

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Juliana Koltermann da Silva

**AVALIAÇÃO DO RISCO GEOTÉCNICO DE TALUDES:
REVISÃO DE PRÁTICAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS**

Porto Alegre
dezembro 2016

JULIANA KOLTERMANN DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO RISCO GEOTÉCNICO DE TALUDES:
REVISÃO DE PRÁTICAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientador: Luiz Antônio Bressani

Porto Alegre
dezembro 2016

JULIANA KOLTERMANN DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO RISCO GEOTÉCNICO DE TALUDES:
REVISÃO DE PRÁTICAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2016

Prof. Luiz Antônio Bressani
Ph.D. pela Imperial College London, Grã-Bretanha
Orientador

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Relator

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)
Ph.D. pela Imperial College London, Grã-Bretanha

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eli Antônio da Costa (UFRGS)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Régio e Tânia, pelo amor incondicional e apoio incessante, que me impulsionaram a conquistar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me possibilitado a conclusão de mais uma etapa da vida com saúde, muitos conhecimentos e experiências adquiridos, junto a pessoas das quais me lembrarei para sempre.

Agradeço aos meus pais Tânia e Régio, e à minha irmã Débora, pelo companheirismo, amor e atenção que sempre me dedicaram, em todos os momentos e, principalmente, naqueles que mais precisei. Vocês me apoiaram em todos os meus projetos, me deram forças pra continuar em frente nas situações difíceis e estavam sempre ao meu lado para comemorarmos as conquistas. Somente consegui realizar esse sonho com vocês.

Agradeço também a todos os demais familiares, pela compreensão durante todos esses anos, pelo carinho e pelas palavras reconfortantes e encorajadoras. Em especial, às minhas avós Nelcy e Marina, e às minhas tias Nilce e Zuleide, que me acompanharam de perto em todos os momentos da minha vida, me transmitindo ensinamentos e princípios, os quais contribuíram para minha formação.

Agradeço a todos professores que tive durante minha vida acadêmica, desde o ensino fundamental até o superior, que me instigaram a buscar mais conhecimento, a dar o melhor de mim em todos os meus projetos e também, de alguma forma, a seguir a carreira da Engenharia Civil.

Agradeço ao Prof. Luiz Antônio Bressani, orientador deste trabalho, pelas discussões sempre muito pertinentes e produtivas sobre o assunto do trabalho, pelos conselhos e apoio recebidos durante este último ano de graduação, e pelas aulas de Mecânica dos Solos II, que me inspiraram a seguir a área geotécnica da Engenharia Civil.

Agradeço, por fim, às minhas amigas do Colégio Mãe de Deus, aos meus amigos presentes desde os primeiros semestres de faculdade, aos amigos/*flatmates* conhecidos durante o meu intercâmbio em Bristol e aos amigos adquiridos no decorrer do curso de graduação, em especial àqueles que me acompanharam durante esses últimos semestres exaustivos e que me apoiaram para chegar ao sonhado momento da colação de grau.

To see the world, things dangerous to come to, to see
behind walls, draw closer, to find each other and to feel.
That is the purpose of life.

The Secret Life of Walter Mitty

RESUMO

Este trabalho discute as diversas metodologias e práticas existentes no Brasil e em países estrangeiros sobre Avaliação de Riscos Geotécnicos de Taludes, com ênfase em taludes rodoviários. Primeiramente, abordaram-se os diferentes tipos de movimentos de massa aos quais taludes naturais e projetados são suscetíveis, com uma atenção especial aos fatores preparatórios, aos elementos desencadeadores de deslizamentos e aos indicadores visuais de movimentação. Após, apresentaram-se os conceitos e a terminologia envolvida no âmbito de gerenciamento de risco de deslizamentos, com o objetivo de uniformizar a interpretação dos conceitos utilizados no decorrer do trabalho, juntamente com o *framework* utilizado para padronizar as apresentações e a posterior análise das metodologias pesquisadas. Na primeira parte do trabalho, expuseram-se duas metodologias brasileiras para avaliação de risco geotécnico de taludes, uma com abordagem qualitativa, publicada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, e outra de cunho quantitativo, proposta por Costa (2005). Na segunda parte do trabalho, detalhou-se a metodologia apresentada por Fell et al. (2005), que oferece métodos para realizar análises de risco geotécnico, tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Para facilitar o entendimento da aplicação dessa metodologia, exibiu-se um exemplo de avaliação de risco de deslizamentos em um aterro rodoviário hipotético e apresentaram-se adaptações da mesma para casos de estudos reais no Canadá, no Nepal e na Austrália. Constatou-se que, apesar da relativa facilidade em se executar análises qualitativas de risco geotécnico, essas não são recomendadas, especialmente quando avaliam riscos a pessoas. Isso se deve ao grande teor de subjetividade dos descritores qualitativos utilizados para a estimativa do risco. Concluiu-se que as abordagens puramente qualitativas podem levar a um mau entendimento dos fatores que compõem o risco e, por isso, descritores numéricos relacionados aos Fatores de Segurança dos taludes podem tornar-se uma alternativa para a melhor compreensão do risco geotécnico nos projetos brasileiros. De fato, os Fatores de Segurança dos taludes já são relacionados aos níveis de segurança desejados em projetos, através da NBR 11.682 (2009). Uma abordagem qualitativa, de cunho numérico, apresenta-se no momento como uma opção para evitar a caracterização do risco geotécnico como alto, médio ou baixo, propiciando uma melhor compreensão do risco existente em taludes entre a sociedade e os profissionais geotécnicos brasileiros.

Palavras-chave: Avaliação de Risco Geotécnico, Taludes, Metodologia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento das perdas econômicas devido a desastres naturais	17
Figura 2 – Tendência de ocorrência de desastres naturais	18
Figura 3 – Diagrama com as etapas do trabalho	23
Figura 4 – Talude Natural ou Encosta	26
Figura 5 – Talude de Corte e Talude de Aterro	26
Figura 6 – Dimensões geométricas básicas de uma encosta	26
Figura 7 – Quedas de blocos rochosos	30
Figura 8 – Corte de talude exemplificando matacão suscetível a rolamento	31
Figura 9 – Tombamento de blocos rochosos	32
Figura 10 – Escorregamento Circular ou Rotacional	34
Figura 11 – Escorregamento Planar ou Translacional	35
Figura 12 – Escorregamento em Cunha	36
Figura 13 – Espalhamento Lateral	37
Figura 14 – Fluxo de detritos	38
Figura 15 – Rastejo de solo	39
Figura 16 – Relações entre definições básicas	47
Figura 17 – Elementos em risco a um deslizamento	48
Figura 18 – <i>Framework</i> para análise, avaliação e gerenciamento de risco geotécnico	49
Figura 19 – Função Densidade de Probabilidade Normal	65
Figura 20 – Função Densidade de Probabilidade Triangular para probabilidades subjetivas	65
Figura 21 – Termos utilizados para o cálculo do Índice de Confiabilidade	68
Figura 22 – Relação entre Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura para um Fator de Segurança com distribuição de probabilidades Normal	69
Figura 23 – Árvore de Eventos para modelo do processo de instabilização	70
Figura 24 – Exemplo de gráfico indicando o critério de tolerância ao risco de uma sociedade (Curva F-N)	88
Figura 25 – Deslizamento em um aterro rodoviário	93
Figura 26 – Avaliação da tolerabilidade de risco para sociedade através de uma Curva F-N	97
Figura 27 – Modelos de frequência x volume dos deslizamentos para as várias unidades de encosta	108
Figura 28 – Leiaute de planilha utilizada para um perigo, local e unidade de encosta em particular	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação abreviada de movimentos de massa por Varnes (1978)	29
Quadro 2 – Escala de Velocidades por Cruden e Varnes (1996)	29
Quadro 3 – Classificação de deslizamentos por Augusto Filho (1992)	54
Quadro 4 – Critérios para a determinação dos graus de risco	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas qualitativas de possibilidade de um deslizamento	80
Tabela 2 – Medidas qualitativas de consequências à propriedade	83
Tabela 3 – Matriz qualitativa de análise de risco – classes de risco à propriedade	87
Tabela 4 – Critérios para riscos toleráveis e aceitáveis em taludes projetados	91
Tabela 5 – Fatores de Probabilidade (PF)	100
Tabela 6 – Fatores de Consequência (CF)	102
Tabela 7 – Níveis de resposta sugeridos e suas respectivas abordagens de gerenciamento, conforme os níveis de risco	103
Tabela 8 – Matriz qualitativa de perigo de instabilidades de taludes, de acordo com o tipo de ruptura	105
Tabela 9 – Matriz de qualitativa vulnerabilidade da rodovia	106
Tabela 10 – Níveis de risco e soluções possíveis	106
Tabela 11 – Algumas vulnerabilidades para deslizamentos adotadas no projeto	109
Tabela 12 – Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas	115
Tabela 13 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais	115
Tabela 14 – Fatores de segurança mínimos para deslizamentos	115

