

PREVISÃO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA SERRA DE OURO PRETO COM BASE EM ÁRVORE DE EVENTOS

DEDALUS - Acervo - EESC



31100044257

Ezilma Cordeiro Dias

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geotecnia

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 04 / 12 / 03

Ass.: Leandro Cordeiro

ORIENTADOR: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

São Carlos
2003



FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **EZILMA CORDEIRO DIAS**

Dissertação defendida e julgada em 21-03-2002 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Assoc. **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada



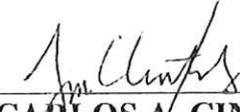
Prof. Assoc. **OSNI JOSÉ PEJON**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada



Profª. Dra. **TERÉZINHA DE JESUS BONUCELLI**
(Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP)

aprovada



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

“Quando o ser humano é determinado, tem um objetivo forte pela frente, ele é capaz de passar por cima do cansaço, lutar e vencer”.

Luiz Almeida Marins Filho, PhD.

Aos queridos Evaldo, Patricia Carla, Ana Flávia, Flávio, Márcio, Mauro, Ana Cláudia, Marília, Douglas, Daniel, Patrícia e em especial aos meus pais (Maria e Belarmindo) e John dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Várias pessoas e entidades contribuíram para a realização deste trabalho, cabe aqui agradecê-las.

Ao Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette, por sua orientação, dedicação e conhecimentos transmitidos durante o desenvolvimento deste trabalho.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de estudo concedida.

Ao Eng. Ed O. F. Calle (Senior Consultant–Strategic Research Department GeoDelft-Holanda) pelas valiosas sugestões.

Ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), pela infra-estrutura oferecida para o programa de pós-graduação, e principalmente pelo quadro de docentes e funcionários.

Ao Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu, pela amizade, incentivo, discussões e sugestões durante a realização deste trabalho.

A Profª. Dra. Teresinha Bonuccelli pelo carinho, pela amizade, pelas valiosas discussões e sugestões e ensinamentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Osni José Pejon pelas discussões e sugestões.

Aos médicos Dr. Leonardo Petrilli Filho, Guilherme Cleber Marconi, José Almir Siqueira Aidar e Valter Fausto dos Santos que foram meus grandes amigos no decorrer desse trabalho.

As amigas do Edifício Bartolomeu de Gusmão, em especial a Irahya e a Monique, pelo incentivo, carinho, amizade e auxílio nos momentos mais difíceis desse trabalho.

Aos amigos Ângelo Zenóbio e Marcos Domingues Muro, pelo carinho, amizade e incentivo.

Á amiga Gracinete Bastos, pelo companheirismo, amizade e carinho na etapa final deste trabalho.

Ao Fernando Hermes Passig, amigo, companheiro e solidário no fechamento deste trabalho.

Ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (Escola de Minas) pelo empréstimo de materiais.

As amigas da República Koxixo (incluindo D. Lúcia), pela amizade e apoio na etapa de obtenção dos dados em Ouro Preto.

Ao Geólogo Eduardo (Dudu) e ao Eder, pelo auxílio na obtenção dos dados em Ouro Preto.

A todos os meus amigos e colegas da pós-graduação em geotecnia pelo apoio e amizade durante o período de realização deste trabalho.

A todos os meus familiares e principalmente a Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	4
2.1.1 <i>Conceitos Básicos</i>	4
2.1.1.1 Escoamentos	5
2.1.1.1.1 Rastejo.....	5
2.1.1.1.2 Corridas.....	6
2.1.1.2 Escorregamentos.....	6
2.1.1.3 Quedas.....	8
2.1.1.4 Tombamentos.....	9
2.1.2 <i>CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA</i>	9
2.2 AVALIAÇÃO DE RISCOS.....	20
2.2.1 <i>Conceitos Básicos</i>	21
2.2.2 <i>Tipos de Análises de Eventos Perigosos (Hazards)</i>	25
2.2.2.1 Análise Relativa.....	27
2.2.2.2 Análises Absolutas.....	27
2.2.2.2.1 Análise determinística	27
2.2.2.2.2 Análise Estatística	28
2.2.2.2.3 Análise Probabilística.....	29
2.2.2.3 Análise Empírica.....	29
2.2.2.4 Análise por Monitoramento	30
2.2.3 <i>FORMAS DE AVALIAÇÃO DE RISCO</i>	32
2.3 RISCOS RELACIONADOS A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	33
2.4 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	38
2.5 PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS PROBABILÍSTICAS E POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO GERAL.....	40
2.5.1 <i>Considerações Gerais</i>	40
2.5.2 <i>Conceitos Básicos</i>	42
2.5.3 <i>Tipos de análises</i>	50
2.5.3.1 Considerações Gerais.....	50
2.5.3.2 QRA (Quantitative Risk Assessment).....	51
2.5.3.2.1 Abordagem Direta	52
2.5.3.2.2 Abordagem por meio de Árvore de Eventos.....	53
2.5.3.2.3 Modelo das Conseqüências	54
2.5.3.2.4 Abordagem por meio de Diagrama de Influência.....	56
2.5.3.3 PRA (Probabilistic Risk Analysis).....	56
2.5.3.3.4 Árvore de eventos (event tree).....	57
2.5.3.3.5 "Fault tree".....	59
3. MATERIAIS E MÉTODOS	65

3.1	CONSIDERAÇÕES BÁSICAS.....	65
3.2	LEVANTAMENTO DOS ATRIBUTOS QUE DEVEM SER MAPEADOS.....	67
3.3	COLETA, GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DAS INFORMAÇÕES.....	70
3.3.1	TRABALHOS PRÉVIOS.....	70
3.3.2	DOCUMENTOS ELABORADOS.....	71
3.3.2.1	MAPA TOPOGRÁFICO.....	71
3.3.2.1.1	Modelo digital do terreno (MDT ou DTM).....	71
3.3.2.1.2	Carta de declividade.....	71
3.3.2.2	MAPA DE CANAIS DE DRENAGEM.....	72
3.3.2.3	CARTA DE CENÁRIOS.....	72
3.3.2.4	TABELA DE CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS.....	72
3.3.2.5	MAPA DO SUBSTRATO ROCHOSO.....	73
3.3.2.6	MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS.....	73
3.3.2.7	MAPA DE FEIÇÕES DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	74
3.3.3	DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA.....	75
3.3.3.1	Queda de Rocha.....	76
3.3.3.2	Tombamento em Rocha.....	76
3.3.3.3	Escoamento.....	79
3.3.3.4	Escorregamento Translacional.....	81
3.3.3.4.1	Escorregamento Translacional em Material Inconsolidado.....	81
3.3.3.4.2	Escorregamento Translacional em Rocha.....	83
3.3.4	RELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS E AS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA ESTABELECIDAS PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA.....	85
3.3.5	VERIFICAÇÃO DO PROCESSO POTENCIAL.....	85
3.3.6	ESTRUTURA BÁSICA DA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA.....	85
4.	APLICAÇÃO.....	87
4.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	87
4.2	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DA ÁREA.....	88
4.2.1	Considerações Gerais.....	88
4.2.2	Aspectos Geológicos.....	88
4.2.2.1	Supergrupo Minas.....	89
4.2.2.1.1	Grupo Caraça.....	90
4.2.2.1.2	Grupo Itabira.....	92
4.2.2.2	Supergrupo Rio das Velhas.....	93
4.2.2.2.1	Grupo Nova Lima.....	93
4.2.3	Aspectos Geomorfológicos.....	93
4.2.4	Vegetação.....	95
4.2.5	Aspectos climáticos.....	95
4.2.6	Hidrografia.....	95
4.3	PLUVIOSIDADE DA ÁREA.....	95
4.4	DOCUMENTOS ELABORADOS.....	105
4.4.1	Mapa Topográfico.....	105
4.4.2	Modelo Digital do Terreno.....	105
4.4.3	Carta de Declividade.....	105
4.4.4	Mapa dos Canais de Drenagem.....	105
4.4.5	Carta de Cenários.....	105
4.4.6	Mapa do Substrato Rochoso.....	106
4.4.7	Mapa do Material Inconsolidado.....	106
4.4.8	Mapa das Feições de Movimento Gravitacional de Massa.....	106
4.4.9	Caracterização do Sistema Classificatório relacionado aos atributos que influenciam na ocorrência dos Movimentos Gravitacionais de Massa.....	107
4.5	RELAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA E OS ATRIBUTOS.....	119
4.6	AVALIAÇÃO DO PROCESSO POTENCIAL.....	130
4.7	AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DOS PROCESSOS PROVÁVEIS.....	141

4.7.1	<i>Escorregamento Translacional Planar</i>	144
4.7.1.1	Cenário 07.....	144
4.7.1.2	Cenário 04.....	149
4.7.1.3	Cenário 11.....	153
4.7.1.3.1	(Encosta 1)	153
4.7.1.3.2	(Encosta 2)	156
4.7.1.4	Cenário 23.....	160
4.7.2	<i>Escorregamento Translacional em Cunha</i>	163
4.7.2.1	Cenário 11.....	163
4.7.2.1.1	Encosta 1	163
4.7.2.1.2	Encosta 2	168
4.7.2.2	Cenário 23.....	171
5.	CONCLUSÕES.....	175
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177

ANEXOS

ANEXO 1. Tabela de Caracterização dos atributos.

ANEXO 2. Arquivo fotográfico da área com visualização dos cenários.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVIDÊNCIAS COMUNS DE RASTEJO (CREEP) GUIDICINI & NIEBLE (1976). A. BLOCOS DE ROCHA DESLOCADOS – B. TRONCOS DE ÁRVORES CURVAS (CONCAVIDADE PARA CIMA) – C. CURVATURA DE LAMINAÇÕES DE SOLO OU ROCHA – D. ESTACAS, POSTES E MONUMENTOS TOMBADOS – F. ESTRADAS DESALINHADAS – G. LINHAS E TURFAS SECAS NAS PEDRAS CONCENTRAM-SE NA PARTE MAIS BAIXA. – H. LINHA DE SEIXOS NA BASE DO SOLO EM RASTEJO. OBS: EXISTEM OUTRAS CAUSAS PROVOCANDO OS MESMOS TIPOS DE PROBLEMAS.	6
FIGURA 2 – TIPOS DE ESCORREGAMENTOS E QUEDAS ASSOCIADAS ÀS DIFERENTES CONDIÇÕES ESTRUTURAIS DO MACIÇO (HOEK & LONDE, 1974).....	8
FIGURA 3 – RECUO EM VALE APRESENTADO POR HUTCHINSON (1988) APUD BONUCCELLI (1999).	17
FIGURA 4 – ALGUNS DOS TIPOS DE RUPTURA CONSIDERADOS POR HUTCHINSON (1988) APUD BONUCCELLI (1999).	17
FIGURA 5 ALGUNS TIPOS DE RUPTURAS CONFINADAS, ROTACIONAIS E ESCORREGAMENTOS COMPOSTOS ADOTADOS POR HUTCHINSON (1988) APUD BONUCCELLI (1999).....	18
FIGURA 6 – ALGUNS TIPOS DE RUPTURAS TRANSLACIONAIS ADOTADAS POR HUTCHINSON (1988) APUD BONUCCELLI (1999).....	18
FIGURA 7 – ALGUNS TIPOS DE RUPTURAS TRANSLACIONAIS ADOTADAS POR HUTCHINSON (1988) APUD BONUCCELLI (1999).....	19
FIGURA 8 – ALGUNS TIPOS DE MOVIMENTO DE DETRITOS EM FORMA DE FLUXO CARACTERIZADOS POR HUTCHINSON (1988) APUD BONUCCELLI (1999).....	20
FIGURA 9 – ALGUNS TIPOS DE TOMBAMENTOS E QUEDAS ADOTADOS POR HUTCHINSON (1988) APUD BONUCCELLI (1999).	20
FIGURA 10 – GRAU DE OBJETIVIDADE DAS ANÁLISES DE RISCO (HANSEN, 1984).	21
FIGURA 11 - RELAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS DE RISCO (MODIFICADO DE HAYS, 1992).	22
FIGURA 12 - DIFERENTES COMPONENTES PARA AVALIAÇÃO DO RISCO (MODIFICADO DE LEROI, 1996).	23
FIGURA 13 - PROCEDIMENTOS E RECURSOS QUE PODEM SER UTILIZADOS PARA O MAPEAMENTO DE RISCO EM DIFERENTES ESCALAS (MODIFICADO DE LEROI, 1996).	24
FIGURA 14. ALTURA VERSUS ÂNGULO DOS TALUDES EXAMINADOS EM HONG KONG (MODIFICADO DE HARTLEN & VIBERG, 1988).	30
FIGURA 15 RELAÇÃO ENTRE ALTURA DE TALUDE E ÂNGULO CONSTRUÍDOS EM DIFERENTES PAÍSES (MODIFICADO DE HARTLEN & VIBERG, 1988).....	30
FIGURA 16. VELOCIDADE DOS RASTEJOS EM XISTO ALGUNS DIAS ANTES DA RUPTURA (SALT, 1988 APUD HARTLEN & VIBERG, 1988).	31
FIGURA 17 DISTRIBUIÇÃO DOS ESCORREGAMENTOS E AVALANCHES NO PERU (CARRILO-GIL & CARRILO-DELGADO APUD HARTLEN & VIBERG, 1988).	33
FIGURA 18. MÉDIA ANUAL DE PERDAS DEVIDO A PROCESSOS GEOLÓGICOS NOS ESTADOS UNIDOS (ROBINSON & SPIEKER, 1978).	34
FIGURA 19 – PRINCIPAIS FONTES DE RISCO REGISTRADOS NO ESTADO DE SÃO PAULO COM DESTAQUE PARA OS MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS (ZUQUETTE ET AL. 1996). É IMPORTANTE SALIENTAR QUE AS UNIDADES 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17 E 18 ESTÃO SUJEITAS A UM OU MAIS TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS.	35
FIGURA 20 ILUSTRAÇÃO DAS DUAS FUNÇÕES X E Y E O ESPAÇO AMOSTRAL S (MEYER, 1972).	43
FIGURA 21. EXEMPLO DE ÁRVORE DE EVENTOS PARA QUEDA DE BLOCOS (QRA REPORT BY ERM, 1996) APUD WONG ET AL (1997).	55
FIGURA 22. ÁRVORE DE EVENTOS TÍPICA (MODIFICADO DE MELCHERS, 1993).....	58
FIGURA 23. “FAULT TREE” TÍPICA, MOSTRANDO OS NÓS (PORTÕES) “AND” E “OR” (MODIFICADO DE MELCHERS, 1993).	61
FIGURA 24. ESTRUTURA FUNDAMENTAL DA “FAULT TREE” (MODIFICADO DE HENLEY & KUMAMOTO, 1992).	62

FIGURA 25: FLUXOGRAMA DAS ETAPAS E FASES DESENVOLVIDAS NO TRABALHO.....	66
FIGURA 26. CONDIÇÕES PROPOSTAS PARA O PROCESSO DE QUEDA DE ROCHA.....	77
FIGURA 27. CONDIÇÕES PROPOSTAS PARA O PROCESSO DE TOMBAMENTO EM ROCHAS.....	78
FIGURA 28. CONDIÇÕES PROPOSTAS PARA O PROCESSO DE ESCOAMENTO.....	80
FIGURA 29. CONDIÇÕES PROPOSTAS PARA O PROCESSO DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM MATERIAIS INCONSOLIDADOS.....	82
FIGURA 30. CONDIÇÕES PROPOSTAS PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM ROCHA.....	84
FIGURA 31. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO.....	87
FIGURA 32 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MODIFICADO DE DORR, 1969).....	88
FIGURA 33. – QUARTZITOS DA FORMAÇÃO MOEDA.....	90
FIGURA 34 – QUARTZITO DA FORMAÇÃO MOEDA EM EXPOSIÇÕES MUITO ALTERADAS E FRIÁVEIS. ...	91
FIGURA 35 – ESCARPAS NO QUARTZITO DA FORMAÇÃO MOEDA.....	91
FIGURA 36 – ITABIRITO DA FORMAÇÃO CAUÊ EXIBINDO FEIÇÕES DO TIPO “FLATIRONS”.....	94
FIGURA 37. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1988.....	98
FIGURA 38. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1989.....	98
FIGURA 39. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1990.....	99
FIGURA 40. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1991.....	99
FIGURA 41. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1992.....	100
FIGURA 42. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1993.....	100
FIGURA 43. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1994.....	101
FIGURA 44. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1995.....	101
FIGURA 45. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1996.....	102
FIGURA 46. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1997.....	102
FIGURA 47. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1998.....	103
FIGURA 48. DADOS PLUVIOMÉTRICOS, MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SARAMENHA, PARA A CIDADE DE OURO PRETO PARA O ANO DE 1999.....	103
FIGURA 49. MAPA TOPOGRÁFICO DA ÁREA.....	110
FIGURA 50. MODELO DIGITAL DO TERRENO.....	111
FIGURA 51. CARTA DE DECLIVIDADE.....	112
FIGURA 52. MAPA DE CANAIS DE DRENAGEM.....	113
FIGURA 53 CARTA DE CENÁRIOS.....	114
FIGURA 54 MAPA DO SUBSTRATO ROCHOSO.....	115
FIGURA 55. MAPA DO MATERIAL INCONSOLIDADO.....	116
FIGURA 56. MAPA DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA: LOCALIZAÇÃO E CÓDIGO DAS FEIÇÕES.....	117
FIGURA 57. MAPA DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA: TIPOS DE PROCESSOS E MATERIAIS ENVOLVIDOS.....	118
FIGURA 58. ÁRVORE DE EVENTOS ELABORADA PARA OS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS EM ROCHA.....	134

FIGURA 59. ÁRVORE DE EVENTOS ELABORADA PARA OS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS, ESCOAMENTOS E CORRIDAS EM MATERIAL INCONSOLIDADO.	135
FIGURA 60. ÁRVORE DE EVENTOS ELABORADA PARA QUEDAS, ROLAMENTOS E TOMBAMENTOS EM ROCHA.	136
FIGURA 61. ÁRVORE DE EVENTOS ELABORADA PARA QUEDAS, ROLAMENTOS E TOMBAMENTOS EM MATERIAL INCONSOLIDADO.	137
FIGURA 62. SEQÜÊNCIA UTILIZADA PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL PLANAR (SEQÜÊNCIA 1) OBTIDA DA ÁRVORE DE EVENTOS REPRESENTADA PELA FIGURA 58.	138
FIGURA 63. SEQÜÊNCIA UTILIZADA PARA ESCORREGAMENTO PLANAR (SEQÜÊNCIA 2) OBTIDA DA ÁRVORE DE EVENTOS REPRESENTADA PELA FIGURA 58.	139
FIGURA 64. SEQÜÊNCIA UTILIZADA PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM CUNHA OBTIDA DA ÁRVORE DE EVENTOS REPRESENTADA PELA FIGURA 58.	140
FIGURA 65. ÁRVORE DE EVENTOS HIPOTÉTICA.	143

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	10
FONTE: MAGALHÃES FREIRE (1965).....	10
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS TÍPICOS DA SERRA DO MAR.....	12
FONTE: WOLLE (1988).....	12
TABELA 3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS GRANDES GRUPOS DE PROCESSOS DE ESCORREGAMENTO NO LATU SENSU.....	13
FONTE: AUGUSTO FILHO (1994).....	13
TABELA 4. CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE ENCOSTA.....	14
FONTE: VARNES, (1978).....	14
TABELA 5. CLASSIFICAÇÃO CINÉTICA DOS MOVIMENTOS DE ENCOSTA.....	16
FONTE: HUTCHINSON (1988).....	16
TABELA 6. DIFERENTES TIPOS DE EVENTOS PERIGOSOS (HAZARDS) E MÉTODOS CORRESPONDENTES.....	26
FONTE: HARTLEN & VIBERG (1988).....	26
TABELA 7. PREVISÃO DE PERDA ECONÔMICA (US\$) NA CALIFÓRNIA ENTRE OS ANOS DE 1970 E 2000.....	34
FONTE: MODIFICADO DE ROBINSON & SPIEKER (1978) APUD RAHN (1986).....	34
TABELA 8 – INVESTIMENTOS FEITOS PELA GEO-RIO EM ESCORREGAMENTOS NO RIO DE JANEIRO ENTRE 1988 E 1996.....	36
FONTE: AMARAL (1997).....	36
TABELA 9 – MAIORIA DOS DESASTRES OCORRIDOS NO RIO DE JANEIRO ENTRE 1986 E 1996.....	36
FONTE: AMARAL (1997).....	36
TABELA 10 – ESTIMATIVA DOS VALORES (EM DÓLARES) RELATIVOS AOS DANOS MATERIAIS CITADOS PELO CORPO DE BOMBEIROS, PARA O PERÍODO DE 1988 A 1998.....	37
FONTE: BONUCCELLI (1999).....	37
TABELA 11 – OCORRÊNCIAS COM DANOS PESSOAIS ATENDIDAS PELO CORPO DE BOMBEIROS NO PERÍODO DE 1988 A 1998.....	38
FONTE: BONUCCELLI (1999).....	38
TABELA 12 VALORES CONSIDERADOS PARA Y (FREQUÊNCIA RELATIVA) E (X) INTENSIDADE.....	45
TABELA 13 – RESUMO DOS INTERVALOS DE VULNERABILIDADE DETERMINADOS EM HONG KONG E VALORES RECOMENDADOS PARA MORTES DEVIDO A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA DE DETRITOS EM SITUAÇÕES DIVERSAS.....	52
FONTE: FINLAY (1997).....	53
TABELA 14. SÍMBOLOS ADOTADOS PARA OS NÓS.....	63
FONTE: MODIFICADO DE HENLEY & KUMAMOTO (1992).....	63
TABELA 15. SÍMBOLOS ADOTADOS PARA OS EVENTOS.....	64
TABELA 16: ATRIBUTOS SELECIONADOS PARA A ÁREA, JUNTAMENTE COM SEUS COMPONENTES E SISTEMA CLASSIFICATÓRIO ADOTADO.....	68
TABELA 16: (CONTINUAÇÃO): ATRIBUTOS SELECIONADOS PARA A ÁREA, JUNTAMENTE COM SEUS COMPONENTES E SISTEMA CLASSIFICATÓRIO ADOTADO.....	69
TABELA 17. MÉTODOS DE OBTENÇÃO DOS ATRIBUTOS CITADOS NA TABELA 16.....	70
TABELA 18 – COLUNA ESTRATIGRÁFICA SIMPLIFICADA PROPOSTA PARA A ÁREA.....	89
FONTE: MODIFICADA DE ENDO (1997).....	89
TABELA 19. PRECIPITAÇÃO MENSAL E ANUAL MEDIDAS NA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DE SARAMENHA (ALCAN) NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1988 A JANEIRO DE 2000.....	97
FONTE: ALCAN (2001).....	97
TABELA 20. DADOS DE CHUVA MÁXIMA ANUAL PARA PRECIPITAÇÃO DIÁRIA E CHUVA ANUAL PARA ACUMULADA E CHUVA DE DIFERENTES DIAS, MÉDIAS E DESVIO PADRÃO DAS MÁXIMAS, PARA O PERÍODO DE 1988 A 1997.....	104
FONTE: BONUCCELLI (1999).....	104
TABELA 21: CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA CLASSIFICATÓRIO ADOTADO.....	108

TABELA 21: (CONTINUAÇÃO) CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA CLASSIFICATÓRIO ADOTADO.	109
TABELA 22: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL PLANAR.	120
TABELA 23: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM CUNHA....	121
TABELA 24: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM DEGRAUS.	122
TABELA 25: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA O PROCESSO DE QUEDA.	123
TABELA 26: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA O PROCESSO DE TOMBAMENTO LENTO.....	124
TABELA 27: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA O PROCESSO DE TOMBAMENTO LENTO.....	125
TABELA 28: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA O PROCESSO DE TOMBAMENTO RÁPIDO.	126
TABELA 29: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM PLACAS... ..	127
TABELA 30: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM LAJES.	127
TABELA 31: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE DETRITOS.	128
TABELA 32: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA O PROCESSO DE CORRIDA OU ESCOAMENTO RÁPIDO.	129
TABELA 33: CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA ESCOAMENTO LENTO.....	129
TABELA 34. LISTAGEM DOS ATRIBUTOS PREDISONENTES E/OU MODIFICADOR AO PROCESSO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA (PRESENTES E OS NECESSÁRIOS AO PROCESSO DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL PLANAR) EXTRAÍDA DA TABELA DE CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS (ANEXO 1) E TABELA 22 (ITEM 4.5) RESPECTIVAMENTE.	131
TABELA 35. LISTAGEM DOS ATRIBUTOS PREDISONENTES E/OU MODIFICADOR AO PROCESSO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA (PRESENTES E OS NECESSÁRIOS AO PROCESSO DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM CUNHA) EXTRAÍDA DA TABELA DE CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS (ANEXO 1) E TABELA 23 (ITEM 4.5).	132
TABELA 36. RESULTADOS APRESENTADOS PELOS CENÁRIOS ANALISADOS.	176

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DTM/MDT: Digital Terrain Model/Modelo Digital do Terreno

IAEG: International Association of Engineering Geology

ISRM: International Society of Rock Mechanics

UNDRO: United Nations Disaster Relief Organization

UNESCO: United Nations Education, Scientific and Cultural Organization

LHZ: Landslide Hazard Zonation

DIRDN: Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais

QRA: Quantitative Risk Assessment

PRA: Probabilistic Risk Analysis

CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais

IGA: Instituto de Geociências Aplicadas

RESUMO

Ouro Preto é uma cidade histórica reconhecida como patrimônio histórico da humanidade pela UNESCO, que tem um passado de intensa exploração mineral e construções sem nenhum planejamento e critério desde 1680. Recentemente, várias ocorrências de escorregamento, quedas e outros movimentos gravitacionais de massa têm ocorrido na área. A ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa é atribuída às chuvas associadas aos fatores predisponentes e modificadores que existem na área. Observa-se que o grande problema não é a magnitude desses processos, mas sim a freqüência com que eles ocorrem. Neste contexto, apresenta-se neste trabalho a previsão de movimentos gravitacionais de massa na Serra de Ouro Preto a partir de árvore de eventos. A avaliação probabilística é realizada a partir de árvore de eventos, para que valores quantitativos sejam atribuídos a cada atributo. Por meio desta análise, é possível se obter uma previsão quantitativa dos possíveis "hazards" e problemas que podem ser esperados na região. Cada tipo de movimento gravitacional de massa é composto por uma seqüência condicionada de atributos que deve ser considerada, e para cada um deles, a probabilidade de ocorrência foi estabelecida considerando os aspectos probabilísticos. A probabilidade de cada atributo foi determinada pela freqüência relativa do atributo no cenário (análise unidimensional) e a sua intensidade (análise bidimensional). Concluiu-se que os principais processos de movimentos gravitacionais de massa que ocorrem na área são classificados como escorregamentos translacionais (em rocha e em material inconsolidado), rolamentos (em rocha, detritos e em blocos de rocha), corridas, quedas (em rocha, blocos de rocha e em material inconsolidado), escoamentos (em detritos e em material inconsolidado), complexo (em rocha e em material inconsolidado) os quais apresentam-se ativos (todos sem nenhuma exceção). Quanto aos valores de probabilidades calculados para os processos de movimentos gravitacionais de massa, obteve-se valores de 1 a 17 por cento, resultando num período de retorno de 50 a 5 anos. Estes valores permitem caracterizar a área como uma zona perigosa a potencialmente perigosa.

Palavras-chave: Probabilidades, movimentos gravitacionais de massa, árvore de eventos, cenários, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

ABSTRACT

Ouro Preto is a historical city that enjoys the World Heritage Landmark Status as granted by UNESCO, and has a history of heavy mining and rampant unstructured housing dating back to 1680. Recently there have been many occurrences of landslides, rock fall and other landslide hazards. The effects of rainfall events associated with predisposing and modifying factors that exist in the area are attributed to the occurrence of landslides. It should be noted that the biggest problem is not the magnitude of these hazards, but the frequency with they occur. Thus, the Assessment of landslide processes in Ouro Preto is presented through event tree form. The probabilistic analysis is performed in an event tree form in order to give quantitative values for every attribute. Such analysis allows a quantitative prediction of the possible hazards and problems that can be expected in the region. Every type of landslide process has a conditional sequence of attributes that must be taken into account and for every kind of attribute the probability of occurrence is established through probabilistic aspects. The probability of every attribute is identified by its relative frequency in the scenario (one-dimensional analysis) and the intensity (two-dimensional analysis). It was possible to conclude that the main landslide processes that occur in the area are classified as translational slides, bouncing or rolling, quickly flows, falls, flows and complex and all the processes are currently active. Concerning the probability values that were calculated for the landslide processes, a range from 1 to 17 percent, they resulted in a return period from 50 to 5 years. These values allow characterizing the area as a dangerous to a potentially dangerous zone.

Keywords: Probabilities, landslides, event tree, scenario, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil.

1. INTRODUÇÃO

Movimentos gravitacionais de massa em regiões montanhosas fazem parte do processo natural de mudanças do meio físico e alteração do relevo. Quando as atividades do Homem interferem neste processo natural uma série de problemas pode ocorrer, pois a atividade antrópica muitas vezes intervém e acelera o processo de alteração do meio físico. Desta forma, a exploração dos recursos naturais sem muito critério e a ocupação de forma desordenada do espaço físico e urbano, pode provocar e agravar acentuadamente a deteriorização e degradação do meio ambiente (BONUCELLI, 1999).

Segundo BONUCELLI (1995) os países em desenvolvimento são os que têm mais sofrido com as conseqüências desses desastres ambientais. Não seria oportuno discutir as responsabilidades por essa situação que geralmente é resultante de questões de ordem econômica, da falta de legislação e fiscalização, e também por pressões econômicas. O primeiro passo para qualquer ação, na tentativa de solucionar ou minimizar estes problemas, é o conhecimento detalhado do meio físico, onde atuam os processos que alteram e/ou degradam o meio ambiente.

Os movimentos gravitacionais de massa são alguns, dos mais importantes processos naturais, que ocorrem no meio físico devido às suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas.

A cidade de Ouro Preto tem sido extremamente afetada por movimentos gravitacionais de massa, tendo como conseqüência enormes prejuízos sociais e econômicos, particularmente em época de chuvas intensas e/ou prolongadas.

Os movimentos gravitacionais de massa nas encostas de Ouro Preto têm ocorrido desde o início do seu povoamento, primeiro nas minerações e mais recentemente na zona urbana. Os tipos mais comuns são os escorregamentos translacionais rasos, podendo ocorrer também os tombamentos, quedas e

escoamentos, todos com alta frequência (pelo menos uma vez/ano), o que coloca em risco a população, o acervo histórico e as obras civis.

Vários trabalhos têm sido realizados na área, com intuito de caracterizar os movimentos gravitacionais de massa e propor medidas preventivas para evitar a ocorrência de tais processos, como de SOBREIRA (1993), GOMES & OLIVEIRA FILHO (1993), SOUZA (1996), ZUQUETTE *et al* (1996), OLIVEIRA & DIAS (1997), ENDO (1997), FONTES & PEJON (1999), BONUCCELLI & ZUQUETTE (1999), ZENÓBIO & ZUQUETTE (2000) e SILVA & PEJON (2001), sendo estes de caráter qualitativo ou semiquantitativo.

No sentido de elaborar uma avaliação mais quantitativa, foi desenvolvido um trabalho que buscou uma avaliação probabilística que permitisse definir tipos de atributos que devem ser considerados em diferentes situações, bem como as técnicas utilizadas, tendo como base às pesquisas de CHOWDHURY (1988), BERGADO (1988), BIELSKI *et al.* (1988), GRIVAS & CHOWDHURY (1988), READ & HARR (1988), RAHMAN *et al.* (1988), MIAO & AI (1988), HARTLEN & VIBERG (1988), KEATON & ECKHOFF (1990), OMURA & HICKS (1992), NIANXUEL & ZHUPING (1992), HAMMOND *et al.* (1992), BERGGREN *et al.* (1992), HENLEY & KUMAMOTO (1992), MELCHERS (1993), RIED (1993), HACHICH (1993), WONG *et al.* (1997), FINLAY *et al.* (1997), BUNCE *et al.* (1997), e MAHLER & OLIVEIRA (2000).

Tendo em vista que para cada tipo de processo utiliza-se classe de atributos diferentes foi necessário estabelecer condições predisponentes e deflagradoras para cada tipo de movimento gravitacional de massa, neste caso utilizou-se os trabalhos realizados em regiões montanhosas de WONG & HO (1997), SIMON *et al.* (1990), FRANKS (1999), SIDLE *et al.* (1985), SOETERS & VAN WESTEN (1996), SANTOSO & SUKMONO (1993), CRUDEN & HU (1996) e trabalhos clássicos de HUTCHINSON (1988); GOODMAN & KIEFFER (2000); CRUDEN & VARNES (1996); HOEK & BRAY (1977) e TURNER (1996).

No intuito de se obter uma caracterização mais minuciosa da área estudada, as encostas foram divididas em cenários. Os cenários foram delimitados a partir da combinação do mapa de landform e o mapa de canais de drenagem, considerando-se ainda a inversão na direção da encosta, o tipo de material e o divisor de água de forma a se obter uma área mais homogênea e conseqüentemente reduzir a variabilidade espacial existente.

Dessa forma procurou-se determinar o conjunto de condições necessárias para ocorrência de diferentes processos, e conseqüentemente avaliar os possíveis movimentos em cada cenário, permitindo a avaliação probabilística dos movimentos gravitacionais de massa.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O presente trabalho teve como objetivo elaborar uma análise quantitativa dos Movimentos Gravitacionais de Massa (escorregamento translacional planar e em cunha), a partir dos atributos do meio físico, considerando os aspectos probabilísticos e árvore de eventos.

A justificativa desta pesquisa se deve ao fato de que o espaço urbano da cidade de Ouro Preto tem sido extremamente afetado por movimentos gravitacionais de massa, particularmente em épocas de chuvas intensas e/ou prolongadas. Neste contexto, escorregamento de encostas, erosões, inundações e assoreamentos constituem fenômenos potenciais, que acarretam enormes prejuízos econômicos e sociais à histórica cidade de Ouro Preto.

Esta complexidade geotécnica da área é condicionada, além dos fatores geológicos e climáticos (fatores deflagradores e predisponentes), pela ocupação desordenada e uso inadequado do solo, em particular ao longo das encostas que delimitam o núcleo urbano. Embora estes fenômenos não sejam recentes (existem registros de ocorrências de escorregamentos nas encostas de Ouro Preto que datam do início do século XVIII), a excessiva e desordenada expansão atual da cidade ao longo das encostas tem propiciado eventos de Movimentos Gravitacionais de Massa cada vez mais importantes e mais danosos à infraestrutura urbana, inclusive com perdas de vidas humanas.

A área escolhida para a realização deste trabalho foi parte da serra de Ouro Preto por constituir um potencial crítico em relação aos movimentos gravitacionais de massa, uma vez que estes estão condicionados a um conjunto de atributos predisponentes, descontinuidades do meio físico, associados a deflagradores naturais (chuvas), normalmente facilitados por atributos modificadores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo aspectos relativos aos movimentos gravitacionais de massa em termos de conceitos e classificações, a avaliação de riscos (análise relativa, absoluta, empírica e por monitoramento, conceitos e formas de avaliação), a avaliação probabilística dos movimentos gravitacionais de massa, aos princípios de aplicação e as possibilidades de aplicação geral.

2.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Devido a grande diversidade encontrada nos conceitos e classificações no que diz respeito a movimento gravitacional de massa tornou-se necessário adotar alguns conceitos, bem como destacar algumas das classificações mais utilizadas.

2.1.1 *Conceitos Básicos*

HUTCHINSON (1968), define os movimentos gravitacionais de massa como todos aqueles induzidos pela aceleração gravitacional, exceto aqueles nos quais o material é carregado diretamente por um meio transportante como água, gelo, neve ou ar, quando são denominados processos de transporte de massa. Os movimentos gravitacionais de massa são influenciados por fatores como litologia, hidrogeologia, geologia estrutural, topografia, clima, vegetação, movimentos sísmicos e erosão HUTCHINSON (1988).

Segundo FREIRE (1965) escorregamento (*strictu sensu*) corresponde a um deslocamento finito ao longo de uma superfície definida de deslizamento preexistente ou de neoformação e classifica-se, em dois subtipos, de acordo com o predomínio de rotação (escorregamento rotacional) ou de translação (escorregamento translacional).

A Associação Internacional de Geologia de Engenharia (1994), tendo em vista as grandes divergências nas classificações de movimentos gravitacionais de massa, publicou um glossário multilinguístico (The Multilingual Landslide Glossary) preparado por um grupo de pesquisadores da UNESCO com a finalidade de classificar e identificar os movimentos. A seguir serão descritos os principais tipos de movimentos gravitacionais de massa propostos, são eles:

2.1.1.1 Escoamentos

Geralmente apresentam-se em diferentes níveis de velocidade: lentos, rápidos a extremamente rápidos. Ocorrem com maior frequência em materiais inconsolidados com diferentes teores de umidade desde materiais totalmente secos, materiais saturados, materiais com umidade próxima ao limite de liquidez.

Descrições relacionadas a esse tipo de movimento têm sido denominadas na literatura como: "creep" ou rastejo, corridas, etc (BONUCELLI, 1999).

2.1.1.1.1 Rastejo

Envolve um conjunto de movimentos lentos (milimétricos a centimétricos por ano) que não apresentem uma superfície de ruptura marcante, e muito menos uma geometria bem definida. As taxas de deslocamento decrescem gradualmente com a profundidade.

Para WOLLE (1980 e 1981a) os rastejos podem ser associados a três mecanismos distintos: Pulsantes, associados a alterações climáticas sazonais e movimentos bruscos de deslocamentos restritos associados à micro-escorregamentos (FIGURA 1).

O rastejo pode atuar nos horizontes superficiais de solo bem como em horizontes de transição solo/rocha e até mesmo em rocha sã (HACH HACH, 1997). Foram incluídos também neste grupo de processos os rastejos associados aos depósitos de tálus e de colúvio ou rastejo superficial segundo HUTCHINSON (1988).

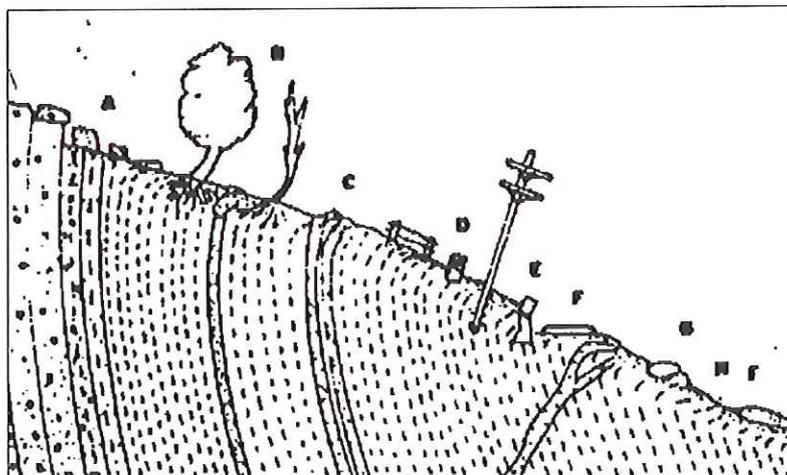


FIGURA 1 – Evidências comuns de Rastejo (creep) GUIDICINI & NIEBLE (1976). A. Blocos de rocha deslocados – B. Troncos de árvores curvas (concavidade para cima) – C. Curvatura de laminações de solo ou rocha – D. Estacas, postes e monumentos tombados – E. Estradas desalinhas – F. Linhas e turfas secas nas pedras concentram-se na parte mais baixa. – G. Linha de seixos na base do solo em rastejo. Obs: existem outras causas provocando os mesmos tipos de problemas.

Mesmo sendo os rastejos considerados movimentos lentos, nada impede que eles sejam causadores de tamanhos danos econômicos, pois são movimentos constantes e coletivos podendo atingir grandes áreas, vários empreendimentos de obras civis, bem como áreas urbanas. Este processo pode ainda evoluir para escorregamentos, acarretando maiores danos econômicos.

2.1.1.1.2 Corridas

As corridas e os rastejos são processos similares, mas as corridas basicamente se diferem dos rastejos pelas altas taxas de velocidades e extenso raio de alcance mesmo em áreas mais planas.

Obs: Vale ressaltar que para HUTCHINSON (1988) os movimentos conhecidos como “creep” ou rastejo não se incluem na classe de escoamentos, sendo considerados como “creep” simplesmente.

2.1.1.2 Escorregamentos

Estes englobam uma série de processos de instabilização, onde o mecanismo de deslizar é bem caracterizado, através de existência de poucos planos de movimentação, bem distintos e externos à massa de instabilidade, e

apresentam velocidade de movimento média a altas, isto é, metros por hora a metros por segundo.

O volume de materiais instabilizados pode ser facilmente identificado e descrito ou pelo menos inferidos. Este tipo de movimento pode envolver solo, saprólito, rocha e depósito coluvionares e de tálus (HACH HACH, 1997). Os escorregamentos são subdivididos de acordo com o mecanismo de ruptura, geometria e o tipo de material mobilizado.

O escorregamento é um processo comumente observado em ocupação de encostas onde envolve a ação antrópica, podendo ocorrer devido à execução de cortes/aterros inadequados, concentração de águas pluviais e servidas devido à retirada da cobertura vegetal, sendo assim denominado escorregamento induzido. Este tipo de escorregamento pode mobilizar materiais produzidos pela própria ocupação tais como: lixos, bota fora, aterro e etc.

O escorregamento propriamente dito são denominados movimentos rápidos ao longo de uma superfície bem definida, exibindo uma geometria que pode ser planar, em cunha, em degraus ou circular, dependendo das estruturas ou características dos planos de fraqueza existentes nos materiais envolvidos na movimentação.

HOEK & LONDE (1974) propõem um conceito de escorregamento específico para diferentes condições estruturais e materiais (solo/rocha).

Os escorregamentos planares ocorrem sobre uma superfície mais ou menos plana exibindo uma inclinação da porção escorregada e que podem se suceder devido a descontinuidades (fraturas, falhas, acamamento, foliações). (FIGURA 2). Os escorregamentos planares também podem ocorrer associados a solos saprolíticos, saprólito e rocha, condicionado por um plano de fraqueza desfavorável à estabilidade, relacionado à estrutura geológica (RIEDEL *et al.* 1995).

Os escorregamentos em cunha podem ocorrer em saprólitos e rochas com dois ou mais planos de fraqueza que se interceptam (FIGURA 2).

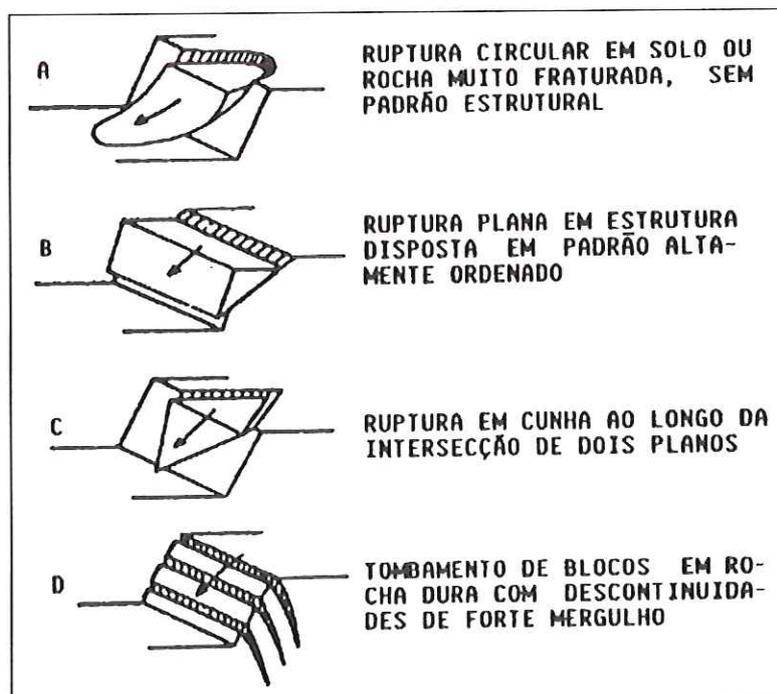


FIGURA 2 – Tipos de Escorregamentos e quedas associadas às diferentes condições estruturais do maciço (HOEK & LONDE, 1974).

Os escorregamentos circulares ou rotacionais possuem superfícies de deslizamento curvas, sendo comum a ocorrência de uma série de rupturas combinadas e sucessivas. Ocorrem em solos espessos e homogêneos ou em pequenas escavações de material natural. Frequentemente quando a ocorrência se dá em aterros, são de grandes dimensões e mostram-se em geral as concavidades voltadas para cima.

Segundo AUGUSTO FILHO (1997), os escorregamentos são os processos de instabilização que têm tido grande números de vítimas nos últimos anos, estando na maioria das vezes associado às formas de uso e ocupação do meio físico de forma inadequada.

2.1.1.3 Quedas

Nos movimentos por quedas, os materiais são descalçados nas encostas geralmente muito íngremes, adquirindo um movimento do tipo queda livre.

Segundo VARNES (1978) estes processos adquirem velocidades muito altas em torno de vários metros por segundo, podendo assim atingir grandes alcances.

Os processos de quedas possuem um forte condicionante litológico e estrutural, e sua deflagração pode estar intimamente associada a processos erosivos.

2.1.1.4 Tombamentos

O tombamento caracteriza-se pela rotação (para frente ou para fora da encosta) de material em torno de um ponto situado abaixo do seu centro de gravidade, por meio da ação da gravidade, ou através de forças adjacentes, ou por fluidos existentes nas descontinuidades. Este processo está combinado à existência de planos de fraqueza subvertical no maciço rochoso.

Pode culminar ou não com queda ou deslizamento, dependendo da geometria e orientação do talude e das descontinuidades. Ocorre em vários tipos de rochas, solos grossos ou finos, podendo movimentar desde algumas centenas até milhares de metros cúbicos de material (BONUCCELLI, 1999).

2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

As classificações relativas a movimentos gravitacionais de massa baseiam-se, normalmente, em características da geometria, dinâmica das superfícies, tipos de materiais, cinemática do movimento e morfologia dos processos.

Apesar de não existir um certo consenso sobre a definição dos termos referentes aos tipos de movimentos gravitacionais de massa, encontra-se na literatura internacional e nacional, inúmeras classificações, sendo que as principais internacionalmente utilizadas, inclusive pela IAEG (International Association of Engineering Geology) e ISRM (International Society of Rock Mechanic) são apresentadas por VARNES (1978) e HUTCHINSON (1988), sendo por este motivo utilizadas neste trabalho. Em termos nacionais, pode-se citar as de MAGALHÃES FREIRE (1965), WOLLE (1988) e AUGUSTO FILHO (1994).

A primeira sistemática de classificação em nível nacional foi proposta por FREIRE (1965), que posteriormente foi modificada por GUIDICINI & NIEBLE (1976). Esta classificação foi baseada na tentativa de agrupar todos os movimentos gravitacionais de massa incluindo as subsidências e movimentos de massa complexos (TABELA 1).

TABELA 1. Classificação dos movimentos gravitacionais de massa.

TIPO FUNDAMENTAL		SUB-TIPO		CLASSES PRINCIPAIS
ESCOAMENTOS	Consistindo em deformação ou movimento contínuo com ou sem superfície definida de escoamento	Rastejo ou reptação	Escoamento Plástico	1.1.1 - Rastejo de solo 1.1.2 - Rastejo de detrito de tálus 1.1.3 - Rastejo de rocha 1.1.4 - Solufluxão 1.1.5 - Rastejo de detritos 1.1.6 - Geleiras
		corridas	Escoamento líquido	1.2.1 - Corrida de terra 1.2.2 - Corrida de areia ou silte 1.2.3 - Corrida de lama 1.2.4 - Avalanche de detritos
ESCORREGAMENTOS	Consiste em deslocamento finito ao longo da superfície de movimento ou deformação	Escorregamentos rotacionais		2.1.1 - Escorregamento de taludes 2.1.2 - Escorregamento de base 2.1.3 - Rotura rot. do solo ou fundação.
		Escorregamentos translacionais		2.2.1 - Escorregamento translacional de rocha 2.2.2 - Escorregamento translacional de solo 2.2.3 - Escorregamento translacional solo e rocha 2.2.4 - Escorregamento translacional retrogressivo 2.2.5 - Queda de rocha 2.2.6 - Queda de detritos
SUBSIDÊNCIAS	Consiste em deslocamento finito ou deformação contínua vertical	Subsidências		3.1.3 - Carreamento de grãos 3.1.2 - Dissol. camadas inf. cavernas 3.1.3 - Deform. de estratos inferiores 3.1.4 - Rotura de estratos inferiores 3.1.5 - Retirada do suporte lateral
		Recalques		3.2.1 - Consolidação 3.2.2 - Compactação
		Desabamentos		3.3.1 - Rotura de camada 3.3.2 - Subescavação 3.3.3 - Retirada do suporte lateral
4 - Formas de transição ou termos de passagem				
5 - Movimentos de massa complexos				

FONTE: MAGALHÃES FREIRE (1965).

A classificação de GUIDICINI & NIEBLE (1976) parece adotar tendências regionais, adaptadas às condições locais das análises de controle de escorregamento.

Dentre as classificações de caráter regional podem-se destacar algumas como as de BARATA (1969) e COSTA NUNES (1966, 1969) baseadas em trabalhos realizados no Rio de Janeiro.

Algumas classificações também surgiram no território Paulista como WOLLE (1988) e AUGUSTO FILHO (1994).

WOLLE (1988) divide os processos de instabilização em classes e subclasses (TABELA 2)

TABELA 2 – Classificação dos processos de instabilização de encostas típicos da Serra do Mar.

CLASSES	SUBCLASSES	
ESCORREGAMENTO EM SOLO	ESCORREGAM. TRANSLACIONAIS (PLANARES)	<ul style="list-style-type: none"> - PROVOCADOS PELA ELEVAÇÃO DE UM NA PRÉ-EXISTENTE - PROVOCADOS PELA INFILTRAÇÃO SEM NA
	ESCORREGAMENTOS ROTACIONAIS	
	ESCORREGAMENTOS PROVOCADOS POR DESCONFINAMENTO	
ESCORREGAMENTO EM ROCHAS E SAPRÓLITO	QUEDAS DE BLOCOS	
	ROLAMENTOS DE MATAÇÕES	
	DESLIZAMENTOS DE BLOCOS E LASCAS	
	ESCORREGAMENTOS ESTRUTURADOS	<ul style="list-style-type: none"> - EM ROCHA FRATURADA - EM SAPROLITO
ESCOAMENTOS LENTOS E MUITO LENTOS	<ul style="list-style-type: none"> - RASTEJO DE MASSAS DE TÁLUS (COLÚVIO); - RASTEJO EM SOLO SUPERFICIAL NAS ENCOSTAS; - RASTEJO PROFUNDO EM ROCHA. 	

FONTE: WOLLE (1988).

AUGUSTO FILHO (1992a) apresenta uma sistemática de classificação relativamente genérica, mas que sintetiza os principais grupos de processos de instabilização pesquisados quando se pretende elaborar Cartas de Risco relacionadas a Escorregamentos no Brasil. Esta classificação apresenta os processos agrupados em quatro grandes classes: rastejos (creep), escorregamentos (slides), quedas (falls) e corridas (flows). Esta classificação é descrita na TABELA 3.

TABELA 3. Características principais dos grandes grupos de processos de escorregamento no latu sensu.

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO/MATERIAL/GEOMETRIA
RASTEJOS (CREEP)	<ul style="list-style-type: none"> - Vários planos de deslocamento (internos) - Velocidades muito baixas (cm/ano) e baixas e decrescentes c/ a profundidade - Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes. - Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada. - Geometria indefinida
ESCORREGAM. (SLIDES)	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos planos de deslocamento (externo) - Velocidades médias (m/h) e altas (m/s) - Pequenos e grandes volumes de material - Geometria e material variável: <p>PLANARES – Solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza. CIRCULARES – Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas EM CUNHA – Solos e rochas com dois planos de fraqueza</p>
QUEDAS (FALLS)	<ul style="list-style-type: none"> - Sem planos de deslocamento - Movimentos: tipo de queda livre ou em plano inclinado - Velocidades muito altas (vários m/s) - Material rochoso - Pequenos e médios volumes - Geometria variável, lascas, placas, blocos, etc. - ROLAMENTO DE MATAÇÃO – TOMBAMENTO
CORRIDAS (FLOWS)	<ul style="list-style-type: none"> - Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa de movimentação); - Movimentos semelhantes ao de um líquido viscoso; - Desenvolvimento ao longo da drenagem; - Velocidades médias e altas; - Mobilização de solo, rocha, detritos e água; - Grandes volumes de material, - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

FONTE: AUGUSTO FILHO (1994).

A classificação proposta por VARNES (1978) leva em consideração o tipo de movimento e o tipo de material como descrito na TABELA 4.

TABELA 4. Classificação dos movimentos de encosta.

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			SUBSTRATO ROCHOSO	SOLO PARA A ENGENHARIA CIVIL	
				GROSSEIRO	FINO
QUEDAS			De rochas	De detritos	De solos
TOMBAMENTOS			De rochas	De detritos	De solos
ESCORREGAMENTOS	ROTACIONAL	Poucas unidades	Deslizamento de rochas	Deslizamento de detritos	Deslizamento de solos
	TRANSLACIONAL		De blocos Rochosos	De blocos de detritos	De blocos de solos
		Muitas unidades	De rochas	De detritos	De solos
ESPALHAMENTOS LATERAIS			De rochas	De detritos	De solos
ESCOAMENTOS			De rocha (rastejo profundo)	De detritos (rastejo de solo)	De solos
COMPLEXOS			Combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos		

FONTE: VARNES, (1978).

Para HUTCHINSON (1988), os movimentos gravitacionais de massa são influenciados por vários fatores tais como: litologia, estrutura geológica, hidrologia, topografia, clima, vegetação, sismicidade e erosão resultando assim numa variedade de tipos e processos que impossibilitam uma rigorosa discretização de tipos na classificação. A sua classificação é baseada principalmente na descrição da morfologia dos movimentos gravitacionais de massa, com algumas considerações de mecanismos e materiais envolvidos bem como a velocidade dos movimentos. Estes parâmetros permitiram as seguintes classificações: recuo, rastejo, ruptura nos taludes de montanhas, escorregamentos, movimentos de

dejetos em forma de fluxo, tombamentos, quedas e movimentos complexos de taludes, que podem ser vistos na TABELA 5 e FIGURAS 3 a 9).

TABELA 5. Classificação cinética dos movimentos de encosta.

TIPOS DE MOVIMENTOS FUNDAMENTAIS	PRINCIPAIS TIPOS DE OCORRÊNCIAS
A – RECUO (“REBOUND”)	1 – artificial. 2 – natural
B – RASTEJO (“CREEP”)	1 – Superficial, predominantemente sazonal – rastejo de tálus; 2 – Grandes profundidades, Rastejo contínuo, Rastejo de massa; 3 – Rastejo progressivo, Anterior a ruptura; 4 – rastejo posteriores a ruptura.
C – RUPTURAS NOS TALUDES DE MONTANHAS. (“SAGGING OF MOUNTAIN SLOPES”)	1 – Ruptura em um lado; 2 – Rupturas em dois lados; 3 – Rupturas Associadas com Tombamentos múltiplos.
D – ESCORREGAMENTOS (“LANDSLIDES”).	1 – ruptura Confinada; 2 – Superfície rotacional; 3 – Escorregamento composto; 4 – Escorregamentos Translacionais.
E - MOV. DE DETRITOS EM FORMA DE FLUXO (“DEBRIS MOV. OF FLOW-LIKE FORM”)	1- Escorregamento de lama (não periglacial); 2- Escorregamento de lama Periglacial; 3- escorregamentos de fluxo; 4- Fluxo de detrito, Fluxo Muito a extremamente rápido de detritos úmidos; 5- “Sturzstroms”, fluxo extremamente rápido de detritos secos.
F - TOMBAMENTOS (“TOPPLES”)	6- tombamentos limitados por descontinuidades preexistentes; 7- tombamentos por fissuras de tração.
G - QUEDAS (“FALLS”)	1 – Primária 2 - Secundária
H - MOVIMENTOS COMPLEXOS DE TALUDES (“COMPLEX SLOPE MOVEMENTS”)	8- “Cambering and valley bulging”; 9- movimento de TALUDE TIPO bloco; 10- “Abandoned clay cliffs” 11- “Landslides breaking down”; 12- escorregamento por erosão de percolação de água; 13- “Multi-tiered slides”; 14- “Multi-storied slides”.

