Y	Forças tangenciais entre fatias
z	Espessura do solo
τ_f	Resistência ao corte
τ_{fr}	Resistência ao corte residual
σ_n	Tensão normal no plano de rotura
σ'	Tensão efetiva
ϕ	Ângulo de atrito interno
ϕ'	Ângulo de atrito interno efetivo
ϕ'_{r}	Ângulo de atrito interno efetivo residual
λ	Tangente da inclinação da resultante das forças entre fatias
β	Inclinação do talude
α	Inclinação da fatia
δ	Inclinação da resultante das forças entre fatias
γ_w	Peso específico da água
γ	Peso específico do solo

AGRADECIMENTOS

“Na vida não existem soluções. Existem forças em marcha: é preciso criá-las e, então, a elas seguem-se as soluções.”

Antoine de Saint-Exupéry (1900-1944)

Ao longo da minha vida foram muitas as pessoas que me influenciaram e que tornaram-me no que sou hoje, e às quais agradeço:

- Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter iluminado o meu caminho durante todo o percurso, pela força e fé que encontrei nele que me deram coragem para chegar aqui;
- Ao meu pai, Carlos Alberto do Couto Pacheco Bolarinho, agradeço por todo o apoio que me deu, pelas tantas idas ao campo comigo, por ter arriscado inúmeras vezes a sua própria vida só para me ver feliz, que esteve sempre ao meu lado pronto a me ajudar, a qualquer hora do dia, e a quem eu devo a minha vida e sou grata por tudo o que fez e faz por mim;
- À minha mãe, Liberta Maria Paiva Ferreira Bolarinho, agradeço pelo amor incondicional, pelo apoio, pela força que me deu quando tudo parecia não dar certo, pelo incentivo e por acreditar em mim todos os dias da minha vida;
- À minha irmã, Beatriz Paiva Bolarinho, agradeço pelo carinho que só um irmão pode dar, pela amizade e pela confiança que tem em mim que me deu força para ir mais além;
- Ao meu namorado, Tiago João Feitor Sousa, agradeço pelo amor, pela amizade, pela compreensão quando tantas vezes não pude namorar para poder me dedicar à tese, por acreditar em mim, por me fazer uma mulher muito feliz e por me dar força para acordar cada dia;

- À minha querida avó, Maria Hermínia Paiva, a minha princesa e um dos grandes amores da minha vida, agradeço por todo o amor que sempre me deu, pela preocupação, por me ter ensinado muitas das coisas que sei na vida, por me ajudar a ver qual era o melhor caminho a seguir, pelos valores que me transmitiu, pela mãe que foi para mim, pela bondade que tem no seu coração e que sempre tentou me inculcar e que, mesmo não se encontrando em boas condições de saúde, estará sempre a meu lado, no meu coração, a torcer por mim e de quem eu, por mais anos que viva, nunca me esquecerei;
- A toda a minha família agradeço a amizade, a alegria e todo o apoio, essenciais para a realização desta tese.

Para a materialização desta dissertação foram muitas as pessoas que deram a sua colaboração, às quais me dirijo com o meu profundo agradecimento:

- ao Magnífico Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor João Luís Gaspar, na qualidade de orientador científico, agradeço profundamente pelos valiosos conhecimentos transmitidos, pela orientação científica, incentivo, apoio, estímulo, colaboração, boa disposição e pelas inúmeras ideias que tornaram esta tese no que é hoje;
- ao meu orientador Doutor Rui Marques os meus profundos agradecimentos pelos ensinamentos transmitidos, pela disponibilidade, empenho, revisão de textos, pela apreciação crítica, cedência de bibliografia, esclarecimento de dúvidas, pela alegria, pela dedicação prestada, pela amizade e sobretudo pela paciência que teve para comigo quando lhe ligava a pensar que nada iria dar certo e sempre me incentivava e me dava força para continuar e é por tudo isso que tenho uma enorme admiração pela pessoa que é, pela força que tem, e que foi um prazer para mim trabalhar consigo;
- ao mestre Paulo Pacheco, agradeço pelo tempo que inúmeras vezes dedicou, pelas tantas idas ao campo nas quais sempre participou, pela compreensão, pelos conselhos, pelo interesse que demonstrou por este trabalho, pelo profissionalismo e pelo empenho;
- ao Diretor do Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, Professor Doutor José Virgílio Cruz, agradeço pela disponibilidade em ajudar, pelo apoio prestado em assuntos legais relacionados com o projeto de mestrado;
- à Professora Doutora Maria Gabriela Queiroz, na qualidade de diretora do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos (CVARG), agradeço o acolhimento e as facilidades que tornaram possível o desenvolvimento desta tese de mestrado;