LISTA DE SIGLAS

AGS – *Australian Geomechanics Society*

ALARP – *As Low As Reasonably Practicable*

CDF – *Cumulative Distribution Function*

CEPED/RS – Centro de Estudos e Pesquisas sobre Desastres

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

JTC-1 – *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes*

LHD – *Lawrence Hargrave Drive*

ONU – Organização das Nações Unidas

PDF – *Probability Density Function*

SHT – *Saskatchewan Highways and Transportation*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNDRO – *United Nations Disaster Relief Organization*

UNISDR – *The United Nations Office for Disaster Risk Reduction*

WP/WLI – *Working Party on World Landslide Inventory*

LISTA DE SÍMBOLOS

C – consequência ou dano de um evento aleatório

Cst – prejuízo monetário

CF – fator de consequência

D – declividade (em porcentagem)

Dmd – número de moradias destruídas

E – elemento em risco

H – amplitude (em medida de comprimento)

L – comprimento na horizontal (em medida de comprimento)

$L_{C:R}$ – comprimento do carro ou a distância de reação

M – número de mortes

NR – número anual de deslizamentos atingindo a rodovia

N_L – número de faixas afetadas pelo deslizamento

N_V – número de carros por dia por faixa

P – probabilidade de ocorrência de um evento aleatório

P_{LS} – estimativa do limite superior para a probabilidade condicional

P_S – probabilidade anual de um carro ser atingido ou atingir um deslizamento

$P_{S:H}$ – probabilidade do impacto espacial do deslizamento na rodovia dado o evento

$P_{(L)}$ – frequência de deslizamento

$P_{(LOL)}$ – probabilidade anual de uma pessoa ser morta devido a um deslizamento

$P_{(S:T)}$ – probabilidade espacial temporal do elemento em risco

$P_{(T:L)}$ – probabilidade do deslizamento alcançar o elemento em risco

PF – fator de probabilidade

R – risco geotécnico

R_D – probabilidade anual de perda de vida

$R_{(prop)}$ – perda anual de valor da propriedade

T – número de habitantes em uma moradia

V – valor de uma moradia

V_D – vulnerabilidade do indivíduo dado o impacto do deslizamento no carro

V_V = velocidade do carro em km/h

$V_{(D:T)}$ – vulnerabilidade da pessoa ao deslizamento

$V_{(prop:S)}$ – vulnerabilidade da propriedade ao deslizamento

α – inclinação (em medida de ângulo, geralmente graus)

β – índice de confiabilidade

μ - média dos fatores de segurança

σ – desvio padrão dos fatores de segurança

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 DIRETRIZES DE PESQUISA	20
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	20
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	20
2.2.1 Objetivo Principal	20
2.2.2 Objetivos Secundários	21
2.3 PRESSUPOSTOS	21
2.4 DELIMITAÇÕES	21
2.5 LIMITAÇÕES	22
2.6 DELINEAMENTO	22
3 MOVIMENTOS DE MASSA	25
3.1 DEFINIÇÃO DE CONCEITOS BÁSICOS	25
3.2 CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA	27
3.2.1 Quedas e rolamentos	30
3.2.2 Tombamentos	31
3.2.3 Escorregamentos ou deslizamentos	32
3.2.3.1 Escorregamentos Circulares ou Rotacionais	33
3.2.3.2 Escorregamentos Planares ou Translacionais	34
3.2.3.3 Escorregamentos em Cunha	35
3.2.4 Espalhamentos	36
3.2.5 Corridas	37
3.2.6 Rastejos	38
3.3 FATORES PREPARATÓRIOS E ELEMENTOS DESENCADEADORES	40
3.4 INDICADORES VISUAIS DE MOVIMENTAÇÃO	42
4 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES E FRAMEWORK PARA AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO	43
4.1 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES PARA AVALIAÇÕES DE RISCO GEOTÉCNICO ..	44
4.2 FRAMEWORK PARA AVALIAÇÕES DE RISCO GEOTÉCNICO	49
5 METODOLOGIA NACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO	50
5.1 ABORDAGEM QUALITATIVA	51
5.1.1 Modelo de Abordagem da ONU	52
5.1.1.1 Identificação dos Riscos	52

5.1.1.2	Análise dos Riscos	53
5.1.2	Conceitos básicos para Análise de Risco	53
5.1.3	Descrição dos movimentos de massa, tipos e proposta de mapeamento	53
5.1.3.1	Descrição dos movimentos de massa	53
5.1.3.2	Tipos de mapeamento	55
5.1.3.3	Proposta de método de mapeamento	56
5.1.4	Roteiro metodológico para Análise de Risco e Mapeamento de Deslizamentos de Solo	57
5.2	ABORDAGEM QUANTITATIVA	61
5.2.1	Considerações Fundamentais	61
5.2.1.1	Análise Determinística e Probabilística	62
5.2.1.2	Origem e Tipos de Incertezas	63
5.2.1.3	Definições Estatísticas Básicas	64
5.2.1.4	Fator de Segurança e Confiabilidade	65
5.2.1.5	Risco Geotécnico	66
5.2.1.5.1	<i>Método de Monte Carlo</i>	67
5.2.1.5.2	<i>Índice de Confiabilidade</i>	67
5.2.1.5.3	<i>Consequências dos eventos adversos</i>	69
5.2.1.5.4	<i>Aceitabilidade do Risco Geotécnico</i>	71
5.2.2	Proposta de Metodologia para Análise Probabilística de Taludes de Terra ...	72
5.2.2.1	Considerações iniciais	72
5.2.2.2	Análise Determinística Prévia	73
5.2.2.3	Análise Probabilística	73
6	METODOLOGIA INTERNACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO	77
6.1	AVALIAÇÃO DE RISCO DE DESLIZAMENTOS	77
6.1.1	Definição do Escopo	77
6.1.2	Análise de Perigo	78
6.1.2.1	Caracterização do movimento de massa (ameaça)	78
6.1.2.2	Análise de frequência	79
6.1.2.2.1	<i>Abordagem qualitativa</i>	80
6.1.2.2.2	<i>Abordagem quantitativa</i>	81
6.1.3	Análise de Consequências	82
6.1.3.1	Abordagem qualitativa	83
6.1.3.2	Abordagem quantitativa	84

6.1.4 Estimativa de Risco	86
6.1.4.1 Abordagem qualitativa	86
6.1.4.2 Abordagem quantitativa	87
6.1.5 Critérios de aceitabilidade do risco	90
6.2 EXEMPLO DE SITUAÇÃO HIPOTÉTICA: DESLIZAMENTO EM ATERRO RODOVIÁRIO	92
6.2.1 Definição do escopo do exemplo	93
6.2.2 Caracterização do deslizamento	93
6.2.3 Estimativa da frequência	94
6.2.4 Análise das Consequências	95
6.2.5 Estimativa do risco geotécnico	95
6.2.6 Avaliação do risco geotécnico estimado	96
6.3 APLICAÇÕES DA METODOLOGIA A CASOS REAIS	97
6.3.1 Aplicação na malha rodoviária de Saskatchewan no Canadá	98
6.3.1.1 Classificação de perigos	99
6.3.1.2 Sistema de Gerenciamento de Deslizamentos	99
6.3.1.3 Análise de Risco	99
6.3.1.4 Circuito de Inspeção	103
6.3.2 Avaliação preliminar de risco de deslizamentos na rede rodoviária do Nepal	104
6.3.3 Aplicação de avaliação quantitativa de risco ao projeto de <i>Lawrence Hargrave Drive</i> na Austrália	106
7 ANÁLISE DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	112
7.1 COMPARAÇÃO DAS METODOLOGIAS E ADAPTAÇÕES	112
7.2 SUGESTÕES DE ADAPTAÇÕES DE PRÁTICAS INTERNACIONAIS	116
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
REFERÊNCIAS	120
ANEXO A – Terminologia Qualitativa para uso em Análises de Risco à Propriedade ..	122
ANEXO B – Formulário de Inspeção de Campo	125