FONTE: HUTCHINSON (1988).

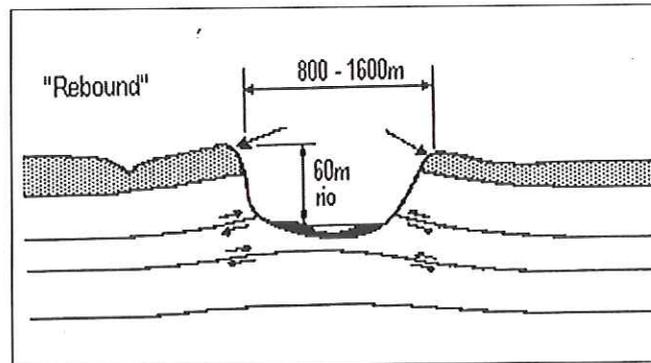


FIGURA 3 – Recuo em vale apresentado por HUTCHINSON (1988) apud BONUCCELLI (1999).

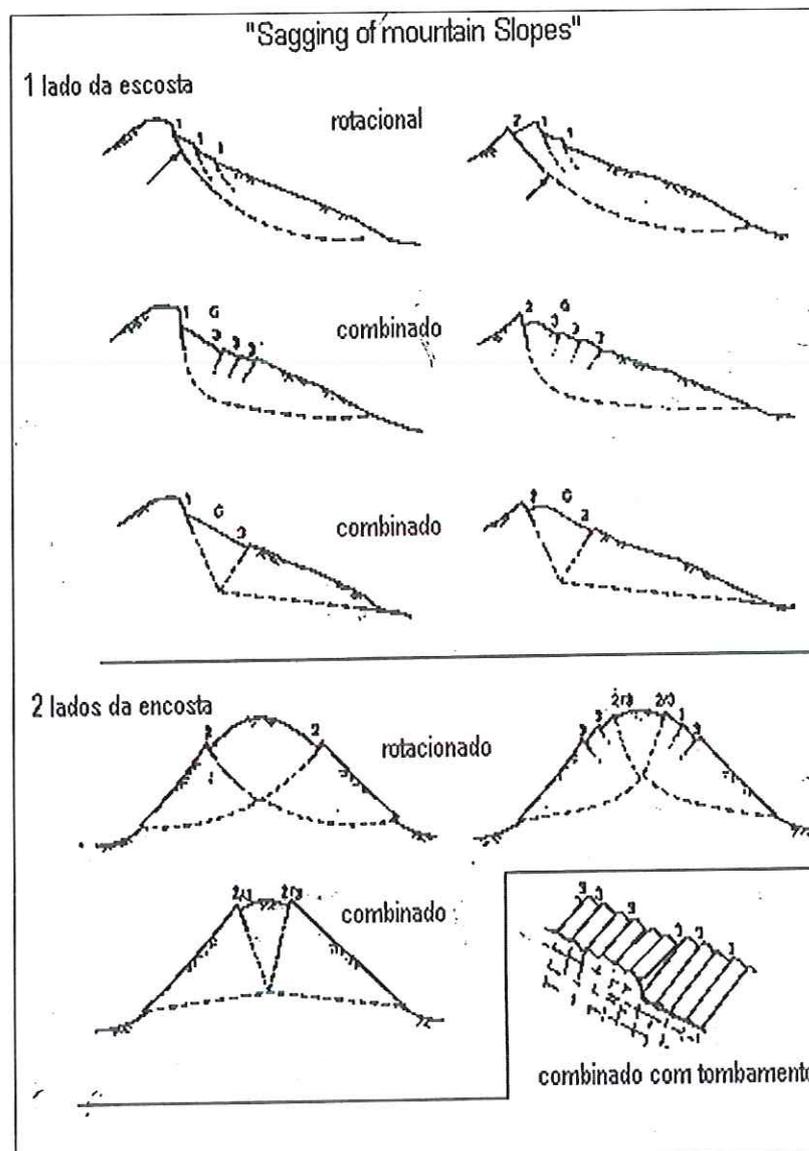


FIGURA 4 – Alguns dos tipos de ruptura considerados por HUTCHINSON (1988) apud BONUCCELLI (1999).

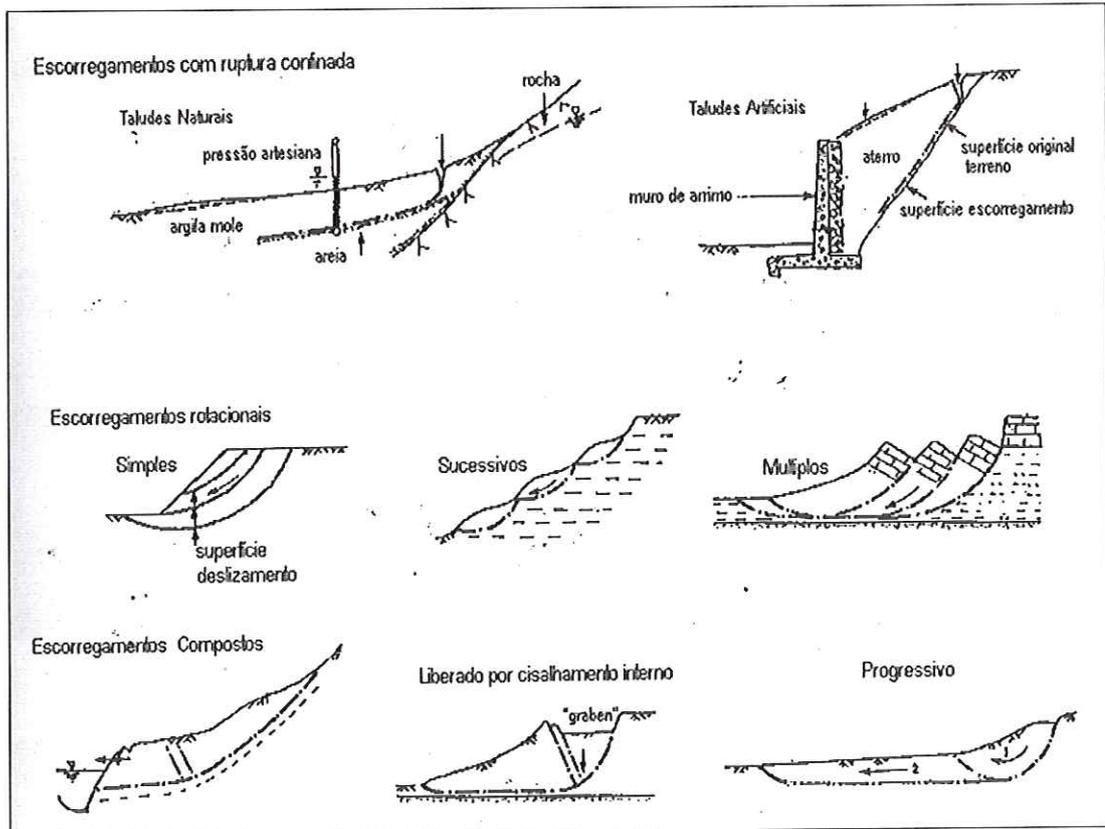


FIGURA 5 Alguns tipos de rupturas confinadas, rotacionais e escorregamentos compostos adotados por HUTCHINSON (1988) apud BONUCCELLI (1999).

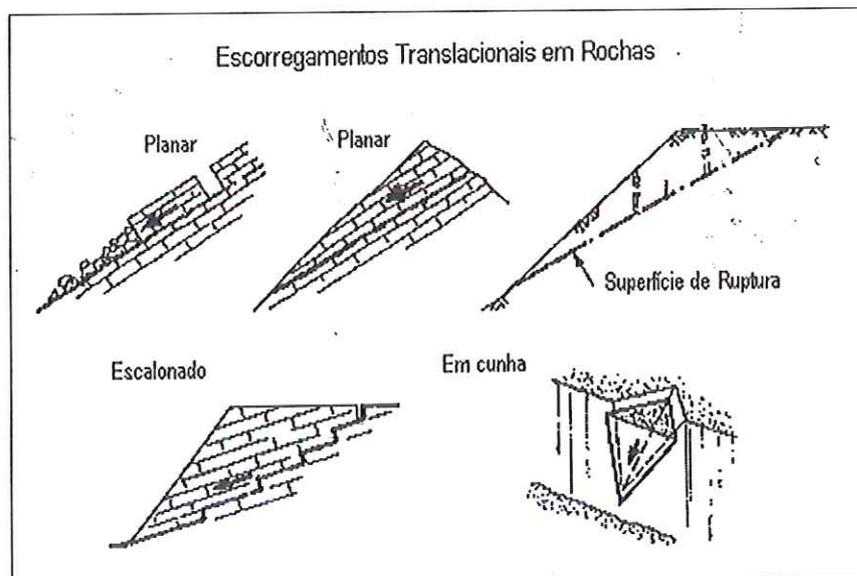


FIGURA 6 – Alguns tipos de rupturas translacionais adotadas por HUTCHINSON (1988) apud BONUCCELLI (1999).

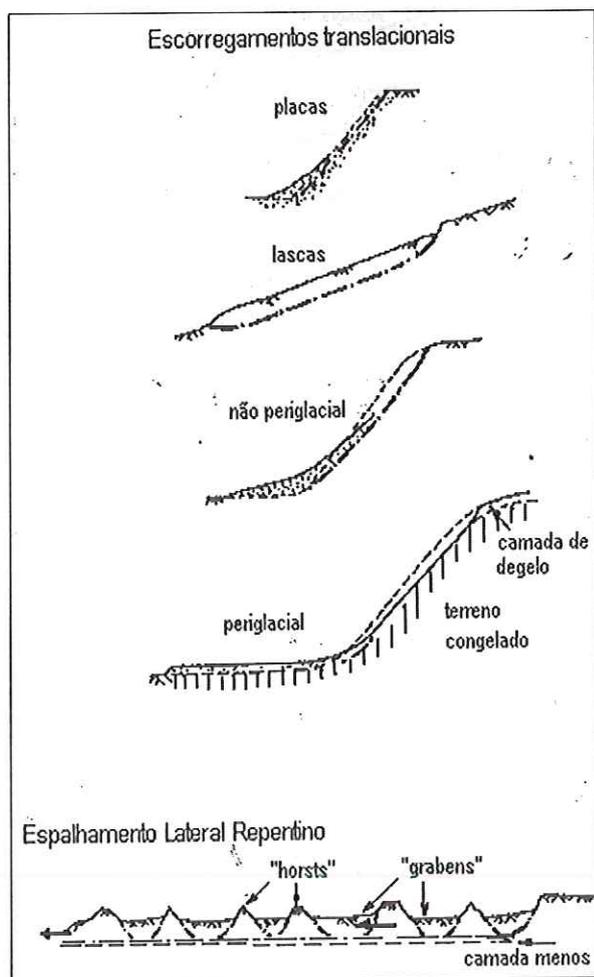


FIGURA 7 – Alguns tipos de rupturas translacionais adotadas por HUTCHINSON (1988) apud BONUCCELLI (1999).

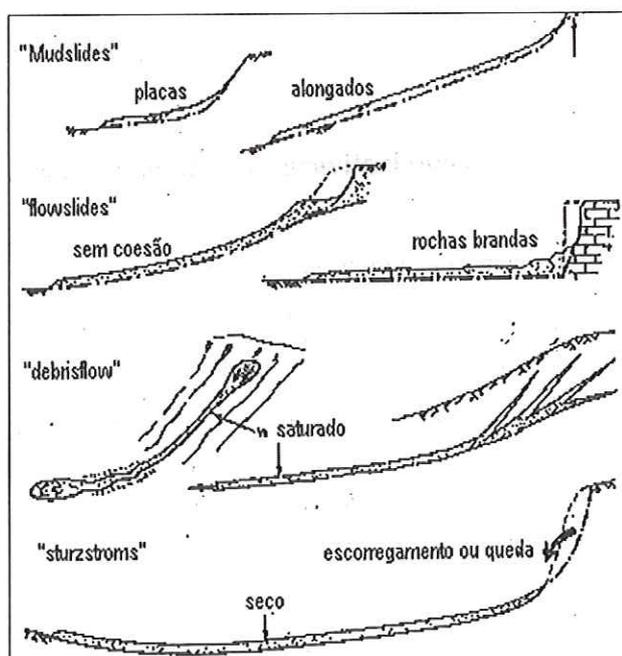


FIGURA 8 – Alguns tipos de movimento de detritos em forma de fluxo caracterizados por HUTCHINSON (1988) apud BONUCCELLI (1999).

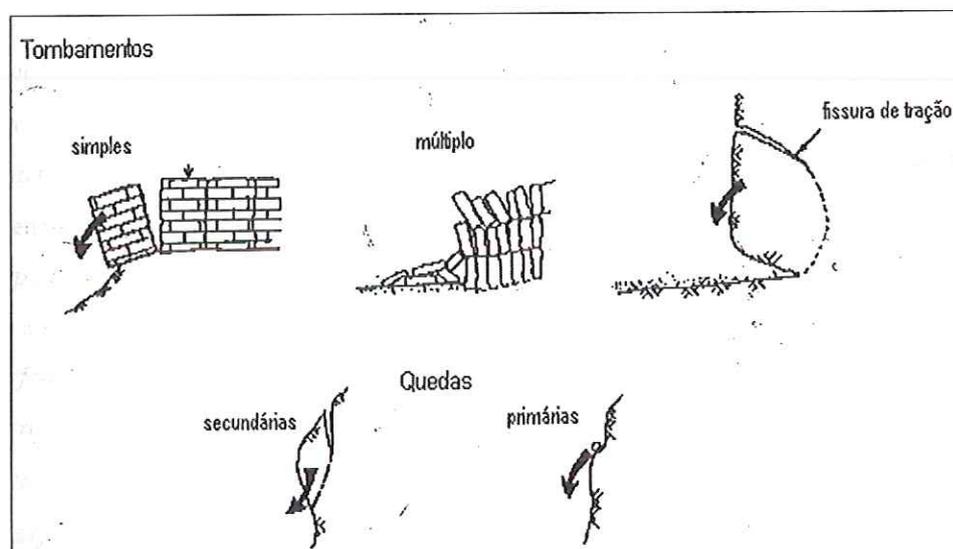


FIGURA 9 – Alguns tipos de tombamentos e quedas adotados por HUTCHINSON (1988) apud BONUCCELLI (1999).

2.2 AVALIAÇÃO DE RISCOS

O risco pode ser avaliado por análises relativas e absolutas; sendo de interesse neste trabalho aquelas de caráter absoluto. As análises absolutas podem ser realizadas por métodos probabilísticos, estatísticos e determinísticos.

De acordo com AUGUSTO FILHO (1997), as análises de riscos geológicos realizadas no Brasil, incluindo as voltadas aos escorregamentos, correspondem, na sua grande maioria, a análises de risco relativas, principalmente na condição da magnitude das conseqüências.

HANSEN (1984) apresenta o nível de objetividade da análise de risco em função do nível de quantificação utilizada na mesma (FIGURA 10).



FIGURA 10 – Grau de objetividade das análises de risco (HANSEN, 1984).

2.2.1 Conceitos Básicos

Alguns termos como Evento Perigoso (hazard), Risco (risk), Vulnerabilidade (vulnerability) tem tido diferentes significados para diferentes autores em diferentes situações. Contudo certos cuidados devem ser tomados quanto à leitura de todo e qualquer trabalho relacionado à análise de risco.

Existem várias fontes bibliográficas que contemplam conceitos com relação a riscos e termos associados. Em um esquema proposto por HAYS (1992), pode-se observar claramente que o risco é diretamente influenciado pelos eventos

perigosos (hazards), vulnerabilidade (vulnerability), localização (location) e exposição (exposure) em que estão submetidas determinadas áreas (FIGURA 11).

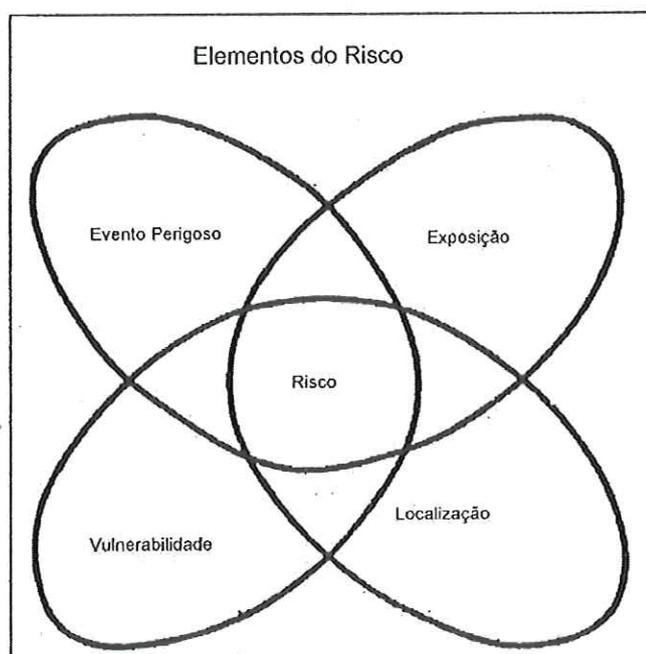


FIGURA 11 - Relações entre os elementos de risco (modificado de HAYS, 1992).

A FIGURA 12 retrata os grupos de atributos e os níveis que devem ser considerados na avaliação de riscos, sejam eles por mecanismos relativos ou absolutos. É importante salientar que sem a existência de um processo completo de análise do meio físico dificilmente serão obtidos todos os atributos citados. A evolução completa de um movimento gravitacional de massa (*landslides hazard*) apresentará as respostas das seguintes perguntas ilustradas na FIGURA 12

Procedimentos e recursos cartográficos existentes para avaliações de riscos e suas relações com escalas (extensões geográficas) estão apresentados na FIGURA 13.

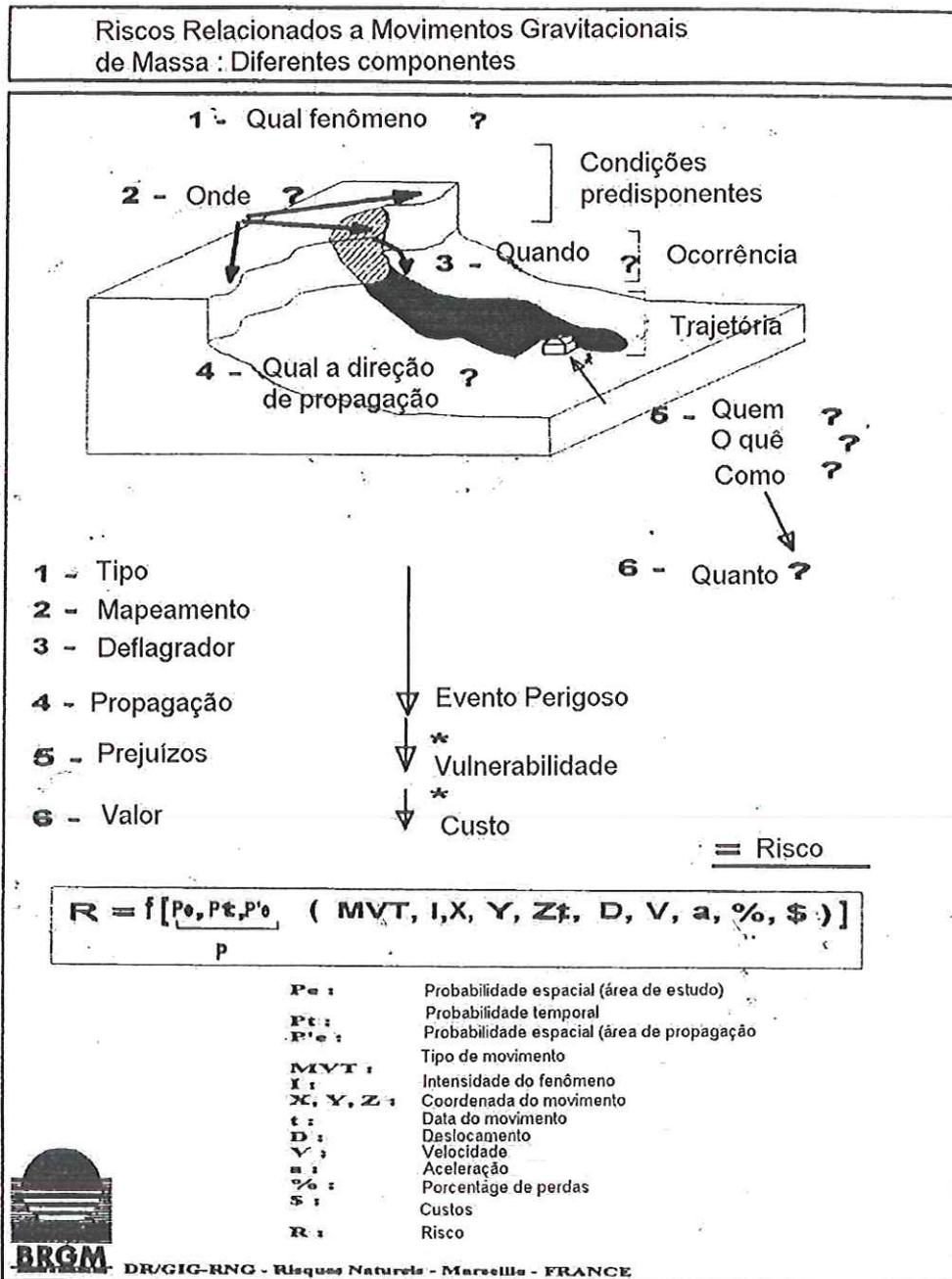


FIGURA 12 - Diferentes componentes para avaliação do risco (modificado de LEROI, 1996).

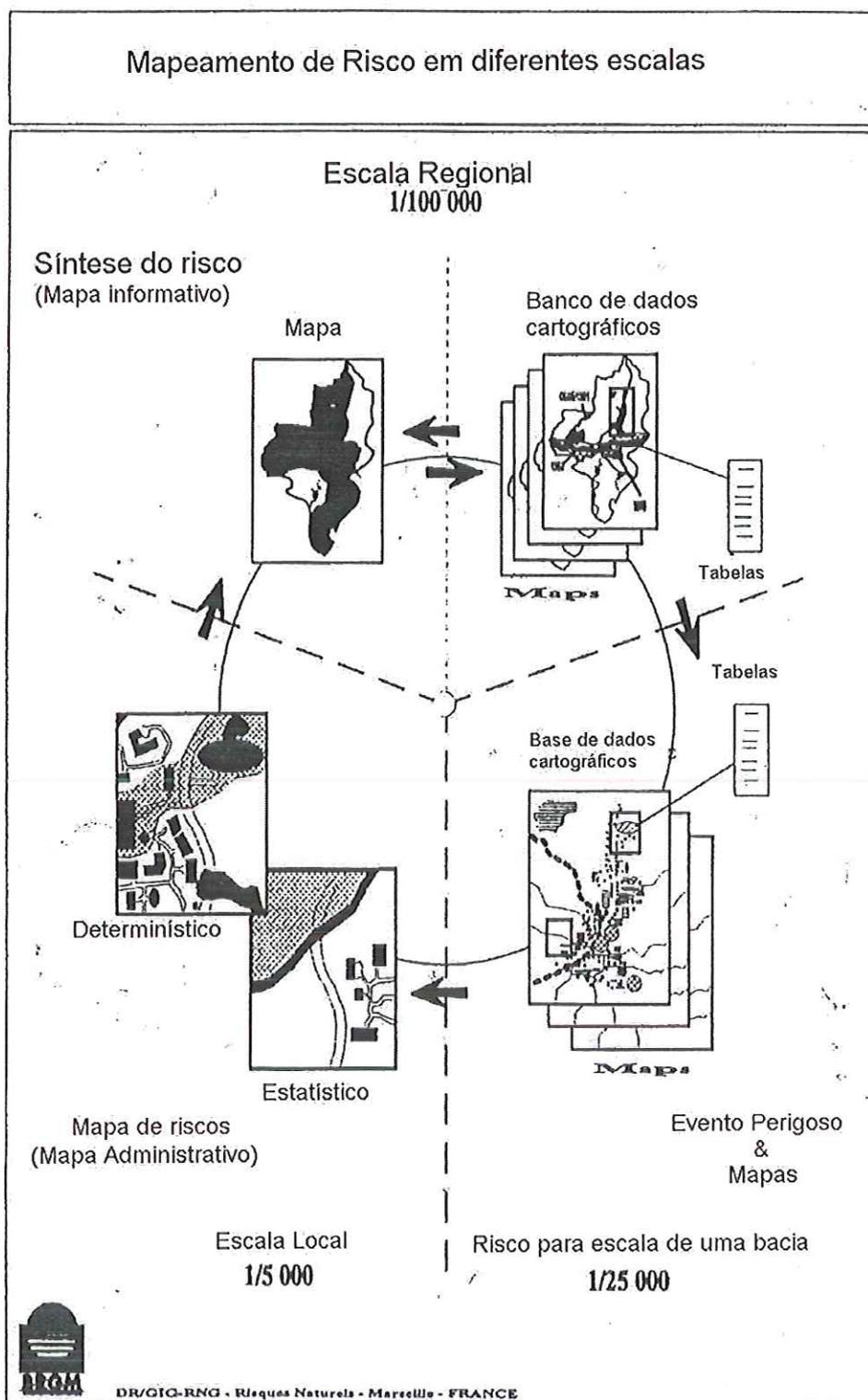


FIGURA 13 - Procedimentos e recursos que podem ser utilizados para o mapeamento de risco em diferentes escalas (modificado de LEROI, 1996).

A elaboração de documentos cartográficos adequados e funcionais para os diferentes tipos de usuários exige o uso correto dos conceitos envolvidos em todo o processo. Em termos de direcionar os estudos foram selecionados alguns conceitos utilizados por VARNES (1984).

HAZARD – Evento Perigoso (H) - probabilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente perigoso, numa dada área e num dado período de tempo.

VULNERABILITY – Vulnerabilidade (V) - é definida como o grau de perda de um determinado elemento ou o conjunto de tais elementos em risco, resultante da ocorrência de um evento perigoso (hazard) de magnitude determinada. É expresso numa escala de 0 a 1 (sem dano a dano total).

SPECIFIC RISK – Risco (R_s) - grau de perda esperado, relacionado a um fenômeno natural particular. É expresso pelo produto de H versus V.

ELEMENT AT RISK – Elemento de risco (E): população, propriedades, atividades econômicas incluindo serviços públicos etc., submetidos a uma determinada área de risco.

TOTAL RISK – RISCO TOTAL (R_T): Número esperado de perdas de vida, pessoas atingidas, danos às propriedades, intervenções nas atividades econômicas, devido a ocorrência de um evento perigoso (hazard). É representado pelo produto do risco (R_s) versus elemento de risco (E). Logo,

$$R_T = (E) \cdot (R_s) = (E) \cdot (H \times V) \quad (01)$$

VARNES (1984), ressalta que o termo "risque" utilizado no francês é equivalente a "hazard" (evento perigoso) utilizado por ele.

2.2.2 Tipos de Análises de Eventos Perigosos (Hazards)

Foram consideradas neste trabalho as análises relativas, absolutas, empíricas e por monitoramento. Na TABELA 6 HARTLEN & VIBERG (1988) mostram as principais diferenças entre elas.

TABELA 6. Diferentes tipos de Eventos Perigosos (hazards) e métodos correspondentes.

TIPO DE EVENTO PERIGOSO (HAZARD)	MÉTODO
1. Evento Perigoso (Hazard) relativo	Mapeamento
a. Susceptível – não susceptível	
b. Taxa de susceptibilidade ao hazard ou classes estáveis	
c. Avaliação Estatística	
d. Queda de Rocha	Mapeamento e cálculos
2. Evento Perigoso (Hazard) Absoluto	Cálculos
a. Determinístico – Fator de segurança	
b. Probabilístico – probabilidade de ruptura	
3. Evento Perigoso (Hazard) Empírico	Empírico
Curvas Empíricas	
4. Evento Perigoso (Hazard) Monitorado (rastejo)	
a. Dados de Deformação	Monitoramento
b. Dados de Precipitação	Monitoramento
5. Qualquer tipo de Evento Perigoso (hazard) simples ou combinação de 1-4	
Planejamento	

FONTE: HARTLEN & VIBERG (1988).

2.2.2.1 Análise Relativa

Na análise desenvolvida por KIENHOLK (1977) as avaliações dos Eventos Perigosos (hazards) foram baseadas na geomorfologia, ou seja, o evento perigoso (*hazard*) foi avaliado em cada parte do terreno e as regras determinadas pela experiência do profissional. Portanto trata-se de um método subjetivo. Vários outros pesquisadores utilizaram métodos semelhantes, por exemplo, MALGOT & MAHR (1979), PERROT (1988), HEARN (1992) e OLIVEIRA & DIAS (1997).

Com intuito de superar a subjetividade desta análise STEVENSON (1977) ¹apud BONUCELLI (1995) estabeleceu “pesos” para diferentes parâmetros (ou atributos). Esse método tornou-se bastante popular como nos trabalhos de ANBALAGAN et al. (1993) apesar de algumas limitações intrínsecas à sua utilização, tais como: determinação do valor correto dos pesos ou a ponderação dos parâmetros é geralmente baseada em conhecimento incompleto dos fatores - causa.

Segundo HARTLEN & VIBERG (1988) este tipo de análise é usada no zoneamento de movimento gravitacional de massa (landslide hazard zonation-LHZ) onde os eventos perigosos de diferentes taludes são comparados uns com os outros. O zoneamento consiste na divisão das áreas mapeadas em duas classes, sendo uma delas com condições (possibilidades) de deslizamento e a outra não. Tendo em mãos, alguns dados, a susceptibilidade a movimento gravitacional de massa pode ser dividida em diferentes classes de eventos perigosos ou classes estáveis pela determinação de um ou mais fatores determinantes, mas sem calcular o fator de segurança (TABELA 6).

2.2.2.2 Análises Absolutas

2.2.2.2.1 Análise determinística

Tem sido muito utilizada em trabalhos para análise de eventos perigosos (hazards), apesar de alguns problemas já conhecidos, tais como quantidade e qualidade dos dados necessários à elaboração do modelo. A aplicação em condições geomorfológicas e geológicas muito homogêneas, e onde os tipos de movimentos de massa são simples, ela pode ser realizada com sucesso. Sua

¹ STEVENSON, P.C. (1977) An Empirical Method for Evaluation of Relative Landslide Risk. Bull. of IAEG no. 16, p. 69-72.

principal vantagem está na base física e sua desvantagem está no grau excessivo de simplificações necessárias (BONUCCELLI, 1995).

Segundo HARTLEN & VIBERG (1988) os métodos determinísticos refere-se aos cálculos clássicos de estabilidade de talude, onde o fator de segurança é utilizado. Este cálculo fornece uma margem de segurança para um talude baseando-se em um grupo de dados. Os métodos correspondentes estão representados na TABELA 6.

2.2.2.2.2 Análise Estatística

Para OBONI & OBONI (1988) a análise estatística pode ser assim descrita: Ordenamentos de procedimentos que permitem a redução de informação a partir de uma amostragem da população (número total de observações) como um valor médio (média), variância etc.

Os métodos estatísticos citados na literatura e que já foram utilizados na avaliação de eventos perigosos (hazards) são:

- Análise estatística de univariáveis:

Análise estatística de dados pontuais obtidos de listas de verificação de fatores - causa associados à ocorrência de movimentos de massa (NEULAND, 1976; CARRARA et al. 1977; COROMINAS et al. 1992; OTHMAN et al. 1992).

Análise estatística de unidades do terreno pertencentes à área de estudo. São coletados e analisados dados geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e morfométricos para cada unidade, através de regressão linear múltipla ou análise discriminante (CARRARA et al. 1978, 1990; CARRARA, 1983, 1988, 1992).

- Information Value Method: YIN & YAN (1988) e BONUCCELLI (1999).

- Logical Message Method: RUNQIU & YUANGUO (1992).

As desvantagens associadas a esses métodos referem-se a grande disponibilidade de tempo necessário à coleta de dados, e ao processamento dos mesmos.

2.2.2.3 Análise Probabilística

Para OBONI & OBONI (1988) a probabilidade é importante porque permite que os problemas sejam analisados com variáveis que atualmente são ou podem ser consideradas estocásticas. Vale ressaltar que a estatística é a ferramenta necessária para caracterizar a variabilidade estocástica de um dado parâmetro de uma análise probabilística.

Segundo HARTLEN & VIBERG (1988) os métodos probabilísticos refere-se à utilização de métodos estatísticos para cálculos de probabilidade de ruptura a partir de um dado grupo de variáveis estocásticas. Os métodos são mostrados na TABELA 6.

2.2.2.3 Análise Empírica

Nesta análise, segundo HARTLEN & VIBERG (1988), a informação de movimentos gravitacionais de massa anteriores e ativos é utilizada para plotar curvas, por exemplo, a relação entre ângulo e altura do talude para taludes que se romperam.

Exemplo de Evento Perigoso (Hazard) empírico – Hong Kong

Em Hong Kong as curvas empíricas são utilizadas desde 1950 (BRAND & HUDSON, 1982 ²apud HARTLEN & VIBERG, 1988). A curva original foi sucessivamente rebaixada devido à existência de fraturas nos taludes executados (FIGURA 14). A curva pontilhada relativa ao ano de 1982, corresponde ao fator de segurança igual a 1,4 para $c' = 7$ KPa, $\phi = 37^\circ$ e poro pressão = 0. A aplicação de curvas empíricas, em mapeamento, realizada no Canadá, Noruega e na Suécia em "argilas moles" foi discutido por VIBERG (1984)³ apud HARTLEN & VIBERG (1988). Comparações entre diferentes critérios, utilizados nestes países, são mostradas na FIGURA 15.

² BRAND, E. W. & HUDSON, R.R. (1982). CHASE, an empirical approach to the design of cut slopes in Hong Kong Soils. Seventh Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong. Vol. 1 p 1-16.

³ VIBERG, L. (1984). Landslide risk mapping in soft clays in Scandinavia and Canada. IV Int. Symp. On Landslides, Toronto. Vol. 1 p 325-348.

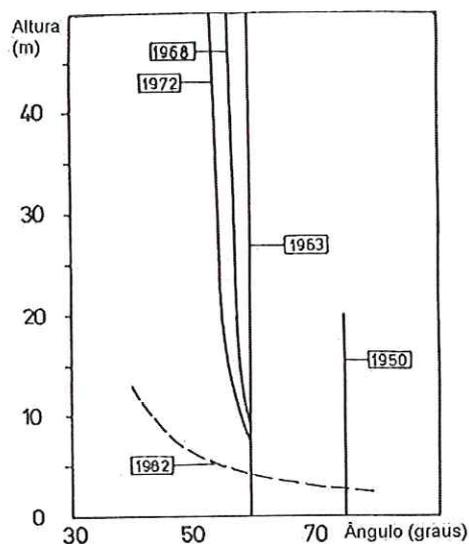


FIGURA 14. Altura versus ângulo dos taludes examinados em Hong Kong (modificado de HARTLEN & VIBERG, 1988).

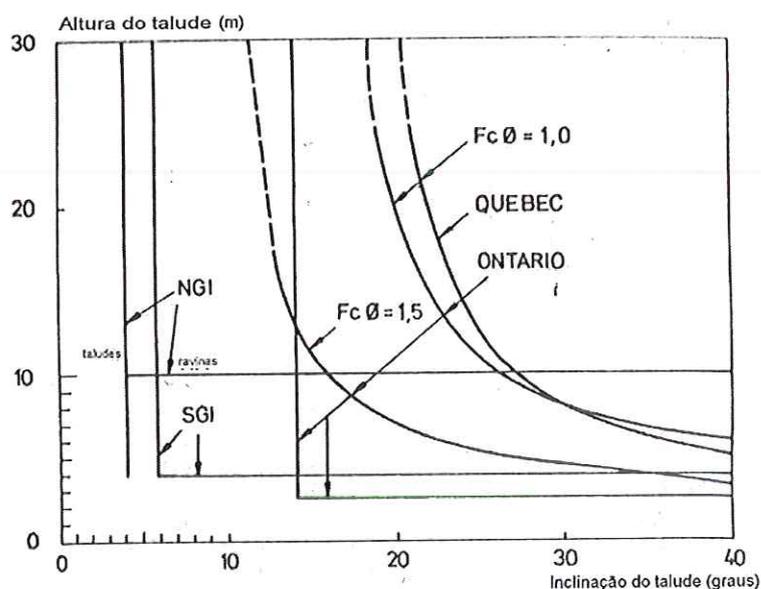


FIGURA 15 Relação entre altura de talude e ângulo construídos em diferentes países (modificado de HARTLEN & VIBERG, 1988).

2.2.2.4 Análise por Monitoramento

Segundo HARTLEN & VIBERG (1988) esta análise consiste no uso do grau de deformação e precipitação no caso de rastejo. Dados de deformação ou dados de precipitação são monitorados e comparados com valores críticos pré-determinados, ou seja, quando o rastejo começa a se desenvolver.

Exemplo - Nova Zelândia

Análises realizadas, em trabalhos executados por SALT (1988)⁴ apud HARTLEN & VIBERG (1988), em xistos na Nova Zelândia mostraram que o monitoramento em rastejo pode ajudar na previsão de ocorrência do mesmo, pois uma pequena redução da estabilidade geralmente resulta em um aumento de velocidade do rastejo (FIGURA 16). O autor relata a existência de muitos casos onde as informações obtidas pelo monitoramento não foram consideradas, sendo assim as previsões não puderam ser estimadas.

O monitoramento da deformação significa que deslocamentos, velocidade e aceleração devem ser considerados. Ex. Alguns dias antecedentes a um movimento rápido de rastejo nas cidades de Vaiont, East Abbotsford e Ruahihi a velocidade atingia cerca de 50 a 100mm/dia num xisto de baixa permeabilidade para todos os casos. O movimento começou acelerar 10 dias antes em que ocorreu a ruptura, com isso SALT (1988) recomenda que para qualquer local, o limite crítico deve ser como se segue:

Velocidade de deslizamento: 50mm/dia e aceleração de deslizamento: 5 mm/dia/dia.

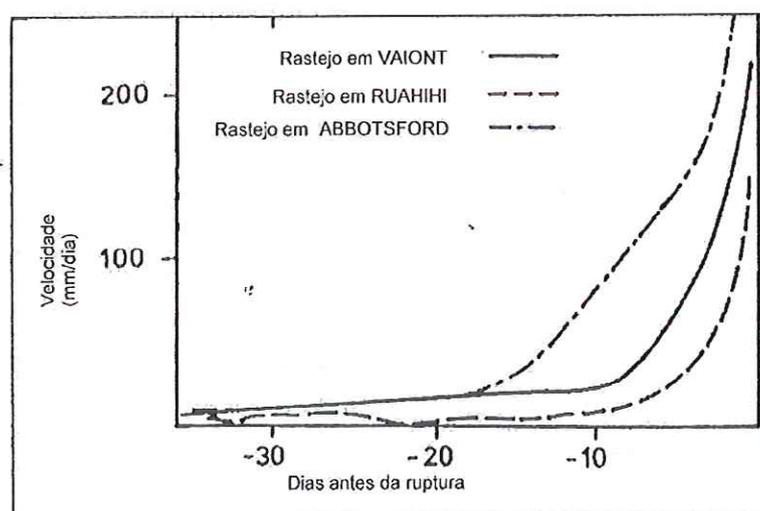


FIGURA 16. Velocidade dos rastejos em xisto alguns dias antes da ruptura (SALT, 1988 apud HARTLEN & VIBERG, 1988).

⁴ SALT, G. (1988) Landslides Mobility and Remedial Measures : Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema.

2.2.3 FORMAS DE AVALIAÇÃO DE RISCO

As técnicas de avaliação de risco tiveram sua origem na indústria aeronáutica e nuclear, sendo hoje difundida, com adaptações e aperfeiçoamentos específicos para diferentes campos de aplicação.

Os trabalhos de COTECCHIA (1977), RAGOZIN (1994), SHEKO (1994), MELCHERS & STEWART (1993), UNESCO (1979) e KEATON (1994) são fundamentais para se desenvolver estudos de avaliação de riscos.

Independente do tipo da fonte de riscos a avaliação é sempre o resultado decorrente da probabilidade de ocorrer um evento com determinada intensidade e da vulnerabilidade dos elementos do meio ambiente frente ao evento (ZUQUETTE, 1995). VARNES (1985) propôs a seguinte expressão para avaliar riscos associados a escorregamentos, mas que pode ser generalizada para a maioria dos eventos.

$$Re = H(i) \times V(i) \quad (2)$$

Em que: Re – grau de perda devido a um evento (i);

H – probabilidade de ocorrer o evento perigoso (i),

V – vulnerabilidade dos elementos ao evento perigoso (i).

Segundo RAGOZIN (1993 e 1994) a seguinte expressão pode ser utilizada para avaliar riscos específicos decorrentes dos mais diferentes tipos de eventos perigosos:

$$Re(i) = P(i) \cdot V(i) \cdot Dt(i) \quad (3)$$

Em que:

V(i) – grau de vulnerabilidade para um evento (i) de uma intensidade definida,

P(i) – recorrência de um evento (i);

(i) – número de eventos em uma unidade de tempo;

Dt (i) – número de indivíduos e objetos expostos ao evento (custo) total dentro da zona afetada.

Apesar da simplicidade das equações, existe um elevado grau de dificuldade para avaliar as características e as condições dos eventos perigosos. O grau de dificuldade para avaliar o nível de risco varia em função do tipo da fonte, sendo elevado para o caso dos eventos de origem natural.

2.3 RISCOS RELACIONADOS A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

O estudo de movimentos gravitacionais de massa assume especial importância quando se considera a grande ocorrência de tais tipos nos empreendimentos de engenharia e seus custos operacionais (FOURNIER D'ALBE, 1976 ⁵apud VAN WESTEN, 1993).

Estima-se que cerca de 3 milhões de pessoas, no mundo, morreram ao longo das últimas duas décadas em decorrência de acidentes naturais ou ambientais diversos, outras 800 milhões foram afetadas adversamente, e foram causados danos imediatos acima de US\$ 23 bilhões, sendo que grande parte desses danos foi decorrente de acidentes de origem geológica (UNDRO, 1988).

Grandes problemas relacionados aos movimentos gravitacionais de massa, ocorridos no Peru, foram descritos por CARRILO-GIL & CARILO-DELGADO⁶ apud HARTLEN & VIBERG (1988), sendo que mais de 200.000 pessoas morreram, devido aos escorregamentos nos últimos 60 anos (FIGURA 17).



FIGURA 17 Distribuição dos escorregamentos e avalanches no Peru (CARRILO-GIL & CARRILO-DELGADO apud HARTLEN & VIBERG, 1988).

⁵ FOURNIER D'ALBE, E.M. (1976). Natural Disasters. Bull. of IAEG, vol. 14 p 187.

⁶ CARRILO-GIL, A. & CARILO-DELGADO, E. (1988) : Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema.

ROBINSON & SPIEKER (1978) *apud* RAHN (1986) apresentaram, para os Estados Unidos e em particular para o estado da Califórnia, valores de perdas por processos e fenômenos relacionados aos riscos (FIGURA 18 e TABELA 7).

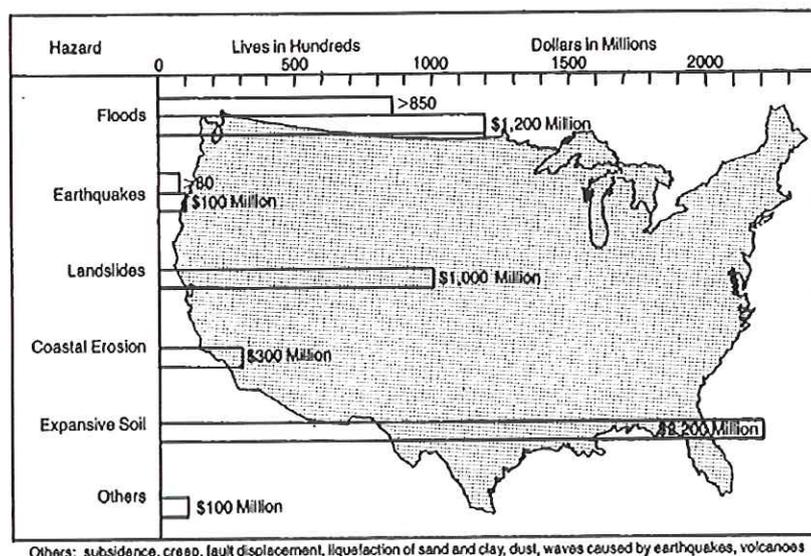


FIGURA 18. Média anual de perdas devido a processos geológicos nos Estados Unidos (ROBINSON & SPIEKER, 1978).

TABELA 7. Previsão de perda econômica (US\$) na Califórnia entre os anos de 1970 e 2000.

PROBLEMAS GEOLÓGICOS	PERDAS ESTIMADAS PARA O ANO 2000 (EM MILHÕES DE DÓLARES)
Abalos Sísmicos	\$ 21.000
"Tsunami"	\$ 40
Rejeito de Falha	\$ 76
Erupção de Vulcão	\$ 49
Enchentes	\$ 6500
Movimentos Gravitacionais de Massa	\$ 9850
Subsidência	\$ 26
Solo Expansivo	\$ 150
Atividade Erosiva	\$ 565
Perdas de Recursos Minerais usados em desenvolvimento urbano	\$ 17.000
Rebaixamento do lençol freático ou degradação	\$ 50
Total	\$ 55.306

FONTE: modificado de ROBINSON & SPIEKER (1978) *apud* RAHN (1986).

No Brasil o intenso processo de urbanização, vivido nas últimas décadas, aliada a falta de recursos e de políticas habitacionais permanentes, tem levado à ocupação de áreas geologicamente desfavoráveis, resultando assim em áreas de risco.

Segundo ZUQUETTE *et al.* (1996), várias fontes de riscos foram registradas nos diversos estados do Brasil, em destaque os movimentos gravitacionais de massa que vêm ocorrendo no estado de São Paulo (FIGURA 19).

No Rio de Janeiro, os investimentos relacionados a desastres por escorregamentos realizados só pela GEO-RIO foram estimados em 191 milhões de dólares entre os anos de 1988 e 1996 (TABELA 8). Segundo AMARAL (1997) os escorregamentos são extremamente perigosos resultando em grandes prejuízos, bem como inúmeras vítimas fatais (TABELA 9).

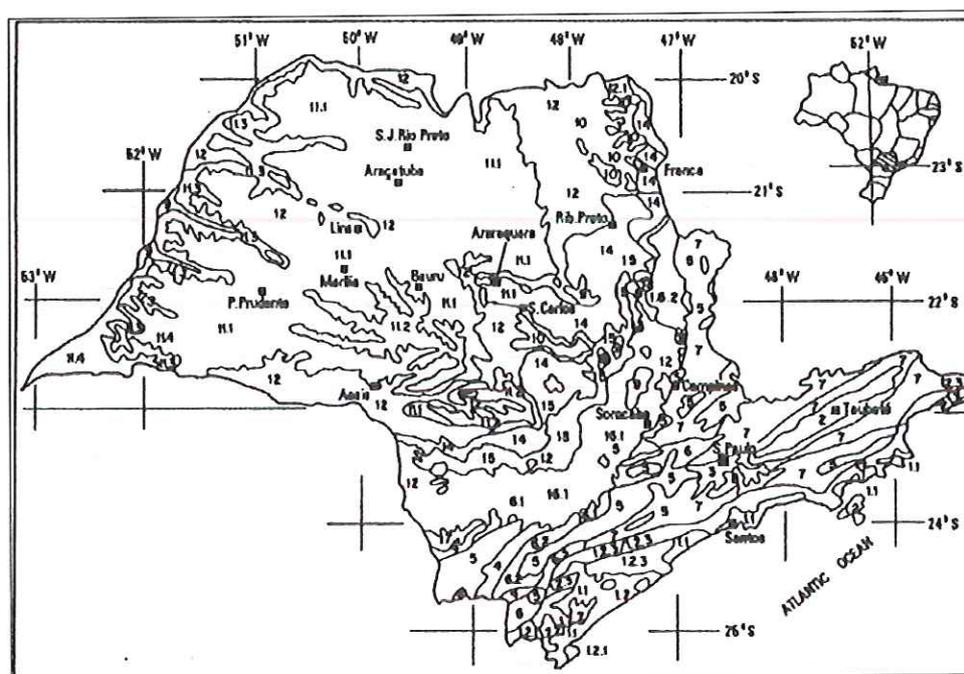


FIGURA 19 – Principais fontes de risco registrados no Estado de São Paulo com destaque para os movimentos de massa gravitacionais (ZUQUETTE *et al.* 1996). É importante salientar que as unidades 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17 e 18 estão sujeitas a um ou mais tipos de movimentos de massa gravitacionais.

TABELA 8 – Investimentos feitos pela GEO-RIO em escorregamentos no Rio de Janeiro entre 1988 e 1996.

ANO	GASTOS EM US\$ (*1000)	CONTRATOS
1988	1.654	20
1989	22.979	59
1990	14.776	47
1991	13.294	57
1992	17.036	105
1993	27.129	122
1994	11.494	76
1995	30.159	142
1996	53.000	207
TOTAL	191.521	815

FONTE: AMARAL (1997).

TABELA 9 – Maioria dos desastres ocorridos no Rio de Janeiro entre 1986 e 1996

MORROS	DATA	CASAS DESTRUÍDAS	MORTES
MACACOS	01/01/86	20	-
TABAJARAS	15/12/86	02	01
VIDIGAL	15/12/87	05	02
SANTA MARTA	14/02/88	23	14
SANTA TEREZA	19/02/88	01 HOSPITAL	22
FORMIGA	20/02/88	120	06
P. BANDEIRA	10/06/89	06	8
LEME	14/06/90	-	04
ANDARAÍ	08/05/91	-	06
ROCINHA	07/09/92	-	06
VIDIGAL	01/06/93	11	03
GROTÃO	10/06/94	-	01
SÃO JOÃO	12/02/95	14	03
PENHA	12/02/95	-	03
QUITITE	13/02/96	150	01
P.FOME	13/02/96	20	08
PAI JOÃO	13/02/96	15	20
ARATICUM	13/02/96	02	02
FLORESTA	13/02/96	10	01
ROCINHA	13/02/96	03	03
ROCINHA	13/02/96	04	02
VIDIGAL	13/02/96	10	07
CASCATA	13/02/96	05	-
ELDORADO	13/02/96	02	-
AÇUDE	13/02/96	01	-
	Total	424	123

FONTE: AMARAL (1997).

A cidade de Ouro Preto tem sido extremamente afetada por movimentos gravitacionais de massa, tendo como conseqüência enormes prejuízos sociais e econômicos, particularmente em épocas de chuvas intensas e/ou prolongadas. A TABELA 10 apresenta uma estimativa dos prejuízos (em valores) calculados para danos materiais citados pelos bombeiros. Quanto aos danos pessoais, incluindo mortos e feridos nos acidentes, encontram-se resumidos na TABELA 11, totalizando 21 mortes e 5 feridos.

TABELA 10 – Estimativa dos valores (em dólares) relativos aos danos materiais citados pelo Corpo de Bombeiros, para o período de 1988 a 1998.

TIPO DE DANO MATERIAL	NÚMERO DE OCORRÊNCIAS	VALOR MÉDIO POR DANO (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Ruptura parcial da residência	69	5000	34500
Perda total da residência	8	5000	40000
Perda de automóveis	4	7000	28000
Perda de móveis	35	1000	35000
Ruptura de muro de arrimo	69	3000	207000
Interrupção de vias de comunicação	23	2000	46000
Ruptura de aterro de estrada	01	1500000	1500000

FONTE: BONUCCELLI (1999).

Dentro deste contexto estão sendo realizados eventos técnicos no âmbito nacional e internacional com intuito de divulgar e discutir estes problemas. Entre eles podem-se destacar o "International Symposium on Landslides" e o Simpósio Latino Americano sobre Riscos Geológicos Urbanos.

Mas acredita-se que se mantendo o ritmo de crescimento da população e da concentração urbana (45% a nível mundial e 70% no Brasil), fica evidente que, mesmo com os avanços tecnológicos e os esforços da comunidade internacional, como o estabelecimento dos anos 90 como a Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais – DIRDN (UNDRO, 1988), acidentes geológicos

continuarão acontecendo em razão do grau de vulnerabilidade a que estão expostas, principalmente, as populações dos países em desenvolvimento (AUGUSTO FILHO, 1997).

TABELA 11 – Ocorrências com danos pessoais atendidas pelo Corpo de Bombeiros no período de 1988 a 1998

DATA	DANOS PESSOAIS	TIPO DE PROCESSO	MATERIAL ENVOLVIDO	ÁREA ATINGIDA (m ²)	LOCAL
14/12/89	3 mortes e 2 feridos	Escorregamento translacional	Rocha e detritos	457	Centro
23/01/92	2 mortes	Escorregamento e corrida na base	Detritos e solos	305	Volta do Córrego
14/12/95	3 mortes e 1 ferido	Escorregamento translacional e corrida	Rocha, detritos e solos	472	São Cristóvão
02/01/97	01 morte	Escorregamento	Rocha, detritos e solos	219	Taquaral
04/01/97	12 mortes e 1 ferido	Escorregamento e corrida na base	Rocha, detritos e solos	3860	Piedade
02/04/98	01 ferido	Queda e rolamento de bloco	Rocha	277	Taquaral
TOTAL	21 mortes e 5 feridos				

FONTE: BONUCCELLI (1999).

2.4 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

A utilização de metodologias probabilísticas se justifica pela grande variabilidade espacial encontrada nos atributos dos componentes do meio físico que constituem uma determinada área. A grande dificuldade para a elaboração deste tipo de análise é a consideração de todos os atributos que realmente influenciam os movimentos gravitacionais de massa.

Na tentativa de reduzir as incertezas que envolvem a prática de estabilidade de talude e análise de risco, vários trabalhos têm sido realizados procurando

identificar e/ou definir quais tipos de atributos devem ser considerados em cada situação e conseqüentemente obter a probabilidade de ruptura ou índice de confiabilidade ou o risco.

CHOWDHURY (1988) através de trabalho realizado em talude natural constituído de solo, concluiu que a criação dos modelos probabilísticos se justifica pelas incertezas que estão associadas aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, poro pressão, detalhes geológicos e carregamento externo. Para BERGADO et al. (1988) as incertezas associadas a estabilidade de taludes incluem alguns parâmetros tais como: Geometria do talude, estimativa da poro pressão, variabilidade espacial das propriedades dos solos e modelamento do erro.

Outros autores como BIELSKI et al. (1988) e ANDERSON et al. (1988) enfatizam a importância de se avaliar a influência das condições da água na estabilidade de talude.

READ & HARR (1988) sugerem que a análise de estabilidade de talude seja feita considerando o princípio da máxima entropia e não os métodos convencionais para cálculo do fator de segurança (análise de equilíbrio limite).