- à Professora Doutora Teresa Ferreira, na qualidade de presidente do Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), agradeço as facilidades concedidas que tornaram possível o desenvolvimento desta tese de mestrado;
- à Sra. Conceição Bicudo, agradeço profundamente pelo apoio, compreensão, pelos conselhos, pelo incentivo quando nada na vida parecia dar certo, por acreditar em mim, por me ajudar, por me ter ouvido inúmeras vezes e ter dado o seu ombro amigo;
- aos funcionários da Biblioteca Pública e Arquivo Regional de Ponta Delgada, agradeço o profissionalismo e a compreensão que demonstraram às inúmeras solicitações de documentação;
- à Geóloga Ana Malheiro, agradeço pela disponibilidade, pelo esclarecimento de algumas questões sobre a temática da tese, pelas fotografias e documentação disponibilizadas e pela prontidão em ajudar;
- à Doutora Rita Carmo, agradeço pela partilha de informação;
- ao Engenheiro Ricardo Costa, agradeço pela compreensão quando inúmeras vezes tive de faltar ao trabalho, ou chegar atrasada para poder realizar ensaios, para as saídas de campo, fundamentais para a concretização desta dissertação, agradeço também o apoio, confiança, amizade e oportunidade.
- à minha amiga e colega de trabalho Catarina Castello agradeço a amizade, o apoio, a força e companheirismo;
- aos meus grandes dois amigos e mosqueteiros da vida, Carlos Silva e Fábio Costa, agradeço a amizade, a diversão, o apoio e por fazerem parte da minha vida;
- ao meu grande amigo Filipe Peixoto, agradeço a enorme amizade, as risadas que demos ao longo da vida, os momentos fascinantes que passámos juntos que ficam para sempre na recordação, pelo companheirismo e apoio, que mesmo estando longe estive presente;
- aos meus colegas e amigos do mestrado, agradeço a amizade, a força, a alegria e a confiança;
- aos meus colegas e amigos de trabalho, agradeço pelo incentivo, amizade, pela força, pela prontidão em ajudar, pelas risadas e bons momentos, pelo ombro amigo nos maus momentos e por estarem presentes todos os dias a meu lado.

Por último, o meu profundo agradecimento a todos aqueles que de certa forma contribuíram para a realização desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

RESUMO

Fruto da localização geográfica e do enquadramento geodinâmico, os Açores têm sido marcados pela ação de diversos perigos naturais, de entre os quais se destacam, pela sua elevada frequência, os fenómenos de instabilidade geomorfológica. Na verdade, são vários os documentos históricos que relatam a ocorrência de eventos desta natureza, responsáveis pela perda de vidas humanas e significativos danos materiais, demonstrando claramente o impacto socioeconómico que este perigo geológico tem na região.

Nos últimos anos, mais concretamente desde o início da década de 90, o concelho da Povoação, localizado na ilha de São Miguel, tem sido particularmente afetado por eventos de instabilidade geomorfológica, os quais têm apresentado uma reincidência quase anual. Toma-se, como exemplo, o evento de instabilidade geomorfológica registado no Salto do Fojo, na freguesia das Furnas, em abril de 1996, no qual foram destruídas habitações, estradas e outras infraestruturas.

Para além das ocorrências recentes, são vários os documentos históricos que relatam eventos de instabilidade geomorfológica no Salto do Fojo, responsáveis pela perda de vidas humanas e significativos danos materiais. Estes eventos encontram-se catalogados na Base de Dados de Perigos Naturais nos Açores (NATHA- *Natural Hazards in Azores*).

A NATHA inclui atualmente informação sobre 7 eventos de instabilidade geomorfológica que afetaram o Salto do Fojo, dos quais se salienta o evento de 14 de outubro de 1942 por ter sido responsável pela morte de 7 pessoas e importante danos socioeconómicos.