1 INTRODUÇÃO

Manifestações das forças da natureza sempre ocorreram no planeta, desde muito antes da espécie humana se estabelecer em cidades, sendo fenômenos aleatórios e incontroláveis por parte dos humanos. No âmbito de gestão de risco de desastres, esses fenômenos da natureza, juntamente com fenômenos ocorridos por consequência de ações humanas, são nomeados conforme o grau de impacto causado pela ocorrência do fenômeno sobre a população. Segundo Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Centro de Estudos e Pesquisas sobre Desastres/RS (2014, p. 5, grifo do autor), esses fenômenos são classificados em:

Eventos são fenômenos da natureza ou causados pela ação antrópica que ocorrem sem causar danos ou prejuízos significativos [...]. **Por exemplo:** deslizamentos e inundações que ocorrem em áreas não ocupadas, com consequências mínimas ao homem e suas atividades [...].

Os **eventos adversos**, por outro lado, tratam da ocorrência desfavorável, prejudicial, imprópria de eventos. Eles trazem danos e prejuízos à população ou ao ambiente. **Por exemplo:** um determinado evento, como por exemplo, uma chuva forte sob uma cidade, uma explosão química em uma indústria ou um período prolongado sem chuvas em uma área agrícola, é chamado de evento adverso.

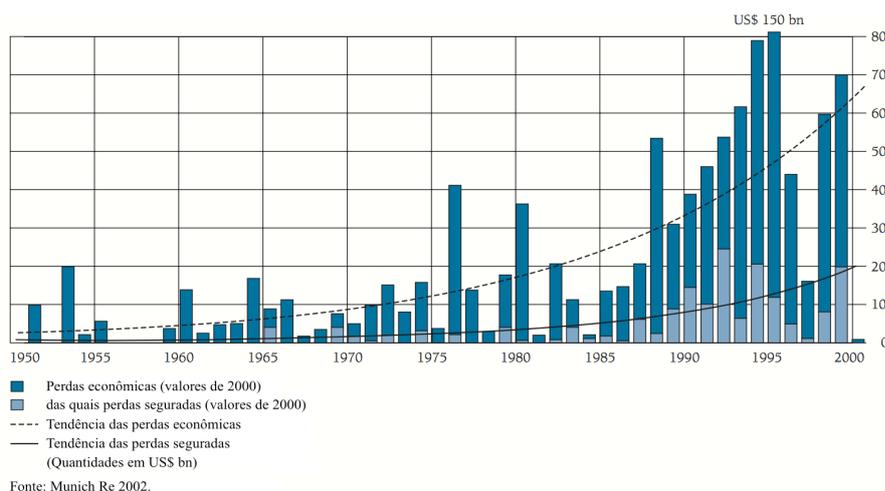
Ainda conforme Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Centro de Estudos e Pesquisas sobre Desastres/RS (2014, p. 5), são os eventos adversos que podem causar desastres se eles acontecerem em regiões habitadas vulneráveis. Os eventos de origem natural capazes de causar “[...] danos humanos, ambientais e/ou materiais e prejuízos ao patrimônio público e privado [...]” (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL; CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES/RS, 2014, p. 5) são também chamados de **ameaças** (em inglês, *danger*) (ABGE; ABMS, 2013, p. 81). Um desastre é definido, portanto, quando os danos mencionados acima são de grande porte, devido a eventos adversos de elevada magnitude sobre um quadro vulnerável (BRASIL¹, 2012 apud UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL e CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES/RS, 2014, p. 5).

¹ BRASIL. **Instrução Normativa Nº 1, de 24 de agosto de 2012.** Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos Municípios, Estados e pelo Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Brasília, DF, 2012.

Com o crescimento populacional e, às vezes, o conseqüente crescimento desordenado das cidades, os danos e as perdas causados por eventos adversos naturais tornaram-se cada vez mais frequentes e maiores. Perdas em infraestrutura devido a essas ameaças são “[...] significantes e continuam a escalar em uma taxa crescente” (KREIMER et al., 2003, p. 33, tradução nossa). Segundo Kreimer et al. (2003, p. 33-34, tradução nossa), “Pesquisa indica dois principais fatores que contribuem para essas perdas: aumento na concentração de pessoas e bens em regiões suscetíveis a ameaças no mundo e o aumento na intensidade e frequência de eventos severos relacionados ao clima”.

*Munich Reinsurance Company*² (2002 apud KREIMER et al., 2003, p. 34, tradução nossa) mostra que houve um aumento de quase oito vezes em perdas econômicas devido a desastres naturais no mundo desde a década de 1960 (figura 1), sendo que as perdas econômicas per capita em países em desenvolvimento foram 20 vezes maiores que as de países desenvolvidos, devido à diferença de tamanho das economias desses países (BENDIMERAD³, 2000 apud KREIMER et al., 2003, p. 34, tradução nossa). O aumento no número de desastres naturais no mundo pode ser visto na figura 2, salientando-se que “[...] enquanto o número de ocorrências de terremotos permaneceu relativamente estável com o tempo, a incidência de eventos relacionados ao clima acelerou” (KREIMER et al., 2003, p. 34, tradução nossa).

Figura 1 – Crescimento das perdas econômicas devido a desastres naturais

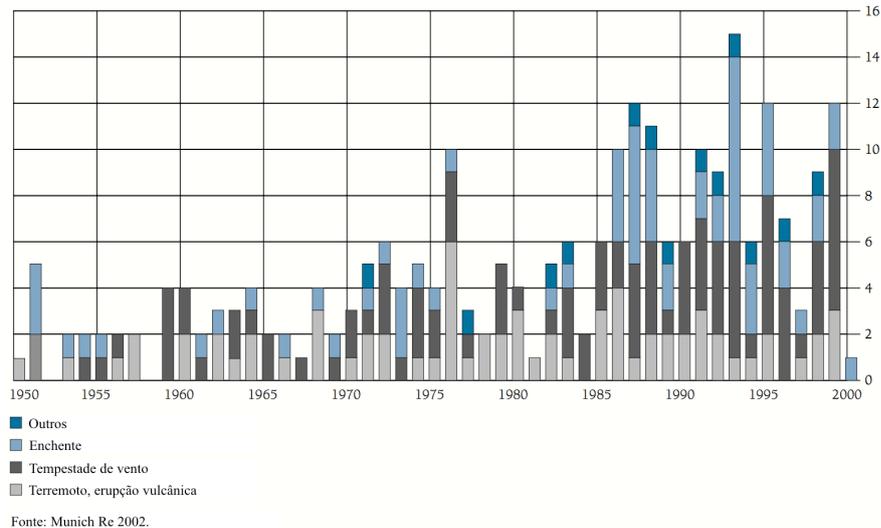


(fonte: MUNICH REINSURANCE COMPANY, 2002 apud KREIMER, 2003, p. 34, tradução nossa)

² MUNICH REINSURANCE COMPANY. Topics: Annual Review: Natural Catastrophes 2001. Munich: 2002.

³ BENDIMERAD, F. “Megacities, Megarisk”. The Disaster Management Facility, World Bank. Washington, D.C, 2000. Available from <<http://www.worldbank.org/dmf/knowledge/megacities.htm>> accessed June 2002.

Figura 2 – Tendência de ocorrência de desastres naturais



(fonte: MUNICH REINSURANCE COMPANY⁴, 2002 apud KREIMER, 2003, p. 35, tradução nossa)

A partir do conhecimento de que os eventos adversos causam consequências em termos de danos, ABGE; ABMS (2013, p. 26) definiram **risco** como sendo:

Uma medida de probabilidade e severidade de um efeito adverso à saúde, à propriedade ou ao meio ambiente. O risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade de um fenômeno de uma dada magnitude, multiplicado por suas consequências. No entanto, uma interpretação mais ampla de risco envolve uma comparação entre a probabilidade e consequências sem o cálculo do seu produto.