RAHMAN et al. (1988) mostraram que a estabilidade de um talude marinho é afetada por tensões induzidas por ondas durante uma tempestade ou por abalos durante um terremoto.

FINLAY et al. (1997) e OMURA & HICKS (1992) propuseram um modelo probabilístico para avaliar a relação entre a probabilidade de ocorrência de um processo de movimentos gravitacionais de massa e um evento de chuva. No primeiro, foram utilizadas regressão linear, log, inversa, quadrática e cúbica e distribuição de Gumbel para cálculo do período de retorno, enquanto que no segundo optaram por usar a distribuição gama.

NIANXUEL & ZHUPING (1992) realizaram avaliação probabilística para análise da relação entre ocorrência de chuva e reativação de movimento gravitacional de massa. Neste caso a probabilidade considerada foi uma combinação de eventos (quantidade, duração e/ou intensidade da chuva).

BUNCE et al. (1997) utilizaram um modelo para estimativa de queda de rocha ao longo de uma estrada a partir da distribuição binomial.

HACHICH (1993) desenvolveu um modelo probabilístico para análise de decisão objetivando otimização e gestão de risco urbano. Neste caso, utilizou-se árvore de decisões como uma ferramenta essencial, pois a mesma é constituída de ações e caminhos lógicos, resultados e conseqüências.

HARTLEN & VIBERG (1988) e HAMMOND et al (1992) utilizaram Método de Monte Carlo para cálculo da probabilidade de ruptura (pf).

Para avaliação de risco BERGGREN et al. (1992), baseando-se em VARNES (1980), realizaram a avaliação da probabilidade x conseqüências de um determinado Evento Perigoso (hazard).

Como se pode observar a avaliação probabilística pode ser usada para diferentes tipos de análises, sendo adaptada e/ou modificada dependendo das características da área e/ou tipo de análise pretendida.

Considerando a abordagem dos trabalhos supracitados concluiu-se que as análises probabilísticas requerem não só valores das propriedades dos materiais envolvidos, mas também, uma caracterização da variabilidade espacial. Isto implica que uma investigação para este tipo de análise é muito maior que aquelas requeridas para análises convencionais ou determinísticas. Os procedimentos adotados a seguir (no capítulo 3), mostram claramente a complexidade deste tipo de análise quando aplicada a uma área (item 4.4.2) que contém além dos fatores predisponentes, os modificadores e os deflagradores.

2.5 PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS PROBABILÍSTICAS E POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO GERAL

2.5.1 Considerações Gerais

Todas as vezes que se emprega a matemática com a finalidade de se estudar alguns fenômenos de observação, deve-se essencialmente começar por construir um modelo matemático (determinístico ou probabilístico) para esses fenômenos. Inevitavelmente, o modelo deve simplificar a descrição dos fenômenos e certos pormenores acabam sendo desprezados. O bom resultado do modelo depende de que as condições desprezadas sejam ou não realmente sem importância na elucidação do fenômeno estudado. A resolução do problema matemático pode estar correta e, não obstante, estar em grande discordância com os dados observados, simplesmente porque as hipóteses básicas feitas podem não serem confirmadas. Geralmente é bastante difícil afirmar com certeza se um modelo matemático especificado é ou não adequado, antes que alguns dados de observação sejam obtidos. A fim de verificar a validade de um modelo deve-se deduzir um certo número de conseqüências do novo modelo e, a seguir, comparar esses resultados previstos com observações (MEYER, 1972).

O modelo determinístico refere-se a um modelo que estipula que as condições sobre as quais um experimento é executado determina o resultado do experimento. Por exemplo, ao introduzir uma bateria em um circuito simples, o modelo matemático que, presumivelmente descreve o fluxo de corrente elétrica observável é $I = E/R$; isto é a lei de Ohm. O modelo prognostica os valores de I , tão logo os valores de E e R sejam fornecidos (MEYER, 1972).

Na natureza, existem muitos exemplos de experimentos, para os quais modelos determinísticos são apropriados, por exemplo, leis de gravitação explicam o que acontece a um corpo que cai sob determinadas condições. As leis de Kepler dão o comportamento dos planetas. Em cada situação, o modelo especifica que as condições, sob as quais determinados fenômenos acontecem, determinam o valor de algumas variáveis observáveis: a grandeza da velocidade, a distância percorrida durante determinado período de tempo (MEYER, 1972).

Para um grande número de situações, o modelo matemático determinístico é suficiente, contudo, existem também, muitos fenômenos que requerem um modelo matemático diferente para a sua investigação. São eles não determinísticos ou probabilísticos (ou modelo estocástico) (MEYER, 1972).

Exemplo disso seria a determinação da precipitação de chuva que ocorrerá como resultado de um evento de chuva particular, que ocorra em determinada localidade. Dispõe-se de instrumentos para registrar a precipitação ou informar relativamente à aproximação de uma tempestade devido alguns fatores tais como: pressão barométrica, variações de pressões, velocidades do vento, origem e direção da "tormenta" e várias leituras referentes a altitudes elevadas, mas por mais precisas que estas leituras sejam nunca permitirá saber a quantidade de chuva que cairá. Neste caso trata-se de um fenômeno não determinístico. Em um modelo probabilístico as condições da experimentação determinam somente o comportamento probabilístico (mais especificamente a lei probabilística) do resultado observável (MEYER, 1972).

Um modelo determinístico emprega considerações físicas para prever o resultado enquanto que um modelo probabilístico emprega a mesma espécie de consideração para especificar uma distribuição de probabilidade (MEYER, 1972).

As probabilidades são úteis porque auxiliam a quantificar o erro na tomada de decisões e a principal vantagem nas situações de incerteza é quantificar a possibilidade da ocorrência de um acontecimento (SILVA, 1998).

Os métodos estatísticos são utilizados para modelar e analisar métodos experimentais. Não importa o grau de precisão em que o experimento é planejado e conduzido, variações sempre ocorrem. Os objetivos dos cálculos das probabilidades são: compreender, modelar e quantificar os tipos de variações que podem ser encontradas (SILVA, 1998).

2.5.2 Conceitos Básicos

Para um melhor entendimento dos termos utilizados na avaliação probabilística realizou-se uma abordagem geral acerca de alguns conceitos empregados, são eles:

Fenômeno aleatório: Em alguns problemas físicos de interesse, existe um elemento de incerteza, ou de imprevisibilidade ou de aleatoriedade; não interessa o quanto se sabe do passado de um dado fenômeno, é impossível prever precisamente o seu comportamento. Por exemplo, não interessa quantas vezes joga-se uma moeda e observa-se o resultado, se é incapaz de prever o resultado do próximo lance. As razões associadas a estas incertezas são variadas, podendo ser:

- Dados insuficientes a respeito das condições iniciais existentes;
- Incertezas quanto às forças envolvidas;
- Forças envolvidas tão complexas que o cálculo através de efeitos combinados não são apropriados.

A este fenômeno imprevisível chama-se de fenômeno aleatório (DAVENPORT, 1970). Ou ainda um fenômeno aleatório é aquele que podendo repetir-se indefinidamente em condições análogas, apresenta resultados diferentes em cada experiência particular (TOURINHO, 1962).

Variável aleatória: À quantidade variável que expressa o resultado de um fenômeno aleatório, dá-se à denominação de variável aleatória (TOURINHO, 1962). Ou ainda, uma variável aleatória é uma função definida num espaço amostral, que assume valores reais, por exemplo, o número de peças defeituosas entre n peças retiradas de uma linha de produção (DANTAS, 1997).

Variável aleatória discreta: Seja X uma variável aleatória. Se o número de valores possíveis de X (isto é, R_x , o contradomínio) for finito ou infinito numerável, denomina-se X de variável aleatória discreta. Isto é, os valores possíveis de X , podem ser postos em lista como x_1, x_2, \dots, x_n . No caso finito, a lista acaba, e no

caso infinito numerável, a lista continua indefinidamente (MEYER, 1972). Exemplos de distribuição onde se utiliza variáveis aleatórias discretas: Distribuição de Poisson, Distribuição Binomial, Distribuição Geométrica, Distribuição de Pascal, Distribuição Hipergeométrica e a Distribuição Multinomial. Pode-se considerar como variáveis aleatórias discretas, por exemplo, as faces de um dado. Sabe-se que ele é composto por seis faces, mas não interessa quantas vezes joga-se um dado e observa-se o resultado, se é incapaz de prever o resultado do próximo lance.

Variável aleatória contínua: Em muitos problemas se torna matematicamente mais simples considerar um espaço amostral "idealizado" para uma variável aleatória X , no qual todos os números reais possíveis (em algum intervalo especificado ou conjunto de intervalos) possam ser considerados como resultados possíveis (MEYER, 1972). Algumas distribuições com aplicação de variáveis aleatórias contínuas: Distribuição Normal, Distribuição Exponencial, Distribuição Gama, Distribuição do Qui-quadrado, etc. A chuva é um exemplo típico desta variável.

Variáveis Aleatórias Bidimensionais: Em muitas situações, no entanto, há interesse em se observar duas ou mais características simultaneamente. Por exemplo, a dureza H e a tensão de ruptura T de uma peça manufaturada de aço poderão interessar, e considera-se (h,t) como um único resultado experimental. Poderia também estudar a estatura H e o peso W de alguma pessoa escolhida, o que forneceria o resultado (h, w) (MEYER, 1972). Definição: Sejam ε um experimento e \mathbf{S} um espaço amostral associado a ε . Seja, $X=X(s)$ e $Y=Y(s)$ duas funções, cada uma associando um número real a cada resultado $s \in \mathbf{S}$ (FIGURA 20).

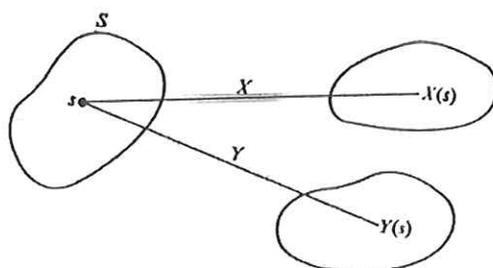


FIGURA 20 Ilustração das duas funções X e Y e o espaço amostral S (MEYER, 1972).

Denomina-se (X, Y) uma variável aleatória bidimensional (algumas vezes chamada um vetor aleatório).

Se $X_1=X_1(s)$, $X_2=X_2(s)$, ..., $X_n=X_n(s)$ forem n funções, cada uma associando um número real a cada resultado $s \in \mathbf{S}$, denomina-se $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ uma variável aleatória n -dimensional.

Definição: (X,Y) será uma variável aleatória discreta bidimensional se os valores possíveis de (X,Y) forem finitos ou infinitos numeráveis. Isto é, os valores possíveis de (X,Y) podem ser representados por (x_i, y_j) ; $i=1,2,3,\dots, n$; $j=1, 2, 3, \dots, n$. (X,Y) será uma variável aleatória contínua bidimensional se (X,Y) assumirem todos os valores, em algum conjunto não-numerável, do plano euclidiano. Por exemplo, se (X,Y) tomar todos os valores no retângulo $\{(x,y) | a \leq x \leq b, c \leq y \leq d\}$ ou todos os valores no círculo $\{(x,y) | x^2 + y^2 \leq 1\}$ pode-se dizer que (x,y) é uma variável aleatória bidimensional contínua.

Definição: (a) Seja (X, Y) uma variável aleatória discreta bidimensional. A cada resultado possível (x_i, y_j) associa-se um número $p(x_i, y_j)$ representando $P(X=x_i, Y=y_j)$ e satisfazendo as seguintes condições:

$$(1) p(x_i, y_j) \geq 0 \text{ para todo } (x, y) \quad (4)$$

$$(2) \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} p(x_i, y_j) = 1 \quad (5)$$

A função p definida para todo (x_i, y_j) no contradomínio e (x, y) é denominada a função de probabilidade de (x, y) . O conjunto dos ternos $[x_i, y_j, p(x_i, y_j)]$, $i, j = 1, 2, \dots, n$ é algumas vezes, denominado distribuição de probabilidade de (x,y) (MEYER, 1972). Exemplo: Considere que um escorregamento translacional planar (Trp) ocorre quando o paralelismo entre o plano de escorregamento (descontinuidade) e a face do talude estiver entre $0-20^\circ$. Mas dependendo dos valores de paralelismo entre eles tem-se uma maior ou menor probabilidade do escorregamento ocorrer, logo para este caso deve-se considerar análise bidimensional. Em que X representa o ângulo de paralelismo entre eles e Y a intensidade de cada intervalo adotado (ver aplicação no item 4.7.1).

Neste caso a probabilidade é representada pela frequência relativa de cada intervalo (X) e a intensidade de cada um (Y) (TABELA 12).

TABELA 12 Valores considerados para Y (frequência relativa) e (X) intensidade.

Y	X	0-5°	6-10°	11-20°
100%		(0) x 100%		
60%				(5/8)x(60%)
80%			(3/8) x (80%)	

$$\text{Logo, } P(\text{trp}) = \begin{cases} 0\% (0-5^\circ, 100) \\ 30\% (6-10^\circ, 80) \\ 37,5\% (11-20^\circ, 60) \end{cases}$$

Como a probabilidade do escorregamento ocorrer ($P(\text{trp})$) pode ser tanto pelo intervalo de 6-10° ou de 11-20°, a probabilidade do escorregamento será:

$$P(\text{trp}) = p(6-10^\circ, 80) + p(11-20^\circ, 60)$$

$$P(\text{trp}) = 67,5\%$$

(b) Seja (x, y) uma variável aleatória contínua tomando todos os valores em alguma região R do plano euclidiano. A função densidade de probabilidade conjunta f é uma função que satisfaz às seguintes condições (MEYER, 1972):

$$(3) f(x, y) \geq 0 \text{ para todo } (x, y) \text{ e} \quad (6)$$

$$(4) \iint_R f(x, y) dx dy = 1 \quad (7)$$

Deve-se ressaltar que para análises unidimensionais a probabilidade absoluta de um evento A é representado por $P(A) = n_A / n$ e para análises bidimensionais com variáveis aleatórias discretas a equação será:

$$P(A) = p(x_i, y_j) \quad (8)$$

Com variáveis aleatórias contínuas será:

$$P(A) = \iint f(x, y) dx dy. \quad (9)$$

Variável aleatória n-dimensional: Muitas vezes, em vez de se observar uma única característica numérica associada aos resultados de um experimento, se observa vários. Desta forma define-se variável aleatória multidimensional da seguinte maneira:

Definição: Sejam X_1, X_2, \dots, X_n variáveis aleatórias definidas no espaço amostral S. A n-upla (X_1, X_2, \dots, X_n) denominaremos variável aleatória n-

dimensional. Ela associa a cada ponto w de \mathbf{S} a n -upla $(X_1(w), X_2(w), \dots, X_n(w))$ (DANTAS, 1997).

Uma variável aleatória discreta multidimensional analogamente a uma variável aleatória unidimensional só fica determinada quando além de seus valores também são conhecidas as probabilidades com que esses valores são assumidos. A definição de distribuição de probabilidade que foi dada para uma variável aleatória unidimensional se estende de maneira natural para uma variável aleatória multidimensional (DANTAS, 1997).

Definição: A distribuição de probabilidade da variável aleatória (X_1, X_2, \dots, X_n) é uma tabela que associa a cada valor (x_1, x_2, \dots, x_n) dessa variável sua correspondente probabilidade $P(X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_n=x_n)$. Ela é denominada também distribuição conjunta de (X_1, X_2, \dots, X_n) .

Observa-se que a notação $(X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_n=x_n)$ representa a interseção dos eventos $(X_1=x_1), (X_2=x_2), \dots, (X_n=x_n)$, ou seja, $[X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n] = \{w : X_1(w) = x_1, X_2(w) = x_2, \dots, X_n(w) = x_n\} = \{w : X_1(w) = x_1\} \cap \{w : X_2(w) = x_2\} \cap \dots \cap \{w : X_n(w) = x_n\}$ (DANTAS, 1997).

Incerteza: O termo incerteza é utilizado para descrever o fato que um valor exato das variáveis não são conhecidos, mas são estimados por meio de medidas limite (BATCHELOR, 1998).

Variabilidade: É utilizada para descrever o fato que a característica atual existe para diferentes pontos no espaço e no tempo (BATCHELOR, 1998).

Processo estocástico: Para CLARKE & DISNEY (1979) num processo estocástico freqüentemente, considera-se situações em que são feitas observações quanto a um período de tempo, situações essas influenciadas por efeitos aleatórios, não só em um único instante, mas por todo o intervalo de tempo ou seqüência de tempos que está a considerar. Em termos gerais é um fenômeno que varia em algum grau, de forma imprevisível, à medida que o tempo passa. A imprevisibilidade, neste caso, implica em que se observou uma seqüência de tempo inteiro do processo em diversas ocasiões diferentes, sob condições presumivelmente "idênticas", as seqüências em observação resultantes, mostraram-se em geral, diferentes (CLARKE & DISNEY, 1979). Para COX & MILLER (1965) um processo estocástico é parte de um sistema que evolui no espaço ou tempo de acordo com as leis probabilísticas e para OTT (1995) é considerado, como aquele que inclui vários (inúmeros) componentes aleatórios. Já um processo sem componente aleatório é chamado determinístico.

Os fenômenos ambientais quase sempre incluem componentes aleatórios, sendo assim, o estudo de processos estocásticos é essencial (usual) para validar previsões ambientais (OTT, 1995). Por exemplo, a concentração de um pesticida observado no leito do rio é resultado da influência combinada de vários fatores complexos, como a quantidade de pesticida utilizada na plantação local, a quantidade de pesticida depositada no solo, irrigação, chuva, percolação dentro do solo, os contornos dos terrenos vizinhos, porosidade do solo, mistura e diluição de pesticidas que passam pelo rio, rios tributários, reações químicas dos pesticidas, e muitos outros fatores. Estes fatores mudarão com o tempo, e a quantidade de pesticida observada também varia com o tempo. Apesar da complexidade de um fenômeno ambiental, muito destes processos “gozam” de certos tratamentos em comum, sendo possível modelá-los estocasticamente (OTT, 1995).

Método Dedutivo: Método eminentemente racional que para chegar à verdade, parte de princípios necessários e simples que, combinados através de raciocínio lógico, permitem estabelecer novas relações e alcançar novos conhecimentos (TOURINHO, 1962).

O método dedutivo, racional ou especulativo, tem largo emprego na matemática, cujos fenômenos são os mais gerais e os menos complexos. Nesta ciência pode-se imediatamente deduzir porque as especulações são bastante simples para que seus princípios sejam espontaneamente apreciáveis (TOURINHO, 1962).

Método indutivo: Por ser experimental, exige medidas. A física, por exemplo, é uma medida do mundo. Mas repetindo-se as medições, quase sempre aparecem resultados diferentes. O método indutivo é representado por fenômenos aleatórios (TOURINHO, 1962).

Freqüência absoluta e relativa: Considere-se um fenômeno aleatório definido no qual se faz uma série de observações. Conta-se então o número de acontecimentos A pertencentes a uma certa categoria especificada de fenômenos: face 6, rei de paus, varões recém-nascidos, peças perfeitas, etc. Se o acontecimento A, numa série de observações aconteceu “ n_A ” vezes, chama-se a este número freqüência absoluta do acontecimento A.

A equação que representada a relação entre a freqüência absoluta e o número total de observações dá-se o nome de freqüência relativa e é expressa pela equação (TOURINHO, 1962):

$$f(A) = n_A/n \quad \text{--- } n: \text{ total} \quad (10)$$

↓
nº de vezes que ocorreu A

Neste caso trata-se de uma análise unidimensional.

Propriedade Aditiva: A propriedade da ocorrência de dois eventos, A e B, na situação em que A ocorre ou B ocorre ou ambos ocorrerem, é igual à soma da probabilidade de A com a probabilidade de B, menos a probabilidade da ocorrência de ambos (MELCHERS, 1993).

Por exemplo, considere um escorregamento planar direcionado ao longo de uma foliação e/ou uma família de descontinuidades (fraturas). Logo, a probabilidade de que o escorregamento seja direcionado ao longo da família de foliação e/ou da família de fraturas será expresso por:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (11)$$

Em que: P(A) representa a família de foliação e P(B) a família de fratura.

Propriedade multiplicativa: Dados dois eventos A e B, em que o resultado é uma interseção de ambos, logo o valor é obtido pela multiplicação dos eventos (MELCHERS, 1993).

Por exemplo, considere um escorregamento planar direcionado ao longo de uma família de foliação e uma família de descontinuidade (fratura). Logo, a probabilidade de que o escorregamento seja direcionado ao longo da família de foliação e da família de fraturas será representado por:

$$P(A \cap B) = P(A) \times P(B) \quad (12)$$

Em que: P(A) representa a família de foliação e P(B) a família de fratura.

Probabilidade condicional: A probabilidade condicional de um evento A, na certeza da ocorrência de um evento B, denotado por P(A/B) (lê-se A na certeza de B) é dada por $P(A/B) = P(A \cap B) / P(B)$. A definição de probabilidade condicional pode ser reescrita para fornecer uma expressão geral para a probabilidade da ocorrência simultânea de dois eventos (SILVA, 1998).

Eventos Independentes: Considere dois eventos A e B que não podem ocorrer conjuntamente, isto é, $A \cap B = \emptyset$. Tais eventos são denominados mutuamente excludentes, ou eventos incompatíveis. Se A e B forem mutuamente excludentes, então $P(A/B) = 0$, porque a ocorrência de B impede a ocorrência de A.

Por outro lado, tem-se a situação na qual $A \supset B$ e, conseqüentemente, $P(A/B) = 1$.

Existem situações em que, saber que B ocorreu dá uma informação bastante definida referente à probabilidade de ocorrência de A. Existem, porém, muitas situações nas quais saber que algum evento B ocorreu não tem qualquer interesse quanto à ocorrência ou não ocorrência de A (eventos independentes).

Exemplo: Suponhamos que um dado equilibrado seja jogado duas vezes. Definem-se os eventos A e B, da seguinte forma:

$$A = \{\text{o primeiro dado mostra um número par}\}$$

$$B = \{\text{o segundo dado mostra um número 5 ou 6}\}$$

É intuitivamente compreensível que os eventos A e B são inteiramente não relacionados. Saber que B ocorreu não fornece qualquer informação sobre a ocorrência de A. De fato, o seguinte cálculo mostra isto. Tomando-se como o espaço amostral os 36 resultados igualmente prováveis. Encontra-se que $P(A) = 18/36 = 1/2$, $P(B) = 12/36 = 1/3$ enquanto que $P(A \cap B) = 6/36 = 1/6$. Consequentemente, $P(A/B) = P(A \cap B)/P(B) = 1/6 / 1/3 = 1/2$. Deste modo encontra-se, como seria de se esperar, que a probabilidade absoluta (ou não condicionada) é igual à probabilidade condicionada $P(A/B)$. Semelhantemente,

$$P(B/A) = \frac{P(B \cap A)}{P(A)} = 1/6 / 1/2 = 1/3 = P(B) \quad (13)$$

A partir daí, poder-se-ia dizer que A e B serão independentes se, somente se, $P(A/B) = P(A)$ e $P(B/A) = P(B)$. Muito embora isso pudesse ser essencialmente apropriado, existe outra forma de colocar a questão que contorna a dificuldade encontrada aqui, a saber, que tanto $P(A)$ como $P(B)$ devem ser não nulos para que as igualdades acima tenham significado.

Considere-se $P(A \cap B)$, supondo que as probabilidades condicionadas sejam iguais às correspondentes probabilidades absolutas tem-se:

$$P(A \cap B) = P(A/B) \times P(B) = P(A) \times P(B) \quad (14)$$

$$P(A \cap B) = P(B/A) \times P(A) = P(B) \times P(A)$$

$$\text{E ainda : } P(A) = n_A/n \quad (15)$$

Em que: $P(A)$ é a probabilidade absoluta de A, n_A é a frequência absoluta de A, n é o número total de observações (MEYER, 1972).

Observa-se que, $P(A)$ definido por MEYER (1972) (equação 15) é exatamente igual a $f(A)$ (equação 10) descrito por TOURINHO (1962), ou seja, a probabilidade absoluta de A é igual a frequência relativa de A.

2.5.3 Tipos de análises

2.5.3.1 Considerações Gerais

Procedimentos para a estimativa probabilística do risco e evento perigoso (hazard) estão sendo vastamente aplicados em Engenharia devido à existência do risco estar sempre associada à atividade que envolva indivíduos ou sociedade. O risco associado a algumas atividades, no entanto é consideravelmente maior que em outras, e em alguns casos o risco assumido por alguém pode significar evento perigoso (hazard) e riscos em outros. A ocorrência destes eventos perigosos (hazards) pode causar prejuízos ambientais, em propriedades, perdas econômicas e ferimentos ou até morte. Com isto, surgem os interesses em solucionar e/ou repará-los (MELCHERS, 1993).

Com o desenvolvimento da sociedade, foi necessária a estimativa do risco, que até então era feita de forma implícita, mas recentemente têm sido considerados de maneira mais específica e objetiva. Várias causas são atribuídas ao desenvolvimento das técnicas utilizadas para a estimativa probabilística do risco e "hazard", são elas: pressão pública com relação à proteção ambiental, aos efeitos nocivos a saúde humana ou a trabalhos próximos a instalação industrial contendo resíduos perigosos, etc. Provavelmente a maioria das aplicações conhecidas para a estimativa do risco foi originada da indústria química e nuclear. No entanto, a técnica tem sido desenvolvida e aplicada em outras áreas como Engenharia Mecânica, Elétrica, Civil e Estrutural. Existe também relato de trabalhos em ciências médicas e na área de saúde pública (MELCHERS, 1993).

Várias técnicas para análise de risco são mencionadas na literatura, dentre elas podem-se citar: Análise Probabilística ou Quantitativa do Risco (PRA, QRA), Análises de tipos e efeitos de ruptura (FMEA), Análises críticas, Evento Perigoso (Hazard) em Estudos de operabilidade (HAZOP) e Causa-conseqüência. Todas estas técnicas têm várias características em comum. As principais diferenças com relação à indústria química em que elas foram desenvolvidas, está no grau de sofisticação e a extensão com que eles usam os conceitos probabilísticos. Apesar destas diferenças, todas as técnicas utilizam uma metodologia similar, que pode ser resumida como (MELCHERS, 1993):

1. Definição do sistema;
2. Identificação do evento perigoso (hazard) provável;
3. Desenvolvimento da árvore de eventos e/ou de defeitos no sistema;



4. Identificar e avaliar conseqüências;
5. Combinar as informações das conseqüências e calcular a probabilidade;
6. Estimativa aceitável;
7. Providenciar ações apropriadas e;
8. Monitoramento.

2.5.3.2 QRA (Quantitative Risk Assessment)

QRA é uma sistemática para estimativa de freqüência e/ou conseqüências de acidentes ocorridos por uma falha no sistema ou operação, muito utilizada nos processos de tomada de decisões. Este método tem sido amplamente utilizado na indústria química e de refinaria, resíduos industriais e de mineração, transportes e operações de distribuição de produtos perigosos, geração de energia nuclear, barragens, etc (MAHLER & OLIVEIRA, 2000).

Esta técnica visa auxiliar na formulação de decisões em Engenharia e realçar a prática de estabilidade de taludes (FELL & HARTFORD, 1997). Um outro aspecto que torna a técnica (QRA) única, com relação aos problemas que envolvem taludes naturais e artificiais é que a técnica requer a estimativa das conseqüências (MAHLER & OLIVEIRA, 2000).

QRA, fundamentalmente envolve dois estágios, sendo que o primeiro consiste na quantificação do risco a partir da avaliação de freqüência do "hazard". O segundo estágio corresponde à quantificação das conseqüências associadas ao hazard, que é chamado Quantitative Risk Analysis (MAHLER & OLIVEIRA, 2000).

Abordagens para estimativa das conseqüências podem ser realizadas por diferentes ferramentas, nas quais incluem-se: dados históricos, opinião de especialista e métodos analíticos. As abordagens podem ser classificadas como (WONG et al. 1997):

1. Abordagem direta;
2. Abordagem por meio de árvore lógica;
3. Modelo das conseqüências e;
4. Abordagem por meio de diagrama de influência

2.5.3.2.1 Abordagem Direta

A abordagem direta envolve a avaliação direta das conseqüências baseadas na experiência e conhecimento especialista sem referenciar os componentes do cenário. Este tipo de abordagem usualmente é utilizado onde os componentes do cenário são muito complicados para serem considerados sistematicamente e onde trabalhos realizados anteriormente permitem julgamentos sensíveis. A estimativa direta é mais viável para avaliação qualitativa.

FINLAY et al (1997) apresenta um exemplo de abordagem direta onde os valores de vulnerabilidade (TABELA 13) são diretamente indicados utilizando-se como referência dados históricos sem levar em consideração os componentes dos diferentes cenários.

TABELA 13 – Resumo dos intervalos de vulnerabilidade determinados em Hong Kong e valores recomendados para mortes devido a movimentos gravitacionais de massa de detritos em situações diversas.

<i>Vulnerabilidade considerando que uma pessoa está ao ar livre</i>			
<i>Possibilidades</i>	<i>Intervalos</i>	<i>Valores recomendados</i>	<i>Comentários</i>
1- Se atingido por queda de rocha	0,1 – 0,7	0,5	Pode ser afetado mas improvável que cause morte
2- Se soterrado pelos detritos	0,8 – 1,0	1,0	Morte por asfixia
3- Se não soterrado	0,1 – 0,5	0,1	Grande chance de sobreviver

<i>Vulnerabilidade considerando uma pessoa em um veículo</i>			
<i>Possibilidades</i>	<i>Intervalos</i>	<i>Valores recomendados</i>	<i>Comentários</i>
1- Se o veículo for soterrado/ou sofrer colisão	0,9 – 1,0	1,0	A morte é quase certa.
2- Se o veículo for só atingido	0 – 0,3	0,3	Grande chance de sobrevivência.

Vulnerabilidade considerando uma pessoa em uma construção			
<i>Possibilidades</i>	<i>Intervalos</i>	<i>Valores recomendados</i>	<i>Comentários</i>
1- Se houver colapso da construção	0,9 – 1,0	1,0	Morte quase certa
2- Se a construção for atingida por detritos e a pessoa for soterrada	0,8 – 1,0	1,0	Alta probabilidade de morte
3- Se a construção for atingida por detritos e a pessoa não soterrada	0,0 – 0,5	0,2	Alta chance de sobrevivência
4- Se o detrito só atingir a construção	0 – 0,1	0,05	Provavelmente sem perigo.

FONTE: FINLAY (1997).

2.5.3.2.2 Abordagem por meio de Árvore de Eventos

A árvore de eventos é uma técnica padrão de QRA (Quantitative Risk Assessment) muito utilizada na Indústria Química. Nesta análise a consequência de um dado evento perigoso em particular é estimada a partir da consideração de uma seqüência de combinações de componentes prováveis utilizando a técnica de árvore lógica e argumentação indutiva para transformar os diferentes componentes prováveis dentro de um intervalo de resultados possíveis (WONG et al. 1997). O desenvolvimento da árvore de eventos tem como objetivo identificar todos os componentes prováveis (que são importantes na determinação do hazard). A probabilidade, de cada nó do braço da árvore, deve ser determinada com intuito de quantificar a freqüência de ocorrência de cada evento e conseqüentemente a probabilidade final do "hazard" (WONG et al. 1997).

Um exemplo de uma árvore de eventos que foi desenvolvida em um estudo de QRA para queda de blocos (boulder fall) em Hong Kong é mostrado a seguir (FIGURA 21). Neste evento em particular, considera-se a influência de obstrução natural de barreiras de proteção (construídos pelo homem), de diferentes tipos de construções afetadas, incluindo áreas abertas, estradas, praças e prédios, possibilidade de perfuração de janelas e muros por meio de blocos, etc. A distribuição de freqüência do volume e a distância percorrida pelo bloco são combinados com a árvore de eventos para a estimativa do nível de risco.

2.5.3.2.3 Modelo das Conseqüências

Este modelo consiste na consideração dos fatores chaves que contribuem com a ocorrência da ruptura, como por exemplo, a distância percorrida pelos detritos, tipo e proximidade das instalações afetadas, distribuição espacial e temporal da população sob risco.

A avaliação é baseada nos cenários e componentes do cenário considerados relevantes para a ocorrência do evento perigoso (hazard).

A avaliação realizada por BUNCE et al (1997) é um exemplo deste modelo.

Esta análise permitiu estimar a probabilidade de perda de vida em decorrência de queda de blocos a partir do cadastramento das marcas deixadas pelo impacto dos blocos numa estrada. A partir destes dados foi possível registrar as quedas de blocos que posteriormente foram utilizadas para estabelecer a freqüência dos mesmos.

O cálculo para estimativa do risco considerou risco associado diretamente com o veículo em movimento ou estacionário sendo atingido por queda de blocos. Para o cálculo assumiu-se tráfico uniformemente distribuído no espaço e no tempo independente da queda de blocos e ainda cada veículo do mesmo comprimento. Da mesma forma assumiu-se queda de blocos uniformemente distribuída no espaço e no tempo e independente do tráfico. Estas considerações foram necessárias para que a probabilidade, da colisão entre a rocha e o veículo, fosse determinada por meio do Teorema Binomial.

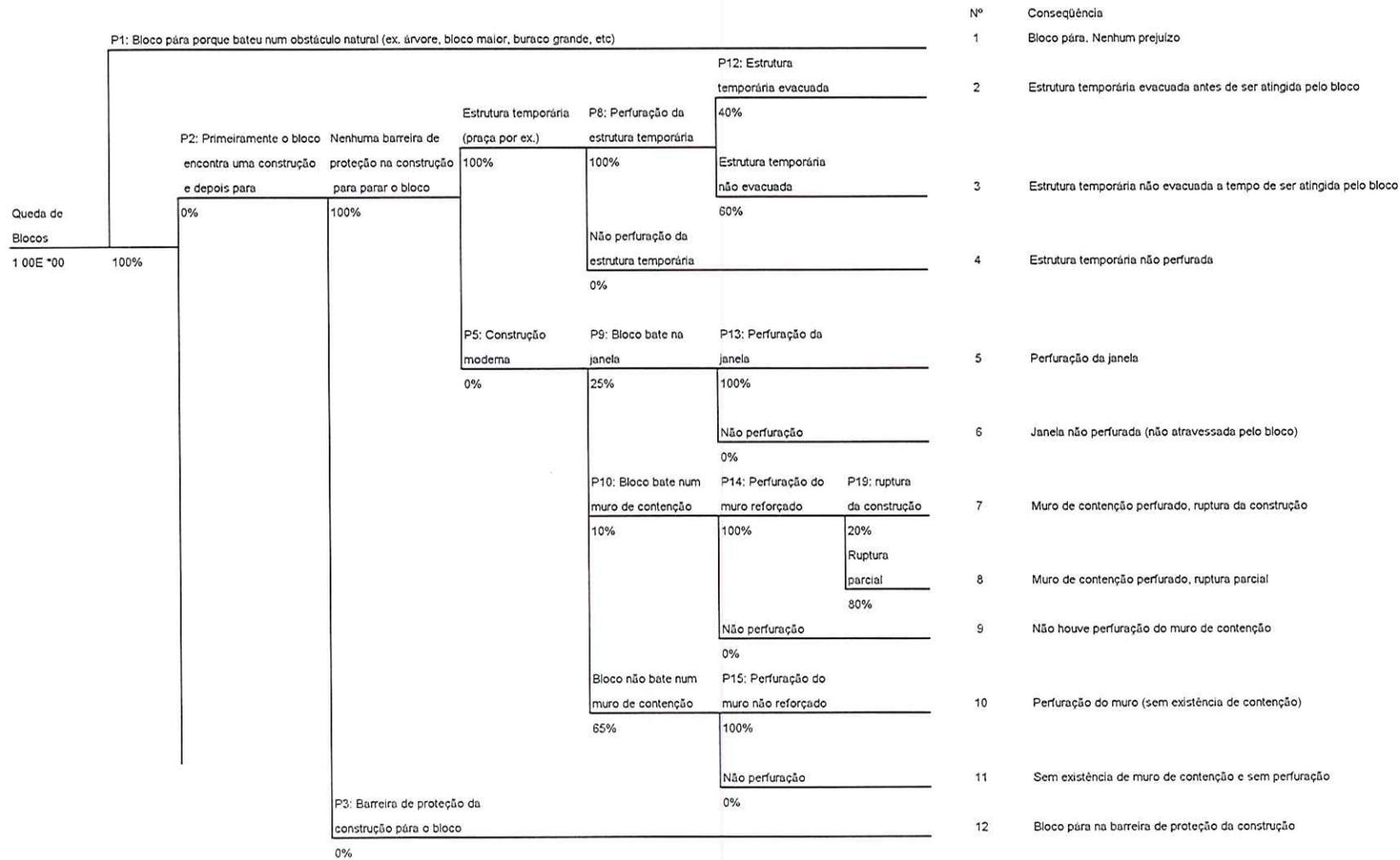


Figura 21 - Exemplo de árvore de eventos para queda de blocos (QRA report by ERM, 1996) apud WONG et al (1997).

2.5.3.2.4 Abordagem por meio de Diagrama de Influência

Neste caso, o diagrama de influência é construído para mostrar a interação entre os fatores (ex: cenário e componentes) relevantes para o evento que está sendo considerado.

Os diagramas são construídos baseando-se principalmente em conceitos e conhecimentos dos cenários relevantes. A estimativa da consequência é realizada de forma similar a estimativa por meio de árvore de evento.

ROBERDS & HO (1997)⁷ apud WONG et al (1997) desenvolveram um trabalho utilizando esta análise.

2.5.3.3 PRA (*Probabilistic Risk Analysis*)

É uma sistemática para estimativa da probabilidade de ocorrência versus diagrama das consequências do "hazard" (MELCHERS, 1993). Tipicamente as consequências são os resultados de um ou mais braços de uma árvore de eventos (MELCHERS, 1993). Consiste na estimativa da probabilidade associado aos custos esperados de possíveis resultados de um sistema que produz risco (RIED, 1993). Uma PRA inclui análise, avaliação e gerenciamento do risco.

A análise probabilística do risco fornece a estimativa da probabilidade de falha (quebra) do sistema.

A avaliação probabilística do risco envolve decisões quanto à gravidade do risco, baseado em medidas quantitativas dos custos e probabilidades originados pela falha no sistema estimados a partir da análise probabilística do risco. Em particular, a avaliação probabilística do risco envolve a avaliação do risco a partir de modelos quantitativos (probabilísticos), considerando valores pessoais e sociais e inclui a estimativa do risco aceitável. A avaliação probabilística do risco é geralmente baseada na comparação do risco, eficácia da redução do risco, ou análises de custo benefício (REID, 1993).

O gerenciamento do risco geralmente envolve aprovação do risco, redução ou idealização do risco baseado em decisão estatística (REID, 1993).

⁷ ROBERDS, W. & HO, K.K.S (1997). A quantitative risk assessment and risk management methodology for natural terrain in Hong Kong. Paper submitted to the First International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment . San Francisco..

Segundo REID (1993) a PRA é útil porque facilita:

1. A determinação de medidas quantitativas do risco;
2. A separação dos elementos objetivos e subjetivos no processo de estimativa do risco;
3. O estabelecimento de uma base quantitativa de “fatos” para discussão e tomadas de decisões e;
4. A aplicação de critérios quantitativos para tomadas de decisões, baseando-se mais na decisão estatística que na intuição.

2.5.3.4 *Árvore de eventos (event tree)*

É uma representação visual de todos os eventos que podem ocorrer em um sistema. À medida que o número de eventos aumenta, a ilustração se assemelha aos galhos de uma árvore (RELEX SOFTWARE CORPORATION, 2001). Podem ser usadas para análise de sistemas em que todos os componentes estão operando continuamente, ou para sistemas em que alguns ou todos os componentes estão em modo de apoio, sendo que esses envolvem uma operação seqüencial lógica. O ponto de partida (chamado evento inicial) separa o sistema normal de operação. A árvore de eventos mostra a seqüência de eventos que envolvem sucesso ou fracasso dos componentes do sistema (RELEX SOFTWARE CORPORATION, 2001).

No caso do sistema de apoio e em particular sistemas de segurança e missões orientadas, a árvore de eventos é utilizada para identificar os possíveis resultados do sistema, seguindo um dado evento inicial que é geralmente um evento operacional insuficiente ou uma situação. No caso de um sistema operacional contínuo, estes eventos podem ocorrer em qualquer ordem. Na análise de árvore de eventos os componentes podem ser considerados em qualquer ordem desde que eles não operem cronologicamente um com relação ao outro (RELEX SOFTWARE CORPORATION, 2001).

A árvore de eventos (FIGURA 22) é uma técnica padrão de QRA na Indústria Química. Nesta análise a consequência de um dado “hazard” em particular é estimada a partir da consideração de uma seqüência de combinações de componentes prováveis utilizando a técnica de árvore lógica e argumentação indutiva para transformar os diferentes componentes prováveis dentro de um intervalo de resultados possíveis (WONG et al. 1997).

O desenvolvimento da árvore de eventos tem como objetivo identificar todos os componentes prováveis (que são importantes na determinação do hazard). A probabilidade, de cada nó do braço da árvore, deve ser determinada com intuito de quantificar a freqüência de ocorrência de cada evento e conseqüentemente a probabilidade final do "hazard" (WONG et al. 1997).



FIGURA 22. Árvore de eventos típica (modificado de MELCHERS, 1993).

Para a estruturação da árvore é necessário que se conheça o evento essencial que seja responsável pelo início de uma seqüência lógica e todos os eventos subseqüentes que conduzirá ao "hazard" (Movimentos Gravitacionais de Massa). Por exemplo, em um escorregamento translacional em rocha, o evento inicial considerado é o tipo de material, que é o atributo predisponente essencial e dando continuidade a uma seqüência lógica têm-se os atributos predisponentes relacionados às descontinuidades e o atributo deflagrador que é a chuva. Dependendo das características ou da classe do atributo, que satisfaçam todas as condições para um determinado tipo de "hazard", as seqüências lógicas são criadas (translacional planar, em cunha e em degraus como ilustrado na FIGURA 51) a partir da lógica Booleana (sim para sucesso e não para fracasso).

Em uma PRA convencional os resultados usualmente são apresentados em uma probabilidade de ocorrência versus diagrama das conseqüências. Tipicamente as conseqüências são os resultados de um ou mais "braços" de uma árvore de eventos sendo que a probabilidade correspondente para esta série de eventos que estão ocorrendo é obtida pela multiplicação de várias probabilidades dos eventos (MELCHERS, 1993).

$$P_o = P[E_i \cap E_a \cap E_b]$$

(16)

Em que: $A \cap B$ representa a interseção de eventos A e B. Onde E_i é o evento inicial (FIGURA 2.21). Como os eventos são independentes a expressão utilizada é:

$$P_o = P_i \times P_a \times P_b$$

(17)

A aplicação desta técnica pode ser encontrada nos trabalhos de KEATON & ECKHOFF (1990), MELCHERS (1993), JACKSON & FELL (1993), CAMERON (1993), WONG et al. (1997) e HENLEY & KUMAMOTO (1992).

2.5.3.5 “Fault tree”

É um procedimento dedutivo para determinação de várias combinações de falhas (defeitos) que podem ocorrer (hardware ou humano) e que podem resultar na ocorrência de um evento indesejado específico (chamado como evento de topo) no sistema. A análise dedutiva começa com a conclusão geral (resultado), e então parte na tentativa de se determinar às causas específicas da conclusão. Este tipo é freqüentemente chamado como uma estimativa “top down” e é um dos métodos mais utilizados em um sistema de análise de segurança (RELEX SOFTWARE, 2001).

Análises em “fault tree” foram desenvolvidas por H. A. WATSON da “Bell Telephone Laboratories” em 1961-62, durante um estudo das Forças Aéreas contratado pelo “Minuteman Launch Control System” (HENLEY & KUMAMOTO, 1992). A primeira publicação foi apresentada em 1965 no “Safety Symposium”, o qual foi organizado pela Universidade de Washington e pela “Boeing Company”. Após a realização do Simpósio um grupo de pesquisadores incluindo D.F. HAASL, R.J. SCHRODER, W.R. JACKSON, e outros têm aplicado e estendido à técnica (HENLEY & KUMAMOTO, 1992). Apesar do amplo uso da metodologia, existe uma grande escassez na literatura. HENLEY & KUMAMOTO (1992) declaram que a importância da “fault tree” está em:

1. Direcionar as análises para encontrar “erros ou falhas” no sistema;
2. Mostrar aspectos importantes no sistema que podem gerar a “falha” de interesse;
3. Providenciar ajuda gráfica para dar visibilidade aos sistemas de gerenciamento;

4. Providenciar opções para sistemas e análise de segurança qualitativos e quantitativos;

5. Permitir ao analista concentrar em um sistema particular de “erro ou falha” no tempo;

6. Providenciar uma compreensão do comportamento interno do sistema (HENLEY & KUMAMOTO, 1992).

A “fault tree” representa a combinação de vários eventos para o evento de interesse, isto é, ele começa do topo, o resultado, e trabalha retornando (regredindo), mostrando os eventos contribuintes. A árvore de evento começa com o evento inicial e trabalha através da lógica dos eventos seguintes para a obtenção de um conjunto de resultados. O resultado da árvore de evento será uma ou mais conseqüências (MELCHERS, 1993) enquanto que na “fault tree” o resultado será único (evento de topo).

Se uma análise em “fault tree” é usada (FIGURA 23) os eventos de baixa ordem contribuem para a ocorrência do evento de topo. Para uma “fault tree” a combinação de eventos que contribuem para o evento de topo por meio de um nó “AND” (interseção) é governado pelas equações 16 e 17. Para eventos que contribuem com um nó “OR” (união), tem-se a união de eventos, logo as equações adotadas serão (MELCHERS, 1993):

$$P_{top} = P(E_a \cup E_b) \quad (18)$$

Que resulta para eventos independentes:

$$P_{top} = Pa + Pb \quad (19)$$

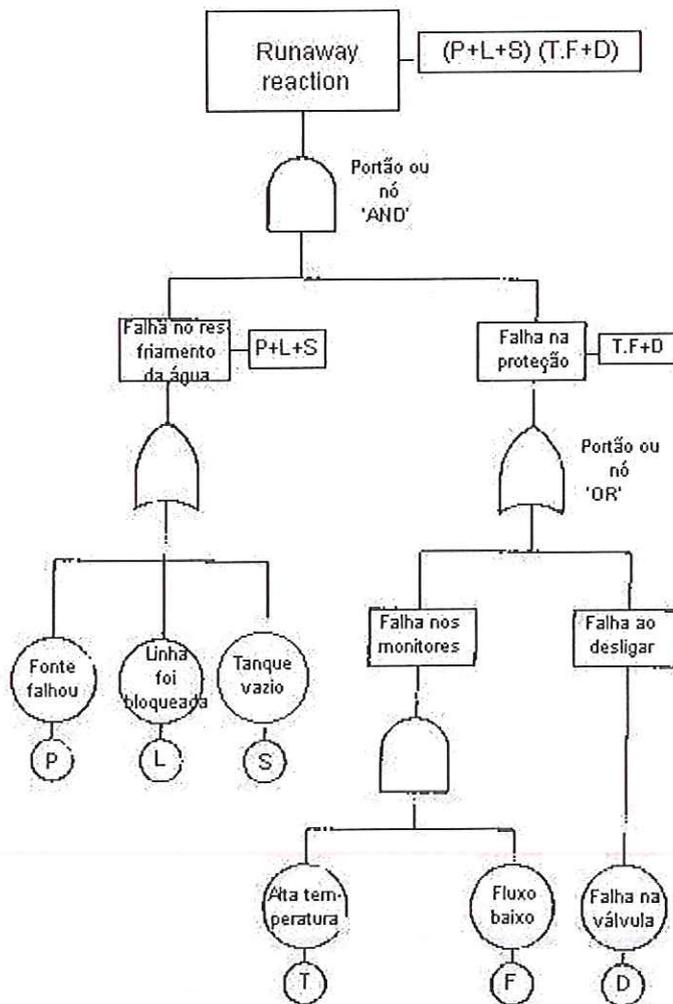


FIGURA 23. "Fault tree" típica, mostrando os nós (portões) "AND" e "OR" (modificado de MELCHERS, 1993).

No exemplo acima (FIGURA 23) tem-se uma "fault tree" onde se considera interseção e união de eventos. Neste caso o evento de topo é a Reação "Runaway" que é representado pela interseção de dois eventos, a saber: falha no sistema de resfriamento de água e falha no sistema de proteção, ou seja, só ocorrerá quando os dois eventos ocorrerem. O primeiro evento, falha no sistema de resfriamento de água, ocorrerá devido à união de três eventos, são eles: falha na fonte de abastecimento de água (P), linha bloqueada (L) e tanque de abastecimento vazio (S), ou seja, poderá ocorrer devido à presença do evento P ou evento L ou evento S. O segundo falha no sistema de proteção ocorrerá devido a união dos eventos falha no monitoramento e falha no sistema de desligar, ou seja, o evento poderá ocorrer devido à ocorrência de um evento ou do outro. Mas o evento, falha no

monitoramento, ocorrerá devido à interseção de dois eventos alta temperatura e baixo fluxo, ou seja, é necessária a ocorrência de ambos, enquanto que a falha no sistema de desligar ocorrerá apenas pela ocorrência do evento falha na válvula de abertura. Logo, Reação "Runaway" é expresso por: $(P+L+S) \times ((TxF) + D)$.

Na construção de uma "fault tree" é utilizada uma estrutura padrão como mostrada na FIGURA 24. O evento indesejado aparece como o evento de topo, e é ligado a uma seqüência de eventos de regressão mais básicos através de nó "AND" (interseção) ou "OR" (união).

No fluxograma da Figura 24 encontra-se a estrutura fundamental de funcionamento de uma "fault tree".

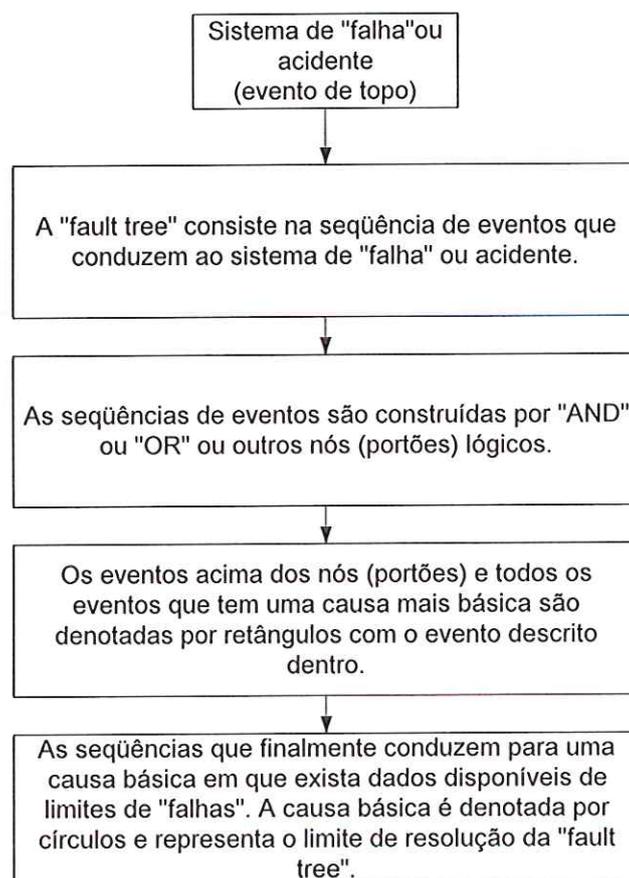
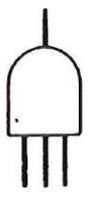
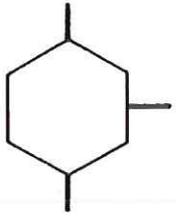
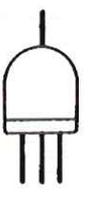


FIGURA 24. Estrutura fundamental da "fault tree" (modificado de HENLEY & KUMAMOTO, 1992).

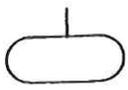
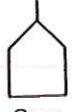
Com intuito de encontrar e visualizar as condições entre os eventos em uma "fault tree" foi criado blocos para classificar e conectar um grande número de eventos. Existem dois tipos de blocos: símbolos de nós e de eventos (TABELAS 14 e 15).

TABELA 14. Símbolos adotados para os nós.

	Símbolo ou nó(portão)	Nome do nó(portão)	Condições
1		Nó (portão) AND	Se todos os eventos ocorrem simultaneamente.
2		Nó (portão) OR	Se um dos eventos ocorrem ou ambos.
3		Nó (portão) Condição	Eventos Condicionais .
4		Nó (portão) Prioritário AND	Se todos os eventos ocorrem da esquerda para a direita.
5		Nó (portão) Exclusivo OR	Se apenas um deles ocorrem, não ambos.
6		m Out of n gate (voting or sample gate)	Se apenas m dos n eventos ocorrem.

FONTE: modificado de HENLEY & KUMAMOTO (1992).

TABELA 15. Símbolos adotados para os eventos

	Símbolo do evento	Significado do símbolo
1	 Círculo	Evento básico com dados suficientes.
2	 Diamante	Evento não desenvolvido.
3	 Retângulo	Evento representado por um nó.
4	 Oval	Evento condicional. Usado com nó de condição.
5	 Casa	Evento também ocorre ou não
6	 Triângulos	Símbolo de transferência

FONTE: modificado de HENLEY & KUMAMOTO (1992).

RELEX SOFTWARE CORPORATION, (2001) afirmaram que o tipo de lógica utilizado nesta análise é dedutiva, concordante com HENLEY & KUMAMOTO (1992).

Exemplos de aplicação desta técnica podem ser encontrados nos trabalhos realizados por MELCHERS (1993), LEE & BROWNE (1993), NAWAR & SAMSUDIN (1993), CAMERON (1993) e HENLEY & KUMAMOTO (1992).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

Os procedimentos utilizados para avaliação do processo potencial e da probabilidade dos movimentos gravitacionais de massa, bem como a seleção dos atributos e a relação destes com os processos, podem ser agrupados em 3 etapas, conforme fluxograma da FIGURA 25.

Primeira etapa: Levantamento dos atributos que devem ser mapeados

- Foram considerados todos os atributos que influenciam nos processos de movimento gravitacional de massa.

Segunda etapa: coleta, geração e armazenamento das informações.