Com base no trabalho de campo efetuado e na leitura de trabalhos foi definida uma escala estratigráfica geral para o talude do Salto do Fojo baseada na identificação de cinco camadas geológicas principais: A - constituída por material pomítico de queda intercalado com níveis com elevada concentração de líticos; B - constituída por um ignimbrito; C - constituída por uma escoada lávica basáltica; D - constituída por um ignimbrito; e E - composta por material pomítico de queda, com níveis de intercalação entre *lapilli* e cinzas, característicos das erupções mais recentes do Vulcão das Furnas.

A aplicação de métodos de base física no domínio da previsão de movimentos de vertente, nomeadamente através da articulação de modelos geotécnicos, deve ser suportada pelo estudo exaustivo e rigoroso dos parâmetros geotécnicos. Neste trabalho, foi realizada a caracterização geotécnica das cinco camadas geológicas constituintes do Salto do Fojo, cujos resultados foram incorporados na análise de estabilidade clássica, recorrendo a modelos de estabilidade.

A caracterização física dos materiais que compõem o talude foi determinada através da análise granulométrica, da determinação dos limites de Atterberg e da densidade das partículas, em amostras no estado perturbado. Estes ensaios permitiram a classificação dos solos do Salto do Fojo como areias argilosas.

Os parâmetros de resistência ao corte foram obtidos através de ensaios de corte direto consolidado, em condições drenadas, e em amostras perturbadas, e possibilitaram a determinação do ângulo de atrito interno e da coesão das partículas, essenciais para a análise de estabilidade do talude.

A análise de estabilidade foi efetuada recorrendo ao método das fatias de: (i) Fellenius; (ii) de Bishop Simplificado; (iii) de Janbu Simplificado; (iv) de Spencer; (v) de Morgenstern-Price; (vi) de GLE; (vii) de *Corps of Engineers* 1 e 2; (viii) de Lowe-Karafiath; e (ix) de Janbu Generalizado. Tais métodos não são mais do que hipóteses simplificadoras, criadas por diversos autores, baseadas no método das fatias, que permitiram reduzir o número de incógnitas do sistema, tornando-o estaticamente determinado. As principais diferenças entre os vários métodos residem nas suposições utilizadas para efetuar o balanço entre as equações e as incógnitas, a satisfação ou não das equações da estática, o tipo de superfície de rotura e o modo de inclusão das forças interfatias e a sua relação com as forças normais.

Através dos referidos métodos, foi efetuada a análise de estabilidade convencional com o programa SLOPE/W, com o objetivo de se determinar o fator de segurança global do perfil geológico estudado.

A análise de estabilidade das condições a longo prazo dos diversos setores geológicos, que incluiu a adoção dos parâmetros mecânicos e uma pressão efetiva nula, permitiu verificar que os valores do fator de segurança determinado para o plano de rotura crítico são inferiores à unidade, refletindo uma situação de desequilíbrio físico. Como tal o talude do Salto do Fojo deve ser considerado como instável.

ABSTRACT

As a result of its geographic and geodynamic settings, the Azores archipelago has been affected by the action of the several natural hazards, among which, landslides stand out because of their high frequency of occurrence. In fact, there are several historical accounts reporting the occurrence of landslide events responsible for casualties and significant material damages.

In recent years, specifically since the 90's, the Povoação country, located on the São Miguel Island, has been particularly affected by instability geomorphological events, which have shown an almost annual recurrence. For an example, consider the geomorphological instability event recorded in Salto do Fojo, located in Furnas, in April 1996, in which homes were destroyed, roads and other infrastructure.

In addition to the recent events, there are several historical documents that relate geomorphological instability events in Salto do Fojo responsible for the loss of life and significant property damage. These events are cataloged in the Document Database Natural Hazards in the Azores (NATHA).

The NATHA includes information on 7 geomorphological instability events that affected the Salto do Fojo, of which stand out the events of 14 October 1942 and April 1996 because they were the ones that caused most impact in the region.

The conducted fieldwork and reading the works of Guest *et. al.* (1999) and Moore (1990) allowed to define a general stratigraphic scale for the Salto do Fojo based on the identification of five main geological layers, from bottom to top: A layer consisting of pumice material fall with intercalated with levels with a high concentration of lytic; Layer B consisting of a ignimbrite; C layer consisting of a lava disposed basalt; Layer D, consisting of a ignimbrite; and Layer E, consisting of pumice material fall, with levels of collation between lapilli and ash.

The application of basic physics methods in the prediction of landslides, must be supported by comprehensive and rigorous study of the geotechnical parameters. In this work, it was performed the geotechnical characterization of five geological constituents

do Salto do Fojo, whose results were incorporated into the classical stability analysis, using stability models.