E diante das tendências do cenário mundial com relação a desastres naturais, as Nações Unidas realizaram, em março de 2015 na cidade de Sendai no Japão, uma conferência mundial, onde foi adotado o Marco de Sendai para Redução de Risco de Desastre (THE UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, 2015, p. 5, tradução nossa). O Marco de Sendai tem o objetivo de “Prevenir novos e reduzir riscos existentes de desastres através da implementação de [...] medidas para prevenir e reduzir a exposição às ameaças e a vulnerabilidade aos desastres, [...] fortalecendo a resiliência” (THE UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, 2015, p. 36, tradução nossa).

Neste contexto, o presente trabalho se enquadra na primeira prioridade de ação do Marco de Sendai, que é o “[...] entendimento do risco do desastre em todas as suas dimensões de vulnerabilidade, capacidade, exposição de pessoas e bens, características das ameaças e do meio ambiente” (THE UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION,

⁴ MUNICH REINSURANCE COMPANY. Topics: Annual Review: Natural Catastrophes 2001. Munich: 2002.

2015, p. 36, tradução nossa). Pois, tem como tema principal a apresentação e a comparação de várias metodologias utilizadas atualmente no Brasil e no mundo para a realização de avaliações de risco geotécnico, com ênfase em taludes rodoviários, proporcionando maior compreensão sobre como são praticadas as etapas dessa análise em países desenvolvidos e no Brasil.

É importante ressaltar que a infraestrutura rodoviária brasileira é, por vezes, suscetível a eventos adversos relacionados a movimentos de massa no Brasil, devido à localização de parte das rodovias serem ao lado de encostas. Os danos que vierem a ocorrer com a ruptura de um talude rodoviário incluem não somente danos à rodovia em si e aos usuários da rodovia no momento da ruptura, mas também danos indiretos, pelo fato de que se interrompida a rodovia, a conexão de cidades será prejudicada.

Este trabalho também contribui em parte para uma das metas incluídas no Marco de Sendai, a qual objetiva “Aumentar substancialmente o número de países com estratégias nacionais e locais de redução de risco de desastres até 2020” (THE UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, 2015, p. 36, tradução nossa). Tendo o amparo dessas medidas internacionais, e também, do reconhecimento nacional da necessidade de se abordar a questão do risco devido a eventos adversos de origem natural, este trabalho espera colaborar para a conscientização de que investimentos aplicados em infraestruturas, para torná-las mais resilientes a desastres e diminuir o risco, não somente reduzem gastos de reconstrução e perdas econômicas, mas também diminuem o número de mortes e de pessoas afetadas por esses fenômenos da natureza, caso o desastre venha a ocorrer.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho são apresentadas neste capítulo, sendo subdividas nos seguintes tópicos: questão de pesquisa; objetivos da pesquisa; pressupostos da pesquisa; delimitações; limitações; e delineamento. Inicialmente, o trabalho tinha como objetivo realizar uma análise de risco geotécnico em um trecho de rodovia, entretanto, devido a problemas com a obtenção e manipulação de dados, a parte de aplicação prática dos conhecimentos adquiridos não foi abordada no presente trabalho.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Para este trabalho, formulou-se a seguinte questão de pesquisa: através de uma análise de metodologias nacionais e internacionais para avaliação de risco geotécnico de taludes, como adaptar práticas internacionais ao contexto brasileiro, de forma que possibilitem uma abordagem mais numérica para análises de risco de taludes?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A partir da formulação da questão de pesquisa foram estabelecidos os objetivos da pesquisa, compreendendo os objetivos principal e secundários descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo principal analisar e comparar as diferentes metodologias nacionais e internacionais pesquisadas, a fim de determinar quais práticas aplicadas em países desenvolvidos poderiam ser adaptadas para complementar as técnicas brasileiras de análise de risco geotécnico, proporcionando uma abordagem com um cunho numérico e contribuindo para diminuir a subjetividade dos resultados usualmente encontrados na maioria das análises atuais no Brasil.

2.2.2 Objetivos Secundários

Este trabalho tem como objetivos secundários:

- a) classificar e caracterizar os movimentos de massa que possam estar presentes em taludes;
- b) revisar a metodologia brasileira referente à avaliação de risco geotécnico para eventos de movimentos de massa;
- c) revisar a metodologia internacional de países desenvolvidos referente à avaliação de risco geotécnico para eventos de movimentos de massa;
- d) apresentar um exemplo fictício e adaptações da metodologia internacional a casos reais.

2.3 PRESSUPOSTOS

Este trabalho tem por pressuposto que uma análise quantitativa da probabilidade de ruptura de um talude realizada a partir do uso da Teoria das Probabilidades é considerada adequada para fenômenos geotécnicos, sendo utilizada por profissionais da área (BRESSANI; COSTA, 2007, p. 15); sendo assim não tem o propósito de sugerir metodologias inovadoras para a análise de risco geotécnico com abordagem quantitativa. Além disso, o trabalho terá como base um *framework* amplamente empregado internacionalmente por engenheiros responsáveis por análises de risco (ABGE; ABMS, 2013, p. 29), considerando tal metodologia capaz de gerar resultados confiáveis. Não é uma finalidade do trabalho validar a competência desse método na avaliação de situações de risco.

2.4 DELIMITAÇÕES

Uma vez que avaliações de riscos podem englobar muitas situações de eventos adversos, tanto de origem natural como tecnológica, este trabalho se delimita a pesquisar metodologias de avaliação de risco geotécnico devido a movimentos de massa em taludes rodoviários, sendo que, devido à falta de um procedimento padrão para taludes rodoviários publicado por algum órgão nacional, uma metodologia brasileira para análise de risco de taludes urbanos também será apresentada. Há de se considerar que existem diferenças entre taludes rodoviários e urbanos, principalmente relativas ao uso do talude, à ocupação humana e à possibilidade de se obter informações geotécnicas a partir de ensaios.

2.5 LIMITAÇÕES

Este trabalho tem como limitações:

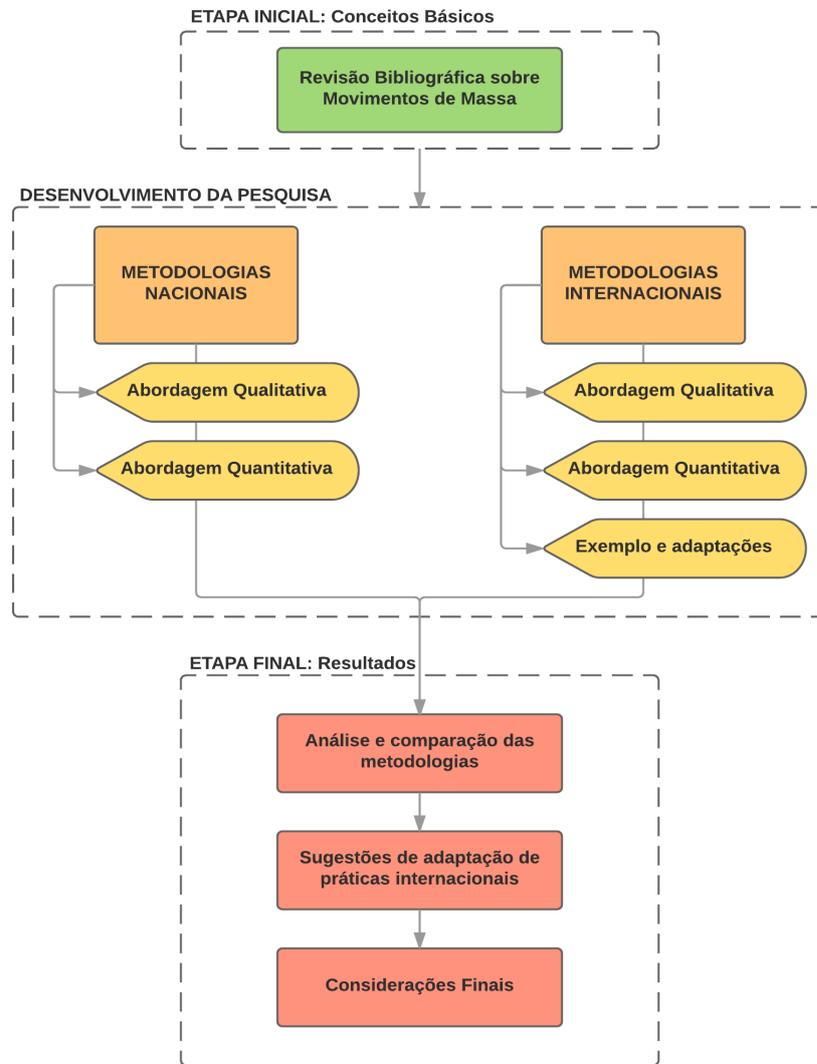
- a) as metodologias apresentadas no trabalho são aquelas que foram selecionadas a partir de critérios da autora;
- b) as adaptações sugeridas como resultado final não serão validadas através de uma aplicação a caso real neste trabalho.