- Consideração de trabalhos realizados anteriormente;
- Digitalização do mapa topográfico;
- Elaboração do modelo de elevação digital do terreno (DTM);
- Elaboração da carta de declividade;
- Elaboração do Mapa de Canais de Drenagem;
- Elaboração do Mapa de *Landform*;
- Elaboração da Carta de Cenários;
- Caracterização de todos os atributos presentes em cada cenário;
- Elaboração do Mapa do Substrato Rochoso;
- Elaboração do Mapa do Material Inconsolidado;
- Elaboração do Mapa de Feições de Movimentos Gravitacionais de Massa;
- Determinação das condições para ocorrência de cada tipo de processo classificado;

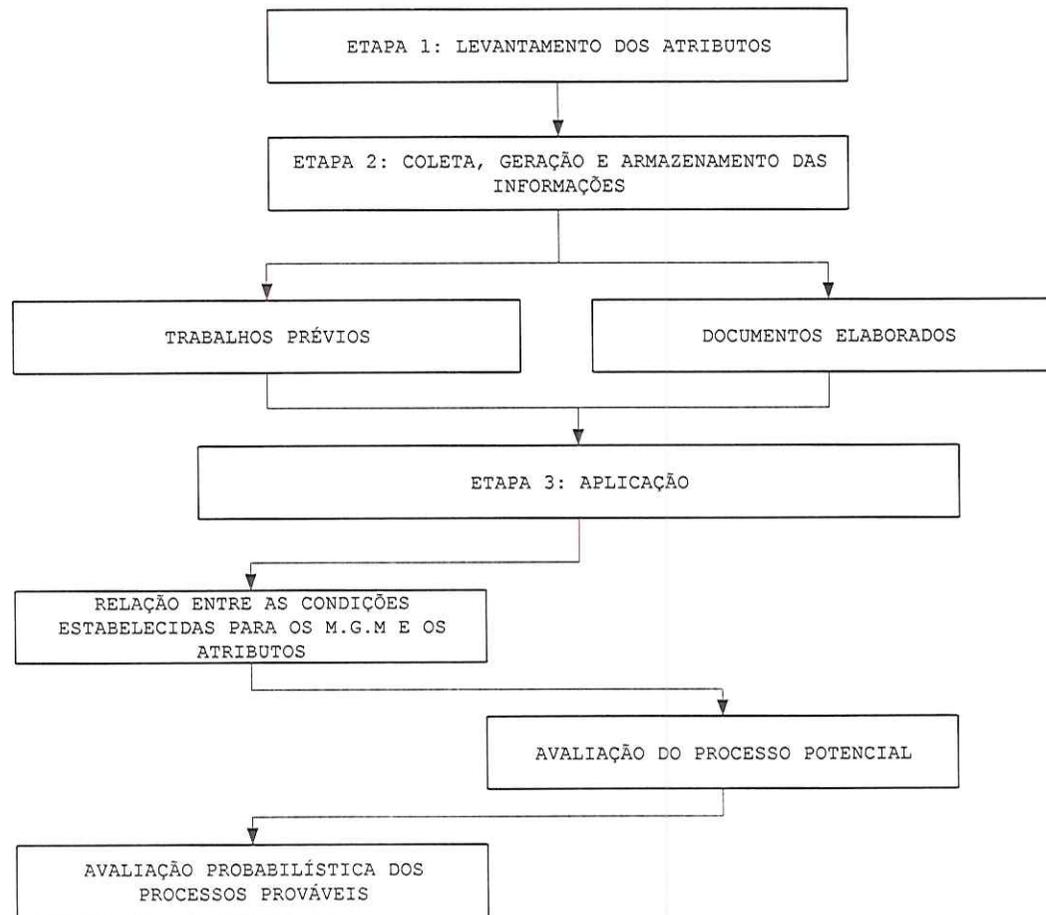


FIGURA 25. Fluxograma das etapas e fases desenvolvidas no trabalho.

Terceira etapa: Aplicação.

- Relação entre as condições estabelecidas para cada processo de movimento gravitacional de massa e os atributos;
- Verificação do processo potencial pela comparação entre as tabelas de atributos presentes e os necessários;
- Estrutura Básica da Avaliação probabilística dos processos prováveis.

3.2 LEVANTAMENTO DOS ATRIBUTOS QUE DEVEM SER MAPEADOS

A lista de atributos utilizada neste trabalho foi proposta por ZUQUETTE (1998). Os atributos baseiam-se nos componentes que estão diretamente ligados aos movimentos gravitacionais de massa e foram selecionados pelas influências nos processos da serra de Ouro Preto (cidade de Ouro Preto-MG). Esses componentes são:

- Processos anteriores;
- Erosão;
- Vegetação;
- Substrato rochoso;
- Águas;
- Materiais inconsolidados;
- Ação antrópica e;
- Relevo.

Para cada componente têm-se os atributos e as classes adotadas (TABELA 16). As classes baseiam-se nas características dos atributos encontrados na área.

Quanto à influência dos atributos na ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa foram considerados de acordo com BONUCCELLI (1999) e quanto aos métodos de obtenção encontram-se ilustrados na TABELA 17.

TABELA 16: Atributos selecionados para a área, juntamente com seus componentes e sistema classificatório adotado.

COMPONENTES	ATRIBUTOS	SISTEMA CLASSIFICATÓRIO	CÓDIGO DOS ATRIBUTOS
PROCESSOS ANTERIORES	- Depósitos oriundos de movimentos de massa antigos e cicatrizados (não colúvios típicos)	Distribuição, espessura, tipo.	01
	- Depósitos oriundos de movimentos de massas recentes	Distribuição e volumes	02
EROSÃO	- Feições erosivas concentradas	Registro quanto ao tipo, característica geométrica e geomorf.	03
VEGETAÇÃO	- Tipo (natural, reflorestamento)	Tipo, distribuição.	04
	- Profundidade das raízes	Profundidade das raízes	05
SUBSTRATO ROCHOSO	- Áreas com rochas aflorantes	Litotipos, distribuição.	06
	- Grau de intemperismo	(ISRM, 1983)	07
	- Alternância de materiais com diferentes níveis de competência	n° repetições, dimensão.	08
	- Litologia/Litotipos	Resistência mecânica (ISRM, 1983)	09
	- Alternância de materiais com diferentes níveis de resistência	Espessura, n° repetições.	10
	- Grau de paralelismo entre o topo rochoso e a superfície do terreno	Ângulo entre eles e direção de mergulho	11
	- Grau de irregularidade do topo rochoso		12
	- Tipo de contato entre os diferentes materiais rochosos		13
	- Tipo de contato entre os materiais rochosos e os inconsolidados		14
	- Tipos de descontinuidades	Gênese, geometria.	15
	- Densidade das descontinuidades	Totais por tipo	16
	- Abertura das descontinuidades	(ISRM, 1983)	17
	- Preenchimento das descontinuidades	Espessura e tipo de material	18
	- Descontinuidades geradas por alívio de tensões e ou por atividades antrópicas	Distribuição e característica geométrica, atividade geradora.	19
	- Persistência das descontinuidades	(ISRM, 1983)	20
	- Conectividade das descontinuidades	Relação entre elas	21
	- Perfil de alteração homogeneizou ou evidenciou as descontinuidades	Contínuo/descontínuo	22
	- Relação entre a direção das descontinuidades e a direção da encosta	Ângulo entre eles	23
	- Relação entre o sentido do mergulho das descontinuidades e a inclinação da encosta	Ângulo entre direções	24
	- Relação entre o ângulo de mergulho das descontinuidades e o mergulho da encosta	Ângulo entre direções	25
	- Relação do plano de interseção entre duas descontinuidades e a encosta	Ângulo entre eles	26
	- Relação D/L	Valor	27
	- Zonas de falhas ou intensamente fraturadas	Largura, característica.	28
	- Presença de descontinuidades específicas	Camadas com pequena espessura/contato	29
	- Direção do vetor de soltamento de blocos	Direção e inclinação	30
	- Camadas litológicas que tenham comportamento de descontinuidades	Repetição no pacote, análise 2° uma descontinuidade.	31

FONTE: modificado de ZUQUETTE (1998).

TABELA 16: (Continuação): atributos selecionados para a área, juntamente com seus componentes e sistema classificatório adotado.

COMPONENTES	ATRIBUTOS	SISTEMA CLASSIFICATÓRIO	CÓDIGO DOS ATRIBUTOS
ÁGUAS	- Pequenas lagoas nos canais de drenagens	Frequência/distribuição	32
	- Relações do N.A. com depósitos de materiais retrabalhados naturais	Geometria/variação anual	33
	- Diferentes níveis de surgências em uma mesma encosta.	Diferença de altitude	34
	- Zona de surgência de água	Provisória/permanente	35
	- Zonas saturadas suspensas	Cotas, distribuição e espessura.	36
MATERIAL INCONSOLIDADO	- Presença de materiais consistentes e inconsistentes intercalados	Espessura, profundidade da 1ª ocorrência.	37
	- Materiais permeáveis e impermeáveis intercalados	Espessura, profundidade da 1ª ocorrência.	38
	- Tipos de contatos entre os retrabalhados e residuais		39
	- Relação D/L	Valor	40
	- Encostas com materiais inconsolidados originados da alteração de diferentes tipos rochosos	Seqüência topo/base	41
	- Materiais com diferentes níveis de resistência intercalados	Espessura, profundidade da 1ª ocorrência.	42
	- Materiais com diferentes índices de erodibilidade intercalados	Espessura, profundidade da 1ª ocorrência.	43
	- Heterogeneidade do pacote de materiais retrabalhados		44
	- Posição dos materiais retrabalhados na encosta	Topo/base	45
	- Presença de matações próximo à superfície	Topo/meia encosta/base	46
	- Posição dos matações na topografia e em relação com as formas das encostas		47
	- Materiais inconsolidados residuais com descontinuidades mantidas e paralelas a superfície das encostas	Frequência/profundidade	48
	AÇÃO ANTRÓPICA	- Escavações.	Dimensão/densidade
- Posição das escavações nas encostas		Distribuição	50
- Relação ente as escavações x as descontinuidades e as anomalias litológicas		Distribuição	51
- Locais de disposição de resíduos e rejeitos em superfície ou raso		Tipo/volume/umidade	52
- Ocupações que afetam o fluxo das águas subsuperficiais		Tipo/distribuição	53
RELEVO	- Inversões da direção das inclinações de partes das encostas	nº inversões/frequência	54
	- Direção, mergulho e sentido do vetor de maior declividade.		55

FONTE: modificado de ZUQUETTE (1998).

TABELA 17. Métodos de obtenção dos atributos citados na Tabela 16.

CÓDIGO DOS ATRIBUTOS	FORMAS DE OBTENÇÃO			
	FOTOGRAFIAS AÉREAS	TRABALHO DE CAMPO	ESCRITÓRIO	INFORMAÇÃO VERBAL
01	X	X		
02	X	X		
03		X		
04		X		
05		X		
06		X		
07		X		
08		X		
09		X		
10		X		
11		X		
12		X		
13		X		
14		X		
15		X		
16		X		
17		X		
18		X		
19		X		
20		X		
21		X		
22		X		
23		X	X	
24		X	X	
25		X	X	
26		X	X	
27		X	X	
28		X		
29		X		
30		X		
31		X		
32	X	X		
33		X		
34		X		
35	X	X		X
36		X		X
37		X		
38		X		
39		X		
40		X	X	
41		X		
42		X		
43		X		
44		X		
45		X		
46		X		
47		X		
48		X		
49	X	X		
50	X	X		
51	X	X		
52	X	X		
53	X	X		
54	X	X	X	
55			X	

3.3 COLETA, GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DAS INFORMAÇÕES.

3.3.1 TRABALHOS PRÉVIOS

Foram consultados alguns trabalhos anteriormente realizados na área como os de DORR (1969), NALINI JR (1993), SOUZA & COSTA (1994), SOUZA (1996), OLIVEIRA & DIAS (1997), ENDO (1997), FONTES (1999) e BONUCCELLI (1999).

3.3.2 DOCUMENTOS ELABORADOS

3.3.2.1 MAPA TOPOGRÁFICO

O mapa topográfico digitalizado para a área em estudo (FIGURA 49), apresenta as curvas de nível com espaçamento de 2m, e foi elaborado a partir dos mapas topográficos publicados pela CEMIG, na escala 1:2.000 ano de 1978. Para a digitalização e obtenção do mapa final foi utilizado o AutoCAD 14. A partir deste mapa foram gerados o DTM e a carta de declividade.

3.3.2.1.1 Modelo digital do terreno (MDT ou DTM)

Para a obtenção do DTM (FIGURA 50) foi necessário exportar o arquivo gerado do AutoCAD 14 (mapa topográfico) para dxf, posteriormente utilizou-se um programa da unicamp (dxf2) para interpolação dos dados. Estes dados foram importados pelo SURFER, que por meio do método da mínima curvatura e definição do número de colunas e linhas foi possível à obtenção do DTM pelo comando "*shaded relief mapping*".

3.3.2.1.2 Carta de declividade

As cartas de declividades, por representarem espacialmente as variações topográficas da superfície, têm sido de grande importância para os trabalhos de mapeamento geotécnico.

Neste trabalho optou-se pela metodologia proposta por DE BIASE (1970), considerando as informações fornecidas pelo mapa topográfico, que consiste na delimitação de áreas que apresentam valores de inclinação do terreno dentro de um mesmo intervalo ou classe de declividade.

As classes foram estabelecidas baseando-se nos tipos de processos de Movimentos Gravitacionais de Massa, em leis já estabelecidas para os diferentes usos e ocupação territorial e em trabalhos anteriormente realizados na área (SOUZA, 1996; OLIVEIRA & DIAS, 1997; BONUCCELLI, 1999 e FONTES, 1999).

Para a realização da carta de declividade (FIGURA 51) foi adotado um ábaco contendo as seguintes classes de declividade: <5% (<3°), 5-10% (3-6°), 10-20% (6-11°), 20-30% (11-17°), 30-45% (17-24°), 45-75% (24-37°), 75-100% (37-

45°), >100% (>45°). O ábaco foi gerado a partir dos valores da escala, distância do espaçamento entre as curvas de nível e dos intervalos de declividade definidos para a área.

3.3.2.2 MAPA DE CANAIS DE DRENAGEM

O mapa de canais de drenagem (FIGURA 52) foi obtido a partir das fotografias aéreas (escala 1:8000 do ano de 1978) e para a correção dos canais de drenagem traçados utilizou-se o SKETCHMASTER e o mapa topográfico da área (escala 1:2.000) como base.

3.3.2.3 CARTA DE CENÁRIOS

Os cenários foram delimitados a partir da combinação do mapa de *landform* e o mapa de canais de drenagem, considerando-se ainda a inversão na direção da encosta, o tipo de material e o divisor de água.

O mapa de *landform* foi obtido pela interpretação das fotografias aéreas na escala 1:8.000 do ano de 1978. Foi caracterizado em nível de elemento de terreno a partir das características geomorfológicas presentes, como a forma topográfica, a amplitude do relevo e a inclinação da vertente. Além dessas características foi considerada também a organização da drenagem em termos de freqüência e estruturação das redes dos canais, conforme critérios estabelecidos por LOLLO (1996).

A delimitação da área em cenários (FIGURA 53), foi feita com o intuito de se obter uma caracterização mais minuciosa da área, procurando reduzir ao máximo a variabilidade espacial existente e, conseqüentemente reduzir as incertezas.

3.3.2.4 TABELA DE CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS

Após a seleção de todos os atributos que desencadeiam os movimentos gravitacionais de massa (TABELA 16), foi realizada a caracterização de cada atributo, quando presente em cada cenário, nos trabalhos de campo. A Tabela

contendo todos os atributos caracterizados, em cada cenário, se encontra no ANEXO 1 deste trabalho.

3.3.2.5 MAPA DO SUBSTRATO ROCHOSO

Os limites, do substrato rochoso, obtidos a partir das fotografias aéreas foram verificados em campo e os contatos não visíveis na foto e encontrados em campo foram considerados. Para a delimitação do substrato rochoso (FIGURA 44) foram considerados informações geológicas preexistentes, por intermédio da revisão bibliográfica dos trabalhos executados, foto interpretação e trabalhos de campo. Foram consultados os trabalhos de DORR (1969), NALINI JR (1993), SOUZA & COSTA (1994), SOUZA (1996), OLIVEIRA & DIAS (1997), ENDO (1997) e BONUCCELLI (1999).

Para a classificação do grau de alteração e resistência da rocha adotou-se a sugerida pela ISRM (1983). Para o grau de alteração da rocha foi considerado o símbolo A1 correspondente a Rocha fresca ou sã, A2 para levemente alterada, A3 para Moderadamente alterada, A4 para Intensamente Alterada, A5 para Completamente alterada, A6 para Solo residual. Quanto à resistência foram: rocha extremamente Fraca (R0); rocha muito fraca (R1); fraca (R2); medianamente resistente (R3); resistente (R4); muito resistente (R5) e extremamente resistente (R6).

3.3.2.6 MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Os materiais inconsolidados foram classificados como Saprolito, Residual e Retrabalhado (FIGURA 45). Para o saprolito utilizou-se a definição de PRICE (1993). A classificação de PRICE (1993) refere-se exatamente à classe A5 da ISRM (1983). Para os materiais residuais adotou-se o termo evoluído e endurecido. O termo evoluído segundo a classificação de PRICE (1993) que corresponde exatamente à classe A6 da ISRM (1983). Foi considerado também o termo residual endurecido proposto por SOUZA (1996). Os retrabalhados foram classificados como: Colúvio, tálus, rejeito de mineração e blocos rolados. Os conceitos utilizados para os materiais inconsolidados foram:

Saprolito: Todo o material rochoso está decomposto para solo, as texturas e estruturas estão em grandes partes preservadas (PRICE, 1993).

Residual evoluído: Todo o material rochoso está decomposto para solo, todas as texturas e estruturas foram destruídas (PRICE, 1993).

Residual endurecido: Constituído por fragmentos detríticos de rocha e minerais (hematita ou cimentados por uma matriz de limonita porosa proveniente do intemperismo sofrido por rochas altamente ferruginosas, como o itabirito e formação ferrífera). São localmente conhecidos por cangas e/ou coberturas lateríticas em função do teor de ferro, sílica, alumínio e fósforo (SOUZA, 1996).

Materiais Retrabalhados: compostos por materiais que sofreram algum tipo de processos de transporte e foram identificados na área (colúvio, tálus, rejeito de mineração e blocos rolados).

Colúvio: Constituído por fragmentos de rochas, de tamanhos variados e conjuntamente aos materiais inconsolidados apresenta uma relativa homogeneidade quanto à textura e encontra-se posicionado geralmente à meia encosta e base.

Tálus: São depósitos de solo e fragmentos de rocha de dimensões variadas (dm a m), formados a partir do acúmulo de material destacado e/ou escorregado das porções superiores das encostas. Além da heterogeneidade textural (blocos de rocha em matriz de solo), caracterizam-se por ocupar as porções mais suaves de declividade, geralmente, na parte basal das encostas.

Rejeito de mineração: Individualizadas em função da ocorrência de expressivas feições relacionadas com atividades de mineração já executadas (inativas) ao longo de muitos anos, com a extração de vários bens minerais (SOUZA, 1996).

3.3.2.7 MAPA DE FEIÇÕES DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

As feições de movimentos gravitacionais de massa foram primeiramente identificadas em fotografias aéreas (escala 1: 8000 do ano de 1978) verificadas e delimitadas em campo, e ainda foram cadastradas as novas feições. Além das feições foram identificados também os tipos de processo, estado de atividade, e tipos de materiais relacionados a cada feição. No primeiro mapa (FIGURA 56) tem-se a localização e código das feições. No seguinte (FIGURA 57) têm-se os tipos de processos conjuntamente com os tipos de materiais envolvidos.

Quanto ao estado de atividade foi considerada ativa, dormente e estabilizada como proposto por BONUCCELLI, (1999).

Ativa: as características da feição sugerem que ela se encontra em franco desenvolvimento pelo menos nos últimos 24 meses;

Dormente: embora estáveis nos últimos 24 meses, as características da feição sugerem que o movimento pode ser reativado por algum agente deflagrador.

Estabilizada: a feição se encontra estabilizada naturalmente ou através de medidas corretivas.

3.3.3 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa mais comuns, na área urbana de Ouro Preto, são os escorregamentos translacionais rasos (em rocha e em material inconsolidado), podendo ocorrer também os tombamentos (em rocha e saprolito), as quedas (rocha), rolamentos (rocha e/ou blocos de rochas) e os escoamentos.

No presente trabalho, foram adotadas as classificações de VARNES (1978) e HUTCHINSON (1988) para os movimentos gravitacionais de massa, por serem mais abrangentes e conhecidas mundialmente.

Os condicionantes propostos para os processos de movimentos gravitacionais de massa foram definidos a partir de duas abordagens, sendo uma de caráter geral e a outra voltada para os trabalhos realizados em regiões montanhosas.

Na primeira incluem-se os trabalhos clássicos de HUTCHINSON (1988), GOODMAN & KIEFFER (2000), CRUDEN & VARNES (1996), HOEK & BRAY (1977) e TURNER (1996) e na Segunda os de WONG & HO (1997) realizados em Hong Kong, SIMON et al (1990) em Puerto Rico, FRANKS (1999) em Hong Kong, SIDLE et al (1985) nos Estados Unidos, SOETERS & VAN WESTEN (1996), SANTOSO & SUKMONO (1993) em Irian Jaya - Indonesia e CRUDEN & HU (1996) no Canadá.

Os condicionantes propostos para os processos de quedas, tombamentos, escoamentos, escorregamentos translacionais em material inconsolidado e translacionais em rocha estão ilustrados nas FIGURAS 26, 27, 28, 29 e 30.

Para cada tipo de movimento gravitacional de massa foi considerada a definição, o tipo de material envolvido e as condições estabelecidas em cada processo.

3.3.3.1 Queda de Rocha

Foram considerados como movimento extremamente rápido de material sob queda livre, ao longo de uma superfície na qual tem-se um pequeno ou nenhum deslocamento cisalhante.

Preferencialmente, ocorrerá em discontinuidades que se interceptam, podendo ser tanto em foliação quanto em fraturas e/ou juntas, encontrados em taludes e/ou encostas com mergulho acima de 45°.

A discontinuidades deverá apresentar direção favorável a instabilidade.

A rocha deverá estar diretamente exposta e terá como deflagrador, chuva forte (FIGURA 26).

3.3.3.2 Tombamento em Rocha

Rotação de colunas de rochas ou blocos de rocha para frente e para fora do talude sobre um ponto ou eixo abaixo do centro de gravidade da massa deslocada.

Ocorrerá quando houver uma base inclinada, mergulhando na direção aproximadamente igual a face do talude, inclinado de um ângulo (B) menor que o ângulo de atrito e um sistema preferencial de discontinuidade orientado com direção de mergulho contrário ao talude.

O movimento será desencadeado pela perda de apoio do sistema de discontinuidade preferencial em taludes muito íngremes (mergulho maior que 50°). Os tombamentos são limitados por discontinuidades pré existentes e deflagrados pela gravidade e/ou algumas vezes pela água existente nas trincas e/ou fraturas do material.

O tombamento em rocha pode ser considerado como rápido ou lento. O tombamento rápido ocorrerá quando o ângulo entre a discontinuidade preferencial e a encosta for maior que 90° e lento quando este ângulo for menor ou igual a 90° (FIGURA 27).

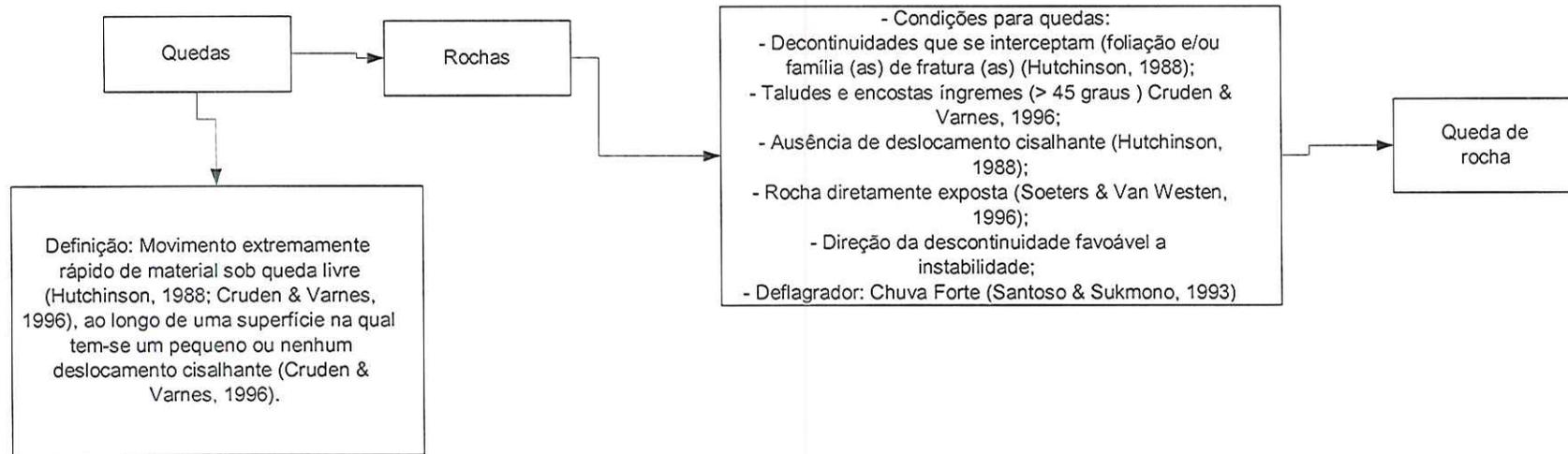


FIGURA 26. Condições propostas para o processo de queda de rocha.

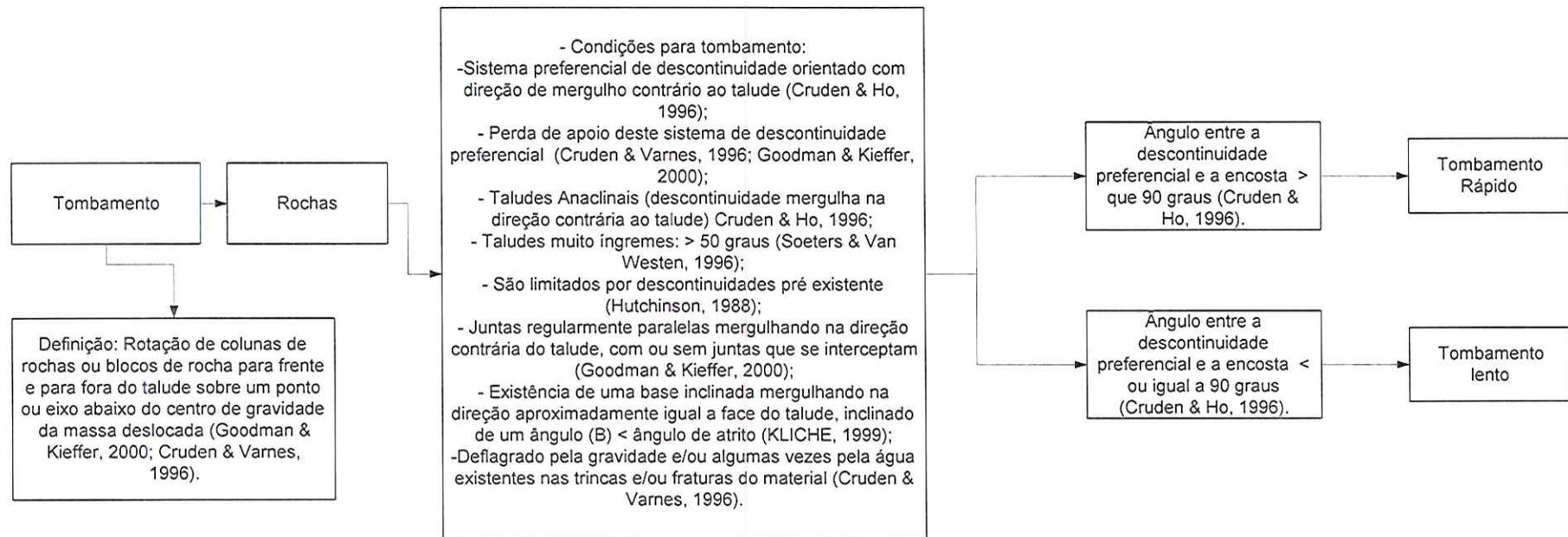


FIGURA 27. Condições propostas para o processo de tombamento em rochas.

3.3.3.3 *Escoamento*

Estes movimentos são restritos aos materiais inconsolidados pouco espessos, podendo-se apresentar com diferentes velocidades desde lentos a extremamente rápidos, assemelhando-se a um fluxo.

Ocorrem em zona de contraste de permeabilidade e pode ser facilmente reconhecido pelo deslocamento de material.

Não existe uma superfície de ruptura preferencial e é fortemente influenciado pela ausência de vegetação. A ruptura ocorrerá quando a intensidade da chuva for grande o suficiente para causar a percolação da água dentro do material inconsolidado em uma velocidade que exceda a velocidade em que a água pode percolar dentro do material subjacente (contato inferior).

Basicamente o escoamento e o escoamento rápido se diferenciam pela declividade da encosta. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, concluiu-se que o escoamento poderá ocorrer em um intervalo de 4 a 20° sendo maior que 25° no escoamento rápido (FIGURA 28).

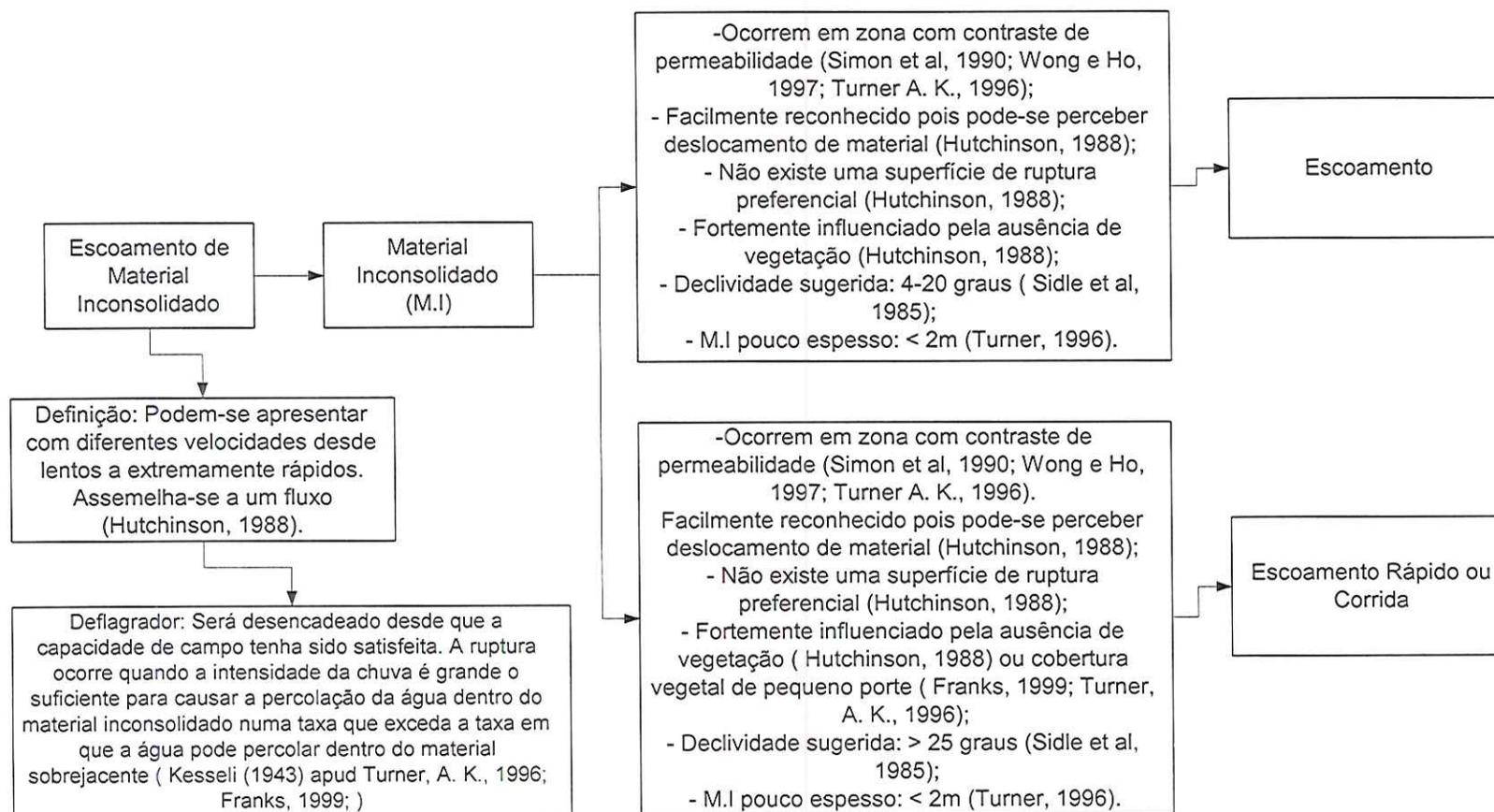


FIGURA 28. Condições propostas para o processo de escoamento.

3.3.3.4 Escorregamento Translacional

Ruptura cisalhante numa superfície uniformemente planar em que a relação D/L (espessura da camada e comprimento) é tipicamente 0,1 ou menos e ainda sem rotação da superfície de descontinuidade.

3.3.3.4.1 Escorregamento Translacional em Material Inconsolidado

Consiste de uma superfície de descontinuidade bem definida, persistente com direção aproximadamente paralela (mais ou menos 20°) com o contorno da superfície do terreno e mergulho com mesma direção que o talude do terreno.

Restrito a material inconsolidado com contraste de permeabilidade.

Podem se classificar em escorregamento translacional em placas (sheet), em lajes (Slab) e de detritos.

O escorregamento translacional em placas ocorrerá em materiais coesivos, pouco espessos, em que o mergulho do plano de ruptura seja maior que o ângulo de atrito e o ângulo de declividade entre 8 e 30°.

O escorregamento translacional em lajes (slab) ocorrerá em materiais não coesivos, poucos espessos, em taludes essencialmente secos, em que o mergulho do plano de ruptura seja maior que o ângulo de atrito e ângulos de declividade entre 30 e 45°.

O escorregamento de detritos ocorrerá em uma massa de material de baixa coesão, que tende a sofrer considerável distorção e partição durante o movimento, em taludes com declividades entre 25 e 45°. A velocidade aumenta com a declividade e diminui com a quantidade de argila. Apresenta a relação D/L menor que 0,05 e é fortemente influenciado pela destruição da vegetação.

Todos, sem exceção, serão desencadeados por chuva intensa e prolongada (FIGURA 29).

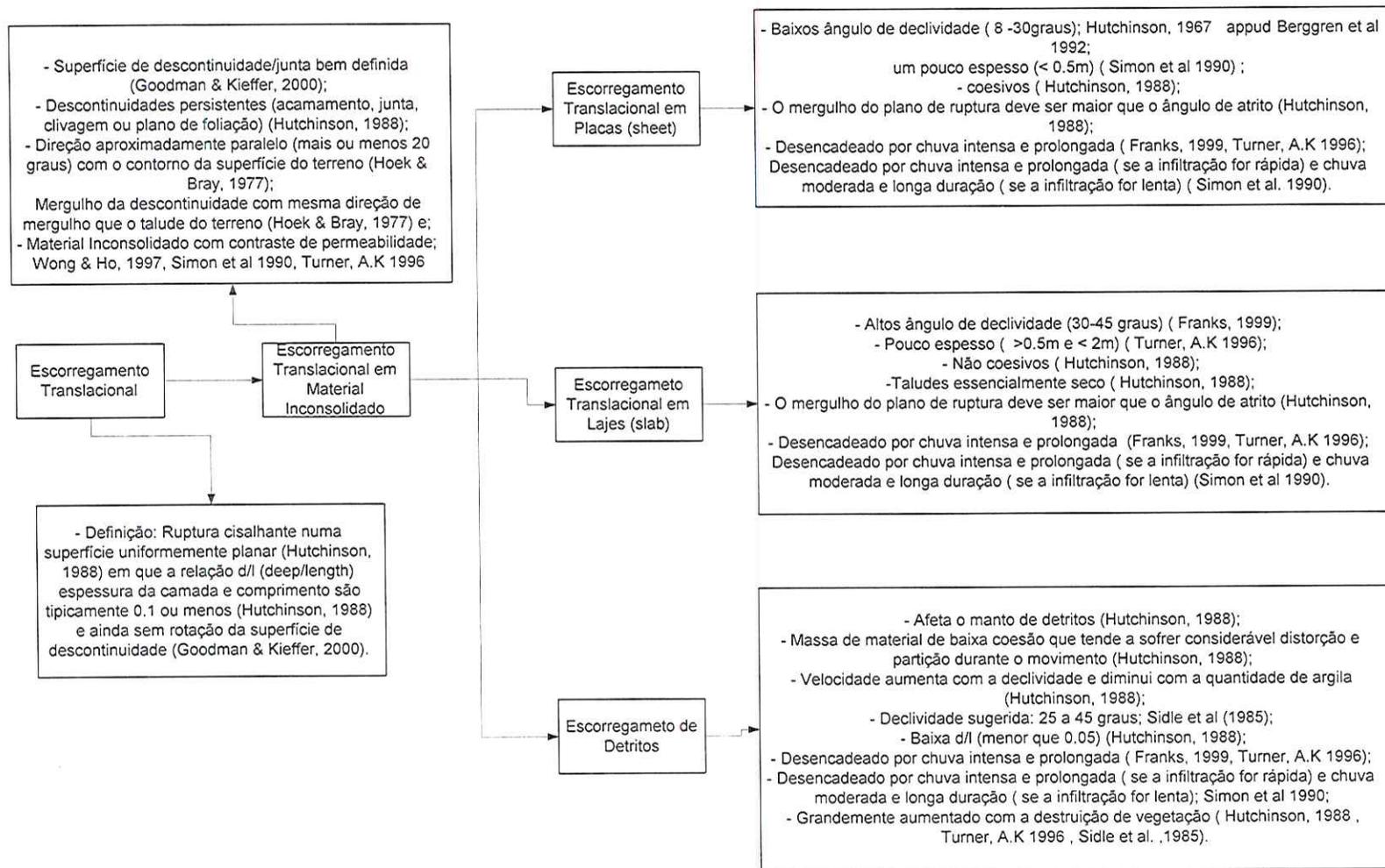


FIGURA 29. Condições propostas para o processo de escorregamento translacional em materiais inconsolidados.

3.3.3.4.2 Escorregamento Translacional em Rocha

Consiste de uma superfície de descontinuidade ou linha de interseção entre dois planos bem definida, persistente com direção aproximadamente paralela (mais ou menos 20°) com o contorno da superfície do terreno e mergulho com mesma direção que o talude do terreno. A inclinação da descontinuidade deve ser maior que o ângulo de atrito. Serão deflagrados por chuva forte e prolongada.

Podem se classificar em escorregamento translacional planar, em cunha e em degraus.

O escorregamento translacional planar ocorrerá quando o mergulho do plano de ruptura for menor que o mergulho da face do talude e maior que o ângulo de atrito com liberação das margens laterais dos blocos.

O escorregamento translacional em cunha é direcionado ao longo da linha de interseção de dois planos de descontinuidades, contendo no mínimo duas famílias de descontinuidades contínuas, não paralelas.

O escorregamento em degraus desenvolve-se em descontinuidades sem persistência e que formam uma superfície de escorregamento contínua, contendo duas ou mais famílias de descontinuidades não paralelas, aproximadamente perpendiculares entre si (FIGURA 30).

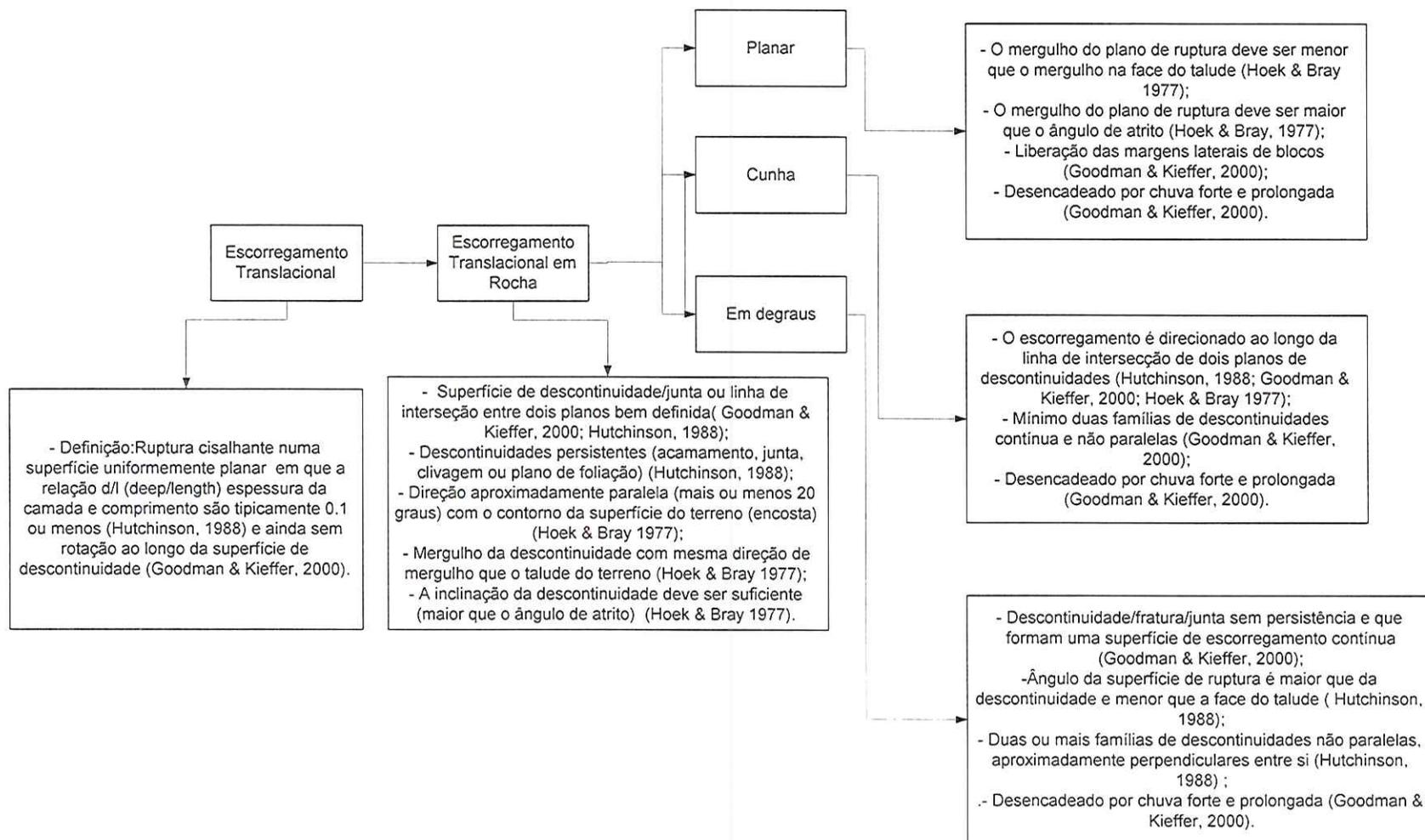


FIGURA 30. Condições propostas para escorregamento translacional em rocha.

3.3.4 RELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS E AS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA ESTABELECIDAS PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA.

Para cada condição proposta para os movimentos gravitacionais de massa foram associados atributos correspondentes, exceto para o deflagrador (chuva) que foi atribuído valores de probabilidades estabelecidos por BONUCCELLI (1999).

3.3.5 VERIFICAÇÃO DO PROCESSO POTENCIAL

A verificação foi realizada via comparação da listagem de todos os atributos presentes no cenário com a tabela de atributos necessários para cada processo provável.

A partir da consideração do processo potencial e das características dos atributos presentes em cada cenário, é executada a verificação na árvore de eventos para identificação das conseqüências (seqüência de atributos que conduzirá ao processo potencial de movimento gravitacional de massa (Hazard)).

A estruturação das árvores de eventos foi realizada a partir da definição e dos critérios descritos no item 2.5, e das condições que foram estabelecidas para ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa, considerando como evento inicial o atributo predisponente essencial (tipo de material que pode ser rocha ou material inconsolidado) e como conseqüência os outros atributos predisponentes relacionados ao tipo de material, o deflagrador e/ou modificador.

O processo potencial é representado por uma seqüência condicionada de atributos em que a sua probabilidade final é determinada pela interseção de todos os atributos envolvidos.

3.3.6 ESTRUTURA BÁSICA DA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA

O método utilizado para a estimativa da probabilidade foi baseado nas técnicas QRA e PRA utilizadas nos trabalhos de KEATON & ECKHOFF (1990), HENLEY & KUMAMOTO (1992), MELCHERS (1993), JACKSON & FELL (1993), WONG et al (1997), RIED (1993) e MAHLER & OLIVEIRA (2000). Vale ressaltar que para todos estes trabalhos a análise foi feita com intuito de se avaliar o risco

(QUANTITATIVE RISK ANALYSIS - QRA ou PROBABILISTIC RISK ANALYSIS - PRA), mas neste trabalho é estimado o Hazard.

Como já foi dito anteriormente (item 2.5), estas técnicas utilizam uma metodologia similar que pode ser sumarizada como:

Definição do Sistema (sistema a ser analisado): Neste trabalho, o sistema será a carta de cenários (item 3.3.2.3), sendo que cada cenário representa um sistema;

Identificação do "Hazard" provável: A identificação do Processo de Movimento Gravitacional de Massa foi realizada pela comparação de tabelas, como mencionado no item 3.4.3;

Desenvolvimento das Árvores de Eventos: Foram elaboradas quatro árvores de eventos como mostradas a seguir (item 4.6);

Identificação e Avaliação das Conseqüências: A identificação das conseqüências pode ser visualizada a partir da elaboração das árvores de eventos e a avaliação estimada por meio da probabilidade final;

Combinação das Conseqüências e Cálculo da Probabilidade: Como já foi dito no item 3.4.4 a probabilidade final será determinada pela interseção de todos os atributos envolvidos. Mas a probabilidade de cada atributo está condicionada ao atributo anterior e para o cálculo da probabilidade é necessário que se analise o grau de dependência entre os atributos.

4. APLICAÇÃO

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área em estudo situa-se na porção urbana da Serra de Ouro Preto, na cidade de Ouro Preto, entre as UTM 7745400 e 7746000 N, 656800 e 657000 E, ao longo da BR 356 perfazendo aproximadamente 120.000 m², englobando parte dos bairros: Lajes e Morro São Sebastião.(FIGURA 31).

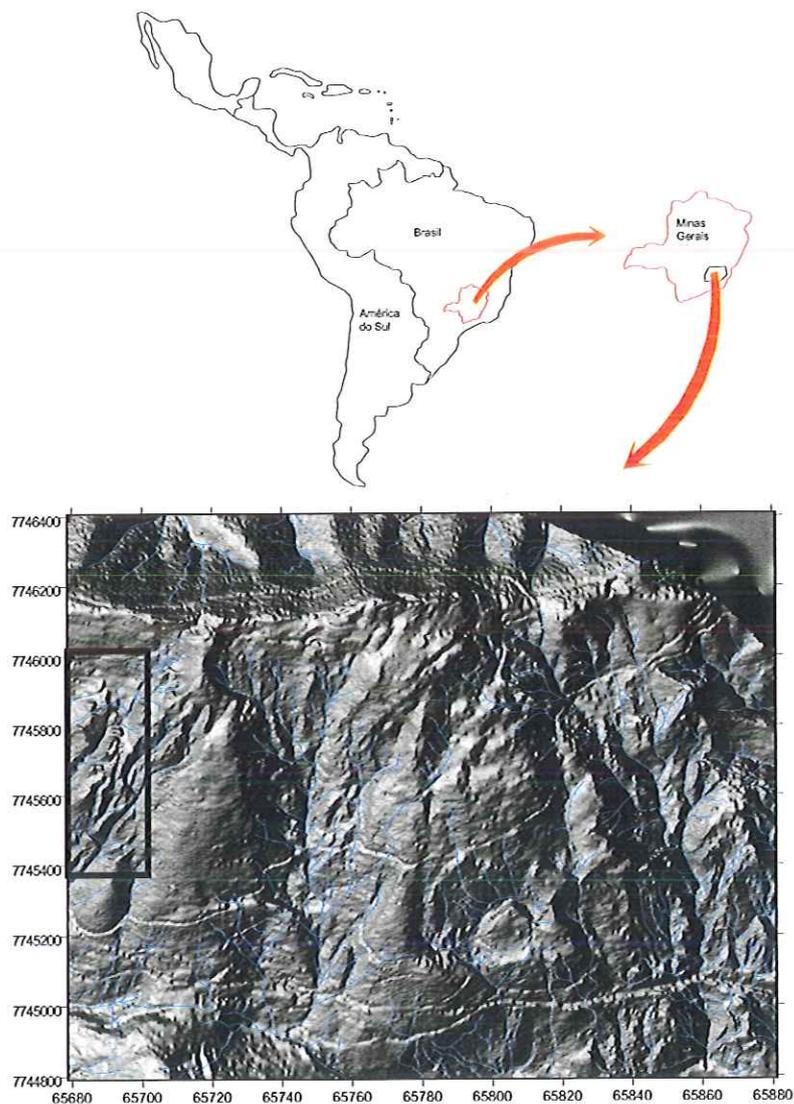


FIGURA 31. Mapa de localização da área em estudo.

4.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DA ÁREA

4.2.1 Considerações Gerais

A área está inserida regionalmente na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero (FIGURA 32) que se localiza a porção central sul do Estado de Minas Gerais, ocupando uma área de aproximadamente 7500 Km².

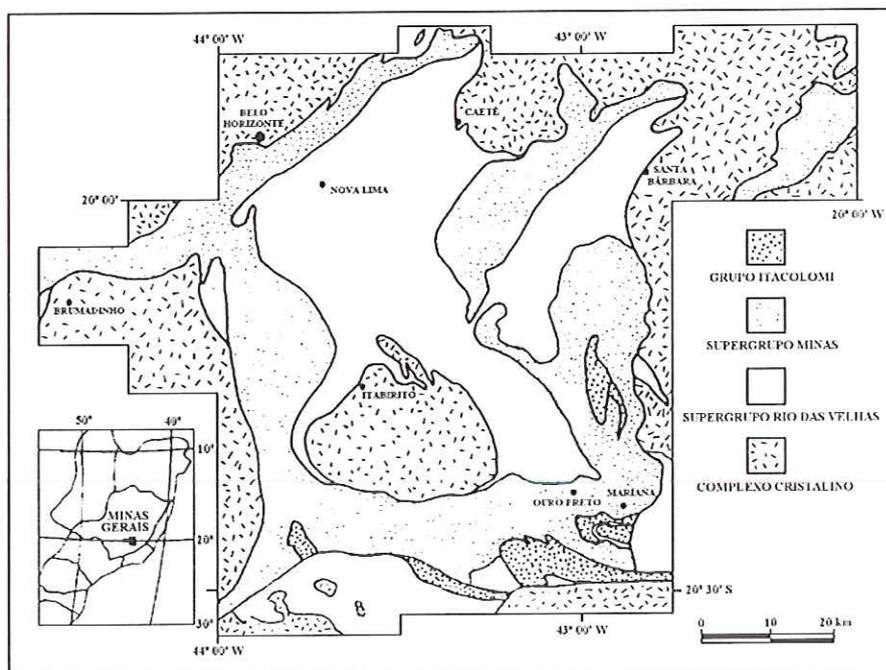


FIGURA 32 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero (modificado de DORR, 1969).

4.2.2 Aspectos Geológicos

São encontrados na área rochas metassedimentares, do Supergrupo Minas e Supergrupo Rio das Velhas, com idades, seqüências (topo/base), litologias e espessura ilustrada na TABELA 18.

TABELA 18 – Coluna estratigráfica simplificada proposta para a área.

IDADE	SUPER GRUPO	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	ESP. MÁX. (m)
PROTEROZOÍCO PALEO	MINAS	ITABIRA	CAUÊ	Itabirito, itabirito dolomítico, hematita	350
		CARAÇA	BATATAL	Filitos e filitos grafitosos	250
			MOEDA	Quartzito sericítico, conglomerados e filitos.	>1000
ARQUEANO	RIO DAS VELHAS	NOVA LIMA	INDIVISO	Filito clorítico, filito grafitoso, metagrauvacas, formações ferríferas, quartzitos, metacherts, dolomitos, rochas máficas e ultramáficas, sericita-quartzo-xisto.	> 4000

FONTE: modificada de ENDO (1997).

4.2.2.1 Supergrupo Minas

DERBY (1906) o definiu como “Série Minas”, o qual encontra-se sobreposto ao Supergrupo Rio das Velhas por uma discordância angular e erosiva. Mas DORR (1969) posteriormente o dividiu em quatro grupos (Grupo Tamanduá, Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba). Sendo esta seqüência da base para o topo. Na área em estudo, o Supergrupo Minas é representado apenas pelo Grupo Caraça (Formações Moeda e Batatal) e Grupo Itabira (Formação Cauê).

4.2.2.1.1 Grupo Caraça

O Grupo Caraça compreende rochas metassedimentares de origem detrítica e divide-se em duas formações: A Formação Moeda e a Batatal.

A Formação Moeda, segundo WALLACE (1958), constitui a base deste grupo e é composta por quartzitos sercíticos, lentes de conglomerados e filitos arenosos.

Afloramentos são encontrados no flanco e nas partes mais altas da Serra de Ouro Preto, a espessura pode ser muito variada desde pacotes individuais da ordem de 50m até seções estranguladas provavelmente por tectonismo.

A exposição desta rocha ocorre de forma bem variada podendo ocorrer na área das lajes um deslocamento característico devido às intercalações milimétricas de sericita ao longo da foliação (FIGURA 33) e os diaclasamentos preenchidos por veios de quartzo facilitando assim o deslocamento. Em alguns locais apresenta-se em graus variados de alteração, desde praticamente sã e muito resistente (FIGURA 33) até muito alterada e friável (FIGURA 34). A topografia presente, devido ao intenso processo de alteração, facilita o processo de erosão que atua ao longo das fraturas (bastante compartimentada e as vezes aberta) ou, sobre as partes de menor resistência, por exemplo, a foliação que mergulham entre 20 e 40° para SW e SE.

São freqüentes as escarpas e penhascos (FIGURA 35) nesta formação o que propicia os depósitos de tálus.



FIGURA 33. – Quartzitos da Formação Moeda

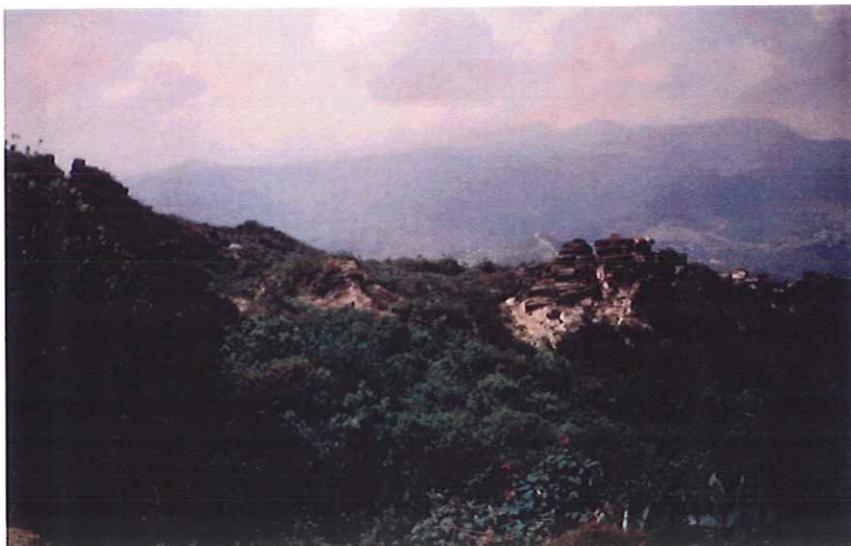


FIGURA 34 – Quartzito da Formação Moeda em exposições muito alteradas e frágeis.

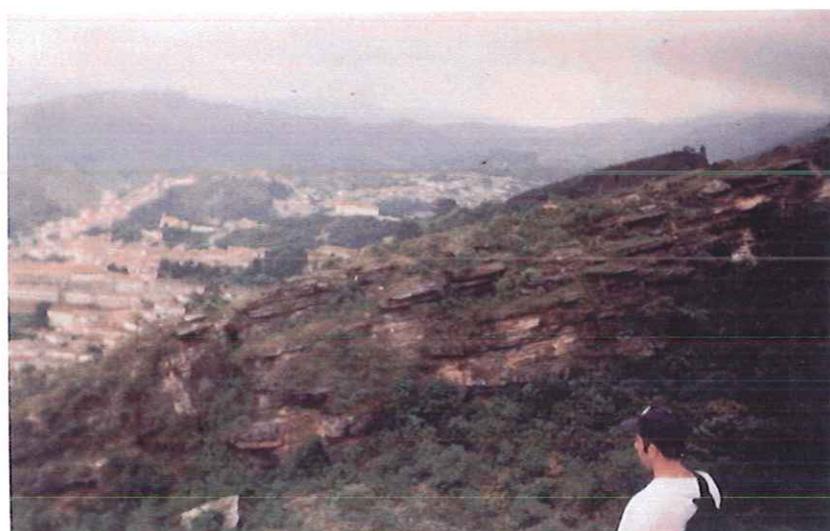


FIGURA 35 – Escarpas no Quartzito da Formação Moeda.