The physical characterization of materials that make up the slope was determined by sieve analysis, determination of the Atterberg limits and particle density, in samples in disturbed state. These tests allowed the classification of Fojo Leaping soils as clay sands.

The shear strength parameters were obtained by direct consolidated cutting tests in conditions drained, and disturbed samples and allowed the determination of the angle of internal friction and cohesion of particles, essential for the slope stability analysis.

The stability analysis was conducted by the method of slices of: (i) Fellenius; (ii) Simplified Bishop; (iii) Janbu Simplified; (iv) Spencer; (v) Morgenstern-Price; (vi) GLE; (vii) Corps of Engineers 1 and 2; (viii) Lowe Karafiath; and (ix) of Janbu Generalized. Such methods are no more than simplifying assumptions, created by several authors, based on the method of slices, which have reduced the number of unknowns of the system, making it statically determined. The main differences between the various methods reside in the assumptions used to make the balance between the equations and unknowns, the satisfaction or otherwise of the static equations, the type of rupture surface and the way of inclusion of interslice forces and their relationship with normal forces.

Through these methods, the conventional stability analysis was carried out with the SLOPE / W program in order to determine the global safety factor of the studied geological profile.

The stability analysis of long-term geological conditions of the various sectors, which included the adoption of mechanical parameters and a zero effective pressure, has shown that the safety factors calculated for the critical failure of the plan are less than unity reflecting an unbalanced situation physical. As such the slope of Salto do Fojo should be considered unstable.

1. INTRODUÇÃO

“Quem não recorda o passado está condenado a repeti-lo.”

Jorge Santayana (1863 - 1952)

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os avanços da Ciência e da Engenharia nas últimas décadas contribuíram para que a relação do Homem com a natureza evoluísse de uma total submissão e aceitação fatalista dos perigos naturais para uma sociedade que, de uma forma geral, procura encontrar novas ferramentas para o ordenamento do território e para o planeamento de emergência, bem como medidas para a mitigação do risco.

No entanto, com base na informação compilada pelas principais bases de dados internacionais (*e.g.* EM-DAT – *The International Disaster Database*), tem-se registado ao longo dos anos um incremento do número de catástrofes naturais e dos danos causados, nomeadamente para aquelas causadas por movimentos de vertente (Marques *et al.*, 2013).

No arquipélago dos Açores, são variadíssimos os indícios geomorfológicos e inúmeras as referências documentais relativas à ocorrência de movimentos de vertente ao longo da História, desencadeados por diferentes fatores (*e.g.* sismos, erupções, precipitação), que refletem o peculiar enquadramento geográfico e geodinâmico do arquipélago. Neste contexto são inúmeros os documentos que relatam mortes de pessoas e animais, destruição de culturas, estradas e infraestruturas, demonstrando claramente o impacte socioeconómico que este perigo geológico tem nesta região (Marques, 2013).

A título de exemplo refere-se, por ser considerado o evento de instabilidade geomorfológica mais danoso conhecido em Portugal (Marques, 2013), a escoada detrítica desencadeada a 22 de outubro de 1522 pelo sismo mais destruidor registado na ilha de São Miguel (intensidade X na Escala Macrossísmica Europeia de 1998; Silveira,

2002, Silveira *et al.*, 2002). Considerado como um evento paroxismal, o volume de material solicitado foi estimado em $6,75 \times 10^6 \text{ m}^3$ e cobriu uma área de aproximadamente $4,5 \text{ km}^2$ (Marques *et al.*, 2009; Marques 2013), tendo soterrado quase na totalidade Vila Franca do Campo, até então capital da ilha, e foi responsável pela morte de aproximadamente 5.000 pessoas (Frutuoso, 1522-1591).

Nos últimos anos, nomeadamente desde o início da década de 90, o concelho da Povoação, localizado na ilha de São Miguel, sobressai do restante arquipélago pela elevada reincidência de eventos de instabilidade geomorfológica com carácter danoso (Marques, 2013). De entre os vários eventos conhecidos, o de 31 de outubro de 1997 marcou a história recente na região. Foram desencadeados centenas de movimentos de vertente por um episódio de precipitação extremamente intensa, tendo vitimado 29 pessoas na freguesia de Ribeira Quente. Esta ocorrência corresponde a um evento extremo quer relativamente às características do fator desencadeante (Marques *et al.*, 2008), quer relativamente ao número de vítimas causado (Marques, 2013).