2.6 DELINEAMENTO

As etapas que serão seguidas para a execução deste trabalho são descritas abaixo e também são apresentadas na figura 3, a fim de explicitar as relações entre as diversas etapas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

- a) revisão bibliográfica sobre movimentos de massa;
- b) revisão bibliográfica sobre metodologias nacionais para avaliação de risco geotécnico em taludes, com abordagens qualitativa e quantitativa;
- c) revisão bibliográfica sobre metodologias internacionais para avaliação de risco geotécnico em taludes rodoviários, com abordagens qualitativa e quantitativa;
- d) exposição de exemplo de uma situação hipotética e adaptações da metodologia internacional a casos reais;
- e) análise e comparação das metodologias pesquisadas;
- f) sugestões de adaptação de práticas internacionais para metodologias brasileiras de análise de risco geotécnico;
- g) considerações finais.

Figura 3 – Diagrama com as etapas do trabalho



(fonte: elaborada pela autora)

A primeira etapa do trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sobre **movimentos de massa** necessária para o embasamento adequado da pesquisa. Foram apontados conceitos básicos de definição e caracterização de taludes, seguidos da apresentação de uma classificação de movimentos de massa, a qual é amplamente adotada por engenheiros geotécnicos mundialmente. Após, cada movimento de massa presente nessa classificação foi detalhado com suas principais características físicas e geotécnicas. Por fim, fatores preparatórios, elementos desencadeadores e indicadores visuais de movimentação dos diversos movimentos de massa foram expostos.

A segunda etapa refere-se ao **desenvolvimento da pesquisa**, através da exposição de metodologias nacionais e internacionais sobre avaliação de risco geotécnico em taludes. Primeiramente, conceitos básicos para o entendimento do trabalho e um *framework* para análise, avaliação e gerenciamento de risco geotécnico foram abordados e exibidos em um capítulo à parte, a fim de facilitar a apresentação dessas definições importantes ao leitor.

Para a parte de **metodologia nacional**, foram detalhadas uma metodologia de análise de risco geotécnico em taludes urbanos, de abordagem qualitativa, e uma metodologia de análise de risco geotécnico de taludes naturais, utilizando uma abordagem quantitativa para a determinação da probabilidade de ruptura do talude. Já para a **metodologia internacional**, além da apresentação de metodologias de avaliação de risco geotécnico para taludes, com abordagens qualitativa e quantitativa, um exemplo de uma situação hipotética e algumas adaptações das metodologias para situações de taludes rodoviários reais em diversos países foram explicitados neste trabalho, com fins de demonstrar a aplicabilidade dessas metodologias a situações encontradas no cotidiano de engenheiros geotécnicos.

A terceira e última etapa do trabalho consiste em **analisar e comparar as metodologias** encontradas através da pesquisa bibliográfica, determinando quais práticas internacionais poderiam ser adaptadas ao contexto atual brasileiro, a fim de complementar as metodologias empregadas usualmente no país no que tange a análise de risco geotécnico de taludes rodoviários. Com a realização da avaliação das metodologias, foi possível estabelecer **sugestões de adaptação das práticas internacionais**, completando-se, então, o objetivo principal do trabalho. Finalmente, foram apresentadas **considerações finais** a respeito da pesquisa e dos assuntos pertinentes a ela.

3 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa consistem nas ameaças mais frequentes a que rodovias e estruturas em geral localizadas ao longo de encostas estão submetidas. Primeiramente, é preciso definir os conceitos básicos referentes a esse tipo de fenômeno, que serão aplicados no resto do trabalho, para que não gere confusão aos leitores. Logo após a definição dos conceitos, será apresentada a classificação de movimentos de massa utilizada na pesquisa, seguida da caracterização e do detalhamento dos movimentos de massa presentes na mesma. Para finalizar o capítulo, serão descritos os elementos desencadeadores e fatores preparatórios de movimentos de massa, e os indicadores visuais de movimentação.

3.1 DEFINIÇÃO DE CONCEITOS BÁSICOS

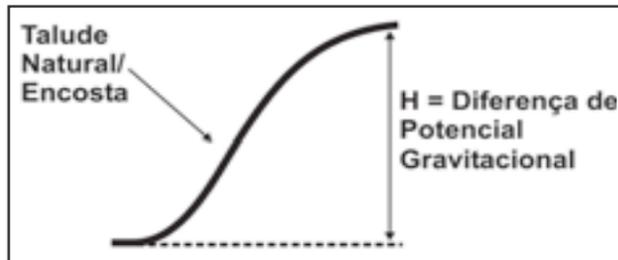
Inicialmente, é necessário definir os conceitos de encosta e talude, além de fazer uma distinção entre os tipos de talude existentes e uma apresentação dos parâmetros geométricos pelos quais eles são caracterizados. Após, é exposta uma definição de movimentos de massa.

Entende-se que taludes sejam “[...] extensões de solo com declividades mensuráveis e que podem sofrer deslocamentos em função da sua inclinação” (BRESSANI, 2016). A partir dessa definição, há uma divisão, diferenciando os taludes conforme a atuação do homem ou não sobre o talude em:

- a) **Taludes Naturais ou Encostas:** “[...] encostas de maciços terrosos, rochosos ou mistos, de solo e/ou rocha, de superfície não horizontal, originados por agentes naturais” (CARVALHO et al., 2007, p. 29);
- b) **Taludes Artificiais ou Taludes:** encostas que foram modificadas expressivamente através de ações humanas (BRESSANI, 2016), sendo subdivididos em:
 - Talude de Corte: “[...] definido como um talude, resultante de algum processo de escavação executado pelo homem” (CARVALHO et al., 2007, p. 30);
 - Talude de Aterro: “[...] refere-se aos taludes originados pelo aporte de materiais, tais como, solo, rocha e rejeitos industriais ou de mineração” (CARVALHO et al., 2007, p. 30).

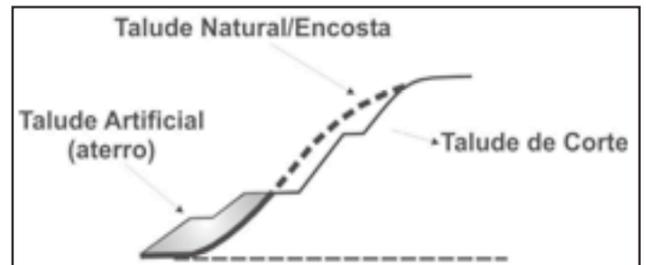
Exemplos esquemáticos de talude natural/encosta e taludes de corte e aterro são mostrados nas figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura 4 – Talude Natural ou Encosta



(fonte: CARVALHO et al., 2007, p. 29)

Figura 5 – Talude de Corte e Talude de Aterro

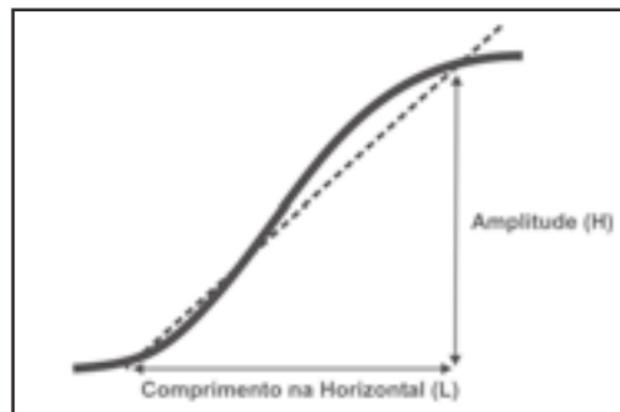


(fonte: CARVALHO et al., 2007, p. 30)

Os taludes são caracterizados geometricamente por dois parâmetros básicos: sua inclinação e sua declividade. Tendo a figura 6 como modelo para a determinação desses parâmetros, são definidas:

- a) Inclinação: representa “[...] o ângulo médio da encosta com o eixo horizontal medido, geralmente, a partir de sua base” (CARVALHO et al., 2007, p. 30). Ver fórmula 1;
- b) Declividade: equivalente ao “[...] ângulo de inclinação em uma relação percentual entre o desnível vertical (H) e o comprimento na horizontal (L) da encosta” (CARVALHO et al., 2007, p. 30). Ver fórmula 2.