A Formação Batatal segundo SIMMONS & MAXWEL (1961) constitui-se de filitos sericíticos e filitos grafitosos com intercalações de Chert no topo e lentes delgadas de hematita.

Esta Formação apesar de ocorrerem em pequenas extensões e serem pouco espessos, encontra-se sempre presente, estando muitas vezes mascarado por depósitos de vertente. Desempenha, contudo, um papel fundamental no condicionamento geotécnico das encostas, tanto por sua baixa resistência mecânica e pela sua erodibilidade, quanto por sua baixa permeabilidade. Esta

unidade é muito importante mesmo sendo de pequeno volume, pois devido a sua baixa resistência, pode comprometer a estabilidade dos terrenos sobrepostos e do ponto de vista hidrogeológico por ser praticamente impermeável. As características apresentadas pelo filito condicionam a forma de evolução das encostas e, pode-se verificar também intensos ravinamentos.

4.2.2.1.2 Grupo Itabira

Este grupo foi definido por HARDER & CHAMBERLYN (1915), DORR et al. (1957), como sendo a seqüência química do Supergrupo Minas e encontra-se sobreposta ao Grupo Caraça por um contato gradacional (variação lateral e vertical de fácies) e abrupto. Esta seqüência segundo BARBOSA (1968), é resultante de uma peneplanização da área fonte em condições de estabilidade tectônica. O Grupo Itabira foi dividido por DORR (1969) em duas formações da base para o topo, são elas: Formação Cauê e a Formação Gandarela, sendo encontrada na área somente a primeira.

A Formação Cauê constitui-se por formações ferríferas bandadas (Banded Iron Formation - BIF) do tipo lago superior, dolomitos, itabiritos anfibolíticos, hematitas e horizontes manganésíferos. Essas formações ferríferas bandadas constitui uma estrutura marcante que á a alternância de camadas de pequenas espessuras de quartzo e óxido de ferro denominado itabiritos.

Quando o itabirito apresenta-se muito friável e com baixa resistência, quando exposto ao intemperismo prolongado, tem-se intenso processo de erosão, descalçando e provocando solapamento da canga; formando assim grotas profundas, com encostas mantidas verticalmente devido ao capeamento de canga. Com a formação de uma crosta de material resistente (cobertura laterítica) sobreposta às formações ferríferas afetou-se profundamente os processos erosivos subseqüentes, modificando a expressão fisiográfica do maciço rochoso.

Os afloramentos apresentam-se geralmente modelados com forma convexa característico ao longo de toda a serra. A espessura pode variar de bancos de pequena espessura até bancos muito espessos podendo atingir até centenas de metros.

O contato inferior raramente é visível, ocorrendo sob depósitos de vertentes e o contato superior se dá com a Formação Gandarela, entretanto os dolomitos desta formação não foram encontrados na área em estudo.

4.2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas é representado por rochas metassedimentares e metavulcânicas com grande expressão areal no Quadrilátero Ferrífero.

DORR *et al* (1957), após observarem que o contato entre as rochas era feito por forte discordância, redefiniram formalmente a antiga Série Minas de DERBY (1906) a qual atribuíram a denominação “Série Rio das Velhas” que foi dividida em dois grupos, um Grupo Inferior (Nova Lima) e um Grupo Superior (Maquiné). Na área, ela é representada pelo Grupo Nova Lima.

4.2.2.2.1 Grupo Nova Lima

O Grupo Nova Lima é composto por xistos que se apresentam extremamente alterados e na grande maioria das vezes são encontrados em porções de encostas de altas declividades sobrepostos por quartzitos. Na maioria dos afloramentos as exposições são de má qualidade e extremamente alterada caracterizando um relevo arrasado.

Segundo NALINI JR (1993), o contato superior desta unidade, com a formação Moeda é fortemente tectonizado.

4.2.3 Aspectos Geomorfológicos

A área de estudo está situada na Serra de Ouro Preto, com elevações variando entre 1210 a 1402m, escarpas subverticais de itabirito sendo a maioria das encostas com declividades entre 24 a 36 graus. Tálus, colúvios são comuns na base das encostas além de alguns rejeitos oriundos da intensa exploração mineral da área.

O relevo da região é essencialmente diferencial sendo caracterizado pelo contraste entre as formas erosivas produzidas pelas rochas do embasamento e as várias seqüências lito-estratigráficas. As seqüências lito-estratigráficas são caracterizadas pelas diferenças de resistência formando estruturas em forma de “hogbacks”.

Dentre as principais características geomorfológicas encontradas na área pode-se citar a expressão geomorfológica da formação ferrífera que é em forma de "hogback" (homoclinal) quando encontrada em formações menos resistentes tem-se também *hogbacks* de duas cristas, que é originado quando a formação ferrífera é sobreposta por um quartzito resistente ou separada por estreitas camadas de filito formando assim, uma crista mais alta de quartzito e outra mais baixa, do lado do mergulho do talude, que é constituída pela formação ferrífera. Nos trechos em que a formação ferrífera é erodida a segunda crista reduz-se a uma série de contrafortes triangulares (*flat irons*) encostados na parte inferior do quartzito (BARBOSA, 1968) (FIGURA 36).

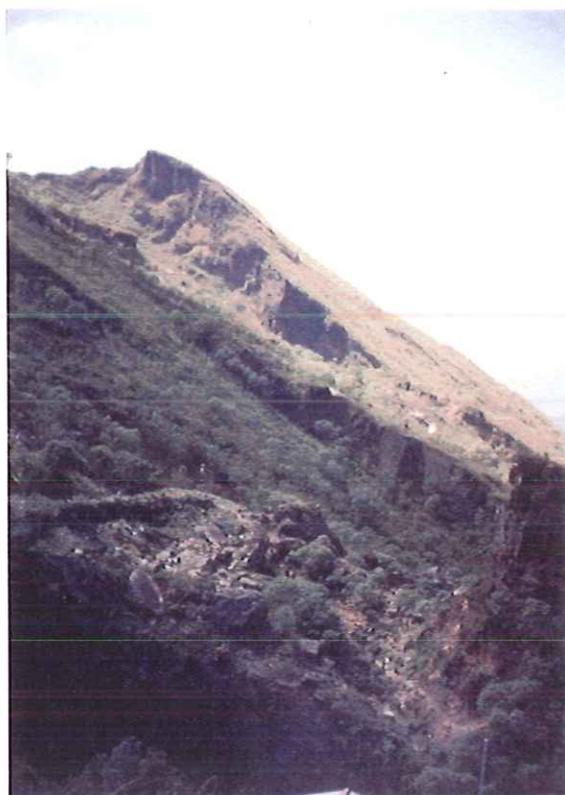


FIGURA 36 – Itabirito da Formação Cauê exibindo feições do tipo "Flatirons".

Os vales são entalhados em filitos, xistos e quartzitos impuros, entretanto são vales jovens, em forma de V, em sua maioria, embora ocorram vales de fundos largos, onde as formações dolomíticas são espessas e os mergulhos mais fracos.

4.2.4 Vegetação

A vegetação predominante é de pequeno porte sendo que em algumas encostas e fundos de vales ocorrem resquícios de matas originais de grande porte. Nas encostas de canga (cobertura laterítica) a vegetação é do tipo cerrado.

4.2.5 Aspectos climáticos

O clima da cidade de Ouro Preto é definido como tropical de altitude (inverno seco e verão brando) segundo KOPPEN (1948). A temperatura média anual é de 18,5°C, sendo o mês de Janeiro o mais quente (média de 21,2°C) e o mês de Julho mais frio (média 15,5°C) conforme dados do IGA (1995).

4.2.6 Hidrografia

A área em estudo encontra-se próxima ao divisor de águas da Bacia do São Francisco e da Bacia do Rio Doce. Sendo que as drenagens que cortam a área estudada são afluentes da Bacia do Rio Doce, uma das mais importantes do Estado de Minas Gerais.

A topografia proporciona uma ampla organização N/S para a rede hidrográfica, sendo esta atualmente muito jovem.

Nos trechos de maiores desnivelamentos temos a presença de cursos fluviais no sopé dos escarpamentos, que formam vales devido aos falhamentos, e acima destes ocorrem vales suspensos devido aos fortes escarpamentos.

De acordo com BONUCCELLI, 1999 a densidade dos canais de drenagem pode ser classificada como alta.

4.3 PLUVIOSIDADE DA ÁREA

As elevações da Serra do Espinhaço afetam as oscilações térmicas e pluviométricas do Quadrilátero Ferrífero atuando como um obstáculo à penetração da massa de ar, gerando núcleos isolados de elevados índices pluviométricos como é o caso da região de Ouro Preto.

Pode-se observar (TABELA 19 e FIGURAS 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 e 48) que o período de chuvas concentra-se basicamente entre os meses de outubro a março e atingem uma média anual de 1590mm.

BONUCCELLI (1999) fez uma verificação da relação entre a quantidade e a distribuição temporal das chuvas e o número de ocorrências de movimentos gravitacionais de massa na cidade de Ouro Preto. Esta relação foi possível a partir dos dados de precipitação pluviométrica medida na estação de Saramenha (Alcan) e do banco de dados das ocorrências atendidas pelo Corpo de Bombeiros de Ouro Preto, no período de Janeiro de 1988 a Abril de 1998. De posse destes dados concluiu-se que, para a maior parte dos casos, acumuladas de chuvas acima de 280mm em 3 a 8 dias, associada a chuvas diárias acima de 70mm, resultam em grande quantidade de ocorrências. Em particular, o período com maior número de ocorrências, coincide com o período de maior quantidade de chuva: chuva diária 114,2mm e acumulada em 3 dias de 314mm. Pode-se afirmar que eventos chuvosos dessa magnitude são catastróficos para a cidade de Ouro Preto (BONUCCELLI, 1999).

Para calcular a probabilidade de ocorrência de valores de chuva máxima diária, Bonuccelli (1999) utilizou a distribuição de Gumbel, considerada a mais adequada, para esse tipo de análise.

A função cumulativa de probabilidade é dada por:

$$P(Y \leq y) = e^{-e^{-\alpha(y-\mu)}} \quad (20)$$

Em que: α é o parâmetro de escala e μ o parâmetro de locação.

Para a estimativa dos parâmetros α e μ devem ser usados os dois primeiros momentos da distribuição de Gumbel.

$$E(Y) = \mu + 0.577/\alpha \quad (21)$$

$$VAR(Y) = 1.645/\alpha^2 \quad (22)$$

Substituindo $E(Y)$ e $VAR(Y)$ por suas estimativas amostrais X_{med} (média) e S^2 (variância), é possível obter os parâmetros "a" e "u" estimativas de α e μ .

$$a = 1.2826/S \quad (23)$$

$$u = X_{med} - 0.451 \times S \quad (24)$$

TABELA 19. Precipitação mensal e anual medidas na estação pluviométrica de Saramenha (ALCAN) no período de Janeiro de 1988 a Janeiro de 2000.

Mês/ano	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Janeiro	290,6	176,6	88,8	594,5	687,5	144,8	367	174,6	148	572,9	322,4	152,9	490,5
Fevereiro	278,5	286,45	141,9	256,1	292	225,8	59,4	188,5	275,3	138,1	299,3	120,2	
Março	99,5	206,1	109,3	290,1	62,3	143,4	206,1	226,9	167,4	208,1	112,9	338	
Abril	205,4	16,2	75,2	65,1	93,5	165,1	60,8	64,7	51,6	96,5	70	23	
Mai	53	1,1	61,9	37	91,1	40,4	35,6	24,3	49,4	20,8	68,7	1,5	
Junho	0,8	40,9	12,2	7,5	1,5	14,7	3,9	5,5	0,0	32,5	0,7	3,9	
Julho	0,0	49,5	32,5	2,1	18,7	0,0	1,0	8,2	0,0	2,2	3,2	0,1	
Agosto	0,0	28,1	52,4	2,0	21,8	11,7	0,0	0,0	5,6	3,1	41,4	0,0	
Setembro	33,4	93,7	44,9	93,4	132,1	73,9	1,2	15,7	96,5	90,6	18,8	37,8	
Outubro	80,2	152,7	69,8	115	156,9	203,1	120,1	178,3	153,2	194,3	164,3	87,6	
Novembro	127,7	212,8	159,4	158,1	347,7	173,1	130	200,3	407,3	189	233,5	298,6	
Dezembro	177,7	555,1	159,3	277,5	411,3	289,1	329,5	528	400,5	165,6	157,2	252,8	
Total (mm)	1346,8	1819,25	1007,6	1898,4	2316,4	1485,1	1314,6	1615	1754,8	1713,70	1492,40	1314,40	

FONTE: ALCAN (2001).

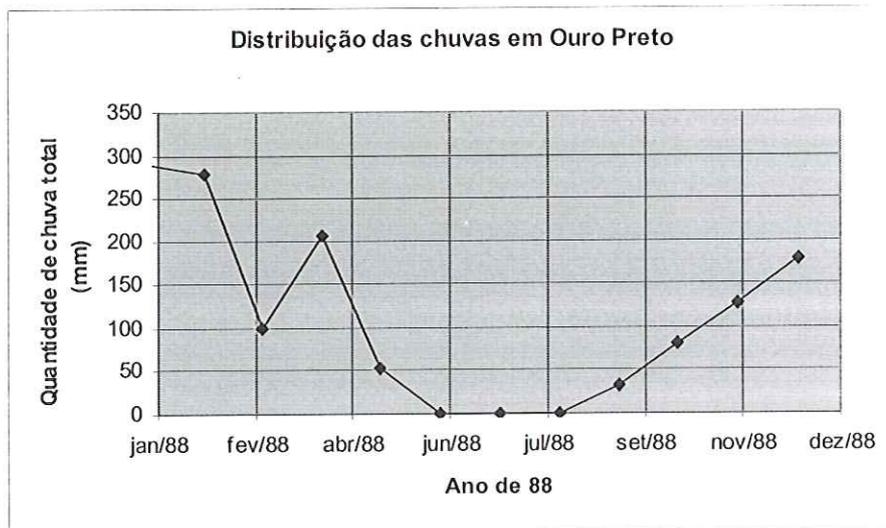


FIGURA 37. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1988.

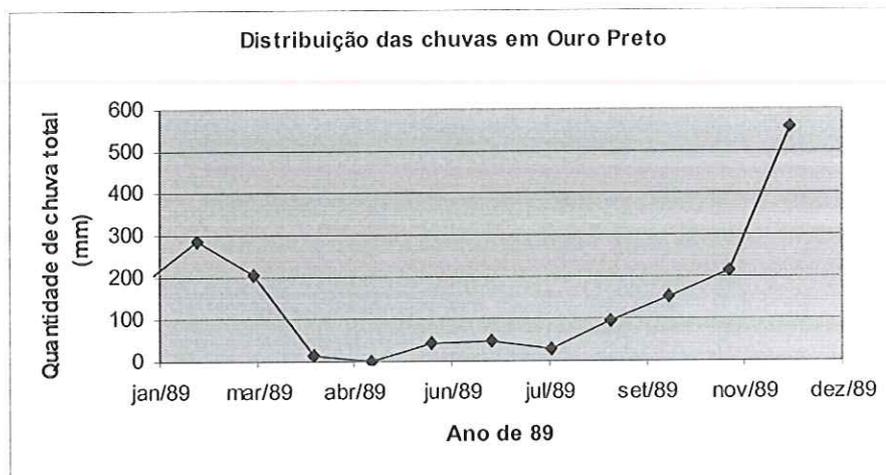


FIGURA 38. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1989.



FIGURA 39. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1990.



FIGURA 40. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1991.

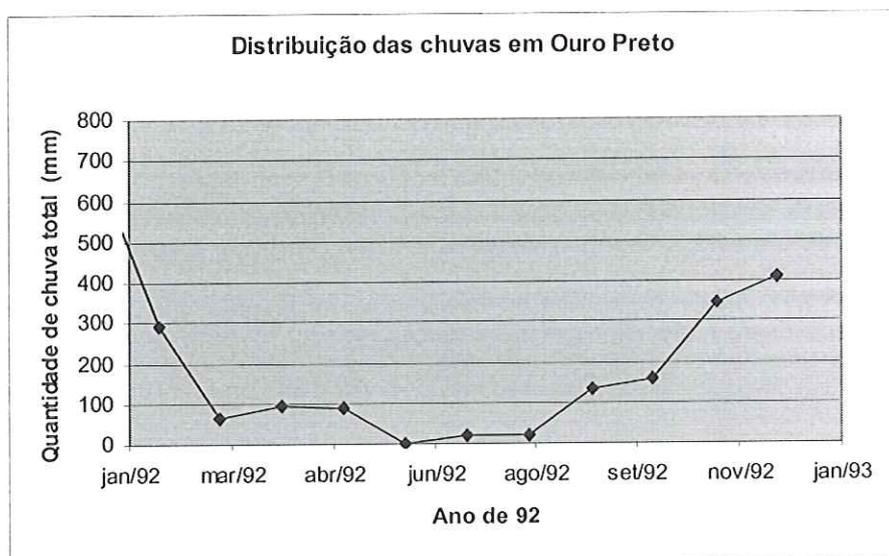


FIGURA 41. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1992.

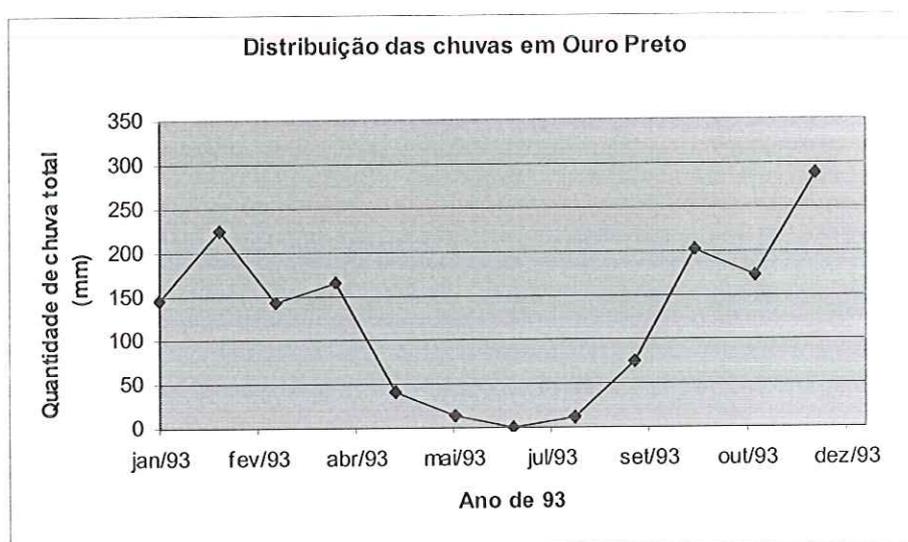


FIGURA 42. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1993.



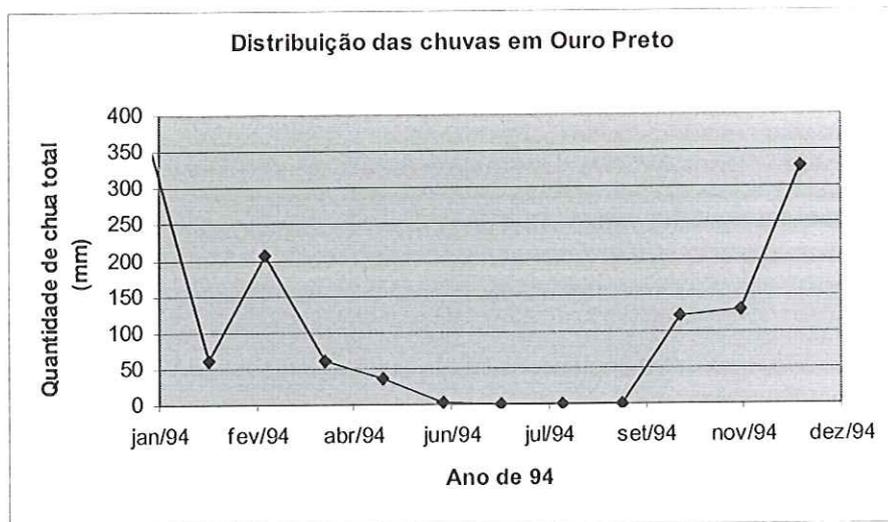


FIGURA 43. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1994.

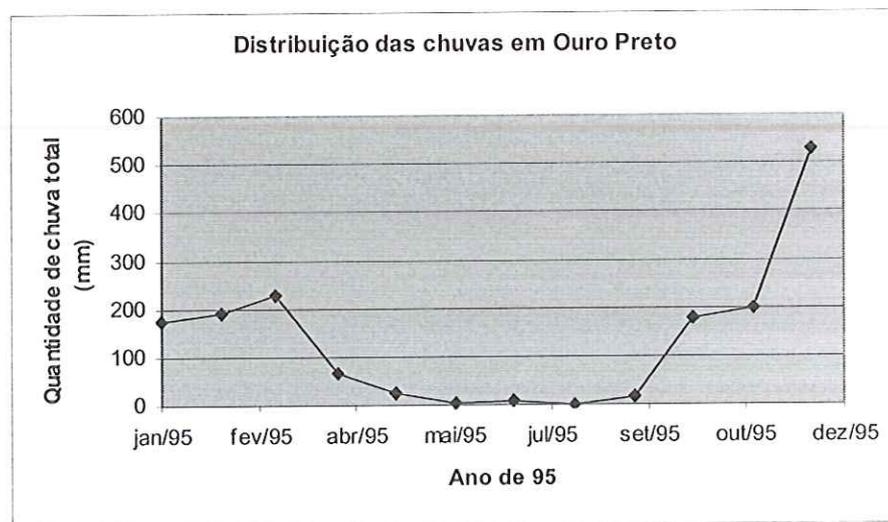


FIGURA 44. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1995.

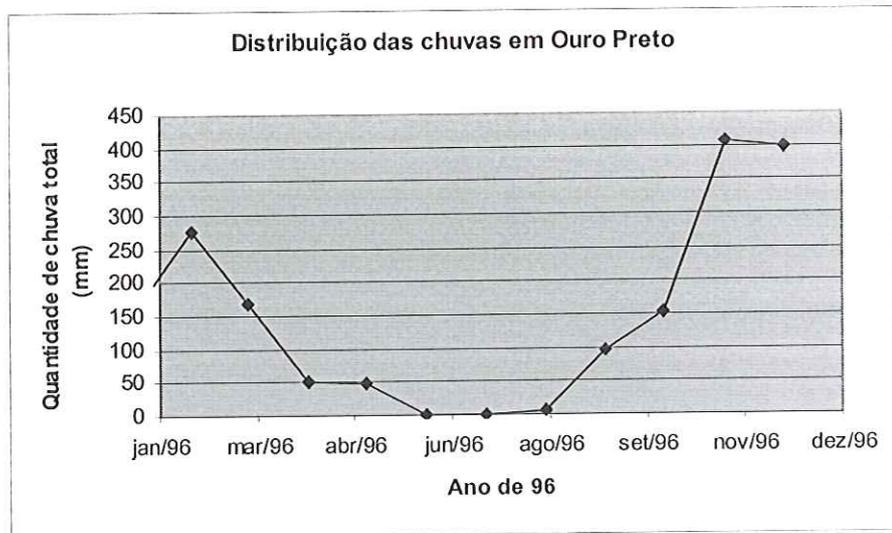


FIGURA 45. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1996.

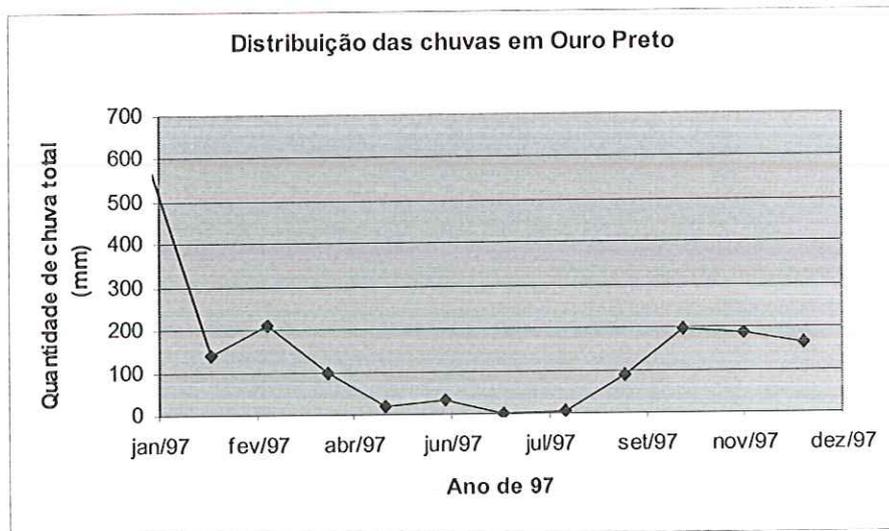


FIGURA 46. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1997.

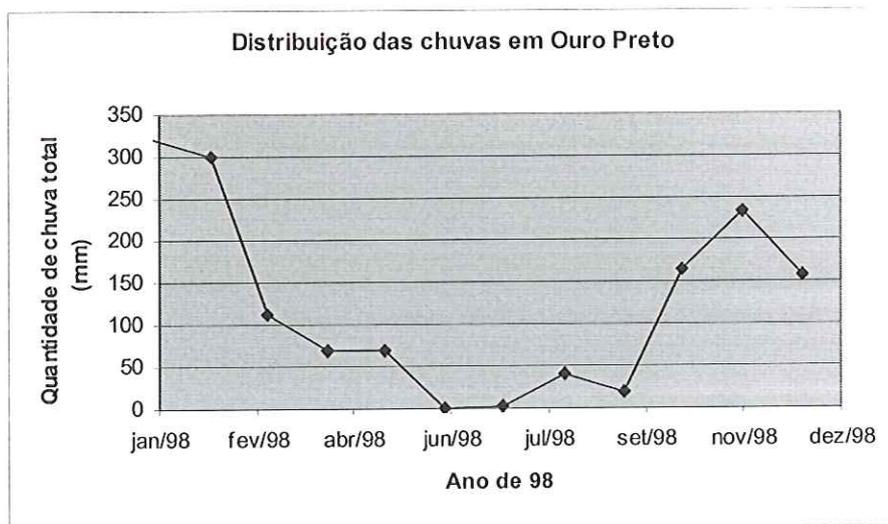


FIGURA 47. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1998.



FIGURA 48. Dados pluviométricos, medidos na estação de Saramenha, para a cidade de Ouro Preto para o ano de 1999.

A TABELA 20 apresenta os dados de chuva máxima anual para precipitação diária, e chuva anual para acumulada e chuva de diferentes dias, médias e desvio padrão das máximas, para o período de 1988 a 1997. BONUCCELLI (1999) apresenta também os dados de chuvas diárias, acumuladas de chuvas de 2 a 30 dias. Esses dados são necessários para avaliar a possibilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, para as seguintes situações:

- ❖ Grande quantidade de ocorrência, relacionadas à chuva diária maior que 70mm e acumulada de 8 dias acima de 280mm;
- ❖ Maior número de ocorrências registradas em Ouro Preto, situação catastrófica: chuva diária acima de 100mm e acumulada de 3 dias acima de 300mm.

Utilizando a distribuição de Gumbel e as estimativas amostrais de média e desvio padrão, calculou-se a probabilidade de ocorrência e respectivo período de retorno para as 2 situações anteriores selecionadas.

TABELA 20. Dados de chuva máxima anual para precipitação diária e chuva anual para acumulada e chuva de diferentes dias, médias e desvio padrão das máximas, para o período de 1988 a 1997.

Ano	Precipitação máxima acumulada (mm)									
	1 dia	2 dias	3	4	8	10	15	20	25	30
1988	97,8	99	116	144	198	233	302	317	384	532
1989	103,6	157	206	252	411	495	525	550	562	628
1990	52,3	62	68	68	81	96	227	513	589	601
1991	115,2	131	152	203	325	344	410	528	598	604
1992	106,4	163	182	202	334	367	468	582	705	766
1993	60,8	77	60	116	156	156	194	268	371	441
1994	65,7	102	109	118	167	207	255	344	392	424
1995	97,9	127	149	165	224	248	369	408	472	513
1996	72,5	122	140	184	289	306	342	416	444	524
1997	114,2	224	314	341	412	417	547	649	642	793
Média	88,64	126,4	149,6	179,3	259,7	286,9	363,9	457,5	525,9	582,6
Desvio padrão	23,45	46,88	73,65	77,56	112,1	122,3	123,0	125,3	133,7	123,3

FONTE: BONUCCELLI (1999)

Assim, é possível afirmar, a cada ano em Ouro Preto, devido às chuvas, existe uma probabilidade de ocorrer grande quantidade de movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos de 59,6%, isto é um período de retorno previsto de 1,68 anos. Para eventos catastróficos, como os que ocorreram em Janeiro de 1997, essa probabilidade anual é de 17,5%, e o tempo de retorno previsto é de 5,7 anos (BONUCCELLI, 1999).

4.4 DOCUMENTOS ELABORADOS

4.4.1 *Mapa Topográfico*

O Mapa Topográfico apresentado na FIGURA 49 registra informações sobre altitude, localização das estradas e vias de acessos. Como pode ser visualizada a área compreende altitudes entre 1210 e 1402m, eqüidistantes de 2m.

4.4.2 *Modelo Digital do Terreno*

Permite uma melhor visualização das variações relativas ao relevo, sendo este caracterizado como dissecado, vales em V, escarpas subverticais e alta densidade da rede de canais de drenagem (FIGURA 50).

4.4.3 *Carta de Declividade*

Foram encontradas na área seis classes de declividade, a saber: Classe 3 (6-11°), Classe 4 (11-17°), Classe 5 (17-24°), Classe 6 (24-37°), Classe 7 (37-45°) e Classe 8 (>45°) (FIGURA 51). Pode-se observar que a maior parte da área tem declividade acima de 17° (80%) e apenas 3% da área apresenta declividades entre 6 e 11°.

4.4.4 *Mapa dos Canais de Drenagem*

No Mapa dos Canais de Drenagem (FIGURA 52) percebe-se que os canais de drenagem têm uma estruturação aproximadamente N-S e alta densidade (5-10Km/Km²).

4.4.5 *Carta de Cenários*

Na FIGURA 53, observa-se o alto grau de detalhamento, pois a área de 120.000 m² foi subdividida em 27 sub áreas. Cada cenário possui uma homogeneidade quanto à direção da encosta, a direção do fluxo, a inclinação da

vertente, o divisor de água, a forma topográfica e a amplitude de relevo. Para cada cenário delimitado foi feita a caracterização de todos os atributos presentes, como ilustrado no ANEXO 1. De posse destes dados pode-se observar o grande número de informações obtidas para cada cenário, que permitiu uma caracterização mais minuciosa da área e conseqüentemente redução na taxa de incerteza existente. A partir desta caracterização foi possível prever o processo com potencial de ocorrência para cada cenário caracterizado.

Encontra-se no ANEXO 2 um arquivo fotográfico para a visualização dos cenários 04, 07, 09, 10, 11, 13, 19 e 22.

4.4.6 Mapa do Substrato Rochoso

O Mapa do Substrato Rochoso é apresentado na FIGURA 54. São encontrados na área quartzitos sericíticos (70%), xistos sericíticos (20%), filitos (3%) e itabiritos (7%). Informações quanto a resistência e grau de alteração das rochas foram consideradas de acordo com a ISRM (1983), para cada cenário, e podem ser encontradas no ANEXO 1.

4.4.7 Mapa do Material Inconsolidado

No Mapa do Material Inconsolidado (FIGURA 55) podem ser visualizados colúvios (69,5%), residual evoluído de xisto (15%), saprolito xisto (5%), saprolito de filito (2,75%), saprolito e residual evoluído de quartzito (0,5%), residual evoluído de filito (0,25%) e canga e material laterítico (7%). As informações relacionadas ao material inconsolidado foram observadas separadamente para cada cenário e os resultados podem ser observados no ANEXO 1.

4.4.8 Mapa das Feições de Movimento Gravitacional de Massa

Foram cadastradas 15 feições de Movimentos Gravitacionais de Massa, ocupando aproximadamente 20% da área (FIGURA 56) e pode-se dizer que os principais processos encontrados na área são:

- ❖ Escorregamento translacional: Feição 01, 02, 03, 07, 10, 14 e 15;
- ❖ Rolamentos: Feição 02, 03, 06, 07, 08 e 09;

- ❖ Quedas: Feição 04, 08, 09 e 12;
- ❖ Escoamento: Feição 02 e 05;
- ❖ Complexo: Feição 11 e 13.

Na FIGURA 57 encontram-se todas as feições e o tipo de material envolvido em cada uma e vale ressaltar que todas as feições encontram-se ativas.

4.4.9 Caracterização do Sistema Classificatório relacionado aos atributos que influenciam na ocorrência dos Movimentos Gravitacionais de Massa.

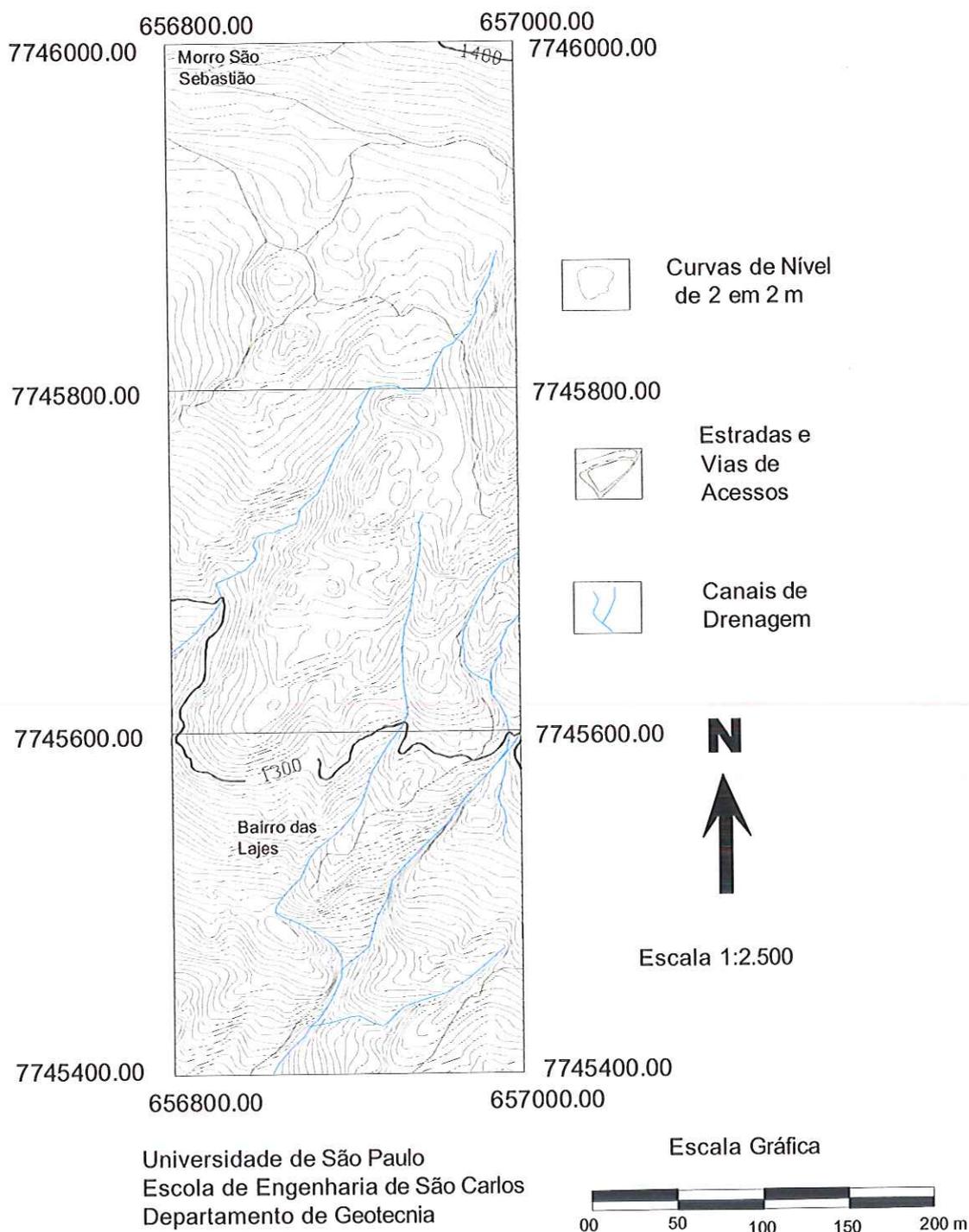
O sistema classificatório adotado foi proposto por ZUQUETTE (1998), como mostrado na TABELA 16 (item 3.2). Neste item são apresentadas as características de cada classe considerada em cada atributo (TABELA 21 continuação da TABELA 16). Estas representam a variabilidade das classes encontradas na área em estudo e em alguns casos são limites pré-estabelecidos de condições dos processos de movimento gravitacional de massa de interesse. Por exemplo, para o atributo 27 assume-se o valor $\leq 0,1$ porque neste caso é uma condição pré-estabelecida para ocorrência de escorregamento translacional planar.

TABELA 21: Caracterização do sistema classificatório adotado.

CÓDIGO DO ATRIBUTO	CLASSES DOS ATRIBUTOS ANALISADOS
01	1 A Tálus; 1B Colúvio; 1C Blocos Rolados; 1D topo, 1E Meia Encosta; 1F Base; 1G < 50cm; 1H 0,5-1m, 1I 1-2m; 1J 2-3m; 1L 3-5; 1M > 5m
02	2 A Tálus; 2B Colúvio; 2C Blocos Rolados; 2D Topo; 2E Meia Encosta; 2F Base; 2G < 1m ³ ; 2H 1-3m ³ ; 2I 3-5m ³ ; 2J >5m ³
03	3 A Sulcos; 3B Ravinas; 3C Voçoroca; 3D Retilíneo; 3E Convergente; 3F Divergente; 3G Paralelo; 3H Dentrítico; 3I Retangular; 3J Pinado; 3L Trelça; 3M Topo e base; 3N Base
04	4 A Natural; 4B Reflorestamento; 4C Não tem; 4D Topo, 4E Meia Encosta; 4F Base; 4G Esparssa; 4H Concentrada
05	5 A Pequeno Porte, 5B Médio porte; 5C Grande Porte; 5D Não tem
06	6 A Quartzito; 6B Filito; 6C Itabirito; 6D Xisto; 6E Topo; 6F Base; 6G Pequena parte
07	7 A Fresca ou Sã (A1); 7B Levemente Alterada (A2), 7C Moderadamente Alterada (A3); 7D Intensamente Alterada (A4); 7E Completamente Alterada (A5); 7F Solo Residual (A6)
08	8 A Quartzito c/ Sericita; 8B Quartzito/filito; 8C Itabirito/Xisto; 8D 01; 8E 02; 8F 03; 8G > 03; 8H Muito pequena (<0,10m); 8I Pequena (0,10-0,20m); 8J grande (0,20-0,30m); 8L > 0,3m
09	9 A Extremamente Fraca (R0); 9B Rocha Muito Fraca(R1); 9C Fraca(R2); 9D Medianamente Resistente(R3); 9E Resistente(R4); 9F Muito Resistente (R5); 9G Extremamente Resistente (R6)
10	10 A Quartzito /sericita; 10B Quartzito/filito; 10C Quartzito/xisto; 10D Itabirito/Cobertura Laterítica; 10E Quartzito/itabirito; 10F Diferentes graus de alteração; 10G 01; 10H 02; 10I 03; 10J >03; 10L (1-2m); 10 M (2-3m); 10N 3-5m; 10 O > 5m.
11	11 A Paralelo; 11B < 10°; 11C 10-20; 11D; > 20; 11E NE; 11F SE; 11G SW; 11H NW.
12	12 A Ondulado e em degraus; 12B Ondulado e irregular; 12C Em degraus; 12D Ondulado; 12E Planar, 12F Planar a ondulado.
13	13 A Regular e planar; 13B Progressivo; 13C Brusco.
14	14 A Gradacional; 14B Brusco; 14C Edentado, 14D Planar.
15	15 A Foliação/xistosidade; 15B 01 Família de Fratura; 15C 02 Famílias de. Fraturas; 15D 03 Famílias de Fraturas; 15E 04 Famílias de. Fraturas ou mais
16	16 A Baixa; 16B Média; 16C Alta; 16D Fratura; 16E Foliação.
17	17 A Muito larga (1-10 cm); 17B Extremamente larga (10-100 cm);
18	18 A Sem preenchimento; 18B Quartzito; 18C < 10; 18D 10-20; 18E 20-30.
19	19 A Alívio de Tensões; 19B Atividades antrópicas; 19C Topo; 19D Meia encosta; 19E Base; 19F Circular; 19G retilíneo; 19H Intervenção homem.
20	20 A Muito pequena; 20B Pequena; 20C Média; 20D Grande; 20E Muito grande (ISRM, 1983); 20F não persistentes.
21	21 A Paralelas; 21B se interceptam; 21C aproximadamente perpendicular entre si; 21D plano de intersecção; 21E não paralelas e não conectadas.
22	22 A Homogeneizou (contínuo); 22B Evidenciou (descontínuo)
23	23 A < 10°; 23B 10-20°; 23C >90°; 23D ≤90°.
24	24 A <10°; 24B 10-20°; 24C >90°; 24D ≤90 °.
25	25 A mergulho da descontinuidade menor que encosta; 25B ângulo da superfície de ruptura é maior que o ângulo da descontinuidade e menor que a face do talude 25C <90°; 25D =90°; 25E >90°.
26	26 A -Strike (da intersecção dos dois planos descontinuidades) aproximadamente paralelo (± 20°) com a encosta 26B- Dip com o talude.
27	27 A - ≤ 0,1.
28	28 A Zonas de falhas; 28B Intensamente Fraturadas; 28C <0,10m; 28D 0,1-0,2m; 28E > 0,2m; 28F cisalhamento.
29	29 A Veio de quartzo; 29B Níveis Sericíticos; 29 C Contato.
30	30 A NE/SW; 30B NW/SE; 30C < 10°; 30D 10-20°; 30E 20-30°; 30F 30-40°; 30G 40-50°; 30H > 50°.
31	31 A Sericita; 31B Intercalação de camadas litológicas fráveis e resistentes; 31C Foliação; 31D 01; 31E 02; 31F 03; 31G>03.
32	32 A Pequena; 32B Média, 32C Alta; 32D Parte do cenário; 32E Todo cenário.

TABELA 21: (continuação) Caracterização do sistema classificatório adotado.

CÓDIGO DO ATRIBUTO	CLASSES DOS ATRIBUTOS ANALISADOS
33	33 A < 0,1m; 33B 0,1-0,5m; 33C 0,5-1m; 33D Permanente; 33E Provisória.
34	34 A Próximo à superfície; 34B < 5m; 34C 5-10m; 34D > 10m.
35	35 A Provisória; 35B Permanente.
36	36 A Topo; 36B Base; 36C 1190m-1200m; 36D 1240-1250m; 36E < 5m; 36F 5-10m; 36G >10m.
37	37 A Sim; 37B não.
38	38 A Quartzito/filito; 38B Quartzito/xisto; 38C Resid.Xisto/Saprolito; 38D Quartzito/sericita; 38E <1m; 38F 1-3m; 38G 3-5m; 38H Filito/Retrabalhado; 38I Xisto/retrabalhado
39	39 A Presença de seixos; 39B Lateritas; 39C Regular; 39D Irregular.
40	40 A 0,1; 40B 0,05.
41	41 A filito/Quartzito; 41B itabirito/filito/Quartzito; 41C itabirito/Quartzito; 41D Quartzito/xisto
42	42 A <1m; 42B 1-2m; 42C 2-3m; 42D 3-5m; 42E 5-10m; 42F >10m.
43	43 A <1m; 43B 1-2m; 43C 2-3m; 43D 3-5m; 43E 5-10m; 43F >10m.
44	44 A Colúvio; 44B Tálus; 44C Blocos; 44D Rejeito de mineração; 44E < 0,5m, 44F > 0,5m e < 2m, 44G > 2m.
45	45 A Topo; 45B Meia encosta; 45C Base.
46	46 A Topo; 46B Meia encosta; 46C Base.
47	47 A Enterrados até o topo; 47B Até o meio; 47C Até a base; 47D Soltos.
48	48 A Pequena; 48B Média; 48C Grande; 48D <5m; 48E 5-10m; 48F >10m; 48G ausente; 48H sap. 48I Res evoluído.
49	49 A Pequena; 49B Médias; 49C Grandes; 49D Baixa; 49E Média; 49F Alta.
50	50 Topo; 50B Meia encosta; 50C base.
51	51 A Topo 51B Meia encosta; 51C Base.
52	52 A Rejeito de mineração; 52B Lixo; 52C Bota-fora; 52D < 5m ³ ; 52E 5-10m ³ ; 52F >10m ³ ; 52G Úmido; 52H Seco
53	53 A Casas; 53B Blocos; 53C Parte da encosta; 53D Canal de drenagem.
54	54 A Convexa/retilínea; 54B Côncava/convexa; 54C Pequena; 54D Média; 54E Alta.
55	55 A NE/SW-SE; 55B NW/SE-SW; 55C NE/SW-NW; 55D NW/SE-NE; 55E 17-24°; 55F 24-37°; 55G 37- 45°; 55H >45; 55I 6-11°; 55J 11-17°; 55L 3-6°.



Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

FIGURA 49. Mapa topográfico da área.

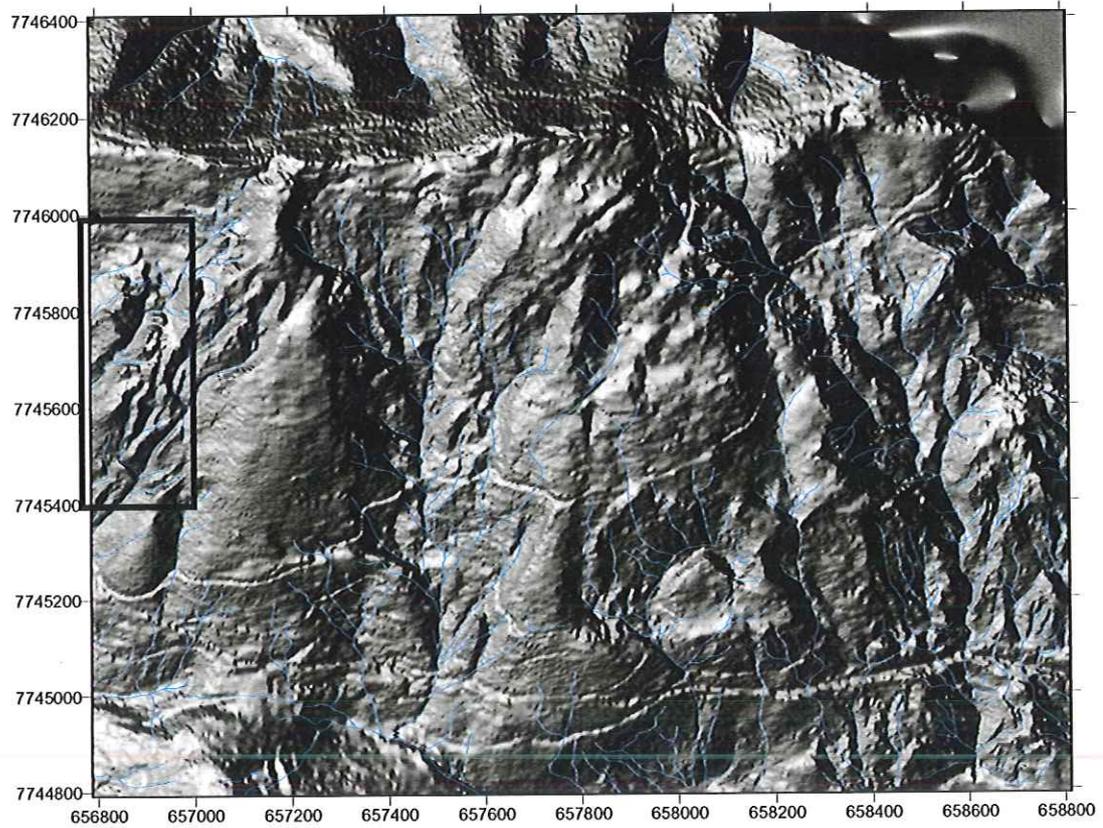
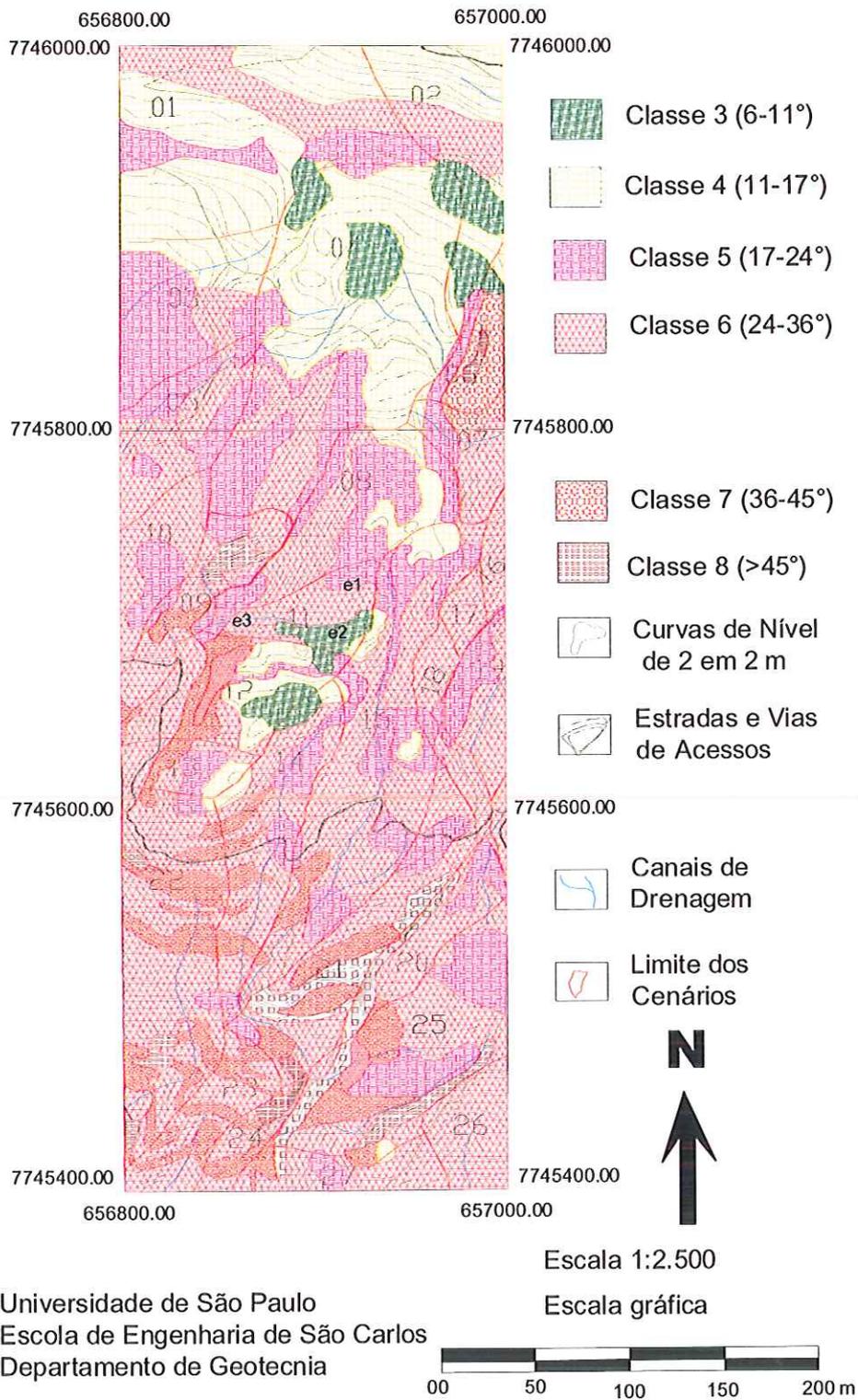


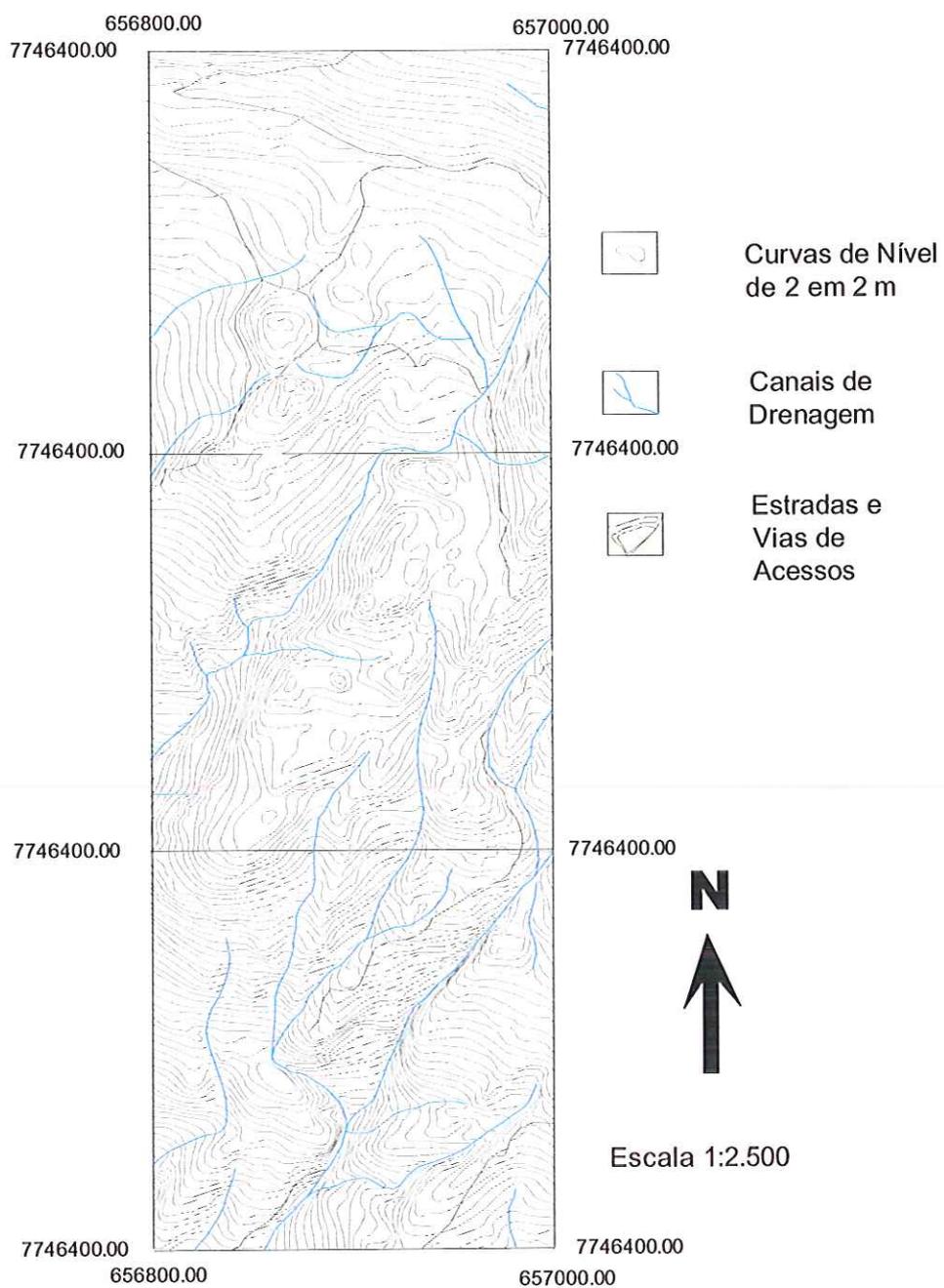
FIGURA 50. Modelo Digital do Terreno.