Para além da freguesia da Ribeira Quente, recorrentemente afetada por este tipo de fenómeno, o lugar do Salto do Fojo, localizado na freguesia das Furnas, apresenta igualmente vários eventos de instabilidade geomorfológica de carácter danoso, alguns dos quais com vítimas mortais associadas. De entre os vários eventos, destaca-se o ocorrido em 14 de outubro de 1942, por corresponder ao evento com maior número de vítimas mortais (7 vítimas) ocorrido naquele local desde o início do séc. XX (Marques, 2013).

Face à elevada reincidência deste tipo de fenómeno no concelho da Povoação, ao elevado número de vítimas mortais associadas e ao impacte socioeconómico por eles provocado nos últimos anos, vários investigadores têm direcionado a sua investigação para a compreensão e predição destes fenómenos, bem como para a avaliação da estabilidade de taludes a várias escalas de análise (*e.g.* Marques 2004; Marques, *et al.*, 2008; Amaral *et al.* 2009a; Amaral, 2010; Marques, 2013).

1.2 OBJETIVOS

Como referido anteriormente, o arquipélago dos Açores, apresenta condições bastante favoráveis ao desenvolvimento de movimentos de vertente. Marques (2013) demonstra que o lugar do Salto do Fojo sobressai na ilha de São Miguel como um dos locais com maior número de vítimas mortais provocadas por fenómenos de instabilidade geomorfológica desde o início do séc. XX. Marques (2013) e Marques *et al.* (2015) apresentam um mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente para a ilha de São Miguel, à escala 1:5.000 e 1:25.000, respetivamente, onde comprovam que o lugar do Salto do Fojo se localiza numa área classificada como tendo suscetibilidade elevada.

Tais evidências levaram a que se selecciona-se o Salto do Fojo como área de estudo da presente tese de mestrado, tendo sido definidos os seguintes objetivos principais:

1. Enquadrar geomorfológica e geologicamente o lugar do Salto do Fojo;
2. Realizar um levantamento documental dos eventos de instabilidade geomorfológica de carácter danoso que afetaram a área de estudo;
3. Compreender e executar procedimentos laboratoriais para caracterizar física e mecanicamente solos, com base nas normas e especificações vigentes em Portugal;
4. Caracterizar física e mecanicamente os depósitos que compõem o talude do Salto do Fojo;
5. Compreender diferentes métodos determinísticos para a análise de estabilidade de taludes;
6. Analisar numericamente a estabilidade do talude do Salto do Fojo, com base em modelos determinísticos;
7. Efetuar uma análise comparativa dos diferentes métodos determinísticos utilizados na análise numérica da estabilidade do talude, tendo em consideração os seus pressupostos e os resultados obtidos.

1.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

A presente dissertação está organizada em duas partes essenciais. A primeira corresponde fundamentalmente a uma revisão bibliográfica que procura dar resposta aos requisitos para a elaboração dos capítulos 1 ao 3. Na segunda parte, que abrange os capítulos 4 ao 6, faz-se a caracterização dos eventos de instabilidade geomorfológica que afetaram o Salto do Fojo, a caracterização do movimento de vertente e a análise da estabilidade do talude do Salto do Fojo (Figura 1.1).