Figura 6 – Dimensões geométricas básicas de uma encosta



(fonte: adaptado de CARVALHO et al., 2007, p. 30)

$$\alpha = \text{ARCTAN} (H/L) \quad (\text{fórmula 1})$$

$$D = (H/L) \times 100 \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

α = Inclinação (em medida de ângulo, geralmente graus);

D = Declividade (em porcentagem);

H = Amplitude;

L = Comprimento na Horizontal.

Finalmente, um movimento de massa pode ser definido conforme Selby⁵ (1993, p. 249 apud HOLCOMBE, 2015, tradução nossa) como:

Movimento de massa é o movimento encosta abaixo de material de solo ou rocha sob a influência da gravidade sem a ajuda direta de outros meios como água, ar ou gelo.

[...] água e gelo, entretanto, são frequentemente envolvidos por reduzir a resistência do material da encosta e contribuir para o comportamento plástico e fluido dos solos.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Conforme Highland e Bobrowsky (2008, p. 6) “As classificações de diferentes tipos de deslizamentos são associadas a mecanismos específicos de falhas em taludes e às propriedades e características desses tipos de falhas geológicas”. Na colocação acima, o vocábulo “deslizamentos” pode ser compreendido como um termo genérico para movimentos de massa, cuja definição foi apresentada na seção anterior.

As Sociedades Internacionais Geotécnicas da UNESCO formaram na década de 1990 um grupo de trabalho chamado *Working Party on World Landslide Inventory* (WP/WLI), como parte dos esforços mundiais em prol da Década Internacional para Redução de Desastres Naturais. No relatório final gerado pelo grupo, foi usada a classificação de Varnes elaborada

⁵ SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1993.

em 1978 e atestado que essa classificação é mais amplamente utilizada (THE GEOLOGICAL SOCIETY, s. d., tradução nossa). Já que este trabalho abordará metodologias nacionais e internacionais de análise de risco, a classificação de movimentos de massa a ser adotada no trabalho será a de Varnes, por ser a mais aplicada mundialmente.

A classificação de movimentos de massa proposta por Varnes em 1978 possui dois termos que, quando unidos, formam a denominação do movimento. O primeiro termo refere-se ao tipo de movimento e “[...] descreve como o movimento do deslizamento é distribuído através da massa deslocada”, sendo “Os cinco tipos cinematicamente distintos [...] descritos na sequência quedas, tombamentos, escorregamentos/deslizamentos, escoamentos e corridas” (THE GEOLOGICAL SOCIETY, s. d., tradução nossa). O segundo termo descreve o tipo de solo deslocado pelo movimento de massa, divididos em (VARNES⁶, 1978 apud THE GEOLOGICAL SOCIETY, s. d., tradução nossa):

- a) **Rocha:** é uma massa rija ou firme que estava intacta e no seu lugar natural antes do início do movimento;
- b) **Solo:** é um agregado de partículas sólidas, geralmente de minerais e rochas, que ou foi transportado ou foi formado pelo intemperismo da rocha do lugar. Gases e líquidos ocupando os poros do solo formam parte do solo;
- c) **Terra:** descreve material no qual 80% ou mais das partículas são menores que 2mm, o limite superior de partículas do tamanho de areia;
- d) **Lama:** descreve material no qual 80% ou mais das partículas são menores que 0,06mm, o limite superior de partículas do tamanho de silte;
- e) **Detritos:** contém uma proporção significativa de material grosseiro, 20% a 80% das partículas são maiores que 2mm, e o restante são menores que 2mm.

O sistema de classificação de Varnes (1978) pode ser compactado e resumido no quadro 1 a seguir.

Em 1996, Cruden e Varnes propuseram uma escala de velocidades para os movimentos de massa, complementando a classificação apresentada por Varnes em 1978. Nessa escala (quadro 2), foram estabelecidas relações entre velocidades, taxas de movimentação, descrição e prováveis efeitos destrutivos causados pelos movimentos de massa (CRUDEN; VARNES, 1996, p. 58-59, tradução nossa).

⁶ VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: LANDSLIDES: ANALYSIS AND CONTROL, 1978, Washington D. C., USA. **Special Report 176...** Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, 1978, p. 11-33.

Quadro 1 – Classificação abreviada de movimentos de massa por Varnes (1978)

TIPO DE MOVIMENTO		TIPO DE MATERIAL		
		ROCHA	SOLOS DE ENGENHARIA	
			Predominantemente grosseiro	Predominantemente fino
QUEDAS		Queda de rochas	Queda de detritos	Queda de solo
TOMBAMENTOS		Tombamento de rochas	Tombamento de detritos	Tombamento de solo
ESCORREGAMENTOS	ROTACIONAL	Escorregamento de rochas	Escorregamento de detritos	Escorregamento de solo
	TRANSLACIONAL			
ESPALHAMENTOS LATERAIS		Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos	Espalhamento de solo
CORRIDAS		Corrida de rochas (rastejo profundo)	Corrida de detritos (rastejo de solo)	Corrida de solo
COMPLEXOS		Combinação de dois ou mais tipos principais de movimento		

(fonte: adaptado de VARNES⁷, 1978 apud THE GEOLOGICAL SOCIETY, s. d., tradução nossa)

Quadro 2 – Escala de Velocidades por Cruden e Varnes (1996)

Classe de Velocidade	Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade Típica	Prováveis Efeitos Destrutivos
7	Extremamente rápido	5×10^3	5 m/s	Catástrofe de grande violência; prédios destruídos pelo impacto do material deslocado; muitas mortes; fuga improvável
6	Muito rápido	5×10^1	3 m/min	Algumas vidas perdidas; velocidade muito grande para permitir que todas as pessoas escapem
5	Rápido	5×10^{-1}	1,8 m/h	Evacuação possível; estruturas, posses e equipamentos destruídos
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m/mês	Algumas estruturas temporárias e não sensíveis podem ser temporariamente mantidas
3	Lento	5×10^{-5}	1,6 m/ano	Construção reparadora pode ser executada durante o movimento; estruturas não sensíveis podem ser mantidas com trabalhos de manutenção frequentes se o movimento total não é grande durante uma fase particular de aceleração
2	Muito lento	5×10^{-7}	15 mm/ano	Algumas estruturas permanentes sem danos devidos ao movimento
1	Extremamente lento			Imperceptível sem instrumentos; construção possível com precauções

(fonte: adaptado de CRUDEN; VARNES, 1996, p. 58-59, tradução nossa)

Os movimentos de massa presentes na classificação de Varnes (1978) serão detalhados nos subitens no decorrer dessa seção. Os deslizamentos serão apresentados na seguinte ordem:

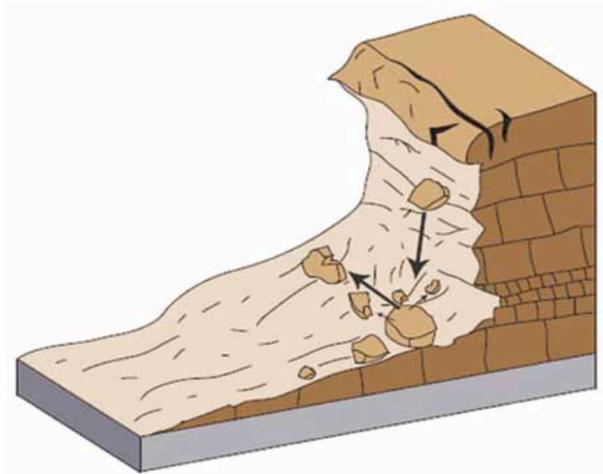
⁷ VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: LANDSLIDES: ANALYSIS AND CONTROL, Washington D. C., USA. **Special Report 176...** Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, 1978, p. 11-33.

quedas (e rolamentos) de rocha, tombamentos de rocha, escorregamentos (rotacionais, translacionais e em cunha), espalhamentos, fluxos de detritos rápidos (corridas) e fluxos de terra lentos (rastejos).