Universidade de São Paulo
 Escola de Engenharia de São Carlos
 Departamento de Geotecnia

Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

FIGURA 51. Carta de declividade.

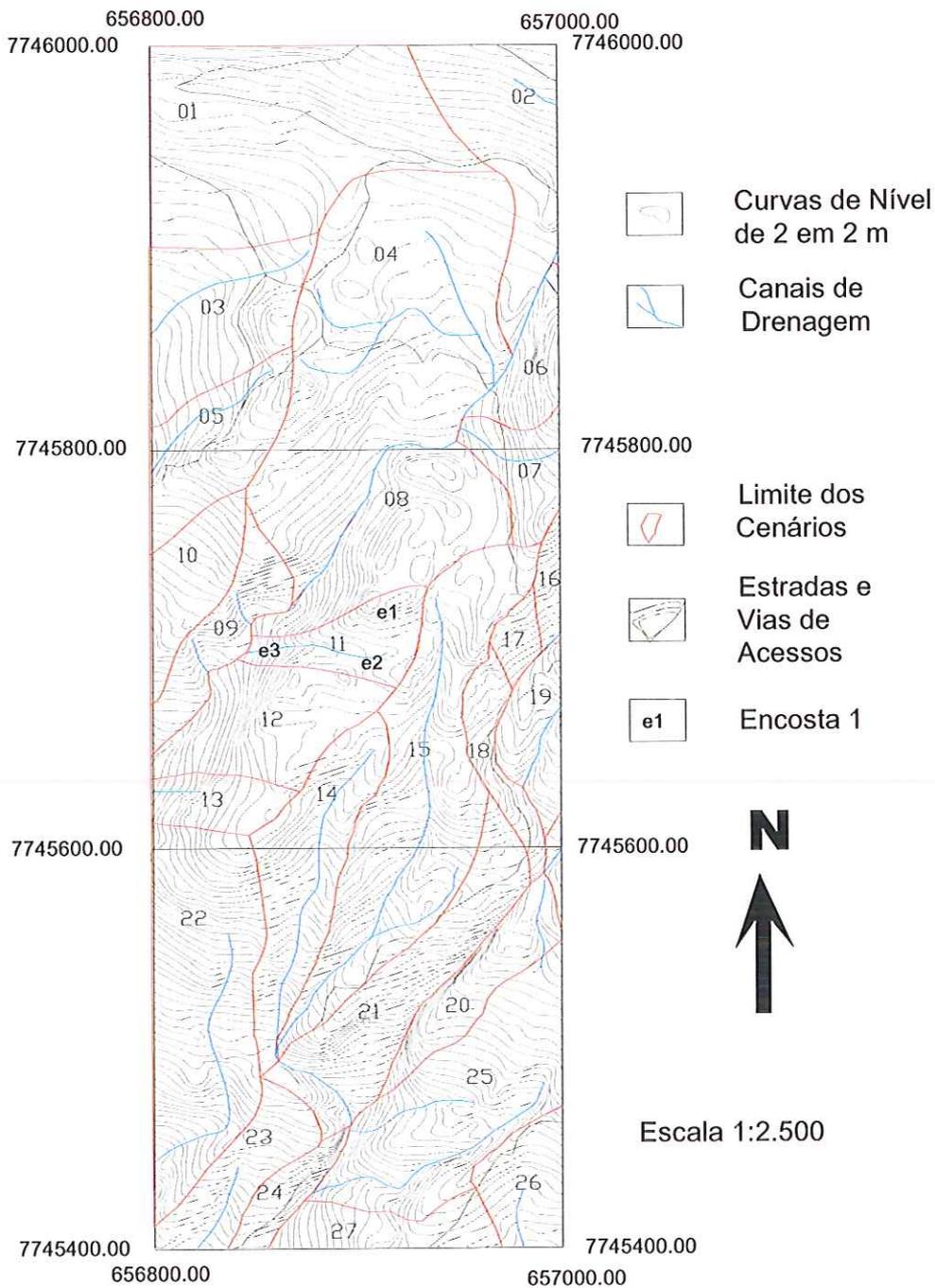


Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia



Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

FIGURA 52. Mapa de Canais de Drenagem.



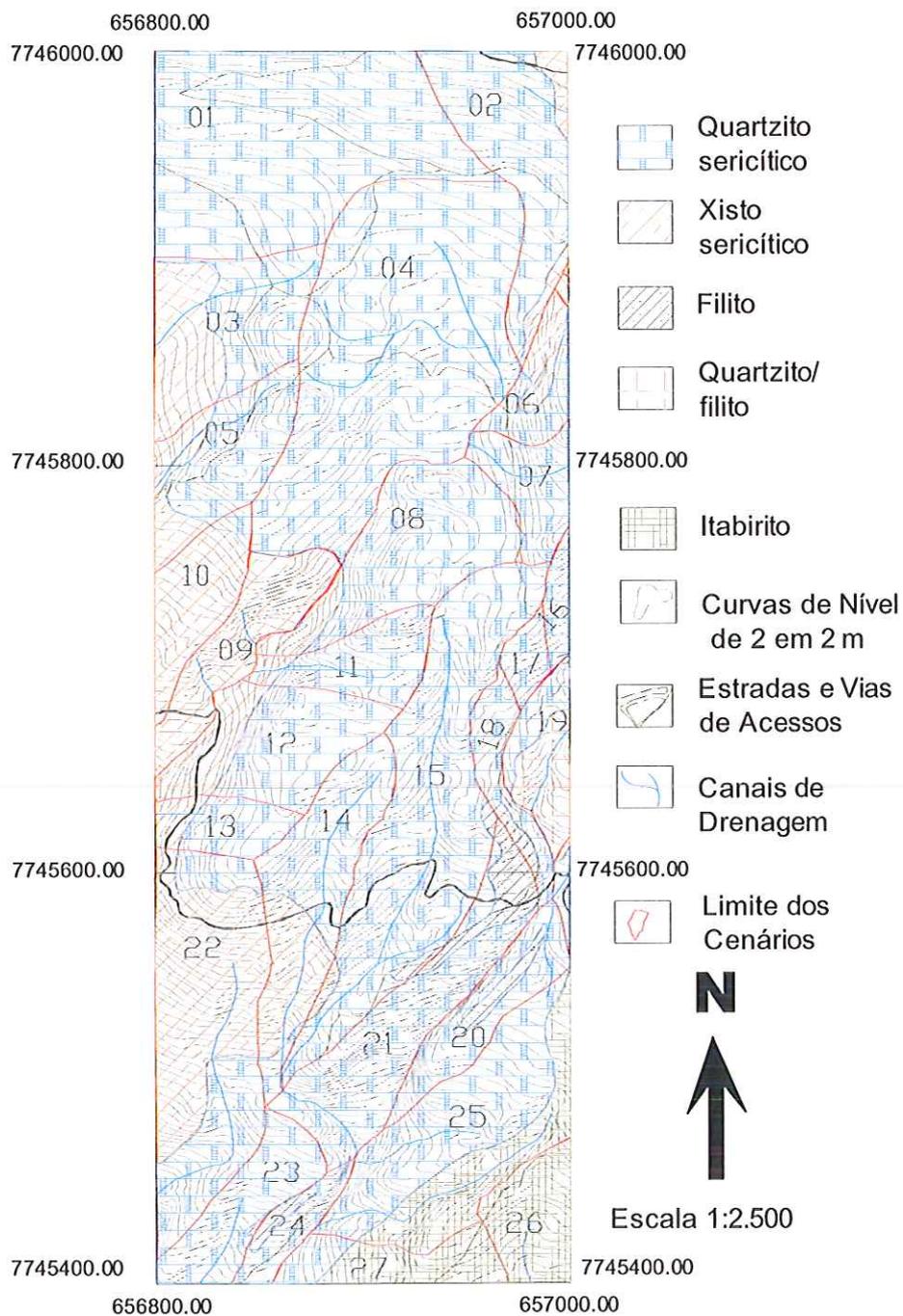
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Escala gráfica



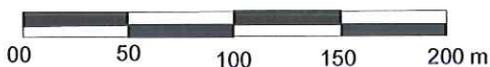
Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

FIGURA 53 Carta de Cenários.



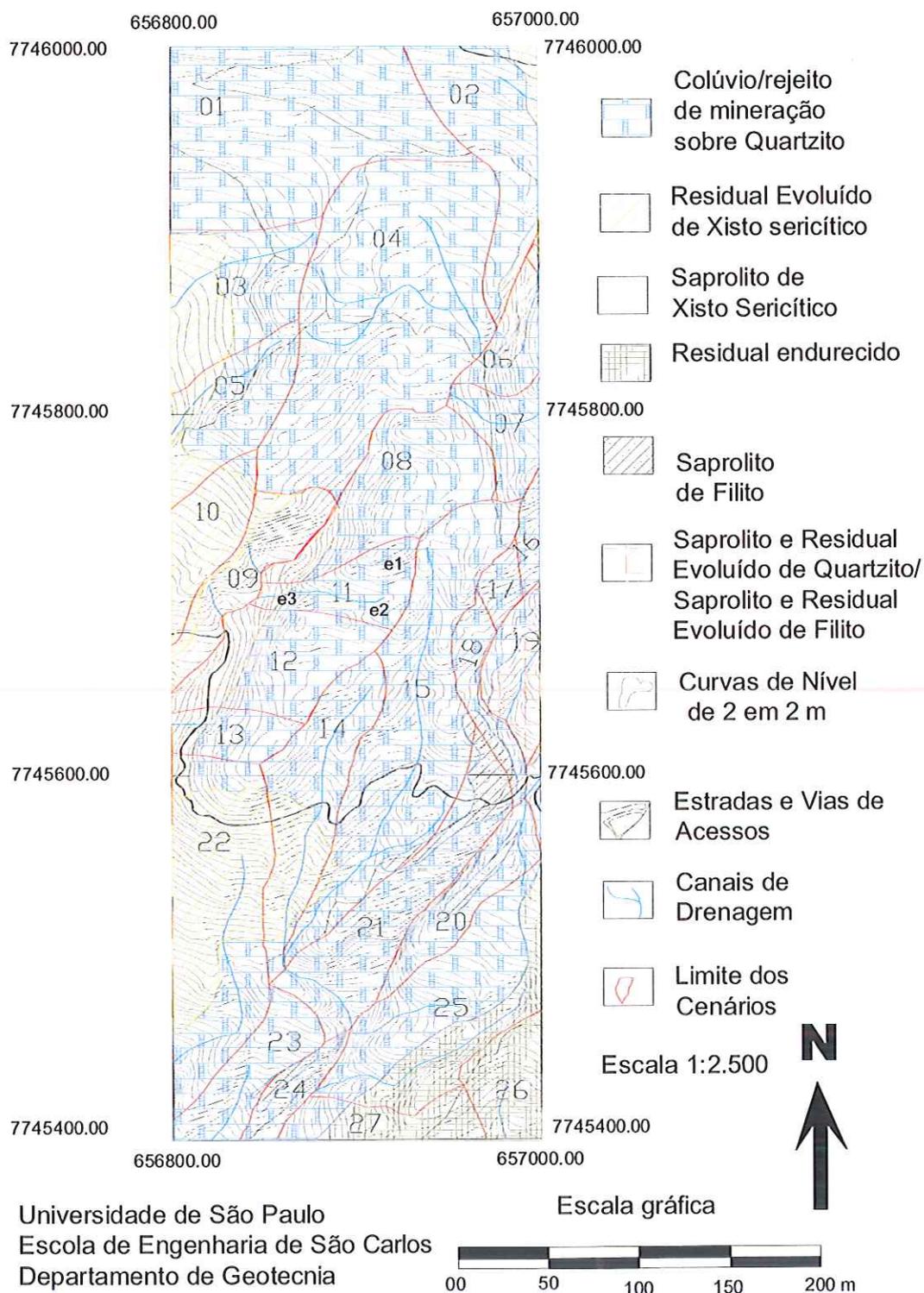
Universidade de São Paulo
 Escola de Engenharia de São Carlos
 Departamento de Geotecnia

Escala gráfica



Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

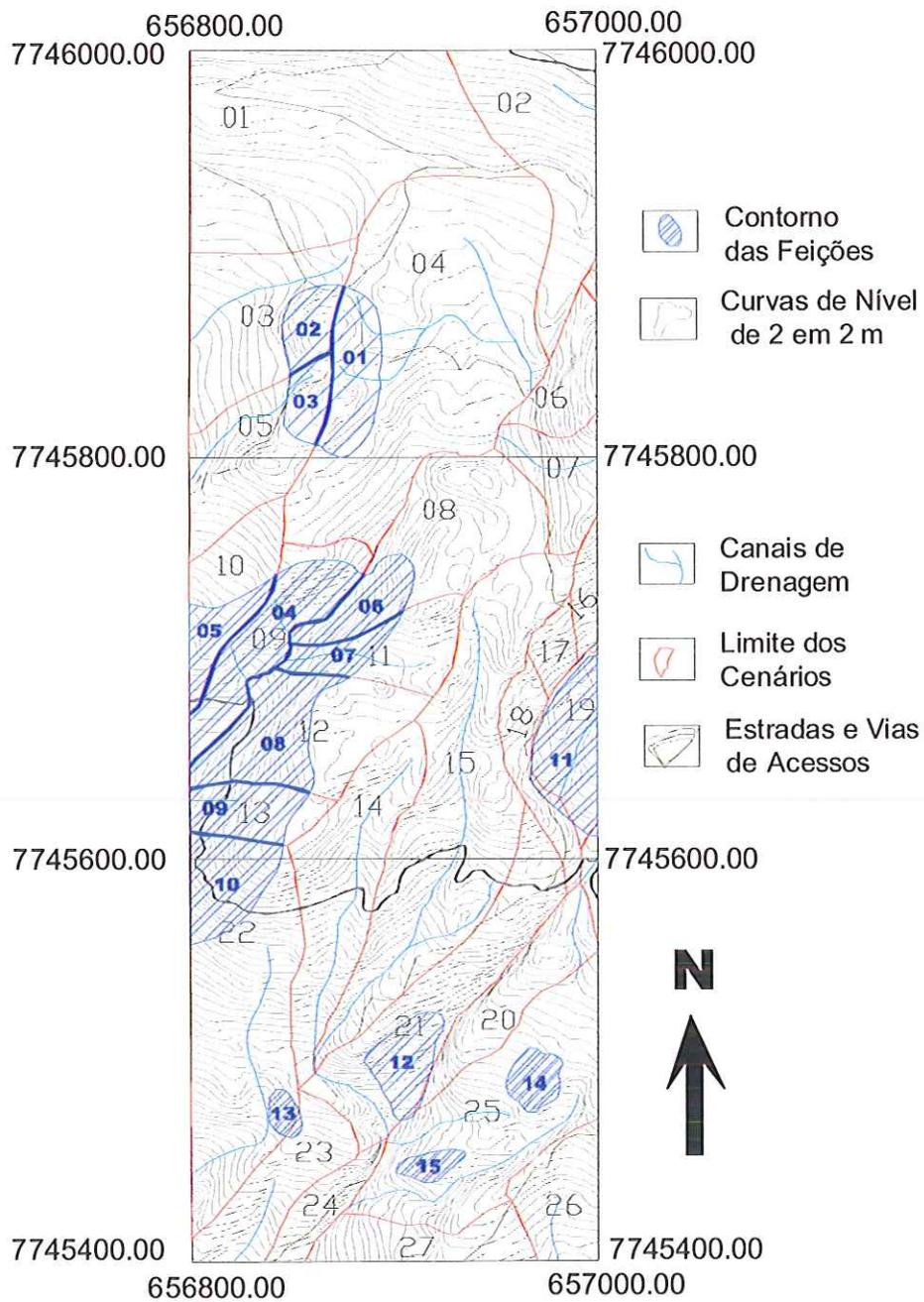
FIGURA 54 Mapa do Substrato Rochoso.



Universidade de São Paulo
 Escola de Engenharia de São Carlos
 Departamento de Geotecnia

Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

FIGURA 55. Mapa do Material Inconsolidado.



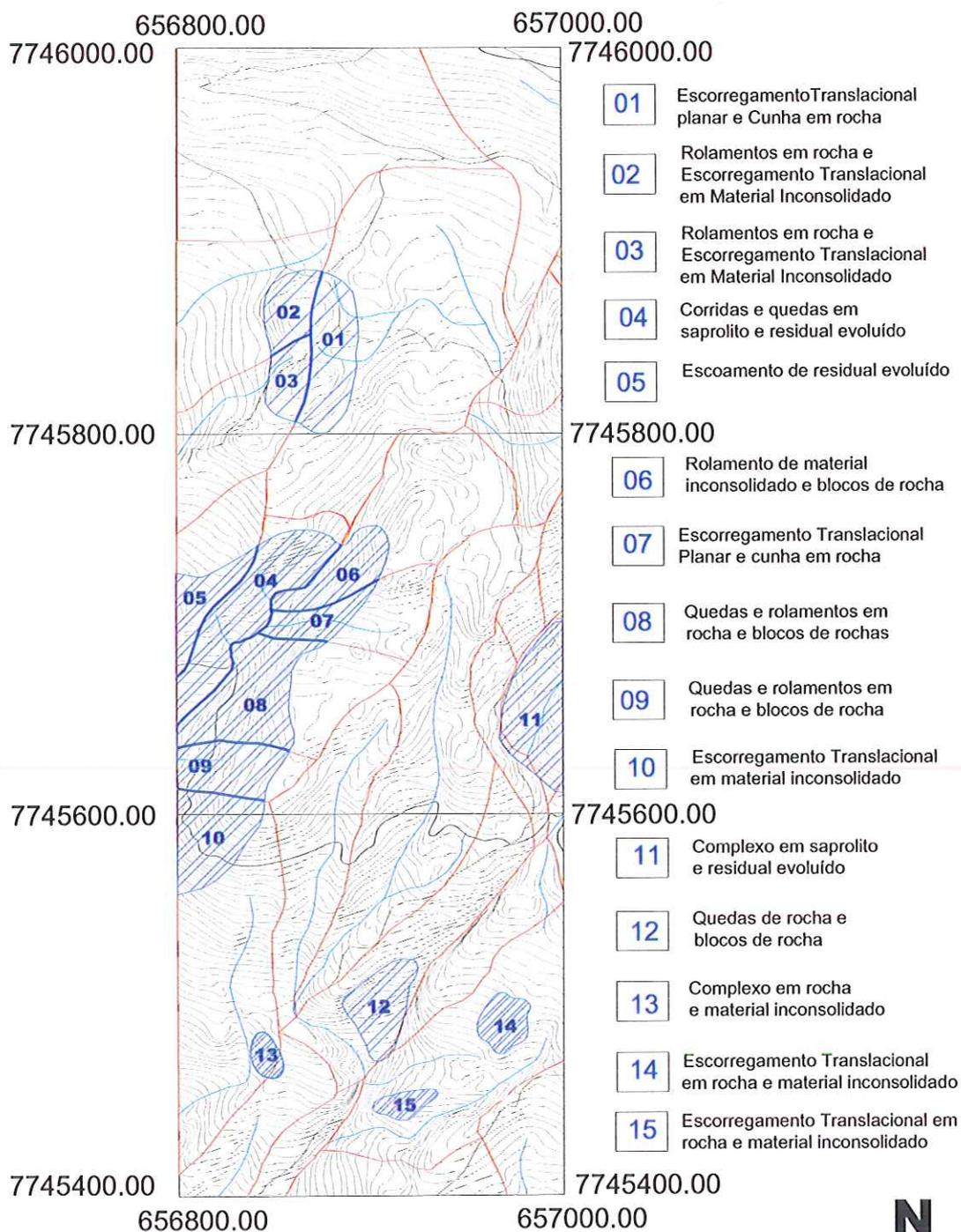
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Escala 1:2.500
Escala gráfica



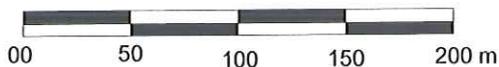
Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

FIGURA 56. Mapa dos Movimentos Gravitacionais de Massa: Localização e código das feições.



Universidade de São Paulo
 Escola de Engenharia de São Carlos
 Departamento de Geotecnia

Escala 1:2.500
 Escala gráfica



Autora: Eng. Geóloga Ezilma Cordeiro Dias
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

FIGURA 57. Mapa dos Movimentos Gravitacionais de Massa: Tipos de Processos e materiais envolvidos.

4.5 RELAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES ESTABELECIDAS PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA E OS ATRIBUTOS

Neste item estão listadas todas as relações elaboradas para os movimento gravitacional de massa. A cada condição estabelecida anteriormente (item 3.4.1) foram relacionados atributos correspondentes, exceto para o deflagrador (chuva) que foi atribuído valores de probabilidades estabelecidos por BONUCCELLI (1999).

Foram considerados todos os processos com potencial de ocorrência na área, são eles: Escorregamento translacional de rochas planar (TABELA 22), em cunha (TABELA 23) e em degraus (TABELA 24), Quedas (TABELA 25), Tombamento lento (TABELAS 26 e 27) e Tombamento rápido (TABELA 28), Escorregamento translacional de materiais inconsolidados em placas (TABELA 29), em lajes (TABELA 30) e em detritos (TABELA 31), Escoamento rápido (TABELA 32) e lento (TABELA 33). Foram considerados ainda os deflagradores para cada tipo de processo.

Considerando a relação entre as condições estabelecidas e os atributos, foi possível avaliar o processo com potencial de ocorrer em cada cenário.

TABELA 22: Condições estabelecidas para escorregamento translacional planar.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
Rocha	06
Superfície descontinuidade/junta bem definida	15
Superfície de ruptura planar	12E e/ou 13 A e/ou 14D
Relação $D/L \leq 0,1$	27
Descontinuidade persistente	20C ou 20D ou 20E
Direção aproximadamente paralela com o contorno da superfície do terreno	23 A ou 23B
Mergulho da descontinuidade com a mesma direção de mergulho que o talude do terreno.	24 A ou 24B
O mergulho do plano de ruptura deve ser menor que o mergulho da face do talude.	25A
Liberação das margens laterais de blocos.	1 ou 2 ou 3 ou 4 famílias de descontinuidades não paralelas (15).
O mergulho do plano de ruptura deve ser maior que o ângulo de atrito	GIANI (1992) sugere que o ϕ para rocha geralmente varia entre 25-35°. Mas os atributos 12E, 12F, 13 A e 14D e para os quartzitos (10 A), contribuem com a redução do atrito e se a superfície estiver úmida também haverá redução.
A inclinação da descontinuidade deve ser suficiente (maior que o ângulo de atrito).	$\phi_b > i$ (equação desenvolvida por GIANI, 1992 para que uma superfície de ruptura inclinada (i) esteja em equilíbrio).
Deflagrador: Chuva forte e prolongada (diária $\geq 70\text{mm}$ e acumulada de 8 dias $\geq 280\text{mm}$)	

Obs: ϕ_b : ângulo de atrito básico; i: inclinação da superfície de ruptura; D (deep): espaçamento da foliação; L (length): distância longitudinal (paralela as curvas de nível) do cenário.

TABELA 23: Condições estabelecidas para escorregamento translacional em cunha.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
Rocha	06
Superfície descontinuidade bem definida	15
Superfície de ruptura planar	12E e/ou 13 A e/ou 14D
Relação $D/L \leq 0,1$	27
Descontinuidade persistente	20C ou 20D ou 20E
Direção de interseção de dois planos aproximadamente paralela à encosta	26 A
Mergulho da interseção de dois planos com mesma direção de mergulho que o talude do terreno.	26B
Escorregamento é direcionado ao longo da linha de interseção de dois planos de descontinuidades	26 A e 26B
Mínimo duas famílias de descontinuidades contínuas e não paralelas	((15 A e 15B) ou (15C) ou (15D) ou (15E)) e 20 e 21
A inclinação da descontinuidade deve ser suficiente (maior que o ângulo de atrito).	$\phi_b > i$ (equação desenvolvida por GIANI, 1992 para que uma superfície de ruptura inclinada (i) esteja em equilíbrio).
Deflagrador: Chuva forte e prolongada (diária $\geq 70\text{mm}$ e acumulada de 8 dias $\geq 280\text{mm}$)	

Obs: ϕ_b : ângulo de atrito básico; i: inclinação da superfície de ruptura; D (deep): espaçamento da foliação; L (length): distância longitudinal (paralela as curvas de nível) do cenário.

TABELA 24: Condições estabelecidas para escorregamento translacional em degraus.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
Rocha	6
Superfície descontinuidade bem definida	15
Superfície de ruptura planar	12E e/ou 13A e/ou 14D
Relação $D/L \leq 0,1$	27
Descontinuidade sem persistência e que forma uma superfície de escorregamento contínua	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
Direção aproximadamente paralela com o contorno da superfície do terreno	23 A ou 23B
Mergulho da descontinuidade com a mesma direção de mergulho que o talude do terreno.	24 A ou 24B
Superfície ruptura deve ter o ângulo maior que a descontinuidade e menor que a face do talude.	25 B
Famílias de descontinuidades não paralelas e não conectadas	21E
Duas ou mais famílias descontinuidades não paralelas e aproximadamente perpendiculares entre si.	(15 A e 15B) ou (15C) ou (15D) ou (15E) e 21C
A inclinação da descontinuidade deve ser suficiente para promover o escorregamento.	$\phi_b > i$ (equação desenvolvida por GIANI, 1992 para que uma superfície de ruptura inclinada (i) esteja em equilíbrio).
Deflagrador: Chuva forte e prolongada (diária $\geq 70\text{mm}$ e acumulada de 8 dias $\geq 280\text{mm}$)	

Obs: ϕ_b : ângulo de atrito básico; i: inclinação da superfície de ruptura; D (deep): espaçamento da foliação; L (length): distância longitudinal (paralela as curvas de nível) do cenário.

TABELA 25: Condições estabelecidas para o processo de queda.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
Rocha	6
Descontinuidades que se interceptam	21B
Foliação e/ou família de fraturas	15
Taludes ou encostas íngremes (declividade > 45°)	55H
Direção da descontinuidade favorável a instabilidade.	23D, 24D e 25 A
Rocha diretamente exposta	Camada de material inconsolidado superficial (1G ou 1H ou 1I ou 42 A ou 42B) ou material inconsolidado na base da encosta (1F ou 2F ou 45C).
Ausência de deslocamento cisalhante (superfície na qual tem-se um pequeno ou nenhum deslocamento cisalhante)	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
Deflagrador: Chuva forte (diária \geq 70mm ou diária > 100mm).	

TABELA 26: Condições estabelecidas para o processo de tombamento lento.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
Rocha	6
Sistema preferencial de descontinuidade orientado com direção de mergulho contrário ao talude	23C e 24C
Perda de apoio deste sistema de descontinuidade preferencial	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998) (sistema de descontinuidade instável).
Taludes muito íngremes (declividade > 45°)	55H
Existência de uma base inclinada mergulhando na direção aproximadamente igual a face do talude, inclinado de um ângulo $\beta <$ que o ϕ (ângulo de atrito).	Considerar ϕ entre 25-35° (GIANI, 1992). Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
São limitados por descontinuidades preexistentes.	15
Juntas regularmente paralelas, mergulhando na direção contrária do talude, com ou sem juntas que se interceptam.	(23 C ou 24C) e (21B ou 21C ou 21D)
Ângulo entre a descontinuidade preferencial e a encosta menor que 90°	25C
Deflagrador: Chuva forte e prolongada (água existente nas trincas e/ou fraturas do material).	

Obs: ϕ : ângulo de atrito

Ângulo β : ângulo da base inclinada.

TABELA 27: Condições estabelecidas para o processo de tombamento lento.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
Rocha	6
Sistema preferencial de descontinuidade orientado com direção de mergulho contrário ao talude.	23C e 24C
Perda de apoio deste sistema de descontinuidade preferencial	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998). (sistema de descontinuidade preferencial instável).
Taludes muito íngremes (declividade > 45°)	55H
Existência de uma base inclinada mergulhando na direção aproximadamente igual a face do talude, inclinado de um ângulo $\beta < \phi$.	Considerar ϕ entre 25-35° (GIANI, 1992). Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
São limitados por descontinuidades preexistentes.	15
Juntas regularmente paralelas, mergulhando na direção contrária do talude, com ou sem juntas que se interceptam.	(23 C ou 24C) e (21B ou 21C ou 21D).
Ângulo entre a descontinuidade preferencial e a encosta igual a 90°	25D
Deflagrador: Chuva forte e prolongada (água existente nas trincas e/ou fraturas do material).	

Obs: ϕ : ângulo de atrito.

Ângulo β : ângulo da base inclinada.

TABELA 28: Condições estabelecidas para o processo de tombamento rápido.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
Rocha	6
Sistema preferencial de descontinuidade orientado com direção de mergulho contrário ao talude.	23C e 24C
Perda de apoio deste sistema de descontinuidade preferencial.	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998). (sistema de descontinuidade preferencial instável).
Taludes muito íngremes ($> 45^\circ$)	55H
Existência de uma base inclinada mergulhando na direção aproximadamente igual a face do talude, inclinado de um ângulo $\beta < \phi$ (ângulo de atrito).	Considerar ϕ entre $25-35^\circ$ (GIANI, 1992). Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
São limitados por descontinuidades preexistentes.	15
Juntas regularmente paralelas, mergulhando na direção contrária ao talude, com ou sem juntas que se interceptam.	(23 C ou 24C) e (21B ou 21C ou 21D).
Ângulo entre a descontinuidade preferencial e a encosta maior que 90° .	25E
Deflagrador: Chuva forte e prolongada (água existente nas trincas e/ou fraturas do material).	

Obs: ϕ : ângulo de atrito.

Ângulo β : ângulo da base inclinada.

TABELA 29: Condições estabelecidas para escorregamento translacional em placas.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
M.I (Saprolito)	38C e/ou 48H
Superfície descontinuidade bem definida	15, 38, 39, 48H
Superfície de ruptura planar.	14D, 39C, 48H
Relação D/L $\leq 0,1$	40 A
M.I com contraste de permeabilidade.	38
Baixos ângulos de declividade (6-36°)	55E, 55I, 55J
Materiais coesivos	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
Muito pouco espesso (< 0.5m)	44E
Deflagrador: Chuva intensa e prolongada (infiltração rápida): chuva diária ≥ 70 mm e acumulada 8 dias ≥ 280 mm; Chuva moderada e de longa duração (infiltração lenta): chuva diária > 35mm e acumulada de 8 dias >280mm.	

TABELA 30: Condições estabelecidas para escorregamento translacional em Lajes.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
M.I (residual evoluído e/ou retrabalhado).	1 ou 2 ou 44 ou 48I ou 38H ou 38I
Superfície descontinuidade bem definida	15, 38, 39, 42, 48H
Superfície de ruptura planar.	14D, 39C, 48H
Relação D/L $\leq 0,1$	40 A
M.I com contraste de permeabilidade.	38
Altos ângulos de declividade (30-45°)	55G
Materiais não coesivos	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
Pouco espesso (>0.5 e < 2m)	44F
Taludes essencialmente secos	30, 31, 32, 33, 34 (atributos ausentes)
Deflagrador: Chuva intensa e prolongada (infiltração rápida): chuva diária ≥ 70 mm e acumulada 8 dias ≥ 280 mm; Chuva moderada e de longa duração (infiltração lenta): chuva diária > 35mm e acumulada de 8 dias >280mm.	

Obs: M.I: material inconsolidado; D (deep): espaçamento da foliação; L (length): distância longitudinal (paralela as curvas de nível) do cenário.

TABELA 31: Condições estabelecidas para escorregamento translacional de detritos.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
M.I (Afeta manto de detritos)	1 ou 2 ou 44 ou 38C ou 48H ou 48I ou 38C ou 38I
Manto de detritos (diâmetro >7,6e<25cm)	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
Superfície descontinuidade bem definida	15, 38, 39, 42, 48H
Superfície de ruptura planar.	14D, 39C, 48H
Relação D/L $\leq 0,05$	40B
M.I com contraste de permeabilidade.	38
Ângulos de declividades entre 25-45°	55G, 55F
Materiais de baixa coesão	Deve-se incluir na listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998).
Grandemente aumentado com a destruição da vegetação	(4C ou 4D) e (5 A ou 5D) ou 4G
Deflagrador: Chuva intensa e prolongada (infiltração rápida): chuva diária ≥ 70 mm e acumulada 8 dias ≥ 280 mm; Chuva moderada e de longa duração (infiltração lenta): chuva diária > 35 mm e acumulada de 8 dias > 280 mm.	

Obs: M.I: material inconsolidado; D (deep): espaçamento da foliação; L (length): distância longitudinal (paralela as curvas de nível) do cenário.

TABELA 32: Condições estabelecidas para o processo de corrida ou escoamento rápido.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
M.I (residuais e/ou retrabalhados)	1 ou 2 ou 44 ou 48I ou 38H ou 38I
Zona com contraste de permeabilidade	38
Facilmente reconhecido, pois, pode-se perceber deslocamento de material.	1 e/ou 2
Ausência de uma superfície de ruptura preferencial.	1 ou 2 ou 44
Fortemente influenciado pela ausência de vegetação.	(4C ou 4G) e (5 A ou 5D)
Declividade > 25°	55F, 55G, 55H
M.I pouco espesso (< 2m)	44G
Deflagrador: Intensidade da chuva grande o suficiente para causar a percolação da água dentro do material inconsolidado numa velocidade que exceda a velocidade em que a água pode percolar dentro do material subjacente (chuva forte e prolongada).	

TABELA 33: Condições estabelecidas para escoamento lento.

CONDIÇÕES	ATRIBUTOS DA TABELA 16
M.I (residuais e retrabalhados)	1 ou 2 ou 44 ou 48I ou 38H ou 38I
Zona com contraste de permeabilidade	38
Facilmente reconhecido, pois se pode perceber deslocamento de material.	1 e/ou 2
Ausência de uma superfície de ruptura preferencial.	1 ou 2 ou 44
Fortemente influenciado pela ausência de vegetação.	(4C ou 4G) e (5 A ou 5D)
Declividade entre 3-17°	55E
M.I pouco espesso (< 2m)	44G
Deflagrador: Intensidade da chuva grande o suficiente para causar a percolação da água dentro do material inconsolidado numa velocidade que exceda a velocidade em que a água pode percolar dentro do material subjacente (chuva forte e prolongada).	

Obs: M.I: material inconsolidado; D (deep): espaçamento da foliação; L (length): distância longitudinal (paralela as curvas de nível) do cenário.

4.6 AVALIAÇÃO DO PROCESSO POTENCIAL

A avaliação é realizada a partir da comparação da listagem de todos os atributos presentes no cenário com a de atributos necessários para cada processo provável (TABELA 34 e 35).

Particularmente, apresenta-se a avaliação do processo potencial para os cenários 04, 07, 11 e 23 por apresentarem os processos de escorregamento translacional planar (TABELA 34) e em cunha (TABELA 35).

Conhecido o tipo de processo identifica-se à seqüência de atributos. É importante observar que para cada processo, a partir das condições estabelecidas, determina-se um grupo de atributos. Este grupo vai condicionar a possibilidade de ocorrência ou não do processo.

A seqüência de atributos que conduzirá ao processo potencial de movimento gravitacional de massa (Hazard) é identificada a partir da elaboração das árvores de eventos (FIGURAS 58, 59, 60 e 61) e das características dos atributos presentes em cada cenário.

TABELA 34. Listagem dos atributos predisponentes e/ou modificador ao processo de movimento gravitacional de massa (presentes e os necessários ao processo de escorregamento translacional planar) extraída da tabela de caracterização dos atributos (ANEXO 1) e Tabela 22 (item 4.5) respectivamente.

CENÁRIO	ATRIBUTOS PRESENTES	ATRIBUTOS NECESSÁRIOS
07	1 A, 1B, 1C; 1E, 1F, 1G; 3B, 3E; 4 A, 4G; 5 A; 6 A; 7C, 7D; 8 A; 9C, 9E; 10 A, 11B, 11C; 12E; 15 A, 15D; 16C, 16B; 17 A, 17B; 18C; 19 A, 20D; 21 A, 21B; 22 A; 23 A, 23B, 23D; 24 A, 24B, 24D; 25 A; 27 A; 44 A, 44B, 44C, 44E; 45B, 45C; 46B, 46C; 47 A, 47B, 47D; 54B, 55B, 55F, 55E	06, 15, 12E e/ou 13 A e/ou 14D, 27 A, 20C ou 20D ou 20E, 23 A e/ou 23B, 24 A e/ou 24B, 25 A
04	1C, 1E, 1F; 1 A, 1E, 1F, 1I; 1B, 1E, 1F, 1I; 2 A, 2E, 2F, 2I; 2B, 2E, 2F, 2J; 2C, 2E, 2F, 2J; 4 A, 4G; 5 A, 5B; 6 A, 6E, 6F; 7 A, 7B; 8 A, 8G, 8H; 9E, 10 A; 11 A; 12E; 14D; 15 A, 15C; 16C, 16E; 16D, 16B; 17B; 18 A; 20E; 21 A, 21B; 22B; 23 A, 23B; 24 A, 24B; 25 A; 26 A, 26B; 27 A; 31 A, 31C, 31G; 35B; 44B, 44C; 45B, 45C; 46B, 46C; 47 A, 47D; 55 A, 55E, 55F, 55I, 55J.	06, 15, 12E e/ou 13 A e/ou 14D, 27 A, 20C ou 20D ou 20E, 23 A e/ou 23B, 24 A e/ou 24B, 25 A
11	1C, 1E, 1F; 1 A, 1B, 1G; 2C, 2J; 3 A, 3B, 3D, 3M; 4 A, 4G; 5 A, 5B, 6 A, 6E, 6F; 7B, 7D; 9C, 9E; 10F, 10 O; 11 A, 12E, 15 A, 15C; 16D, 16 A; 16E, 16C; 20B, 20D; 21 A, 21B; 22 A; 23 A, 23C; 24 A, 24C; 25 A, 25D; 26 A, 26B; 27 A; 31B, 31C; 35B; 44C; 45 A, 45B, 45C; 47D; 55I, 55F, 55G, 55H.	06, 15, 12E e/ou 13 A e/ou 14D, 27 A, 20C ou 20D ou 20E, 23 A e/ou 23B, 24 A e/ou 24B, 25 A
23	1C, 1 A, 1D, 1E, 1F; 2C, 2D, 2E, 2F, 2J; 3 A, 3B, 3D, 3M; 4 A, 4G; 5 A, 5B; 6 A, 6E, 6F; 7 A, 7B; 9E, 9F; 11H; 12E; 15 A, 15C; 16C, 16E; 16B, 16D; 20C, 20D; 21 A, 21B; 22 A; 23 A, 23B; 24 A, 24B; 25 A; 27 A, 31C; 44 A, 44B, 44C; 45 A, 45B, 45C; 46 A, 46B, 46C; 47 A, 47D; 54 A; 55 A, 55F, 55G.	06, 15, 12E e/ou 13 A e/ou 14D, 27 A, 20C ou 20D ou 20E, 23 A e/ou 23B, 24 A e/ou 24B, 25 A

TABELA 35. Listagem dos atributos predisponentes e/ou modificador ao processo de movimento gravitacional de massa (presentes e os necessários ao processo de escorregamento translacional em cunha) extraída da tabela de caracterização dos atributos (ANEXO 1) e Tabela 23 (item 4.5).

CENÁRIO	ATRIBUTOS PRESENTES	ATRIBUTOS NECESSÁRIOS
11	1C, 1E, 1F; 1A, 1B, 1G; 2C, 2J; 3A, 3B, 3D, 3M; 4A, 4G; 5A, 5B, 6A, 6E, 6F; 7B, 7D; 9C, 9E; 10F, 10O; 11A, 12E, 15A, 15C; 16D, 16A; 16E, 16C; 20B, 20D; 21A, 21B; 22A; 23A, 23C; 24A, 24C; 25A, 25D; 26A, 26B; 27A; 31B, 31C; 35B; 44C; 45A, 45B, 45C; 47D; 55I, 55F, 55G, 55H.	06, ((15A e 15B) ou (15C) ou (15D) ou (15E)) e 20 e 21, 12E e/ou 13A e/ou 14D, 20C e/ou 20D e/ou 20E, 26A e 26B, 27A.
23	1C, 1A, 1D, 1E, 1F; 2C, 2D, 2E, 2F, 2J; 3A, 3B, 3D, 3M; 4A, 4G; 5A, 5B; 6A, 6E, 6F; 7A, 7B; 9E, 9F; 11H; 12E; 15A, 15C; 16C, 16E; 16B, 16D; 20C, 20D; 21A, 21B; 22A; 23A, 23B; 24A, 24B; 25A; 26A, 26B; 31C; 44A, 44B, 44C; 45A, 45B, 45C; 46A, 46B, 46C; 47A, 47D; 54A; 55A, 55F, 55G.	06, ((15A e 15B) ou (15C) ou (15D) ou (15E)) e 20 e 21, 12E e/ou 13A e/ou 14D, 20C e/ou 20D e/ou 20E, 26A e 26B, 27A.

Particularmente, apresenta-se a seqüência de atributos identificada para os processos de escorregamento translacional planar e em cunha verificadas nos cenários 07, 04, 11 e 23 (FIGURAS 62, 63 e 64).

Cenário 07: Considerando o processo potencial e a existência de quatro famílias de descontinuidades não paralelas, foi possível identificar duas seqüências, sendo uma para escorregamento translacional planar (seqüência 1) (FIGURA 62) e a outra para escorregamento translacional em cunha (FIGURA 64).

Cenário 04: Considerando o processo potencial e a existência de três famílias de descontinuidades não paralelas, foi possível identificar duas seqüências, sendo uma para escorregamento translacional planar (seqüência 2) (FIGURA 63) e a outra escorregamento translacional em cunha (FIGURA 64).

Cenário 11 (encosta 1): Considerando o processo potencial e a existência de três famílias de descontinuidades não paralelas, foi possível identificar duas seqüências, sendo uma para escorregamento translacional planar (seqüência 2) (FIGURA 63) e a outra para escorregamento translacional em cunha (FIGURA 64).

Cenário 11 (encosta 2): Considerando o processo potencial e a existência de três famílias de descontinuidades não paralelas, foi possível identificar duas seqüências, sendo uma para escorregamento translacional planar (seqüência 2) (FIGURA 63) e a outra escorregamento translacional em cunha (FIGURA 64).

Cenário 23: Considerando o processo potencial e a existência de três famílias de descontinuidades não paralelas, foi possível identificar duas seqüências, sendo uma para escorregamento translacional planar (seqüência 2) (FIGURA 63) e a outra para escorregamento translacional em cunha (FIGURA 64).

O processo potencial é representado por uma seqüência condicionada de atributos em que a sua probabilidade final é determinada pela interseção de todos os atributos envolvidos.

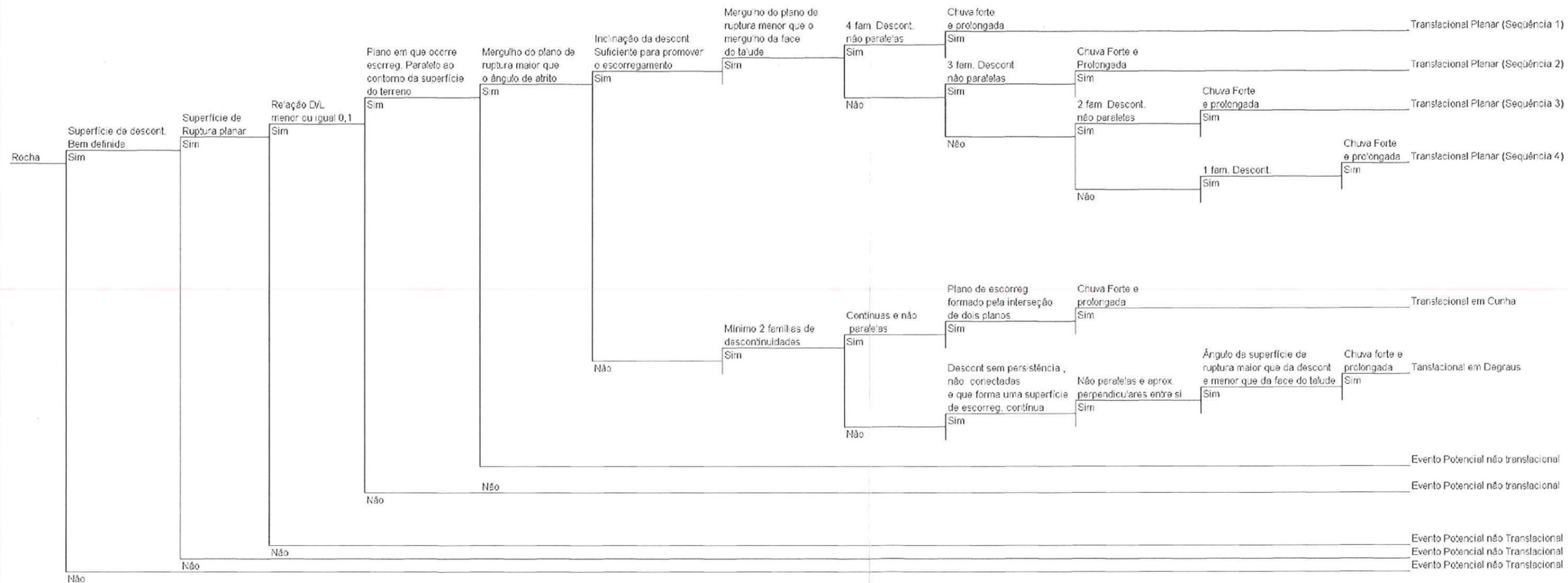


FIGURA 58. Árvore de eventos elaborada para os Escorregamentos Translacionais em rocha.

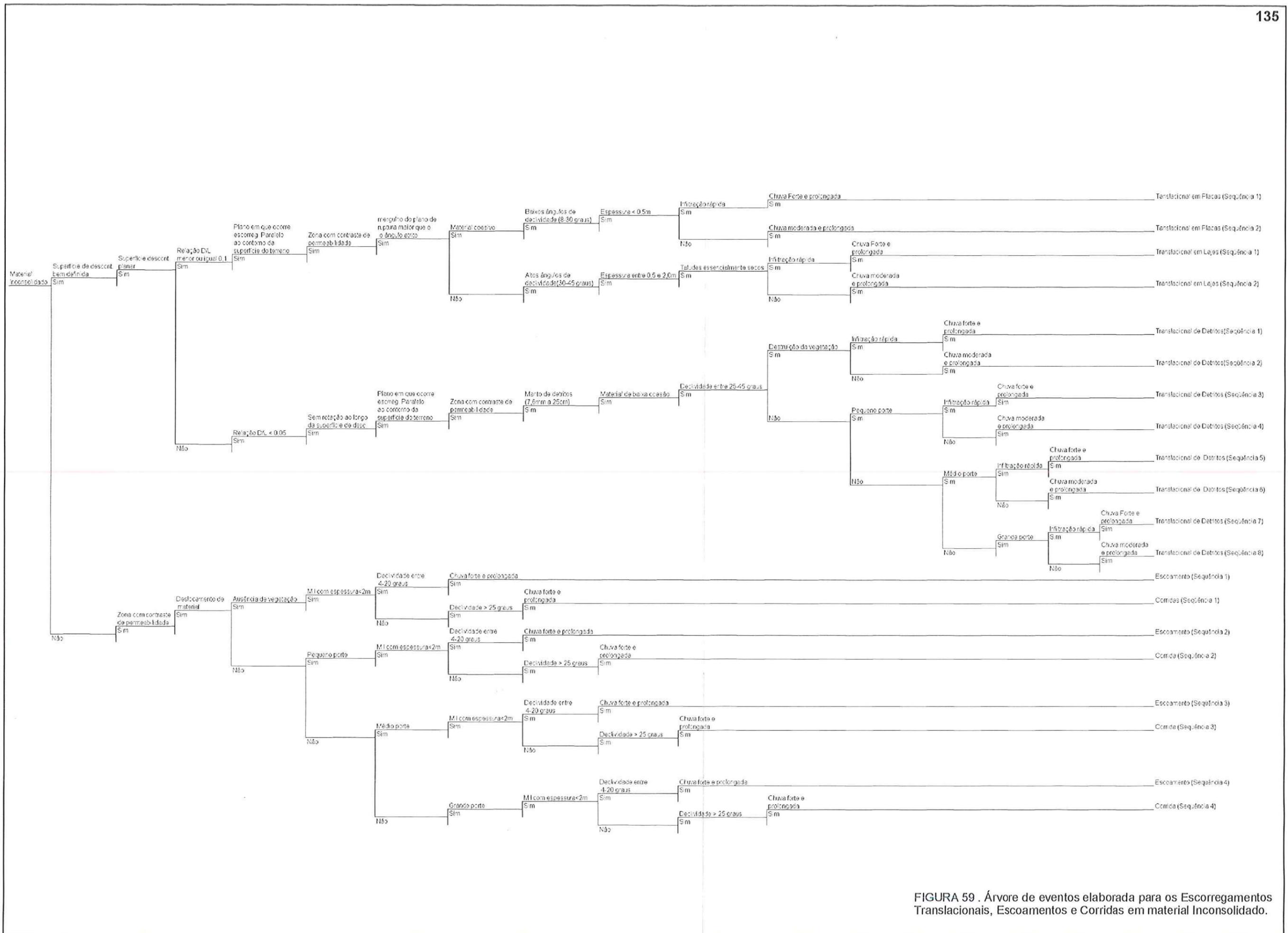


FIGURA 59 . Árvore de eventos elaborada para os Escorregamentos Translacionais, Escoamentos e Corridas em material Inconsolidado.

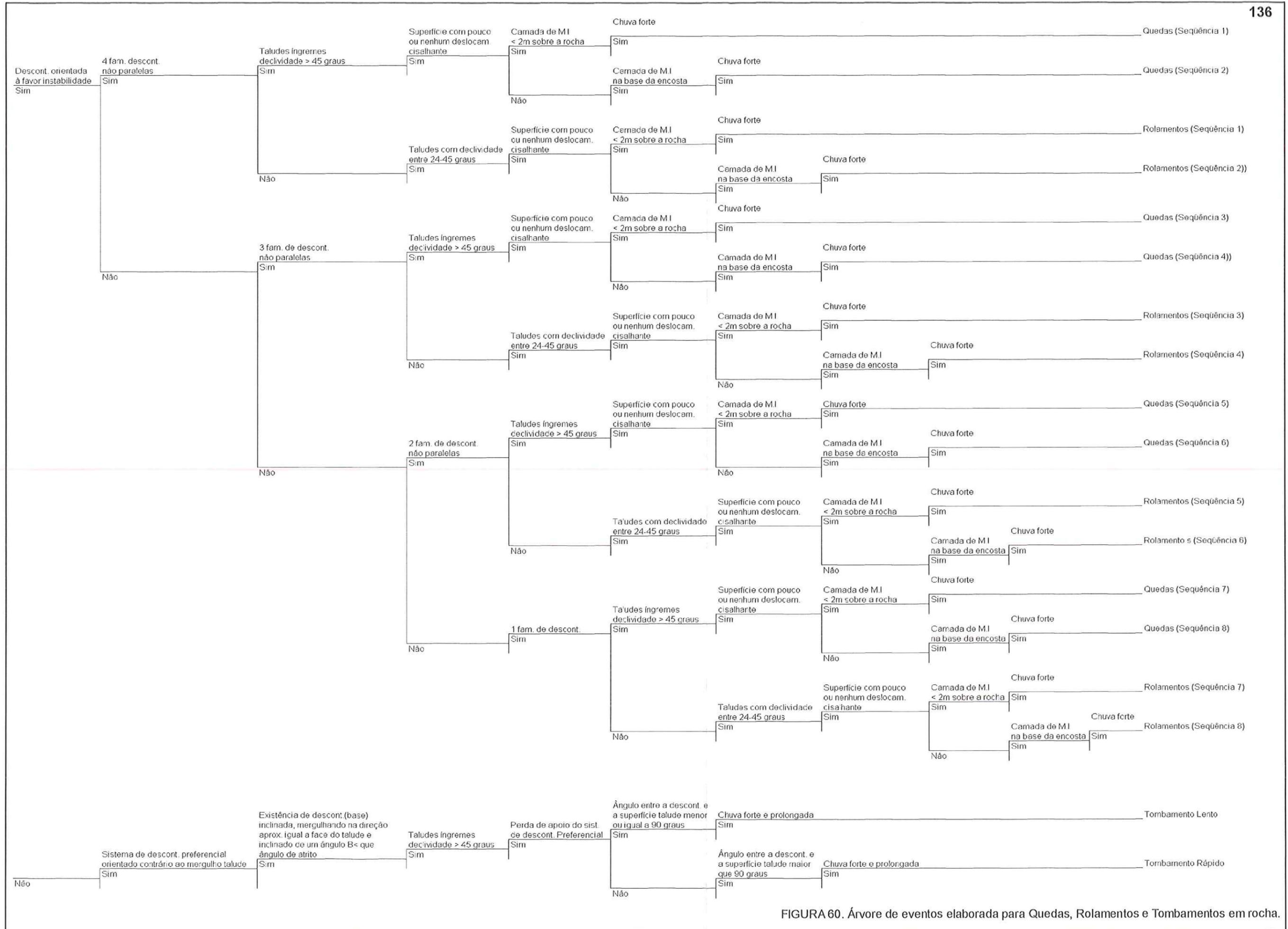


FIGURA 60. Árvore de eventos elaborada para Quedas, Rolamentos e Tombamentos em rocha.