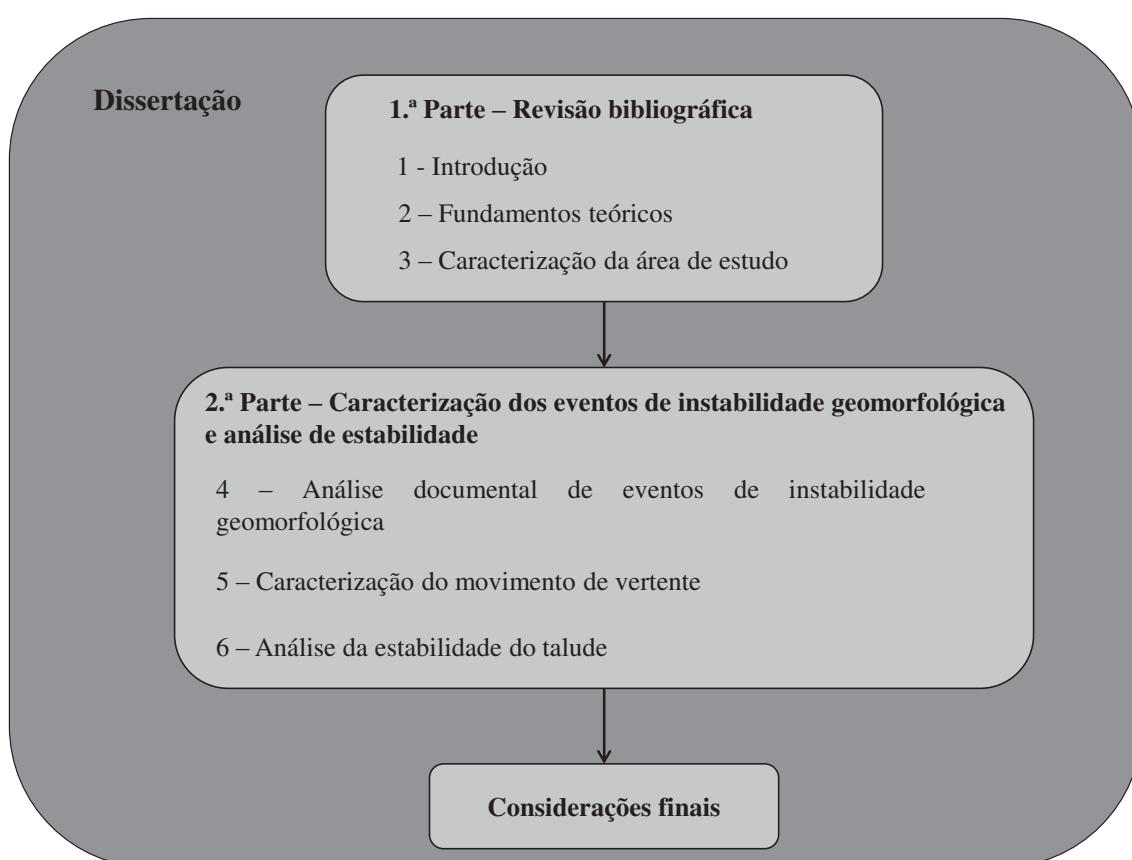


Figura 1.1 – Estrutura organizacional da tese.

No **capítulo 1** é efetuada uma breve introdução, onde se introduz a problemática dos movimentos de vertente no arquipélago dos Açores, bem como os objetivos e a estrutura organizacional da tese.

O **capítulo 2** aborda alguns fundamentos teóricos relativos ao estudo dos movimentos de vertente. Neste capítulo apresentam-se os critérios subjacentes à terminologia adotada na classificação deste tipo de perigo geológico, os critérios

utilizados para a caracterização da sua atividade (estilo, distribuição e estado) e os termos e definições utilizados para descrever a sua morfologia e as suas dimensões. No final do capítulo, apresentam-se as causas principais para o desencadeamento de movimentos de vertente e de que forma influenciam a estabilidade de um talude.

No **capítulo 3** é realizado o enquadramento geral da área de estudo, nomeadamente as características geomorfológicas e geológicas do Vulcão das Furnas e do Salto do Fojo em particular.

O **capítulo 4** compreende a recolha e análise de documentos relativos a eventos de instabilidade geomorfológica com carácter danoso ocorridos no Salto do Fojo desde o início do séc. XX, referidos por Marques (2013) na Base de Dados Documental de Perigos Naturais nos Açores (NATHA – *Natural Hazards in Azores*).

No **capítulo 5** é apresentada a sequência litoestratigráfica dos depósitos vulcânicos que constituem o talude do Salto do Fojo, com base nos trabalhos de campo efetuados. São descritos os ensaios laboratoriais realizados para a caracterização física e mecânica dos depósitos estudados e apresentados os resultados obtidos para os diferentes parâmetros determinados.

O **capítulo 6** aborda a análise da estabilidade do talude com recurso a métodos determinísticos baseados no equilíbrio limite. Descrevem-se os diferentes métodos utilizados e apresentam-se os resultados obtidos recorrendo ao *software* SLOPE/W. No final do capítulo, efetua-se a análise crítica dos resultados obtidos com base nos diferentes métodos utilizados e uma discussão tendo em conta os seus pressupostos.

Por último, no **capítulo 7** tecem-se algumas considerações finais sobre o trabalho desenvolvido e apresentam-se algumas propostas para dar continuidade aos trabalhos efetuados.