3.2.1 Quedas e rolamentos

As quedas de rocha são movimentos verticais para baixo, em que não há significativo deslocamento de massa causado por cisalhamento (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 8). As massas de rocha (na forma de blocos e/ou lascas de rochas) se desprendem de taludes íngremes ou penhascos com velocidades muito rápidas em queda livre (em uma ordem de grandeza de m/s) (CARVALHO et al., 2007, p. 37). Durante o deslocamento da massa de rocha, o material pode se chocar contra partes inferiores do talude, causando saltos ou, até mesmo, a quebra do material com conseqüente rolamento das partes menores até uma cota mais baixa do terreno, como pode ser visto na figura 7. O volume de material deslocado em uma queda pode variar expressivamente, de blocos individuais (também conhecidos como matacões) a centenas de metros cúbicos de rocha (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 8).

Figura 7 – Quedas de blocos rochosos



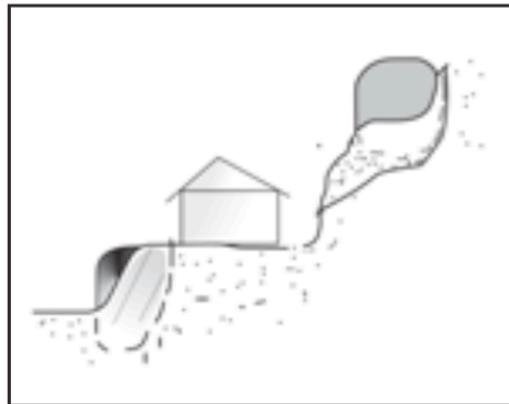
(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 10)

As quedas e rolamentos ocorrem mundialmente onde há a presença de afloramentos rochosos em talude íngremes, de origem natural ou artificiais de escavação, como: taludes litorâneos ou de rios, cortes em rocha, frentes de exploração de pedreiras, etc. Esses movimentos são

causados pela existência de descontinuidades nos maciços rochosos. Ciclos de dilatação e contração da rocha, ocasionados por condições climáticas diferenciadas, e ações antrópicas potencializam e aceleram o desencadeamento desse tipo de movimento (CARVALHO et al., 2007, p. 37; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 8-9).

Os rolamentos de matacões são mais característicos de solos derivados de rochas graníticas nos quais, segundo Carvalho et al. (2007, p. 39), “[...] existe maior predisposição a origem de matacões de rocha sã, isolados e expostos em superfície”. A figura 8 mostra um corte esquemático de um talude com presença de bloco rochoso suscetível a rolamento.

Figura 8 – Corte de talude exemplificando matacão suscetível a rolamento



(fonte: CARVALHO et al., 2007, p. 39)

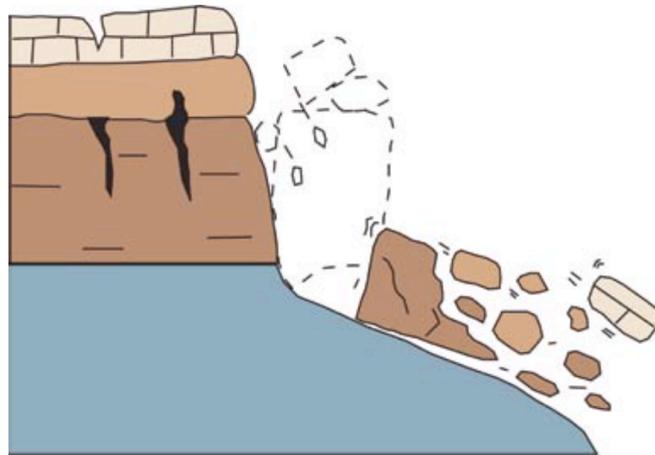
Como consequências a propriedades, devidas a quedas ou rolamentos rochosos, tem-se uma alta possibilidade de danos a estruturas localizadas abaixo da linha de queda das rochas e a veículos e/ou estruturas que estejam no trajeto de rolamento dos matacões, assim como, danos elevados para rodovias e ferrovias, que podem ficar bloqueadas após o acontecimento de um evento. Esse tipo de movimento também promove um risco elevado à vida de pessoas, já que os blocos rochosos podem atingir casas e veículos tanto em quedas quanto em rolamentos (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 9).

3.2.2 Tombamentos

Conforme Carvalho et al. (2007, p. 38), os tombamentos, assim como os outros movimentos em rocha, ocorrem predominantemente em taludes íngremes com fraturas e diaclases

verticais, entretanto geralmente são movimentos mais lentos e possuem um mecanismo de movimentação muito diferente dos anteriores. O tombamento é caracterizado por um movimento de “[...] rotação frontal de uma massa de solo ou rocha para fora do talude, em torno de um ponto, ou eixo, abaixo do centro de gravidade da massa deslocada” (ver figura 9) (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 11).

Figura 9 – Tombamento de blocos rochosos



(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 12)

As principais ocorrências são notadas em taludes de corte, onde ocorre o desconfinamento das discontinuidades devido à mudança de geometria do talude, promovendo o movimento de blocos de rocha. Quando do seu acontecimento em taludes rodoviários, pode ocasionar danos muito destrutivos, especialmente se a ruptura for repentina e/ou sua velocidade for alta, o que pode ser possível se a distância de deslocamento do bloco de rocha for elevada (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 11).

3.2.3 Escorregamentos ou deslizamentos

Os escorregamentos, também conhecidos como deslizamentos, são movimentos de massa com velocidades consideráveis (de m/h a m/s), onde é possível se estabelecer claramente uma superfície de ruptura, com limites e profundidades definidos, determinando de forma aproximada o volume de material que pode ser movimentado ou já se moveu. Esse tipo de

movimento pode acontecer com vários tipos de material, como solo, saprolito, rocha e depósitos (CARVALHO et al., 2007, p. 34).

Os deslizamentos também diferem entre si pela geometria da superfície de ruptura, a qual varia de acordo com os planos de fraqueza ou estruturas de baixa resistência existentes no maciço. A existência desses planos é condição essencial para a formação desses movimentos (CARVALHO et al., 2007, p. 35). De acordo com esse parâmetro, os escorregamentos são divididos em: circulares ou rotacionais, planares ou translacionais, e em cunha. (CARVALHO et al., 2007, p. 34-35).

3.2.3.1 Escorregamentos Circulares ou Rotacionais

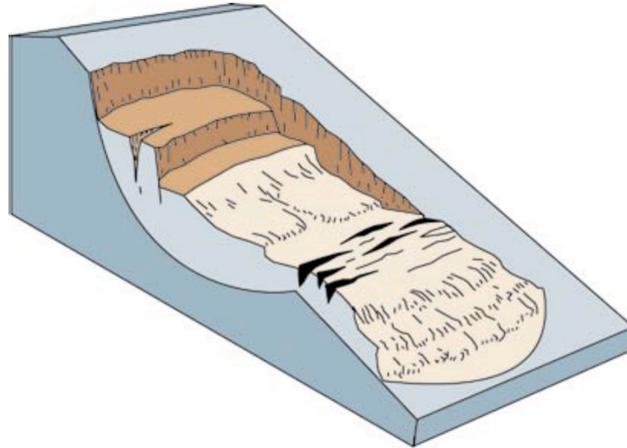
Este tipo de escorregamento é frequente em materiais homogêneos e é o tipo de deslizamento mais corriqueiro em aterros, podendo ter uma velocidade que varia de muito vagarosa a rápida. Ele também pode ser relacionado a taludes com inclinação de 20 a 40 graus (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 13). Além dos aterros, escorregamentos rotacionais (figura 10) são também característicos em pacotes de solo ou depósitos espessos e em rochas sedimentares ou cristalinas muito fraturadas. Se comparados com os escorregamentos translacionais, os deslizamentos circulares têm raio de alcance menor (CARVALHO et al., 2007, p. 35).