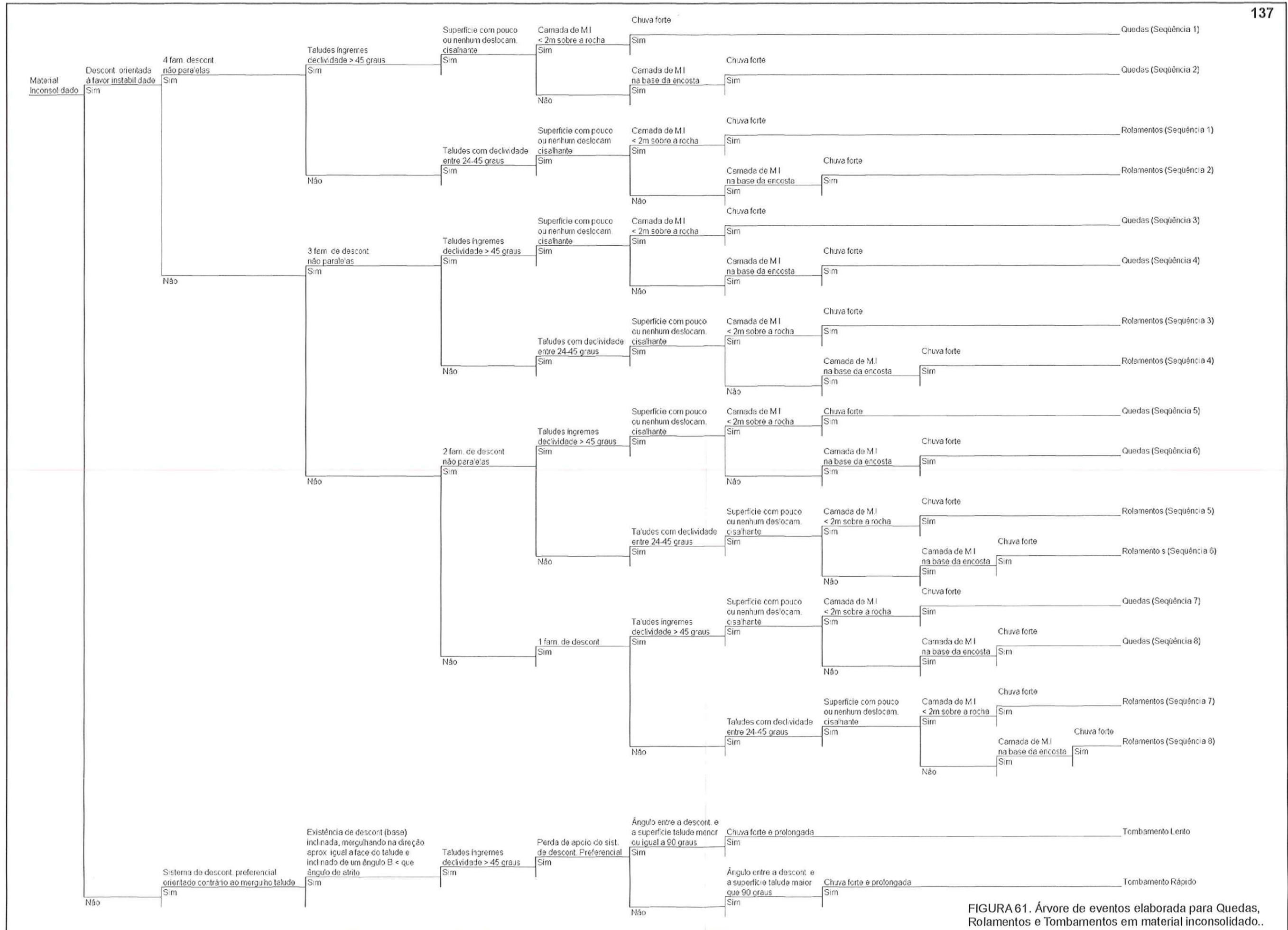


FIGURA 61. Árvore de eventos elaborada para Quedas, Rolamentos e Tombamentos em material inconsolidado.

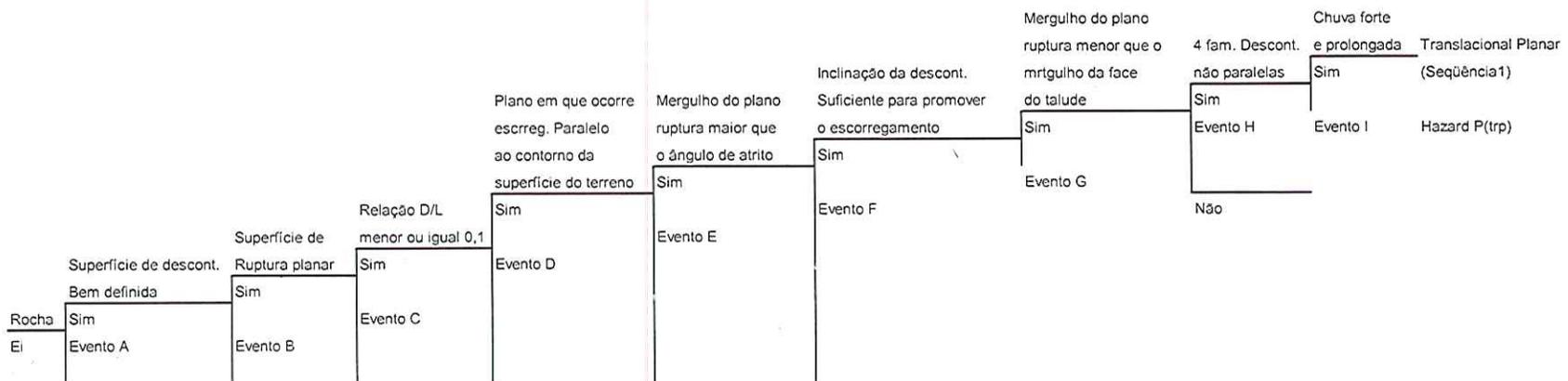


FIGURA 62 Seqüência utilizada para escorregamento translacional planar (seqüência 1) obtida da árvore de eventos representada pela FIGURA 58.

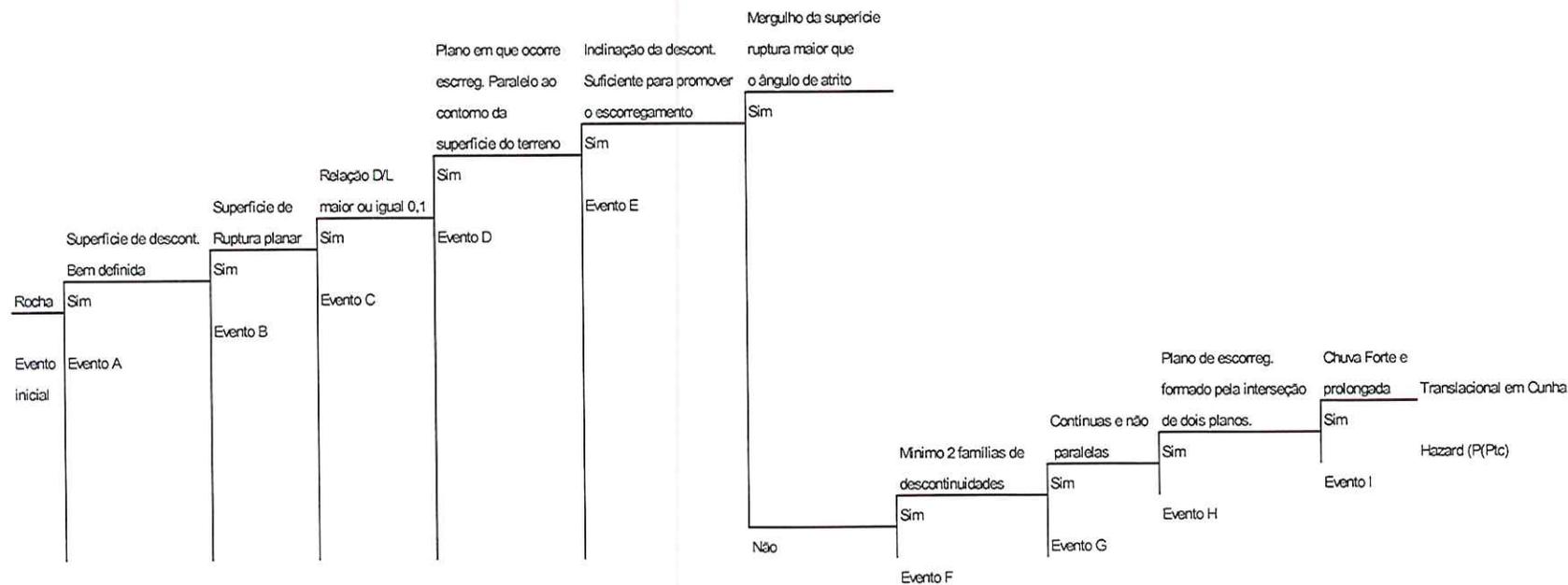


FIGURA 64 Seqüência utilizada para escorregamento translacional em cunha obtida da árvore de eventos representada pela FIGURA 58.

4.7 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DOS PROCESSOS PROVÁVEIS

A avaliação probabilística realizada neste trabalho consistiu de cinco fases, a saber: definição do sistema, identificação do "hazard" provável, desenvolvimento da árvore de eventos, identificação e avaliação das conseqüências e combinação das conseqüências e cálculo da probabilidade.

Combinação das Conseqüências e Cálculo da Probabilidade: Como dito anteriormente (item 3.4.3), a probabilidade final será determinada pela interseção de todos os atributos envolvidos. Mas a probabilidade de cada atributo está condicionada ao atributo anterior e para o cálculo da probabilidade é necessário que se analise o grau de dependência entre os atributos, sendo que:

Para atributos independentes o cálculo será:

- o Variável unidimensional

$$P(B/A) = P(B) = n_B / n \quad (15)$$

Onde: $P(B)$ é a probabilidade absoluta de B , n_B é a freqüência absoluta de B e n o número total de observações.

- o Variável Bidimensional

1. Independência entre X e Y (considerando que um determinado evento B é representado por X, Y).

- Variável aleatória discreta

$$P(xi/yj) = P(xi) \text{ para quaisquer valores de } i \text{ e } j. \quad (25)$$

$$q(yj/xi) = q(yj) \text{ para todo } i \text{ e } j. \quad (26)$$

Mas se X não está condicionado a Y e eles são independentes a equação da probabilidade absoluta do evento B é representado por:

$$p(xi, yj) = p(xi)q(yj) \text{ para quaisquer } i \text{ e } j, \text{ isto é,} \\ P(X = xi, Y = yj) = P(X = xi)P(Y = yj) \text{ para todo } i \text{ e } j. \quad (27)$$

- Variável aleatória contínua

$$g(x/y) = g(x)$$

$$h(y/x) = h(y) \text{ para todo } (x, y) \text{ e;} \quad (28 \text{ e } 29)$$

$f(x, y) = g(x)h(y)$ para todo (x, y) , onde f é a fdp conjunta, e g e h são as fdp marginais de X e Y , respectivamente. (30)

2. Independência entre X,Y e um evento anterior (por exemplo, evento A)

▪ Variável aleatória discreta

$$P(xi, yj / A) = P(xi, yj, A) / P(A) = P(xi, yj) \text{ Sendo que:} \quad (31)$$

$$p(xi, yj) = p(xi)q(yj) \text{ para quaisquer } i \text{ e } j, \text{ isto é,}$$

$$P(X = xi, Y = yj) = P(X = xi)P(Y = yj) \text{ para todo } i \text{ e } j. \quad (27)$$

❖ Para atributos dependentes será:

○ Variável unidimensional

$$P(B / A) = P(B \cap A) / P(A) \quad (13)$$

○ Variável bidimensional

1. Dependência entre X e Y (considerando que um determinado evento B é representado por X, Y).

▪ Variável aleatória discreta

$$P(xi / yj) = P(xi, yj) / yj \text{ Para quaisquer valores de } i \text{ e } j. \quad (32)$$

$$q(yj / xi) = q(xi, yj) / xi \text{ Para todo } i \text{ e } j; \quad (33)$$

2. Dependência entre X,Y e um evento anterior (por exemplo, evento A).

▪ Variáveis aleatórias discreta

$$P(xi, yj / A) = P(xi, yj, A) / P(A) \text{ Sendo que:} \quad (34)$$

$$P(xi) = \sum_{j=1}^{\infty} P(xi, yj) \quad e \quad (35)$$

$$P(yj) = \sum_{i=1}^{\infty} P(xi, yj) \quad \text{São as marginais} \quad (36)$$

Exemplo: Considere uma seqüência (1), de uma árvore hipotética (FIGURA 65), como sendo um dos n caminhos de uma árvore de eventos, contendo todos os atributos necessários (A, B, C, D e E) considerados discretos, que conduzirá ao Hazard, a expressão considerada é:

Para casos em que os atributos são dependentes entre si tem-se:

$$P(S1) = P(A) \times P(B/A) \times P(C/B) \times P(D/C) \times P(E/D) \quad (37)$$

Em que: $P(A) = n_A / n$ (análises unidimensionais) e, (15)

$P(A) = p(xi, yj)$ (análises bidimensionais); (27)

$P(B/A) = P(B \cap A) / P(A)$ Considerando que B e A são unidimensionais; (13)

$P(xi, yj/A) = P(xi, yj \cap A) / P(A)$ Considerando que B é bidimensional e A unidimensional e ainda (34)

$$P(xi) = \sum_{j=1}^{\infty} P(xi, yj) \quad e \quad (35)$$

$$P(yi) = \sum_{j=1}^{\infty} P(xi, yj) \quad \text{São as marginais} \quad (36)$$

Para casos em que os eventos são independentes a equação se reduz a:

$$P(S1) = P(A) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \quad (38)$$

Em que: $P(A) = n_A / n$ (análises unidimensionais) e, (15)

$P(A) = p(xi, yj) = p(xi)q(yj)$ para quaisquer i e j, isto é,
 $P(X = xi, Y = yj) = P(X = xi)P(Y = yj)$ para todo i e j (análises bidimensionais)(27).

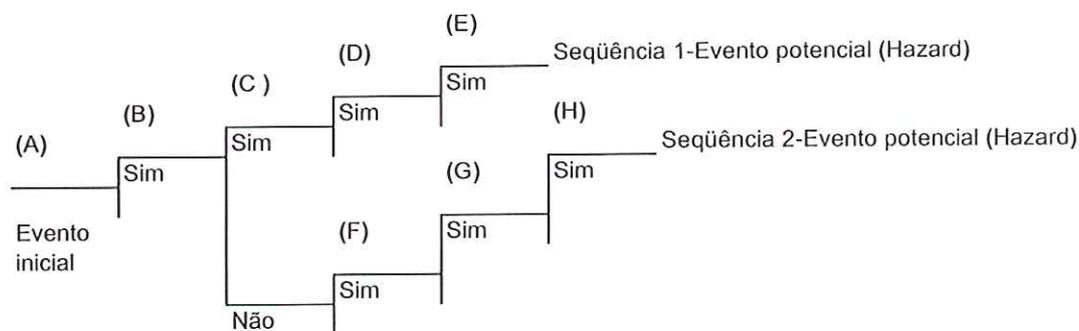


FIGURA 65. Árvore de eventos hipotética.

Serão apresentados neste item os resultados obtidos para as análises probabilísticas dos movimentos gravitacionais de massa (escorregamento translacional planar e em cunha).

4.7.1 Escorregamento Translacional Planar

Este tipo de processo foi verificado para os cenários 07, 04, 11 e 23 (Fotos 02, 01, 04 e 05 respectivamente em ANEXO 2), sendo que os atributos presentes e necessários estão ilustrados na TABELA 34 e as seqüências adotadas nas FIGURAS 62 e 63.

Neste item apresentam-se todos os atributos considerados nos cálculos da probabilidade para cada cenário.

4.7.1.1 Cenário 07

Conhecida a seqüência (FIGURA 62), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem:

1. Todos os atributos da seqüência foram considerados discretos;
2. Todos os atributos da seqüência são independentes exceto A e E_i , F e E;
3. A probabilidade de cada evento será expressa pela probabilidade absoluta de cada atributo, exceto para A que está condicionada a E_i e F que está condicionada a E;
4. 3/3 do cenário (topo, meia encosta e base) é constituído por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
5. O plano potencial para escorregamento translacional planar é representado pela foliação;
6. A foliação é considerada planar;
7. Três discontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
8. Espaçamento da foliação (D) é aproximadamente constante e igual a 20cm;
9. Ângulo de mergulho da foliação varia entre 16-25°;
10. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da discontinuidade for igual ao ângulo de atrito do material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 25° para condição de equilíbrio;

os possíveis valores podem ser postos assim?

$P(A) = \frac{1}{n}$

11. GIANI (1992) sugere um ângulo de atrito médio entre 25-35° para a maioria das rochas, como não foi estabelecido o ângulo de atrito para o quartzito, considerou-se valores baseando-se nesses supra citados;

12. O Quartzito encontra-se intercalado com sericita, a qual reduz o ângulo de atrito, por este motivo se considerou ângulo de atrito igual a 20°;

13. O cenário é constituído por duas classes de declividade (17-24° e 24-36°) ocupando 50% da área cada uma, como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);

14. A probabilidade estabelecida para a chuva forte e prolongada foi obtida por BONUCCELLI (1999);

15. A distância longitudinal (paralela às curvas de nível) do cenário (L) é de 100m;

16. Atitudes da foliação apresentaram os seguintes valores: 194/25, 192/23, 210/16, 205/24, 184/19, 201/21 e 225/22 (conforme documento em ANEXO1);

17. Atitude da encosta: 235/36 (direção de máximo mergulho) (conforme documento em ANEXO1);

18. Para os eventos relacionados ao paralelismo entre o plano de escorregamento e o contorno da superfície do terreno (Evento D), a inclinação da descontinuidade ser suficiente para promover o escorregamento, isto é, o mergulho do plano de ruptura maior que ϕ_b (Evento F) e o mergulho do plano de ruptura menor que o mergulho da face do talude (Evento G) foram consideradas bidimensionais, pois se pretende analisar além da relação entre eles a intensidade;

19. A probabilidade de cada evento será:

$P(i) = n_i / n = f(i)$ Para o caso unidimensional e $P(i) = p(x_i, y_j)$ Para o caso bidimensional;

20. A probabilidade do Evento (A) será representado por $P(A/E_i)$ em que: $P(A/E_i) = P(A \cap E_i) / P(E_i)$ e a probabilidade do Evento (F) por $P(F/E)$ em que: $P(F/E) = P(F \cap E) / P(E)$;

21. A probabilidade do Evento (D) será representada por $P(D)$ e como trata-se de uma análise bidimensional sua equação geral será expressa por: $P(D) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \cdot q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do paralelismo e y_j a frequência relativa de cada paralelismo;

calculo mo?

22. A probabilidade do Evento (F) será representada por $P(F/E)$. Como a intersecção de F e E se trata de uma análise bidimensional sua equação geral será expressa por $P(F \cap E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \cdot q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo;

23. A probabilidade do Evento (G) será representada por $P(G)$ e como trata-se de uma análise bidimensional sua equação geral será expressa por $P(G) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \cdot q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade da relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o mergulho do talude e y_j a frequência relativa da relação entre eles.

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional planar ($P(trp)$) é representada por:

$$P(trp) = P(E_i) \cdot P(A/E_i) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) \cdot P(E) \cdot P(F/E) \cdot P(G) \cdot P(H) \cdot P(I)$$

Sendo que: $P(E_i)$, $P(A/E_i)$, $P(B)$, $P(C)$, $P(E)$, $P(H)$, $P(I)$ foram considerados unidimensionais e $P(D)$, $P(F \cap E)$ e $P(G)$ bidimensionais (FIGURA 62) e $P(A)$ dependente de E_i e $P(F)$ dependente de E .

Será apresentado a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional planar (FIGURA 62).

Evento Inicial (E_i): Neste caso pretende-se analisar a presença do substrato rochoso porque representa uma das condições para ocorrência do processo. O cenário foi considerado como sendo de três partes (topo, meia encosta e base) e com ausência de material inconsolidado, uma vez que o mesmo apresenta espessura entre 10 a 20cm sendo assim desprezada.

Desta forma, o valor estabelecido para $P(E_i)$ foi de 3/3 que representa a frequência relativa da existência de rocha no cenário.

Evento (A): Pretende-se analisar a probabilidade condicionada de A dado E_i , ou seja, a probabilidade da superfície de ruptura ser bem definida dado a existência de rocha. Considerou-se A dependente de E_i porque somente o substrato rochoso apresenta descontinuidade.

Neste caso, o cálculo de $P(A)$ será representado por $P(A/E_i) = P(A \cap E_i) / P(E_i)$.

Em que $P(A)$ é a frequência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e $P(E_i)$ a frequência relativa da presença de rocha no cenário logo:

$$P(A/E_i) = P(A \cap E_i) / P(E_i)$$

$$P(A/E_i) = 3/3 / 3/3 = 100\%.$$

Evento (B): Pretende-se analisar a presença de superfície potencial de ruptura planar. Foi considerado como superfície potencial de ruptura a foliação.

Sendo assim o valor estabelecido para $P(B)$ foi de 100% porque toda a foliação (superfície de ruptura) foi considerada planar, ou seja, a frequência relativa da superfície de ruptura planar é de 100%.

Evento (C): Pretende-se analisar a relação D/L (deep and length) e a condição é que seja $\leq 0,1$ para ocorrência do processo em questão. Considerou-se $D=20\text{cm}$ e $L=100\text{m}$. Desta forma a relação D/L assumiu um valor de 0,0002, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para $P(C)$ foi de 100% que representa a frequência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Pretende-se analisar o paralelismo entre a superfície potencial de ruptura (foliação) e a superfície do terreno (encosta). Neste caso foi considerada análise bidimensional, pois além da frequência relativa de cada intervalo interessa também a intensidade de cada um.

Para a análise do paralelismo considerou-se a relação entre atitudes da foliação e atitude da encosta (analisou-se separadamente a relação entre as direções e entre os mergulhos em cada caso). Foram obtidos os seguintes valores: $(41^\circ/11^\circ)$, $(43^\circ/13^\circ)$, $(25^\circ/20^\circ)$, $(30^\circ/12^\circ)$, $(51^\circ/17^\circ)$, $(34^\circ/15^\circ)$ e $(10^\circ/11^\circ)$ respectivamente.

ANBALAGAN et al. (1993) estabeleceram valores diferentes de intensidades de acordo com o intervalo de paralelismo entre eles, são eles: 100% ($<5^\circ$), 80% (6-10°), 60% (11-20°), 50% (21-30°) e 50% ($> 30^\circ$).

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do paralelismo e y_j a frequência relativa de cada paralelismo.

Logo, $P(D) = (50\% \times 60\% \times 1/7) + (80\% \times 60\% \times 1/7) = (50\% \times 60\% \times 6/7) + (80\% \times 60\% \times 1/7) = 32,57\%$.

Obs: Os valores de intensidades devem ser multiplicados porque o paralelismo inclui a análise de ambas (direção e mergulho). Os valores obtidos da

relação entre as atitudes da foliação e da encosta devem ser somados porque não é essencial a presença de todas elas para ocorrência do processo, basta a presença de apenas uma delas.

Evento (E): Pretende-se analisar a relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o ângulo de atrito. A condição é que o mergulho da descontinuidade seja maior que o ângulo de atrito. Foi considerado o ângulo de atrito igual a 20°. Desta forma o valor de $P(E)$ foi de 5/7 que representa a freqüência relativa do mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.

$$\frac{n_A}{n} = p$$

Evento (F): Pretende-se analisar o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura. Neste caso foi considerada análise bidimensional, pois além da relação entre o mergulho da descontinuidade e o ângulo de atrito interessa também a intensidade. O mergulho deve ser maior que o ângulo de atrito para que o equilíbrio seja vencido. Os valores de intensidade, utilizados para cada intervalo de mergulho da descontinuidade, foram baseados em trabalhos de ANBALAGAN et al. (1993), são eles: 40% (< 15°), 50% (16-25°), 60% (26-35°), 80% (36-45°) e 100% (> 45°).

Desta forma considerou-se:

$P(F \cap E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a freqüência relativa de cada intervalo. Logo, $P(F \cap E) = (50\%) \times (5/7) = 35,71\%$.

Como $P(F/E) = P(F \cap E) / P(E)$ tem-se que:

$$P(F/E) = 35,71 / (5/7) = 50\%$$

Obs: Foram considerados somente os valores em que os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito.

Evento (G): Pretende-se analisar a relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o mergulho do talude. A condição é que o mergulho da descontinuidade seja menor que o mergulho do talude. O mergulho da descontinuidade varia entre 16 e 25° e o talude representado por duas classes de declividades (17-24° e 24-36°) ocupando 50% do cenário cada uma.

Neste caso foi considerada análise bidimensional porque além da relação entre os intervalos interessa também a intensidade. Utilizou-se valores de intensidades, para cada relação entre mergulho da descontinuidade e mergulho do talude, estabelecidos por ANBALAGAN et al. (1993), são eles: 30% (> 10°), 50% (0-10°), 70% (0°), 80% (0-(-10°)) e 100% (-10). Os valores positivos indicam que o

Relação = °
Intensidade: %

mergulho da descontinuidade é maior que o mergulho do talude, e negativo o contrário.

Desta forma considerou-se:

$P(G) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade da relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o mergulho do talude e y_j a frequência relativa da relação entre eles. Logo, $P(G) = (70\% \times 1/2) + (80\% \times 1/2) = 35 + 40 = 75\%$.

Obs: A primeira parte é referente à análise realizada entre o intervalo de mergulho da descontinuidade 16-25 e a classe de declividade 17-24, portanto utilizou-se o valor de 70% porque a relação entre eles foi de aproximadamente 0° e ainda ocupam 50% do cenário. Quanto a segunda, refere-se à classe 24-36 que apresentou uma relação entre 0-(-10)° utilizando-se o valor de 80%. Os valores são somados porque não é essencial a presença de ambos os intervalos, basta a presença de apenas um deles.

Evento (H): Pretende-se analisar a liberação de bloco (s). Considerou-se que a existência de 4 famílias de descontinuidades não paralelas resultará em uma probabilidade de 100% de chance que os blocos sejam liberados e conseqüentemente, 3 famílias 75% (3/4), 2 famílias 50% (2/4) e 1 família 25% (1/4). Desta forma, $P(H)$ neste caso é de 100% (4/4) que representa a frequência relativa do número de famílias de descontinuidades não paralelas.

Evento (I): Pretende-se analisar a probabilidade de ocorrência de uma chuva forte e prolongada. Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto $P(I)$ é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional planar tem-se que:

$$P(trp) = (3/3) \times (1) \times (1) \times (1) \times (0,3257) \times (0,50) \times (5/7) \times (0,75) \times (4/4) \times (0,596)$$

$$P(trp) = 5,17\%$$

4.7.1.2 Cenário 04

Conhecida a seqüência (FIGURA 63), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem:

1. Idem ao item 1 considerado no cenário 07;
2. Idem ao item 2 considerado no cenário 07;

3. Idem ao item 3 considerado no cenário 07;
4. 1/3 do cenário (base) é composta por Material Inconsolidado;
5. 2/3 do cenário (topo e meia encosta) é constituído por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
6. Idem ao item 5 considerado no cenário 07
7. Idem ao item 6 considerado no cenário 07;
8. Duas descontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
9. Espaçamento da foliação (D) é aproximadamente constante e igual a 10cm;
10. Ângulo de mergulho da foliação varia entre 20-28°;
11. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da descontinuidade for igual ao ângulo de atrito do material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 20°, 25° e 28° para condição de equilíbrio;
12. Idem ao item 11 considerado no cenário 07;
13. Idem ao item 12 considerado no cenário 07;
14. O cenário é constituído de quatro classes de declividades (6-11°, 11-17°, 17-24° e 24-36°) como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);
15. Idem ao item 14 considerado no cenário 07;
16. A distância longitudinal (paralela a curva de nível) do cenário (L) é de 200m;
17. Atitudes da foliação apresentaram os seguintes valores: 150/28, 172/20, 178/22, 176/20, 160/25, 167/20, 165/25 e 187/20 (conforme documento em ANEXO1);
18. Atitude da encosta: 158/40 (direção de máximo mergulho);
19. Idem ao item 18 considerado no cenário 07;
20. Idem ao item 19 considerado no cenário 07
21. Idem ao item 20 considerado no cenário 07;
22. Idem ao item 21 considerado no cenário 07;
23. Idem ao item 22 considerado no cenário 07;
24. Idem ao item 23 considerado no cenário 07.

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional planar ($P(trp)$) é representada por:



$$P(trp) = P(Ei) \times P(A/Ei) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \times P(F/E) \times P(G) \times P(H) \times P(I)$$

Sendo que: P(Ei), P(A/Ei), P(B), P(C), P(E), P(H), P(I) foram considerados unidimensionais e P(D), P(F∩E) e P(G) bidimensionais (FIGURA 63), P(A) dependente de Ei e P(F) dependente de E.

Apresenta-se a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional planar (FIGURA 63). Os procedimentos adotados serão os mesmos utilizados na primeira análise (cenário 07) por este motivo apresenta-se somente os valores considerados.

Evento (Ei): P(Ei)=2/3 que representa a freqüência relativa da presença de rocha no cenário.

Evento (A): P(A/Ei) = 100% que representa a probabilidade condicionada de A dado Ei, Sendo que P(A) é a freqüência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e P(Ei) a freqüência relativa da presença de rocha no cenário. Logo:

$$P(A/Ei) = P(A \cap Ei) / P(Ei)$$

$$P(A/Ei) = 2/3 / 2/3 = 100\%$$

Evento (B): Foi considerado como superfície potencial de ruptura a foliação. Sendo assim o valor estabelecido para P(B) foi de 100% porque toda a foliação foi considerada planar, ou seja, a freqüência relativa da superfície de ruptura planar é de 100%.

Evento (C): Considerou-se D=10cm e L=200m. Desta forma a relação D/L assumiu um valor de 0,0005, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para P(C) foi de 100% que representa a freqüência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Foram obtidos os seguintes valores: (8°/12°), (14°/20°), (26°/18°), (18°/20°), (02°/15°), (09°/20°), (07°/15°) e (29°/30°) respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(xi,yj) = p(xi) \times q(yj)$ em que xi representa a intensidade do paralelismo e yj a freqüência relativa de cada paralelismo.

Logo, $P(D) = (80\% \times 60\% \times 1/8) + (60\% \times 1/8) + (60\% \times 50\% \times 1/8) + (60\% \times 1/8) + (100\% \times 60\% \times 1/8) + (80\% \times 60\% \times 1/8) + (80\% \times 60\% \times 1/8) + (60\% \times 50\% \times 1/8) = (80\% \times 60\% \times 3/8) + (60\% \times 2/8) + (60\% \times 50\% \times 2/8) + (100\% \times 60\% \times 1/8) = 48\%$.

Obs: Para as 2ª e 4ª medidas utilizou-se apenas os valores de 60% porque a relação de paralelismo entre a atitude da foliação e a atitude da encosta apresentaram o mesmo valor para a direção e mergulho.

Evento (E): Foi considerado o ângulo de atrito igual a 20°.

Desta forma o valor de $P(E)$ foi de 4/8 que representa a frequência relativa do mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.

Evento (F): Neste caso a probabilidade é representada pela frequência relativa de cada intervalo e a intensidade de cada um. Desta forma considerou-se:

$P(F \cap E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo. Logo,

$$P(F \cap E) = (50\% \times 7/8) + (60\% \times 1/8)$$

$$P(F \cap E) = 51,25\%.$$

Como $P(F/E) = P(F \cap E) / P(E)$ tem-se que:

$$P(F/E) = 51,25 / (4/8) = 100\%$$

Obs: Foram considerados todos os valores porque todos os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito. Os valores são somados porque não é essencial a presença de ambos os intervalos (20-25° e 26-35°) basta a presença de apenas um deles.

Evento (G): Foi considerado o mergulho da descontinuidade entre 20-28° e 4 classes de declividade para o talude (6-11°, 11-17°, 17-24° e 24-36°) ocupando 2/10, 4/10, 2/10 e 2/10 respectivamente do cenário.

Desta forma considerou-se:

$P(G) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade da relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o mergulho do talude e y_j a frequência relativa da relação entre eles. Logo, $P(G) = (30\% \times 2/10) + (50\% \times 4/10) + (50\% \times 2/10) + (80\% \times 2/10)$

$$P(G) = 52\%.$$

Obs: Considerou-se a relação entre eles > 10° (30%), 0-10° (50%) e 0-(-10°) (80%) respectivamente. Os valores são somados porque não é essencial a presença de todos os intervalos, basta a presença de apenas um deles.

Evento (H): Considerou-se a existência de 3 famílias de descontinuidades.

Desta forma, $P(H)$ neste caso é de 75% (3/4) que representa a frequência relativa do número de famílias de descontinuidades não paralelas.

Evento (I): Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto $P(I)$ é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional planar tem-se que:

$$P(trp) = (2/3) \times (1) \times (1) \times (1) \times (0,48) \times (1) \times (4/8) \times (0,52) \times (3/4) \times 0,596$$

$$P(trp) = 3,72\%$$

4.7.1.3 Cenário 11

4.7.1.3.1 (Encosta 1)

Conhecida a seqüência (FIGURA 63), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem.

1. Idem item 1 considerado no cenário 7;
2. Idem item 2 considerado no cenário 7;
3. Idem item 3 considerado no cenário 7;
4. 30% do cenário (partes do topo e meia encosta) é constituído por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
5. Idem item 5 considerado no cenário 7;
6. Idem item 6 considerado no cenário 7;
7. Duas descontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
8. Espaçamento da foliação (D) varia entre 10 a 20cm;
9. Ângulo de mergulho da foliação varia entre 35-40°;
10. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da descontinuidade for igual ao ângulo de atrito do material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 35° e 40° para condição de equilíbrio;
11. Idem item 11 considerado no cenário 7;
12. Idem item 12 considerado no cenário 7;
13. A encosta é constituída de duas classes de declividade (17-24 e 24-36°) ocupando 20 e 80% da encosta respectivamente, como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);
14. Idem item 14 considerado no cenário 7;

15. A distância longitudinal (paralela a curva de nível) do cenário (L) é de 70m;
16. Atitudes da foliação apresentaram os seguintes valores: 200/35, 198/40 e 187/35 (conforme documento em ANEXO1);
17. Atitude da encosta e_1 : 190/40 (direção de máximo mergulho);
18. Idem item 18 considerado no cenário 7;
19. Idem item 19 considerado no cenário 7;
20. Idem item 20 considerado no cenário;
21. Idem item 21 considerado no cenário 7;
22. Idem item 22 considerado no cenário 7;
23. Idem item 23 considerado no cenário 7.

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional planar ($P(trp)$) é representada por:

$$P(trp) = P(Ei) \times P(A/Ei) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \times P(F/E) \times P(G) \times P(H) \times P(I)$$

Sendo que: $P(Ei)$, $P(A/Ei)$, $P(B)$, $P(C)$, $P(E)$, $P(H)$, $P(I)$ foram considerados unidimensionais e $P(D)$, $P(F \cap E)$ e $P(G)$ bidimensionais (FIGURA 63), $P(A)$ dependente de Ei e $P(F)$ dependente de E .

Apresenta-se a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional planar (FIGURA 63). Os procedimentos adotados serão os mesmos utilizados na primeira análise (cenário 07) por este motivo apresenta-se somente os valores considerados.

Evento (Ei): A encosta foi considerada composta somente por rocha porque o material inconsolidado apresenta uma espessura de até 20cm sendo assim desprezada.

Desta forma o valor estabelecido para $P(Ei)$ foi de 30% que representa a probabilidade absoluta da existência de rocha no cenário;

Evento (A): Considerou-se A dependente de Ei porque somente o substrato rochoso apresenta descontinuidade. O cálculo neste caso será $P(A/Ei) = 100\%$ que representa a probabilidade condicionada de A dado Ei , Sendo que $P(A)$ é a freqüência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e $P(Ei)$ a freqüência relativa da presença de rocha no cenário. Logo:

$$P(A/Ei) = P(A \cap Ei) / P(Ei)$$

$$P(A/E_i) = 0,3 / 0,3 = 100\%$$

Evento (B): Foi considerado como superfície potencial de ruptura a foliação. Sendo assim o valor estabelecido para $P(B)$ foi de 100% porque toda a foliação (superfície de ruptura) foi considerada planar, ou seja, a frequência relativa da superfície potencial de ruptura planar é de 100%;

Evento (C): Considerou-se $D=10-20\text{cm}$ e $L=70\text{m}$. Desta forma a relação D/L assumiu um valor entre 0,0014 e 0,0028, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para $P(C)$ foi de 100% que representa a frequência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Foram obtidos os seguintes valores: $(10^\circ/05^\circ)$, $(08^\circ/00^\circ)$ e $(03^\circ/05^\circ)$ respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do paralelismo e y_j a frequência relativa de cada paralelismo.

Logo, $P(D) = (80\% \times 100\% \times 1/3) + (80\% \times 100\% \times 1/3) + (100\% \times 1/3) = 86,7\%$.

Obs: Para a 3ª medida utilizou-se apenas o valor de 100% porque a relação de paralelismo entre a atitude da foliação e a atitude da encosta apresentou o mesmo valor para a direção e mergulho.

Evento (E): Foi considerado o ângulo de atrito igual a 20° .

Desta forma o valor de $P(E)$ foi de 3/3 que representa a frequência relativa do mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.

Evento (F): Neste caso a probabilidade é representada pela frequência relativa de cada intervalo e a intensidade de cada um.

Desta forma considerou-se:

$P(F \cap E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo. Logo,

$$P(F \cap E) = (60\% \times 2/3) + (80\% \times 1/3)$$

$$P(F \cap E) = 60\%$$

Como $P(F/E) = P(F \cap E) / P(E)$ tem-se que:

$$P(F/E) = 60 / (3/3) = 100\%$$

Obs: Foram considerados todos os valores porque todos os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito. Os valores são

somados porque não é essencial a presença de ambos os intervalos (26-35° e 36-40°) basta a presença de apenas um deles.

Evento (G): Foi considerado o mergulho da descontinuidade entre 35-40° e duas classes de declividades (17-24° e 24-36°) ocupando aproximadamente 20 e 80% respectivamente. Desta forma considerou-se:

$P(G) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade da relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o mergulho do talude e y_j a frequência relativa da relação entre eles.

$$\text{Logo, } P(G) = (30\% \times 20\%) + (50\% \times 80\%)$$

$$P(G) = 46\%$$

Obs: Considerou-se a relação entre eles $> 10^\circ$ (30%) e $0-10^\circ$ (50%) respectivamente. Os valores são somados porque não é essencial a presença de todos os intervalos, basta apenas a presença de um deles.

Evento (H): Considerou-se a existência de 3 famílias de descontinuidades.

Desta forma, $P(H)$ neste caso é de 75% (3/4) que representa a frequência relativa do número de famílias de descontinuidades não paralelas.

Evento (I): Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto $P(I)$ é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional planar tem-se que:

$$P(trp) = (0,3) \times (1) \times (1) \times (1) \times (0,867) \times (0,6) \times (3/3) \times (0,46) \times (3/4) \times 0,596$$

$$P(trp) = 3,2\%$$

4.7.1.3.2 (Encosta 2)

Conhecida a seqüência (FIGURA 63), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem.

1. Idem item 1 considerado no cenário 7;
2. Idem item 2 considerado no cenário 7;
3. Idem item 3 considerado no cenário 7;
4. 30% do cenário é constituído por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
5. O plano potencial para escorregamento translacional planar é a família de fraturas F1;
6. A família de fraturas F1 é considerada planar;

7. Duas descontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
8. Espaçamento da descontinuidade (D) varia entre 40 a 60cm;
9. Ângulo de mergulho da F1 varia de 68-75°;
10. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da descontinuidade for igual ao ângulo de atrito do material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 75° para condição de equilíbrio;
11. Idem item 11 considerado no cenário 7;
12. Idem item 12 considerado no cenário 7;
13. A encosta é constituída de duas classes de declividade (6-11° e 24-36°) como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);
14. Idem item 14 considerado no cenário 7;
15. A distância longitudinal (paralela a curva de nível) do cenário (L) é de 70m;
16. Atitudes da F1 apresentaram os seguintes valores: 12/70, 05/75, 12/70, 20/70, 35/68 e 18/75 (conforme documento em ANEXO1);
17. Atitude da encosta e_2 : 12/60 (direção de máximo mergulho);
18. Idem item 18 considerado no cenário 7;
19. Idem item 19 considerado no cenário 7;
20. Idem item 20 considerado no cenário 7;
21. Idem item 21 considerado no cenário 7;
22. Idem item 22 considerado no cenário 7;
23. Idem item 23 considerado no cenário 7.

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional planar ($P(trp)$) é representada por:

$$P(trp) = P(Ei) \times P(A/Ei) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \times P(F/E) \times P(G) \times P(H) \times P(I)$$

Sendo que: $P(Ei)$, $P(A/Ei)$, $P(B)$, $P(C)$, $P(E)$, $P(H)$, $P(I)$ foram considerados unidimensionais e $P(D)$, $P(F \cap E)$ e $P(G)$ bidimensionais (FIGURA 63), $P(A)$ dependente de Ei e $P(F)$ dependente de E .

Apresenta-se a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional planar (FIGURA 63). Os procedimentos adotados

serão os mesmos utilizados na primeira análise (cenário 07) por este motivo apresenta-se somente os valores considerados.

Evento (Ei): A encosta foi considerada composta somente por rocha porque o material inconsolidado apresenta uma espessura de até 20cm sendo assim desprezada.

Desta forma o valor estabelecido para $P(Ei)$ foi de 30% que representa a probabilidade absoluta da existência de rocha no cenário;

Evento (A): Considerou-se A dependente de Ei porque somente o substrato rochoso apresenta. O cálculo neste caso será $P(A/Ei) = 100\%$ que representa a probabilidade condicionada de A dado Ei, Sendo que $P(A)$ é a freqüência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e $P(Ei)$ a freqüência relativa da presença de rocha no cenário. Logo:

$$P(A/Ei) = P(A \cap Ei) / P(Ei)$$

$$P(A/Ei) = 0,3 / 0,3 = 100\%$$

Evento (B): Foi considerado como superfície potencial de ruptura a família de fraturas F1. Sendo assim o valor estabelecido para $P(B)$ foi de 70% porque considerou-se que 30% da descontinuidade não apresenta-se planar, ou seja, a freqüência relativa da superfície potencial de ruptura planar é de 70%.

Evento (C): Considerou-se $D=40-60\text{cm}$ e $L=70\text{m}$. Desta forma a relação D/L assumiu um valor entre 0,0057 e 0,0085, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para $P(C)$ foi de 100% que representa a freqüência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Foram obtidos os seguintes valores: $(0^\circ/10^\circ)$, $(07^\circ/15^\circ)$, $(0^\circ/10^\circ)$, $(08^\circ/10^\circ)$, $(23^\circ/08^\circ)$ e $(06^\circ/15^\circ)$ respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(xi,yj) = p(xi) \times q(yj)$ em que xi representa a intensidade do paralelismo e yj a freqüência relativa de cada paralelismo.

Logo, $P(D) = (100\% \times 80\% \times 1/6) + (80\% \times 60\% \times 1/6) + (100\% \times 80\% \times 1/6) + (80\% \times 1/6) + (50\% \times 80\% \times 1/6) + (80\% \times 60\% \times 1/6) = 61,67\%$.

Obs: Para a 4ª medida utilizou-se apenas o valor de 80% porque a relação de paralelismo entre a atitude da foliação e a atitude da encosta apresentou o mesmo valor para a direção e mergulho.

Evento (E): Foi considerado o ângulo de atrito igual a 20° .

Desta forma o valor de $P(E)$ foi de 6/6 que representa a freqüência relativa do mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.

Evento (F): Neste caso a probabilidade é representada pela frequência relativa de cada intervalo e a intensidade de cada um.

Desta forma considerou-se:

$P(F \cap E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo. Logo,

$$P(F \cap E) = (100\% \times 6/6)$$

$$P(F \cap E) = 100\%$$

Como $P(F/E) = P(F \cap E) / P(E)$ tem-se que:

$$P(F/E) = 100/(6/6) = 100\%$$

Obs: Foram considerados todos os valores (todos os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito). O valor de 100% de intensidade considerado é porque todas as descontinuidades são maiores que 45° (68-75°).

Evento (G): Foi considerado o mergulho da descontinuidade entre 68-75° e duas classes de declividades (6-11° e 24-36°) ocupando aproximadamente 80 e 20% respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(G) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade da relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o mergulho do talude e y_j a frequência relativa da relação entre eles.

$$\text{Logo, } P(G) = (30\% \times 100\%)$$

$$P(G) = 30\%$$

Obs: Considerou-se a relação entre eles > 10° (30%).

Evento (H): Considerou-se a existência de 3 famílias de descontinuidades.

Desta forma, $P(H)$ neste caso é de 75% (3/4) que representa a frequência relativa do número de famílias de descontinuidades não paralelas.

Evento (I): Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto $P(I)$ é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional planar tem-se que:

$$P(trp) = (0,3) \times (1) \times (0,7) \times (1) \times (0,6167) \times (1) \times (6/6) \times (0,3) \times (3/4) \times 0,596$$

$$P(trp) = 1,73\%$$

4.7.1.4 Cenário 23

Conhecida a seqüência (FIGURA 63), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem.

1. Idem item 1 considerado no cenário 7;
2. Idem item 2 considerado no cenário 7;
3. Idem item 3 considerado no cenário 7;
4. 3/3 da encosta (topo, meia encosta e base) é constituído por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
5. Idem item 5 considerado no cenário 7;
6. Idem item 6 considerado no cenário 7;
7. Duas descontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
8. Espaçamento da foliação (D) é aproximadamente constante e igual a 20cm;
9. Ângulo de mergulho da foliação varia entre 35-42°;
10. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da descontinuidade for igual ao ângulo de atrito do material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 42° para condição de equilíbrio;
11. Idem item 11 considerado no cenário 7;
12. Idem item 12 considerado no cenário 7;
13. O cenário é constituído de duas classes de declividade (24-36° e 36-45°) como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);
14. Idem item 14 considerado no cenário 7;
15. A distância longitudinal (paralela a curva de nível) do cenário (L) é de 40m;
16. Atitudes da foliação apresentaram os seguintes resultados: 210/36, 205/35, 212/42 e 222/38 (conforme documento em ANEXO1);
17. Atitude da encosta: 212/42 (direção de máximo mergulho);
18. Idem item 18 considerado no cenário 7;
19. Idem item 19 considerado no cenário 7;
20. Idem item 20 considerado no cenário 7;
21. Idem item 21 considerado no cenário 7;
22. Idem item 22 considerado no cenário 7;

23. Idem item 23 considerado no cenário 7;

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional planar ($P(trp)$) é representada por:

$$P(trp) = P(Ei) \times P(A/Ei) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \times P(F/E) \times P(G) \times P(H) \times P(I)$$

Sendo que: $P(Ei)$, $P(A/Ei)$, $P(B)$, $P(C)$, $P(E)$, $P(H)$, $P(I)$ foram considerados unidimensionais e $P(D)$, $P(F \cap E)$ e $P(G)$ bidimensionais (FIGURA 63), $P(A)$ dependente de Ei e $P(F)$ dependente de E .

Apresenta-se a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional planar (FIGURA 63). Os procedimentos adotados serão os mesmos utilizados na primeira análise (cenário 07) por este motivo apresenta-se somente os valores considerados.

Evento (Ei): A encosta foi considerada composta somente por rocha porque o material inconsolidado apresenta uma espessura de 10-20cm sendo assim desprezada.

Desta forma o valor estabelecido para $P(Ei)$ foi de 3/3 que representa a freqüência relativa da existência de rocha no cenário;

Evento (A): Considerou-se A dependente de Ei porque somente o substrato rochoso apresenta. O cálculo neste caso será $P(A/Ei) = 100\%$ que representa a probabilidade condicionada de A dado Ei , Sendo que $P(A)$ é a freqüência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e $P(Ei)$ a freqüência relativa da presença de rocha no cenário. Logo:

$$P(A/Ei) = P(A \cap Ei) / P(Ei)$$

$$P(A/Ei) = 3/3 / 3/3 = 100\%$$

Evento (B): Foi considerado como superfície potencial de ruptura a foliação. Sendo assim o valor estabelecido para $P(B)$ foi de 100% porque toda a foliação (superfície de ruptura) foi considerada planar, ou seja, a freqüência relativa da superfície potencial de ruptura planar é de 100%;

Evento (C): Considerou-se $D=20\text{cm}$ e $L=40\text{m}$. Desta forma a relação D/L assumiu um valor de 0,005, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para $P(C)$ foi de 100% que representa a freqüência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Foram obtidos os seguintes valores: $(02^\circ/06^\circ)$, $(07^\circ/07^\circ)$, $(0^\circ/0^\circ)$ e $(10^\circ/04^\circ)$ respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do paralelismo e y_j a frequência relativa de cada paralelismo.

Logo, $P(D) = (100\% \times 80\% \times \frac{1}{4}) + (80\% \times \frac{1}{4}) + (100\% \times \frac{1}{4}) + (80\% \times 100\% \times \frac{1}{4}) = 85\%$.

Obs: Para a 2ª e 3ª medida utilizou-se apenas o valor de 80% e 100% porque a relação de paralelismo entre a atitude da foliação e a atitude da encosta apresentou o mesmo valor para a direção e mergulho.

Evento (E): Foi considerado o ângulo de atrito igual a 20°.

Desta forma o valor de $P(E)$ foi de 4/4 que representa a frequência relativa do mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.

Evento (F): Neste caso a probabilidade é representada pela frequência relativa de cada intervalo e a intensidade de cada um.

Desta forma considerou-se:

$P(F \cap E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo. Logo,

$$P(F \cap E) = (60\% \times \frac{1}{4}) + (80\% \times \frac{3}{4})$$

$$P(F \cap E) = 75\%$$

Como $P(F/E) = P(F \cap E) / P(E)$ tem-se que:

$$P(F/E) = 75 / (4/4) = 75\%$$

Obs: Foram considerados todos os valores (todos os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito). Os valores são somados porque não é essencial a presença de ambos os intervalos (26-35° e 36-45°) basta a presença de apenas um deles.

Evento (G): Foi considerado o mergulho da descontinuidade entre 35-42° e duas classes de declividades (24-36° e 36-45°) ocupando aproximadamente 60 e 40% respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(G) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade da relação entre o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura e o mergulho do talude e y_j a frequência relativa da relação entre eles.

$$\text{Logo, } P(G) = (60\% \times 50\%) + (40\% \times 80\%)$$

$$P(G) = 62\%$$

Obs: Considerou-se a relação entre eles de 0-10° (50%) e 0-(-10) (80%).

Evento (H): Considerou-se a existência de 3 famílias de descontinuidades.

Desta forma, P(H) neste caso é de 75% (3/4) que representa a frequência relativa do número de famílias de descontinuidades não paralelas.

Evento (I): Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto P(I) é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional planar tem-se que:

$$P(trp) = (3/3) \times (1) \times (1) \times (1) \times (0,85) \times (0,75) \times (4/4) \times (0,62) \times (3/4) \times 0,596$$

$$P(trp) = 17,67\%$$

4.7.2 Escorregamento Translacional em Cunha

Este tipo de processo foi verificado para os cenários 11 (Foto 04 e 05 em ANEXO 2) e 23, sendo que os atributos presentes e necessários estão ilustrados na TABELA 35 e a seqüência utilizada na FIGURA 64 mostrada anteriormente.

Neste item, apresentam-se todos os atributos considerados nos cálculos da probabilidade para cada cenário.

4.7.2.1 Cenário 11

4.7.2.1.1 Encosta 1

Conhecida a seqüência (FIGURA 64), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem:

1. Idem item 1 considerado no cenário 7;
2. Todos os atributos são independentes exceto A e Ei;
3. A probabilidade de cada evento será expresso pela probabilidade absoluta de cada atributo, exceto para A que está condicionada a Ei;
4. 30% da encosta é constituída por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
5. A linha de interseção potencial para escorregamento translacional em cunha é representada pela interseção das descontinuidades F2 e F0 (foliação);
6. O plano de interseção formado por F2 e F0 é planar;

7. Duas descontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
8. Espaçamento da foliação (D) varia de 10 a 20cm;
9. Ângulo de mergulho da linha de interseção com potencial para escorregar varia entre 34-40°;
10. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da descontinuidade for igual ao ângulo de atrito do material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 40° para condição de equilíbrio;
11. Idem item 11 considerado no cenário 7;
12. Idem item 12 considerado no cenário 7;
13. A encosta é constituída de duas classes de declividade (17-24° e 24-36°) ocupando aproximadamente 20 e 80% da encosta respectivamente, como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);
14. Idem item 14 considerado no cenário 7;
15. A distância longitudinal (paralela a curva de nível) do cenário (L) é de 70m;
16. Atitudes da foliação apresentaram os seguintes valores: 200/35, 198/40 e 187/35 (conforme documento em ANEXO1);
17. Atitudes das Famílias de fraturas F1: 12/70, 05/75, 12/70, 20/70, 35/68 e 18/75 (conforme documento em ANEXO1);
18. Atitudes das Famílias de fraturas F2: 100/88, 104/85 e 92/80 (conforme documento em ANEXO1);
19. Atitudes da Lineação de Interseção F0 (foliação) e F2: 182/34, 183/40 e 182/34.
20. Atitudes da Linha de interseção (F0, F2) com potencial para escorregamento translacional em cunha é representado por 182/34(2/3) e 183/40 (1/3).
21. Atitude da encosta 1: 190/40 (direção de máximo mergulho);
22. Para os eventos relacionados ao paralelismo entre o plano de escorregamento e o contorno da superfície do terreno (Evento D) e a inclinação da descontinuidade ser suficiente para promover o escorregamento (Evento E) foram consideradas bidimensionais, pois se pretende analisar além da relação entre eles à intensidade;
23. Idem item 19 considerado no cenário 7;

24. A probabilidade do evento A será representado por $P(A/E_i)$ em que $P(A/E_i) = P(A \cap E_i) / P(E_i)$;

25. Idem item 21 considerado no cenário 7;

26. A probabilidade do Evento (E) será representada por $P(E)$ e como se trata de uma análise bidimensional sua equação geral será expressa por $P(E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \cdot q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo.

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional em cunha ($P(trc)$) é representada por:

$$P(trp) = P(E_i) \times P(A/E_i) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \times P(F) \times P(G) \times P(H) \times P(I)$$

Sendo que: $P(E_i)$, $P(A/E_i)$, $P(B)$, $P(C)$, $P(F)$, $P(G)$, $P(H)$, $P(I)$ foram considerados unidimensionais e $P(D)$ e $P(E)$ bidimensionais (FIGURA 64), e $P(A)$ dependente de E_i .

Apresenta-se a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional em cunha (FIGURA 64).

Evento Inicial (E_i): Neste caso pretende-se analisar a presença do substrato rochoso porque representa uma das condições para ocorrência do processo. A encosta foi considerada com ausência de material inconsolidado, uma vez que a mesma apresenta espessura de 20cm sendo assim desprezada.

Desta forma o valor estabelecido para $P(E_i)$ foi de 30% que representa a probabilidade absoluta da existência de rocha no cenário;

Evento (A): Pretende-se analisar a probabilidade condicionada de A dado E_i , ou seja, a probabilidade da superfície de ruptura ser bem definida dado a existência de rocha. Considerou-se A dependente de E_i porque somente o substrato rochoso apresenta descontinuidade.

Neste caso o cálculo será representado por $P(A/E_i) = P(A \cap E_i) / P(E_i)$.

Em que $P(A)$ é a frequência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e $P(E_i)$ a frequência relativa da presença de rocha no cenário logo:

$$P(A/E_i) = P(A \cap E_i) / P(E_i)$$

$$P(A/E_i) = 0,3/0,3 = 100\%.$$

Evento (B): Pretende-se analisar a presença de superfície potencial de ruptura planar. Foi considerado como superfície potencial de ruptura a lineação de interseção entre F0 e F2.

Sendo assim o valor estabelecido para P(B) foi de 70% porque nem toda a lineação foi considerada planar, ou seja, a frequência relativa da superfície de ruptura planar é de 70%.

Evento (C): Pretende-se analisar a relação D/L (deep and length) e a condição é que seja $\leq 0,1$ para ocorrência do processo em questão. Considerou-se D=10-20cm e L=70m. Desta forma a relação D/L assumiu um valor de 0,0014-0,0028, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para P(C) foi de 100% que representa a frequência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Pretende-se analisar o paralelismo entre a superfície potencial de ruptura (interseção foliação/F2) e a superfície do terreno (encosta). Neste caso foi considerada análise bidimensional, pois além da frequência relativa de cada intervalo interessa também a intensidade de cada um.

Para a análise do paralelismo considerou-se a relação entre atitudes da foliação e atitude da encosta (analisou-se separadamente relação entre as direções e entre os mergulhos em cada caso). Foram obtidos os seguintes valores: (08°/06°) e (07°/0°) respectivamente.

ANBALAGAN et al. (1993) estabeleceram valores diferentes de intensidades de acordo com o intervalo de paralelismo entre eles, são eles: 100% (<5°), 80% (6-10°), 60% (11-20°), 50% (21-30°) e 50% (> 30°).

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do paralelismo e y_j a frequência relativa de cada paralelismo.

Logo, $P(D) = (80\% \times 2/3) + (80\% \times 100\% \times 1/3) = 79,67\%$.

Obs: Os valores de intensidades devem ser multiplicados porque o paralelismo inclui a análise de ambas (direção e mergulho). Os valores obtidos da relação entre as atitudes da foliação e da encosta devem ser somados porque não é essencial a presença de todas elas para ocorrência do processo, basta a presença de apenas um deles. Para a 1ª medida utilizou-se apenas o valor de 80% porque a relação de paralelismo entre a atitude da foliação e a atitude da encosta apresentou o mesmo valor para a direção e mergulho.

Evento (E): Pretende-se analisar o mergulho da descontinuidade potencial de ruptura. Neste caso foi considerada análise bidimensional, pois além da relação

entre o mergulho da descontinuidade e o ângulo de atrito interessa também a intensidade. O mergulho deve ser maior que o ângulo de atrito para que o equilíbrio seja vencido. Os valores de intensidade, utilizados para cada intervalo de mergulho da descontinuidade, foram baseados em trabalhos de ANBALAGAN et al. (1993), são eles: 40% (< 15°), 50% (16-25°), 60% (26-35°), 80% (36-45°) e 100% (> 45°).

Desta forma considerou-se:

$P(E)=p(x_i,y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a freqüência relativa de cada intervalo. Logo, $P(E) = (60\% \times 2/3) + (80\% \times 1/3) = 66,67\%$.

Obs: Foram considerados todos os valores porque todos os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito. Os valores são somados porque não é essencial a presença de ambos os intervalos (26-35° e 36-45°) basta a presença de apenas um deles.

Evento (F): Pretende-se analisar a possibilidade de formação de uma cunha, sendo assim é necessário no mínimo duas famílias de descontinuidades. Neste caso, considerou-se $P(F)$ igual a 100% que representa a freqüência relativa da existência de no mínimo duas famílias de descontinuidades, conhecido que nesta encosta há três famílias de descontinuidades.

Evento (G): Pretende-se analisar a presença de duas famílias de descontinuidades que sejam contínuas e não paralelas. Logo, considerou-se $P(G)$ igual a 100% que representa a freqüência relativa de que as duas famílias de descontinuidades (analisadas anteriormente) sejam contínuas e não paralelas.

Evento (H): Pretende-se analisar o plano de escorregamento, ou seja, o plano potencial para ocorrência de escorregamento deve ser formado pela interseção de dois planos. Neste caso, tem-se a formação de três linhas de interseções entre F_0 e F_2 , logo $P(H)$ é representado por $3/3$ que é a freqüência relativa do plano de escorregamento potencial formado pela interseção das descontinuidades (F_2 e F_0).

Evento (I): Pretende-se analisar a probabilidade de ocorrência de uma chuva forte e prolongada. Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto $P(I)$ é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional em cunha tem-se que:

$$P(trc) = (0,3) \times (1) \times (0,7) \times (1) \times (0,7967) \times (0,6667) \times (1) \times (1) \times (3/3) \times (0,596)$$

$$P(trc) = 6,65\%$$

4.7.2.1.2 Encosta 2

Conhecida a seqüência (FIGURA 64), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem:

1. Idem item 1 considerado no cenário 7;
2. Idem item 2 considerado no cenário 11 encosta 1;
3. Idem item 3 considerado no cenário 11 encosta 1;
4. 30% da encosta é constituída por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
5. A linha potencial para escorregamento translacional em cunha é representada pela interseção das descontinuidades F2 e F1;
6. A linha de interseção formado por F2 e F1 é planar;
7. Duas descontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
8. Espaçamento da descontinuidade (D) varia de 40 a 60cm;
9. Ângulo de mergulho da linha de interseção com potencial para escorregar varia entre 68-72°;
10. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da descontinuidade for igual ao ângulo de atrito do material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 72° para condição de equilíbrio;
11. Idem item 11 considerado no cenário 7;
12. Idem item 12 considerado no cenário 7;
13. A encosta é constituída de duas classes de declividade (6-11° e 24-36°) como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);
14. Idem item 14 considerado no cenário 7;
15. A distância longitudinal (paralela à curva de nível) do cenário (L) é de 70m;
16. Atitudes da foliação apresentaram os seguintes valores: 200/35, 198/40 e 187/35 (conforme documento em ANEXO1);
17. Atitudes das Famílias de fraturas F1: 12/70, 05/75, 12/70, 20/70, 35/68 e 18/75 (conforme documento em ANEXO1);

18. Atitudes das Famílias de fraturas F2: 100/88, 104/85 e 92/80 (conforme documento em ANEXO1);

19. Atitudes da Lineação de Interseção F1 e F2: 19/70, 26/68 e 36/72.

20. Atitudes da lineação de interseção (F1, F2) com potencial para escorregamento translacional em cunha é representado por 19/70(4/6), 26/68 (1/6) e 36/72 (1/6).

21. Atitudes da encosta 2: 12/60 (direção de máximo mergulho);

22. Idem item 22 considerado no cenário 11 encosta 1;

23. Idem item 19 considerado no cenário 7;

24. Idem item 24 considerado no cenário 11 encosta 1;

25. Idem item 21 considerado no cenário 7;

26. Idem item 26 considerado no cenário 11 encosta 1;

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional em cunha ($P(trc)$) é representada por:

$$P(trc) = P(Ei) \times P(A/Ei) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \times P(F) \times P(G) \times P(H) \times P(I)$$

Sendo que: $P(Ei)$, $P(A/Ei)$, $P(B)$, $P(C)$, $P(F)$, $P(G)$, $P(H)$, $P(I)$ foram considerados unidimensionais e $P(D)$ e $P(E)$ bidimensionais (FIGURA 64) e $P(A)$ dependente de Ei .

Será apresentado a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional em cunha (FIGURA 64). Os procedimentos adotados serão os mesmos utilizados na primeira análise (cenário 11 encosta 1) por este motivo apresenta-se somente os valores considerados.

Evento (Ei): A encosta foi considerada composta somente por rocha porque o material inconsolidado apresenta uma espessura de até 20cm, sendo assim desprezada.

Desta forma o valor estabelecido para $P(Ei)$ foi de 30% que representa a probabilidade absoluta da existência de rocha no cenário;

Evento (A): Considerou-se A dependente de Ei porque somente o substrato rochoso apresenta descontinuidade (o material inconsolidado apresenta-se ausente de descontinuidade). O cálculo neste caso será $P(A/Ei) = 100\%$ que representa a probabilidade condicionada de A dado Ei , Sendo que $P(A)$ é a freqüência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e $P(Ei)$ a freqüência relativa da presença de rocha no cenário. Logo:

$$P(A/E_i) = P(A \cap E_i) / P(E_i)$$

$$P(A/E_i) = 0,3 / 0,3 = 100\%$$

Evento (B): Foi considerado como superfície potencial de ruptura a interseção entre F1 e F2. Sendo assim o valor estabelecido para P(B) foi de 70% porque nem toda a lineação entre F1 e F2 foi considerada planar, ou seja, a frequência relativa da superfície potencial de ruptura planar é de 70%.

Evento (C): Considerou-se $D=40-60\text{cm}$ e $L=70\text{m}$. Desta forma a relação D/L assumiu um valor entre 0,0057 e 0,0085, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para P(C) foi de 100% que representa a frequência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Pretende-se analisar o paralelismo entre a superfície potencial de ruptura (interseção entre F1 e F2) e a superfície do terreno (encosta). Foram obtidos os seguintes valores: $(07^\circ/10^\circ)$, $(14^\circ/08^\circ)$ e $(24^\circ/32^\circ)$ respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do paralelismo e y_j a frequência relativa de cada paralelismo.

$$\text{Logo, } P(D) = (80\% \times 4/6) + (60\% \times 80\% \times 1/6) + (50\% \times 60\% \times 1/6) = 66\%.$$

Obs: Para a 1ª medida utilizou-se apenas o valor de 80% porque a relação de paralelismo entre a atitude da foliação e a atitude da encosta apresentou o mesmo valor para a direção e mergulho.

Evento (E): Neste caso a probabilidade é representada pela frequência relativa de cada intervalo e a intensidade de cada um.

Desta forma considerou-se:

$P(E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo. Logo,

$$P(E) = (100\% \times 6/6) = 100\%.$$

Obs: Foram considerados todos os valores porque todos os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito e ainda todos eram maiores que 45° ($68-72^\circ$).

Evento (F): Considerou-se P(F) igual a 100% que representa a frequência relativa da existência de no mínimo duas famílias de descontinuidade, conhecido que nesta encosta há três famílias de descontinuidades.

Evento (G): Considerou-se P(G) igual a 100% que representa a frequência relativa de que as duas famílias de descontinuidades (analisadas anteriormente) sejam contínuas e não paralelas.

Evento (H): A linha de interseção potencial para translacional em cunha é formado pela família de descontinuidade F1 e F2. Neste caso, tem-se a formação de seis linhas de interseção entre F1 e F2, mas apenas cinco delas foram consideradas como potencial (paralelismo de até 20°), logo P(H) é representado por 5/6 que representa a freqüência relativa da linha potencial de escorregamento formada pela interseção das descontinuidades F2 e F1.

Evento (I): Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto P(I) é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional em cunha tem-se que:

$$P(trc) = (0,3) \times (1) \times (0,7) \times (1) \times (0,66) \times (1) \times (1) \times (1) \times (5/6) \times (0,596)$$

$$P(trc) = 6,88\%$$

4.7.2.2 **Cenário 23**

Conhecida a seqüência (FIGURA 64), é atribuída a probabilidade para cada evento a partir das considerações que se seguem.

1. Idem item 1 considerado no cenário 7;
2. Idem item 2 considerado no cenário 11 encosta 1;
3. Idem item 3 considerado no cenário 11 encosta 1;
4. 3/3 do cenário (topo, meia encosta e base) é constituído por rocha (Quartzito) foliada e fraturada com intercalação de sericita;
5. O plano potencial para escorregamento translacional em cunha é representado pela interseção das descontinuidades F0 e F2;
6. O plano de interseção formado por F0 e F2 é planar;
7. Duas descontinuidades não paralelas entre si, e não paralelas com a foliação;
8. Espaçamento da foliação (D) é aproximadamente constante e igual a 20cm;
9. Inclinação do plano de interseção com potencial para escorregar é de 34-36°;
10. Considerando que o escorregamento ocorre quando $|i| = \phi_b$, ou seja, quando o ângulo de mergulho da descontinuidade for igual ao ângulo de atrito do

material (GIANI, 1992), o ângulo de atrito básico deveria ser maior que 36° para condição de equilíbrio;

11. Idem item 11 considerado no cenário 7;
12. Idem item 12 considerado no cenário 7;
13. O cenário é constituído de duas classes de declividade (24-36° e 36-45°) como ilustrado na carta de declividade (FIGURA 51);
14. Idem item 14 considerado no cenário 7;
15. A distância longitudinal (paralela a curva de nível) do cenário (L) é de 40m;
16. Atitudes da foliação apresentaram os seguintes resultados: 210/36, 205/35 212/42 e 222/38 (conforme documento em ANEXO1);
17. Atitudes das Famílias de fraturas F1: 55/60, 60/53, 58/58, 51/52, 53/56 e 55/55 (conforme documento em ANEXO1);
18. Atitudes das Famílias de fraturas F2: 114/75, 118/85 e 111/58 (conforme documento em ANEXO1);
19. Atitudes da lineação de Interseção F0 e F2: 194/36, 180/34 e 206/36.
20. Atitudes de lineação de interseção (F0, F2) com potencial para escorregamento translacional em cunha é representado por 194/36 (1/3), 180/34 (1/3) e 206/36 (1/3).
21. Atitudes da encosta: 212/42;
22. Idem item 22 considerado no cenário 11 encosta 1;
23. Idem item 23 considerado no cenário 11 encosta 1
24. Idem item 24 considerado no cenário 11 encosta 1;
25. Idem item 21 considerado no cenário 7;
26. Idem item 26 considerado no cenário 11 encosta 1

Portanto, a probabilidade final estabelecida para o escorregamento translacional em cunha ($P(trc)$) é representada por:

$$P(trc) = P(Ei) \times P(A/Ei) \times P(B) \times P(C) \times P(D) \times P(E) \times P(F) \times P(G) \times P(H) \times P(I)$$

Sendo que: $P(Ei)$, $P(A/Ei)$, $P(B)$, $P(C)$, $P(F)$, $P(G)$, $P(H)$, $P(I)$ foram considerados unidimensionais e $P(D)$ e $P(E)$ bidimensionais (FIGURA 64) e $P(A)$ dependente de Ei .

Será apresentado a seguir, o cálculo de cada evento que compõe a seqüência necessária para translacional em cunha (FIGURA 64). Os procedimentos adotados serão os mesmos utilizados na primeira análise (cenário 11 encosta 1) por este motivo apresenta-se somente os valores considerados.

Evento (Ei): A encosta foi considerada composta somente por rocha porque o material inconsolidado apresenta uma espessura de até 10cm, sendo assim desprezada.

Desta forma, o valor estabelecido para $P(Ei)$ foi de 3/3 que representa a probabilidade absoluta da existência de rocha no cenário.

Evento (A): Considerou-se A dependente de Ei porque somente o substrato rochoso apresenta descontinuidade (o material inconsolidado apresenta-se ausente de descontinuidade). O cálculo, neste caso, será $P(A/Ei) = 100\%$ que representa a probabilidade condicionada de A dado Ei, sendo que $P(A)$ é a freqüência relativa da existência de uma superfície potencial de ruptura bem definida e $P(Ei)$ a freqüência relativa da presença de rocha no cenário. Logo:

$$P(A/Ei) = P(A \cap Ei) / P(Ei)$$

$$P(A/Ei) = 3/3 / 3/3 = 100\%.$$

Evento (B): Foi considerado como superfície potencial de ruptura a interseção entre F0 e F2. Sendo assim, o valor estabelecido para $P(B)$ foi de 70% porque nem toda a lineação entre F0 e F2 foi considerada planar, ou seja, a freqüência relativa da superfície potencial de ruptura planar é de 70%.

Evento (C): Considerou-se $D=20\text{cm}$ e $L=40\text{m}$. Desta forma, a relação D/L assumiu um valor de 0,005 e, portanto menor que 0,1 e conseqüentemente o valor estabelecido para $P(C)$ foi de 100% que representa a freqüência relativa da relação $D/L \leq 0,1$.

Evento (D): Pretende-se analisar o paralelismo entre a superfície potencial de ruptura (interseção F0 e F2) e a superfície do terreno (encosta). Foram obtidos os seguintes valores: $(18^\circ/06^\circ)$, $(32^\circ/08^\circ)$ e $(06^\circ/06^\circ)$ respectivamente.

Desta forma considerou-se:

$P(D) = p(xi,yj) = p(xi) \times q(yj)$ em que xi representa a intensidade do paralelismo e yj a freqüência relativa de cada paralelismo.

$$\text{Logo, } P(D) = (60\% \times 80\% \times 1/3) + (50\% \times 80\% \times 1/3) + (80\% \times 1/3) = 56\%.$$

Obs: Os valores de intensidades devem ser multiplicados porque o paralelismo inclui a análise de ambas (direção e mergulho). Os valores obtidos da relação entre as atitudes da foliação e da encosta devem ser somados porque não

é essencial a presença de todas elas para ocorrência do processo. Para a 3ª medida utilizou-se apenas o valor de 80% porque a relação de paralelismo entre a atitude da foliação e a atitude da encosta apresentou o mesmo valor para a direção e mergulho.

Evento (E): Neste caso a probabilidade é representada pela frequência relativa de cada intervalo e a intensidade de cada um.

Desta forma considerou-se:

$P(E) = p(x_i, y_j) = p(x_i) \times q(y_j)$ em que x_i representa a intensidade do intervalo de mergulho da descontinuidade e y_j a frequência relativa de cada intervalo. Logo,

$$P(E) = (60\% \times 1/3) + (80\% \times 2/3) = 73\%.$$

Obs: Foram considerados todos os valores porque todos os mergulhos das descontinuidades apresentaram-se maiores que o ângulo de atrito (34-36°). Os valores são somados porque não é essencial a presença de todos as descontinuidades para a ocorrência do processo.

Evento (F): Considerou-se $P(F)$ igual a 100% que representa a frequência relativa da existência de no mínimo duas famílias descontinuidades. Conhecido que neste cenário há três famílias de descontinuidades.

Evento (G): Considerou-se $P(G)$ igual a 100% que representa a frequência relativa de que duas famílias de descontinuidades (analisadas anteriormente) sejam contínuas e não paralelas.

Evento (H): A linha de interseção potencial para escorregamento translacional em cunha é formada entre a família de descontinuidade F0 e F2. Neste caso, tem-se a formação de três linhas de interseção entre F0 e F2, mas somente duas delas foram consideradas potencial, logo $P(H)$ é igual a 2/3 que representa a frequência relativa da linha de escorregamento potencial formado pela interseção das descontinuidades (F2 e F0).

Evento (I): Considerou-se o valor estabelecido por BONUCCELLI (1999). Portanto $P(I)$ é igual a 59,6% que representa a probabilidade da ocorrência de chuva forte e prolongada.

Considerando os valores de cada evento para a definição da probabilidade final para escorregamento translacional em cunha tem-se que:

$$P(trc) = (3/3) \times (1) \times (0,7) \times (1) \times (0,56) \times (0,73) \times (1) \times (1) \times (2/3) \times (0,596)$$

$$P(trc) = 11,37\%$$

5. CONCLUSÕES

A carta de cenários permite prever o tipo de processo juntamente com a sua probabilidade de ocorrência, bem como, analisar a variabilidade de ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa e sua probabilidade de cenário para cenário. Dessa forma, é possível o gerenciamento individual de cada cenário de acordo com o processo potencial. Com o estudo detalhado de partes da encosta é possível reduzir a variabilidade espacial existente e conseqüentemente obter uma informação minuciosa da área, reduzindo os níveis de incertezas existentes.

Os tipos de processos que predominam na área em estudo são os escorregamentos translacionais (rocha e material inconsolidado), seguido dos rolamentos e quedas (rocha e blocos de rocha), complexos (rocha e material inconsolidado), corridas (saprolito e residual evoluído) e escoamentos (detritos e residual evoluído).

Os cenários analisados (07, 04, 11 e 23) são constituídos por quartzito sericítico, com grau de alteração variando de levemente a intensamente alterada, com pequena cobertura de colúvio (cenário 04 < 2m, cenário 07, 11 e 23 \leq 20cm).

Todos os cenários (exceto 07) apresentam feições de movimentos gravitacionais de massa ativas com probabilidades e períodos de retorno ilustrados na TABELA 36 que se segue.

Comparando os valores de probabilidades obtidos para cada cenário com os limites de probabilidades apresentados por BIELSKI et al. (1988) (< 1% - zona segura, 1-10% - zona perigosa, > 10%- zona potencialmente perigosa), conclui-se que os cenários encontram-se em zonas perigosas (cenário 07, 04 e 11) e potencialmente perigosa (cenário 23).

Conhecido os tipos de processos, os valores de probabilidades e o período de retorno é possível um gerenciamento mais preciso das áreas, priorizando as áreas mais problemáticas.

TABELA 36. Resultados apresentados pelos cenários analisados.

CENÁRIO	TRANSLACIONAL PLANAR		TRANSLACIONAL EM CUNHA	
	Probabilidade	Período de retorno	Probabilidade	Período de retorno
07	3,71%	26,95 anos	–	–
04	1,9%	52,63 anos	–	–
11	Encosta1: 3,2% Encosta2: 1,73%	Encosta1: 31,25anos Encosta2: 57,8anos	Encosta1: 6,65 Encosta2: 6,88%	15 anos 14,53 anos
23	17,67%	5,66 anos	11,37%	8,79 anos

Obs: $P=1/T$

Em que P é a probabilidade e T o período de retorno.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho pode-se dizer que a metodologia proposta, para a realização desta pesquisa, tanto em termos de avaliação do processo potencial, quanto da avaliação probabilística dos movimentos gravitacionais de massa, mostrou-se satisfatória dentro do escopo do trabalho, no qual se utilizam considerações relacionadas a aspectos probabilísticos e árvores lógicas.

A utilização de árvores de eventos auxiliou na representação visual de todas as condições necessárias a ocorrência de cada movimento gravitacional de massa, e conseqüentemente na identificação da seqüência de atributos que deviam ser analisadas.

A listagem de atributos proposta por ZUQUETTE (1998), apresentada no capítulo 3 (TABELA 16), é a mais completa e deve servir de base e orientação para se executar os trabalhos de fotointerpretação e trabalhos de campo, nos estudos da relação entre atributos e ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. Entretanto, é necessária a inclusão de alguns atributos relacionados ao ângulo de atrito e coesão do material.

Recomenda-se a continuação dessa linha de pesquisa, uma vez que só foram realizadas as análises para os escorregamentos translacionais planar e em cunha.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, C. (1997) Landslides Disasters Management in Rio de Janeiro. 2nd COBRAE (Conferência Brasileira de Estabilidade de Talude) Rio de Janeiro – 1997, p. 209-212.

ANBALAGAN, R.; SHARMA, L.; TYAGI, S. (1993), Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping of a part of Doon Valley, Garhwal Himalaya, Índia. In: Environmental Management Geo-Water and Engineering Aspects Universit of Wollong – New South Wales – Austrália.

ANDERSON, M. G.; KEMP, M. J.; LLOYD, D. M. (1988) Applications of Soil Water Finite Difference Models to slope Stability Problems. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema V. 1. p. 525-530.

AUGUSTO FILHO, O. (1992a). Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilidade de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. AnaisRio de Janeiro: ABMS/ABGE/PCRJ. V.2, p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O (1997). Análise e Controle de Riscos Geológicos. In: XXXVI Semana de Estudos Geológicos Geologicos – Geologia e desenvolvimento Sustentável no final do século XX. Ouro Preto/UFOP/DEGEO –1997, p. 10-18.

AUGUSTO FILHO, O. (1994). Cartas de Risco de Escorregamento: Uma Proposta Metodológica e sua Aplicação no Município de Ilha Bela. Dissertação de Mestrado Escola Politécnica/USP. 162p .

- BARATA, F.E.** (1969). Landslides in The Tropical Region of Rio de Janeiro. In: ICSMFE, 7. México . ProceedingsMéxico: SMMS. V. 2. p. 507-516.
- BARBOSA, A. L. M.** (1968). Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero. IGC/UFMG, 44p.
- BATCHELOR, B.; VALDES, J.; ARAGANTH, V.** (1998) Stochastic Risk Assessment of Sites Contaminated by Hazardous Wastes In: Journal of Environmental Engineering v. 124 n.4 p. 380-388.
- BERGADO, D. T. ; MIURA, N. ; ONITSUKA, K. ; ANDERSON, L. R. ; BOWLES, D. S. ; SHARP, K. D.** (1988) Probabilistic Assessment of Earth Slope Stability by Variance Reduction and Nearest-Neighbor Methods. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema v. 1. p. 501-514.
- BERGGREN, B.; FALLSVIK, J.; VIBERG, L.** (1992) Mapping and Evaluation of Landslides Risk in Sweden. In Landslides v. 2 p. 873-878.
- BIELSKI, R.; GWIZDALA, K. ; SWINIANSKI, J.S. ; TEJCHMAN, A.** (1988) Stability Analysis of Sea Cliff Shore. In Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema v.1 p. 537-540.
- BONUCELLI, T.** (1995) Movimentos de Massa em Áreas Urbanas. Revisão bibliográfica. ESSC/USP, São Carlos, 60p.
- BONUCELLI, T. J.** (1999) Estudo dos Movimentos Gravitacionais de Massa e Processos Correlatos na área urbana de Ouro Preto, Minas Gerais. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos/Departamento de Geotecnia.
- BRABB, E. E.** (1991) The World Landslides Problem. Episodes. v. 14. n.1 p. 52-61.

- BUNCE, C. M.; CRUDEN, D.M; MORGENSTERN, N. R.** (1997) Assessment of the Hazard from Rock Fall on a Highway. In: Canadian Geotechnical Journal – v. 34 n.3 p. 344-356.
- CAMERON, R. F.** (1993). Incorporation human error in risk assessment. In: Probabilistic Risk and Hazard Assessment. Melchers & Stewart eds. p. 187-194.
- CARRARA, A. PUGLIESE, C.E. MERENDA, L.** (1977). Computer Based Data Bank and Statistical Analysis of Slope Instability Phenomena. Geomorphologie. Vol. 21 n.2, p 187-222.
- CARRARA, A. CATALANO, E. SORRISO VALVO, M. REALLI e OSSI, I.** (1978). Digital Terrain Analysis for Lnad Evaluation. Geologia Applicata e Idrogeologica, Vol. 13, p. 69-127.
- CARRARA, A. CARDINALI, M. DETTI, R. GUZZETTI, F. PASQUI, V. e REICHENBACH.** (1990). Geographical Information Systems and Multivariate Models in Landslide Hazard Evaluation. In Sixth International Conference and Field Wokshop on Landsslides, p 17-28.
- CARRARA, A.** (1983). Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation. Mathematical Geology, vol. 15, no. 3, p. 403-407.
- CARRARA, A.** (1988). Landslide Hazard Mapping by Statistical Methods: A “Black Box” Aproch. In Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries, p 205-224.
- CARRARA, A.** (1992). Landslide Risk Assessment. Proc. Of 1° Simposio Internacional sobre Sensores Remotos Y Sistemas de Informatiion Geografica el Estudio de Riesgos Naturales, p. 329-335.
- CHOWDHURY, R. N.** (1988) Analisys Methods for Assessing Landslide Risk ; Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema. p. 515-524.

- CLARKE, A. B. & DISNEY, R. L.** (1979). Probabilidade e Processos Estocásticos. Tradução de Gildásio Amado Filho – Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 338p.
- COROMINAS, J.; BAEZA, C. & SALUENA, I.** (1992). The Influence of Geometrical Slope Characteristics and Land Use on the Development of Shallow Landslides. Proceedings of 6th International Symposium on Landslides Christchurch, New Zealand, vol. 2, p. 914-924.
- COSTA NUNES, A. J.** (1969). Landslides in Soils of Decomposed Rock due to Intense Rainstorms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7. 1969. México. ProceedingsMéxico: SMMS. v. 2, p. 547-554.
- COSTA NUNES, A. J.** (1966). Estabilidade de Taludes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS, 2. Belo Horizonte. Anais....Belo Horizonte: ABMS. v. 1. p. 133-177.
- COTECCHIA, V.** (1977). Sytematic reconnaissance mapping and registration of slope movements. Bulletin of the IAEG, n. 17, p. 5-38.
- COX, D. R. & MILLER, H. D.** (1965). The Theory of Stochastic Processes. Imperial College, London, 398p.
- CRUDEN, D.M & HU, X.Q.** (1996) Hazardous Modes of Rock Slope Movement in the Canadian Rockies. Environmental & Engineering Geoscience. V.2, n.4 507-516p.
- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J.** (1996). Landslide types and Processes. In Turner, A. Keith and Schuster,R.B (editors), Landslides: Investigation and Mitigation: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report.

- DANTAS, (1997).** Probabilidade: Um Curso Introdutório. Editora da Universidade de São Paulo, 252p.
- DAVENPORT, W. B. (1970).** Probability and random processes. Department of electrical engineering study massachusetts institute of technology, McGraw-Hill Book Company, 542p.
- DE BIASE, M. (1970).** Cartas de declividade: Confecção e Utilização. Geomorfologia, n. 21 p. 8-13.
- DERBY, O. A. (1906).** The Serra do Espinhaço, Brasil. Journal of Geology, v.14, n.3, p. 374-401.
- DORR, J. N. (1969).** Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, D.N.P.M/U.S.G.S. 109p. (Prof. paper 641-A).
- DORR, J. N.; GAIR, J. E.; POMERENE, J. B.; RYNEARSON, G. A. (1957).** Revisão da Estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, DNPM, Div. Fomento, avulso 81: p. 1-31.
- ENDO, I. (1997).** Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e área adjacentes, Minas Gerais. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, 243 p.
- FELL, R. & HARTFORD, D. (1997).** Landslide Risk Management. Proceedings of the International Workshop on the Landslide Risk Assessment, Honolulu, p. 51-109.
- FINLAY, P. J.; FELL, R. & MAGUIRE, P.K. (1997).** The Relationship Between The Probability of Landslide Occurrence and Rainfall In: Canadian Geotechnical Journal. v. 34 n.6 p. 811-824.

- FONTES, S.B. & PEJON, O** (1999). Mapeamento Geotécnico com ênfase em Erosões no Município de Ouro Preto-Minas Gerais, escala 1:5000, São Carlos, 1999. 1v. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FRANKS, C. A. M.** (1999) Characteristics of some rainfall-induced landslides on natural slopes, Lantau Island, Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32. p. 247-259.
- FREIRE, E. S. M.,** (1965) Movimentos Coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. *Revista Construção*, Rio de Janeiro. V.8, n.95 p. 10-18.
- GIANI, G. P.** (1992). *Rock Slope Stability Analysis*. Technical University of Turin, 361p. A. A. Balkema Publishers.
- GOMES, R. C. & OLIVEIRA FILHO, W.L** (1993) Laudo Geotécnico do Grupo Escolar em Altiplano de Encosta no Bairro São Cristóvão, Relatório do convênio PMOP/UFOP, 11p.
- GOODMAN, R. & KIEFFER, D.S.** (2000) Behavior of Rock in Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 675-684.
- GRIVAS, D. A. & CHOWDHURY, R.N.** (1988). Two and Three Dimensional Progressive Failure of Slopes: Model development and implementation: *Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides*. Lausanne-Balkema v. 1, p. 643-648.
- GUIDICINI, G., & NIEBLE, C. M.,** (1976) *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo: Edgard Blucher, 170 p.
- HACH HACH, A.** (1997) Seminários Gerais SGS 833 Movimentos Gravitacionais de massa (inventário, mecanismo e monitoramento) EESC/USP. 83 p.

- HACHICH, W.** (1993) Decision Analysis for optimized urban risk management. In: Environmental Management Geo-Water and Engineering Aspects – Austrália, p. 687-692.
- HAMMOND, C. J.; PRELLWITZ, R. W.; MILLER, S. M.** (1992) Landslide Hazard Assessment Using Monte Carlo Simulation. In: Landslides v. 2, p. 959-964.
- HANSEN, A.** (1984) Landslide Hazard analysis. In: Slope instability. Chichester: Brunson & Prior. 523-602 pp.
- HARDER, E. C. & CHAMBERLIN, R. T.** (1915). The Geology of central Minas Gerais, Brasil. Journal of Geology, v. 23, p. 341-378.
- HARTLEN, J.; VIBERG, L.** (1988) Evaluation of Landslides Hazard : Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema, p. 1037-1057.
- HAYS, W.** (1992) Hazard and Risk Assessment in the United States. Episodes. V. 14, n.1, p. 7-12.
- HEARN** (1992). Terrain Hazard Mapping at Ok Tedi Mine, Papua New Guinea. Proceedings of 5th International Symposium on Landslides Lausanne, vol. 2, p. 971-976.
- HENLEY, E. J. & KUMAMOTO, H.** (1992). Probabilistic Risk Assessment. IEEE Press, N.Y.
- HOEK, E. & BRAY, J. W.** (1977). Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy. Second Edition.
- HUTCHINSON, J. N.** (1988). Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrology. Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema, p. 3-35.

HUTCHINSON, J. N., (1968) Mass Movement. In: Encyclopedia of Geomorphology. New York. Ed. R.W. Fairbridge. Reinhold Book, p. 688-700.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS (IGA) (1995). Desenvolvimento Ambiental de Ouro Preto – Microbacia do Ribeirão do Funil.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM) (1978). Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. Tradução: Marchi, A. J.; Cury Jr., A.; Alves Filho, A. et. al. São Paulo: ABGE/CBRM, 132P., 1983. Tradução de: "Suggested Methods for the quantitative description of rock masses" (International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, v. 15, n.6, p. 319-368, 1978).

JACKSON, S. D. F. & FELL, R. (1993). A Risk-based Approach to the Characterisation of Mine Waste Rock Embankments. In: Probabilistic Risk and Hazard Assessment. Melchers & Stewart eds. p. 95-109.

KEATON, J. R. & ECKHOFF, D.W. (1990). Value Engineering Approach to Geologic Hazard Risk Management. Transportation Research Record 1288, 168-174p.

KIENHOLZ, H. (1978). Maps of Geomorphology and Natural Hazards of Grindelwald, Switzerland, Scale 1:10.000. Arctic and Alpine Research 10, p. 169-184.

KLICHE, C. A. (1999). Rock Slope Stability. Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. 253p.

KÖPPEN, W. (1948). *Climatologia: com un estudio de los climas de la tierra*. FCE. México, FCE.

LEE, D. A. & BROWNE, J. M. (1993). Implications of varying probability in fault tree analysis. In: *Probabilistic Risk and Hazard Assessment*. Melchers & Stewart eds. p. 165-169.

LEROI, E., 1996 *Landslides Hazard – risk map at different scales: objectives, tools*. Proceedings of The Seventh International Symposium on Landslides. v.1 p. 35-51.

LOLLO, J. A. (1996). *O uso da técnica de Avaliação do Terreno no Processo de Elaboração do mapeamento geotécnico: Sistematização e Aplicação para a Quadricula de Campinas (S.P)*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo, 2v. 246p.

MAHLER, C. & OLIVEIRA, L. C. D. (2000). Risk Assessment in an Area Downstream of a Rock Massif Based on Consequences Evaluation. In. 5th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Belo Horizonte.

MALGOT, J. & MAHR, T. (1993). Engineering Geological Mapping of the West Carpathian Landslide Areas. *Bulletin International Association of Engineering Geologists*, n. 19, p. 16-21.

MELCHERS, R. E. (1993). On the Treatment of uncertainty information in PRA. In: *Probabilistic Risk and Hazard Assessment*. Melchers & Stewart eds. p. 13-26.

- MELCHERS, R. E. & STEWART, M. G.** (1993). Probabilistic Risk and Hazard Assessment. Proceedings of the Conference on Probabilistic Risk and Hazard Assessment – New Castle N.S.W – Australia, 253p.
- MEYER, P. L.** (1972). Probabilidade: Aplicações à Estatística. Departamento de Matemática – Washington State University. Tradução: Prof. Ruy de C. B. Lourenço Filho da Universidade Federal de Minas Gerais, 391p.
- MIAO, T.D.; AI, N. S.** (1988) Landslides Analysis and prediction by catastrophe theory. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema, p. 731-733.
- NALINI JR, H. A.** (1993). Análise estrutural descritiva e cinemática do Flanco sul e terminação periclinal do Anticlinal de Mariana e adjacências, Região Sudeste do Quadrilátero Ferrífero/M.G., Belo Horizonte, Brasil. Tese de mestrado, IGC/UFMG, 132p.
- NAWAR, G. & SAMSUDIN, R.** (1993). Evaluation and Control of human error in the management of engineering systems. In: Probabilistic Risk and Hazard Assessment. Melchers & Stewart eds. p. 179-186.
- NEULAND, H.** (1976). A Prediction Model for Landslips. Catena, 3 p. 215-230.
- NIANXUEL, Z. & ZHUPING, S.** (1992) Probability Analysis of Rain-related Occurrence and Revival of Landslides in Yunyang-Fengjie area in East Sichuan. In Landslides. V.2 1077-1083p.
- OBONI, F.; OBONI, & Associates** (1988) Analysis Methods and Forecasting of Behavior: Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema v. 1. p. 491-499.

- OLIVEIRA, A. & DIAS, E. C.** (1997) Zoneamento Geológico Geotécnico da Porção Urbana da Serra de Ouro Preto – Minas Gerais. Trabalho de Graduação UFOP/DEGEO, 85p.
- OMURA, H.; HICKS, D.** (1992) Probability of Landslides in Hill Country In: Landslides V. 2 1045 – 1049p.
- OTHTMAN, M. A.; HASSAN, N. R. N. & AZIZ, H. M. A.** (1992). A Statistical Approach to cut Slope Instability Problems in Peninsular Malaysia. Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides Christchurch – New Zealand, vol. 2, p. 1379-1385.
- OTT, W. R.** (1995). Environmental Statistics and Data Analysis. Lewis Publishers, 312p.
- PERROT, A.** (1988). Cartographie des Risques des Glissement en Lorraine. Proceedings of 5th International Symposium on Landslides Lausanne, vol. 2, p. 1217-1222.
- PRICE, D. G.** (1993). A suggested method for classification of rock mass weathering by ratings system. Quaterly Journal of Engineering Geology, v. 26, p. 69-76.
- RAGOZIN, A. L.** (1993). Risk Assessment and Cartography of Natural Hazards (history and methodology). Safety problems in emergencies, vol. 3, p. 16-41.
- RAGOZIN, A. L.** (1994). Basic Principles of Natural Risk Assessment and Management. 7th International IAEG Congress, vol. 3, p. 1277-1286.
- RAHMAN, M. S.; HWANG, C. H.; JABER, W. Y.** (1988) Probabilistic Analysis for Wave or earthquake induced instability os submarine slopes. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema V. 1 743-747 pp.

- RAHN, P. H.** (1986). Engineering Geology: an environmental approach. New York, Elsevier Science Publishing, 589p.
- READ, J. R. L. & HARR, M. E.** (1988) Slope Stability Analysis Using the Principle of Maximum Entropy. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema, v. 1, p.749-755.
- REID, S. G.** (1993). Probabilistic Risk Acceptance and Safety Standards for Architectural Glazing. In: Probabilistic Risk and Hazard Assessment. Melchers & Stewart eds. p. 233-242.
- RELEX SOFTWARE CORPORATION** (2001). Visual Reliability Software "the intuitive solution". <http://www.event-tree.com> e <http://www.fault-tree.com> .
- RUNQIU, H. & YUANGUO, L.** (1992). Logical Message Model of Slope Stability Prediction in Three Gorges Reservoir Area-China. Proceedings of 6th International Symposium on Landslides Christchurch, New Zealand, vol. 2, p. 977-981.
- SANTOSO, D. & SUKMONO** (1993). Some landslide along Nabire-Epomani highway, Irian Jaya, Indonesia. Environmental Management, Geo-Water & Engineering Aspects. Chowdhury & Sivakumar editors, p. 317-322.
- SHEKO, A. I.** (1994). Assessment of Danger and Risk of Exogenic Geological Processes (landslides, collapses, mud flows, etc.). Proceedings of 7th International IAEG Congress, vol. 3, p. 1335-1340.
- SIDLE, R.C.; PEARCE, A.J.; O'LOUGHLIN, C.L.** (1985) Hillslope Stability and Land Use. American Geophysical Union. Washington D.C, 140p.
- SILVA, M.M.O & PEJON, O.** (2001) Investigação e Análise dos Movimentos de Massa Gravitacionais e Processos Correlatos na região da Serra de Ouro Preto – escala: 1:5000. Tese de mestrado. Instituto de Geociências e Ciências exatas – Campus de Rio Claro- Universidade Estadual de São Paulo, 160p.

- SILVA, P. A. L.** (1998). Princípios dos Métodos Estatísticos: Conceitos, modelos e aplicações no Excel. Rio de Janeiro - Editora Universitária Santa Úrsula, 195p.
- SIMMONS, G. E. & MAXWELL, C. H.** (1961). Grupo Tamanduá da Série Rio das Velhas. Rio de Janeiro, DNPM/dgm, 30p (boletim 211).
- SIMON, A.; MATTHEW, C.L.; CLIFF, R.H.** (1990) The role of soil processes in determining mechanisms of slope failure and hillslope development in a humid-tropical forest, eastern Puerto Rico. *Geomorphology*, 3. 263-286p.
- SOBREIRA, F. G.** (1993) Riscos Geológicos: Definição dos Pontos Críticos em Ouro Preto. *Revista Escola de Minas*, v.46,n.2p. 213-223p.
- SOETERS, R. & VAN WESTEN, C.J.** (1996) Slope instability Recognition, Analysis, and Zonation. In Turner, A. Keith and Schuster, R.B (editors), *Landslides: Investigation and Mitigation: Transportatio Research Board, National Academy of Sciences, Special Report*.
- SOUZA, M. L.** (1996) Mapeamento Geotécnico da Cidade de Ouro Preto – Minas Gerais (escala 1:10.000). Susceptibilidade aos Movimentos de Massa e Processos Correlatos. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SOUZA, M. L. & COSTA, T. A. V.** (1994). Mapeamento Geológico-Geotécnico com considerações de geologia ambiental na Bacia do Ribeirão do Carmo entre os municípios de Ouro Preto e Mariana. Trabalho de Graduação. Departamento de Geologia, Escola de Minas, UFOP, 133p.
- TURNER, K.** (1996) Colluvium and Tallus. *In* Turner, A. Keith and Schuster, R.B (editors), *Landslides: Investigation and Mitigation: Transportatio Research Board, National Academy of Sciences, Special Report*.

UNDRO (1988) Resolution on the International decade on natural disaster reduction. Undro News. P2 Jan/Fev.

UNDRO (1978) Disaster prevention and mitigation: a compedium of current Knowledge. N.Y v. 5 Land use aspects, 690 p.

UNESCO (1979). Annual Summaries of Information on Natual Disasters.

VARNES, D.J. (1978). Landslides Types and Processes. In: Landslides and Engineering Praticce. E.B. Eckel (ed). Special Report n.29 Highway Research Board 20-47 p.

VARNES, D. J. (1984) Landslides Hazard Zonation: A Review of Principles, and Praticce. Comission on Landslides of IAEG/UNESCO – Natural Hazard n. 3, 61 p.

VARNES, D. J. (1985). Landslide Hazard Zonation: Review of Principle and Practice. UNESCO, Paris.

WALLACE, R.M. (1958). The Moeda Formation. Boltein da Sociedade Brasileira de Geociências – São Paulo, SBG. 7(2), p. 59-60.

WOLLE, C. M. (1980) Taludes Naturais: Mecanismos de Instabiização e Critérios de Segurança. São Paulo. (Dissertação de mestrado apresentado na Escola Politécnica/USP, 345 p.

WOLLE, C. M. (1981a) Microescorregamentos na Serra do Mar. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro. Anais Rio de Janeiro: ABMS. v.1, p. 773-785.

WOLLE, C.M. (1988) Análises dos Escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas. São Paulo. Tese de doutorado apresentado na Escola Politécnica da USP.

WONG, H. N.; HO, K. K. S. & CHAN, Y. C. (1997). Assessment of consequence of landslides. Proceedings International Workshop on Landslide Risk Assessment. Honolulu, A. A. Balkema, p. 111-149.

WONG, H.N. & HO, K.K. (1997). The 23 July 1994 landslide at Kwun Lung Lau, Hng Kong. Canadian Geotechnical Journal. 34: p. 825-840.

YIN, J. L.; YAN, T. Z. (1988) Statitital Prediction for Slope instability of metamorphosed rocks. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne-Balkema V.2. 1269 – 1272 pp.

ZENÓBIO, A. & ZUQUETTE, L. V. (2000) Avaliação Geológica-Geotécnica de encostas Naturais Rochosas por meio de Classificações Geomecânicas: área urbana de Ouro Preto (MG) escala 1:5.000. 2v.

ZUQUETTE, L. V. (1998) Proposta metodológica para análise de eventos perigosos. Geociências (no prelo).

ZUQUETTE, L. V.; BONUCCELLI, T.J.; ZENÓBIO, A. A. & SILVA, M.M.O. (1996) Avaliacion de Movimientos de masas en macizos rocozos a través de classificaciones geomecánicas Y analisis cinemáticos en la ciudad de Ouro Preto, Brasil. Anais: IV SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE RIESGOS GEOLÓGICOS – SAN JOSE, COSTA RICA.

ANEXOS

ANEXO 01- TABELA DE CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS

<i>COMPONENTES</i>	<i>PROCESSOS ANTERIORES</i>		<i>EROSÃO</i>	<i>VEGETAÇÃO</i>	
<i>ATRIBUTOS</i>	Depósitos onundos de movimentos de massa antigos e cicatrizados (não colúvios típicos)	Depósitos onundos de movimentos de massas recentes	Feições erosivas concentradas	Tipo (natural, reflorestamento)	Profundidade das raízes
<i>QUANTIFICAR/SISTEMA CLASSIFICATÓRIO</i>	Distribuição, Espessuras, Tipos Classificação: Talus, colúvios, blocos rolados	Distribuição Volumes	Registros quanto ao tipo, Característica geométrica e geomórfica	Distribuição	Distribuição
<i>CENÁRIO 07</i>	-	-	ravinas	natural pequeno porte	rasa
<i>CENÁRIO 04</i>	cicatriz de MMG (complexo) antigo e recente	-	-	natural pequeno a médio porte	rasa
<i>CENÁRIO 11</i>	cicatriz de MMG (complexo) antigo e recente	presença de blocos	sulcos e ravinas	natural de pequeno a médio porte	rasa
<i>CENÁRIO 23</i>	cicatriz de MMG (complexo) antigo e recente escorregamento translacional (aproximadamente 10m)	rolamento de blocos	sulcos e ravinas	natural médio porte	rasa

SUBSTRATO ROCHOSO

Áreas com rochas aflorantes	Litologia/Litotipo	Alteração de materiais com diferentes níveis de competência	Grau de intemperismo	Alteração de materiais com diferentes níveis de resistência	Materiais com estruturas intercaladas com outros	Grau de paralelismo entre o topo rochoso e a superfície do terreno	Grau de irregularidade do topo rochoso	Tipo de contato entre os materiais diferentes	Tipo de contato entre os materiais rochosos e os inconsolidados	Tipos de descontinuidades	Densidade das descontinuidades	Abertura das descontinuidades	Preenchimento das descontinuidades	Descontinuidades geradas por alívio de tensões e ou por atividades antrópicas	Persistência das descontinuidades	Conectividade das descontinuidades	Perfil de alteração homogêneo ou evidenciou as descontinuidades	Relação entre a direção das descontinuidades e a direção da escosta	Relação entre o sentido do mergulho das descontinuidades e a inclinação da escosta	Relação entre o ângulo de mergulho das descontinuidades e o mergulho da escosta	Zonas de falhas ou intersemente fraturadas	Presença de descontinuidades específicas	Direção do vetor de soltamento de blocos	Camadas litológicas que tenham comportamento de descontinuidades
Litotipo	Resistência, mecânica (tracés e dura)	Número de repetições	Classificação de IABO (1976), Brand (1992), Working Party (1995)	Espessuras	Porcentagem Distribuição	Ângulo entre eles e direção dos mergulhos	Profundidades e direção de ventrâncias	Regular e Planar	Gradacional	Gênese Geométria	Totais Por tipo	Por tipo ISRM (1983)	Espessura Tipo de material	Distribuição Características geométricas Atividade geradas	ISRM (1983) Ojai (1992)	Classificação considerando os diferentes tipos	Contínuo Descontínuo	Ângulos entre eles	Ângulos entre as direções	Ângulos entre as direções	Largura Características	Camadas com pequena espessuras contatos	Considerar centro de massa do bloco em análise, Inclinação das escostas	Repetição no pacote Análise segundo uma descontinuidade
quartzito	quartzito: (ISRM) frível: rocha fraca; resistente: resistente		quartzito: (ISRM) (muito alterado 'as vezes pouco)	quartzito frível/quartzito resistente		20 graus	planar					fratura preenchida com quartzo (2cm) família 330/80	quartzo	grande (>10 m)	formando blocos	homogêneo	escosta: 242/20, 255/50	ver descontinuidades e escosta	ver descontinuidades e escosta				74 graus	
quartzito	resistente		levemente alterado			o terreno é paralelo à foliação	planar					aberturas variando de 2 e 30 cm (família F1)	sem preenchimento	foliação: grande F1 grande (aprox. 5m)	interceptam formando blocos	evidenciou	escosta: 138/40	ver descontinuidades e escosta	ver descontinuidades e escosta				276 graus	
quartzito	quartzito frível: fraca quartzito duro: resistente quartzito:		quartzito frível: muito alterado; quartzito duro pouco alterado e alterado	quartzito duro e frível		paralelo	planar							grande (foliação)	interceptam	homogêneo	escosta1: 190/40 escosta2: 12/60	ver descontinuidades e escosta	ver descontinuidades e escosta				escosta1: 95 graus escosta2: 290 graus	
quartzito	resistente a muito resistente		levemente alterado			paralela	planar							média a grande (2 e 5m)	interceptam	homogêneo	escosta: 212/42	ver descontinuidades e escosta	ver descontinuidades e escosta				50 graus	

ÁGUAS

Pequenas lagoas nos canais de drenagem	Relações do N.A. com depósitos de materiais retrabalhados naturais	Diferentes níveis de surgências em uma mesma encosta	Evidências de "piping" associado as surgências em encostas	Zonas de surgência de água	Zonas saturadas suspensas
Frequência Distribuição	Geometria Variação anual	Diferenças de altitudes	Intensidade Material associado	(provisoria/permanente)	Cotas Espessuras Distribuição
água permanente				nascente permanente no pé da encosta	
	sim (águas pluviais) vários encanamentos de água das nascentes muito precários				

MATERIAL INCONSOLIDADO

Heterogeneidade do perfil de alteração/textura dos materiais	Presença de matenas consistentes e inconsistentes intercalados	Matenas permeáveis e impermeáveis intercalados	Tipos de contatos entre os retrabalhados e residuais	Matenas com esmectitas intercalados a outros	Espessuras	Encostas com matenas inconsolidados originados da alteração de diferentes tipos rochosos	Matenas com diferentes níveis de resistência intercalados	Matenas com diferentes índices de erodibilidade intercalados	Posição dos materiais retrabalhados nas encostas	Heterogeneidade do pacote de materiais retrabalhados	Presença de matações próximo à superfície	Posição dos matações na topografia e em relação com as formas das encostas	Matenas inconsolidados residuais com descontinuidades mantidas e paralelas a superfície das encostas
Descontinuidades devido a evolução Working Party, (1990)	Espessuras Profundidade da primeira ocorrência	Espessuras Profundidade da primeira ocorrência	Presença de seixos/lentilhas (espessuras) Regular Irregular	Porcentagem Espessura Profundidade Confinamento	Para cada variação no perfil	Seqüência (topo/base)	Espessura Profundidade da primeira ocorrência	Espessura Profundidade da primeira ocorrência	Topo/ base	Colúvio/talus Blocos (tamanho,	Profundidade, Tamanho dos matações, Posição do centro de massa, Posição em relação aos canais de drenagens	Tamanho do matação Base/sumo/topo	Frequência Profundidade Grau de paralelismo
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	blocos e meia encosta e na base colúvio e talus	quartzito: 110(1m), 46(2m), 22(3m), 9(5m), canga: 1(2m), 1(3m); filito: 1(1m), 1(5m).	quartzito: 37(1m), 15(2m), 1(5m), canga: 1(2m), 1(3m), filito: 1(5m), enterrados até topo e 3(3m) até o meio. Os outros estão soltos.	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	blocos e talus na base da encosta	quartzito: 157(1m), 122(2m), 45(3m), 34(4m), 2(6m). canga: 1(2m).	quartzito: 35(1m), 61(2m), 16(3m), 3(4m) enterrados até o meio, e os outros soltos. Obs: vários blocos grandes (> 3m) estão enterrados até o topo por outros blocos, sendo difícil contá-los.	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	blocos	encosta1 (quartzito): 46(1m), 12(2m), 6(3m), 4(4m); canga: 7(1m), 2(2m), 1(3m). encosta2 (quartzito): 24(1m), 5(2m), 3(3m), 4(4m); canga: 3(1m), 2(2m), 1(3m).	blocos soltos	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	blocos	quartzito: 92(1m), 14(2m), 7(3m), 1(4m), 2(5m).	quartzito: 38(1m), 5(2m), 2(3m), 1(4m), 2(5m) enterrados até o topo e os outros blocos estão soltos.	-

AÇÃO ANTRÓPICA					RELEVO		OBSERVAÇÃO
Escavações	Posição das escavações nas encostas	Relação ente as escavações x as descontinuidades e as anomalias litológicas	Locais de disposição de resíduos e rejeitos em superfície ou raso	Ocupações que afetam o fluxo das águas subsuperficiais	inversões da direção das inclinações de partes das encostas	Direção, mergulho e sentido do vetor de maior declividade	
Dimensões	Distribuição	Distribuição	Tipo	Tipo	numero de inversões (frequência); Direção do maior valor de declividade, Declividade da porção invertida;	Classes padrões	
Densidade			Volume	Distribuição			
			Umidade				
-	-	-	-	-	-	235/36	Extensão deste cenário é de 160m e 80m de altura. Pacote de quartzito alternando-se em fráveis e resistentes. Onde o quartzito é mais frável é erodido ficando uma placa de quartzito resistente que com o tempo sofre basculamento.
-	-	-	-	-	-	325/16	Extensão deste cenário é de 200 e 50m de altura. Pacote de quartzito bem espesso, muito fraturado, com fraturas abertas. No pé da encosta pode-se observar água corrente e vários blocos menores que 50cm ao longo da base da encosta.
-	-	-	-	-	2	293/45	Extensão deste cenário é de 70m e 20m de altura. Pacote de quartzito bem espesso intercalando-se em frável e duro. Drenagem sem água.
-	-	-	-	-	-	225/45	Extensão deste cenário é de 40 a 50m e 50m de altura. Pacote de quartzito com escorregamento translacional de aprox.

ANEXO 02 – ARQUIVO FOTOGRÁFICO



FOTO 01 – Vista Geral do Cenário 04.

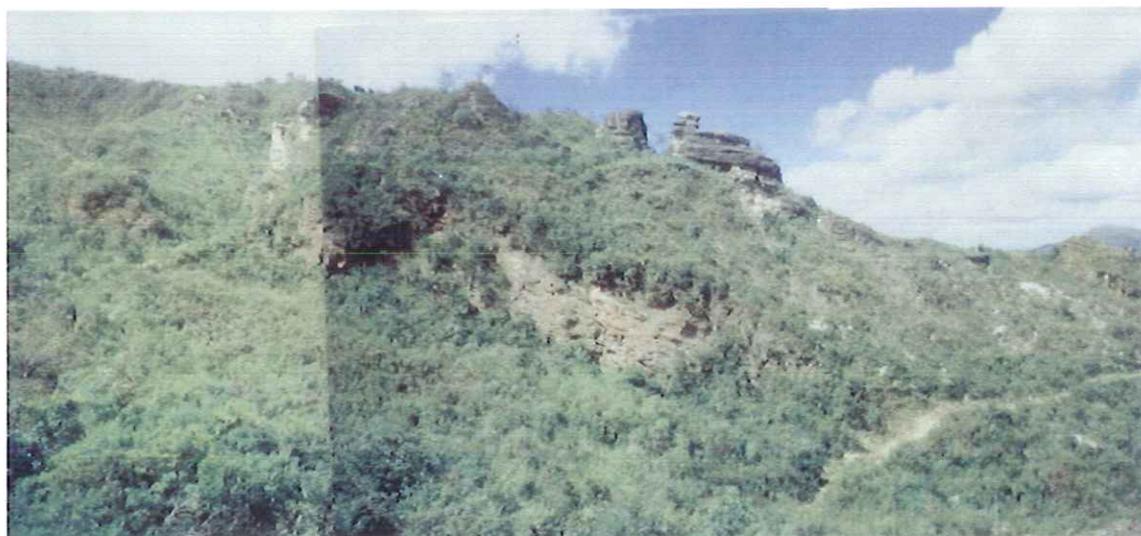


FOTO 02 – Vista Geral do Cenário 07.



FOTO 03 – Vista Geral dos Cenários 09 e 10.



FOTO 04 – Vista Geral do Cenário 11 (encosta 1).



FOTO 05 – Vista Geral do Cenário 11 (encosta 2).



FOTO 06 – Vista Geral do Cenário 13.



FOTO 07 – Vista Geral do Cenário 13 e 22.



FOTO 08 – Vista Geral do Cenário 19.