Highland e Bobrowsky explicam o movimento de escorregamento rotacional da seguinte forma (2008, p. 13):

É um tipo de deslizamento em que a superfície da ruptura é curvada no sentido superior (em forma de colher) e o movimento da queda de barreira é mais ou menos rotatório em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude. A massa deslocada pode, sob certas circunstâncias, mover-se de maneira relativamente coerente, ao longo da superfície de ruptura e com pouca deformação interna. O topo do material deslocado pode mover-se quase que verticalmente para baixo e a parte superior desse material pode inclinar-se para trás em direção ao talude.

Segundo os mesmos autores, esse tipo de escorregamento usualmente não oferece risco a vidas, caso sua velocidade seja lenta, mas podem causar muitos danos a estruturas, redes de abastecimento e rodovias. Esses danos podem alcançar altos valores especialmente quando essas estruturas estiverem sobre ou dentro da massa, se ela for deslocada pelo movimento (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 14).

Figura 10 – Escorregamento Circular ou Rotacional



(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 14)

3.2.3.2 Escorregamentos Planares ou Translacionais

Dentre os tipos de escorregamento, um dos mais comuns pelo mundo são os escorregamentos translacionais, já que eles ocorrem em todos os tipos de ambientes e condições. Sua extensão pode variar de algumas centenas de metros quadrados até quilômetros quadrados, mas geralmente são mais rasos que os escorregamentos rotacionais. A velocidade desse tipo de movimento é bastante variável também, ele pode iniciar-se lento e chegar a velocidades moderadas, muitas vezes, ou até a altas velocidades. Entretanto, quando atingidas velocidades elevadas, esse tipo de movimento pode se transformar em corrida (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 16).

Nas regiões serranas brasileiras, os escorregamentos planares são bastante frequentes, principalmente em solos pouco desenvolvidos em encostas com altas inclinações, mas também podem acontecer em solos saprolíticos, saprolitos e rochas (quando da existência de planos de fraqueza desfavoráveis à estabilidade do maciço). Como pode ser visto na figura 11, sua forma é muitas vezes retangular, onde o comprimento da massa deslocada é proporcionalmente muito maior que sua largura (CARVALHO et al., 2007, p. 35).

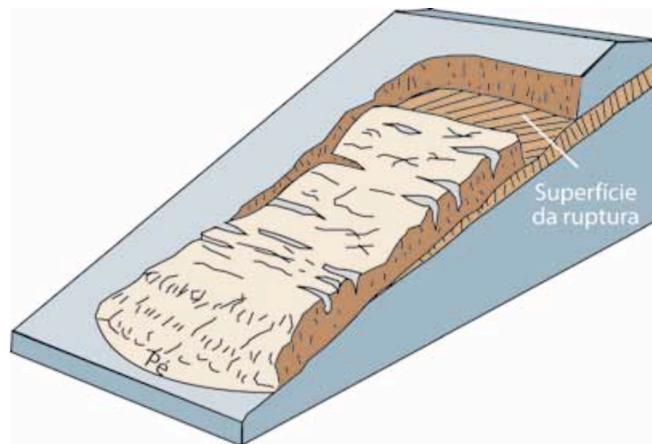
O mecanismo de movimentação dos escorregamentos translacionais é esclarecido por Highland e Bobrowsky (2008, p. 16):

A massa [...] move-se para fora, ou para baixo e para fora, ao longo de uma superfície relativamente plana, com pequeno movimento rotacional ou inclinação para trás. Este tipo de deslizamento pode progredir por distâncias consideráveis, se a superfície da ruptura estiver suficientemente inclinada, ao contrário dos

escorregamentos rotacionais, que tendem a restaurar o equilíbrio do deslizamento. [...] Escorregamentos translacionais comumente ocorrem ao longo de descontinuidades geológicas [...] ou o ponto de contato entre rocha e solo.

Quanto aos danos provocados pelos deslizamentos deste tipo, os autores acima indicam que esses movimentos somente arriscam a vida de pessoas quando se dão em altas velocidades. Se o movimento for lento, ele poderá causar danos a propriedades e/ou redes de abastecimento (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 17).

Figura 11 – Escorregamento Planar ou Translacional

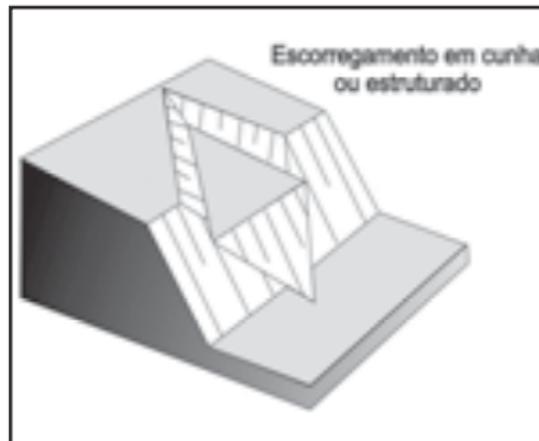


(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 17)

3.2.3.3 Escorregamentos em Cunha

Os escorregamentos em cunha são mais relacionados a saprolitos e rochas (em taludes de corte ou em taludes que passaram por desconfinamento), não tendo, por isso, muita relevância em especificá-los neste trabalho com tantos detalhes, da mesma forma que foi feito para os deslizamentos descritos nos subitens anteriores. É importante saber que esse tipo de movimento depende da existência de dois planos de falhas não favoráveis à estabilidade do maciço (figura 12), sendo eles mesmos a condição necessária para o movimento ao longo do eixo de interseção dos planos (CARVALHO et al., 2007, p. 36).

Figura 12 – Escorregamento em Cunha



(fonte: CARVALHO et al., 2007, p. 36)

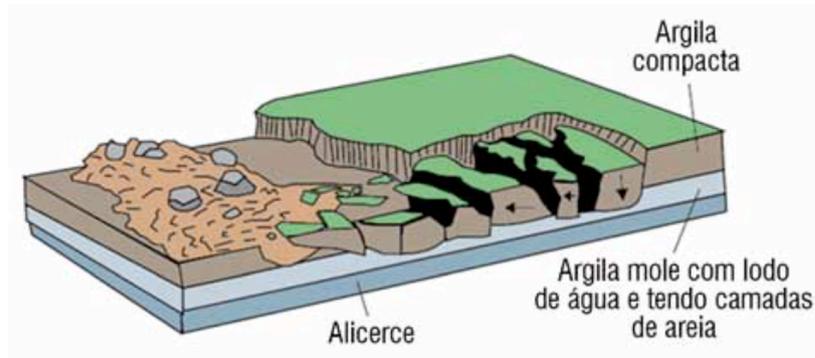
3.2.4 Espalhamentos

Segundo Highland e Bobrowsky (2008, p. 19), espalhamentos ou espalhamentos laterais são movimentos de massa que ocorrem em terrenos planos ou taludes de baixa inclinação onde existam uma camada de rocha ou solo coesivo em cima de uma camada menos rígida e mais fraca (figura 13). Quando as rupturas acontecem, geralmente ocorre também um afundamento geral em direção à camada inferior, como descrito a seguir (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 19, grifo nosso):

Nos **espalhamentos de solos rochosos**, a parte sólida se estende e rompe, movendo-se, vagarosamente da posição estável para cima da camada mais fraca, sem que necessariamente se forme uma superfície de ruptura identificável. A camada menos rígida, em determinadas condições, pode ser espremida para cima e para dentro da físsura que divide os blocos rochosos. Em **espalhamentos de terra**, a camada superior estável estende-se ao longo da camada inferior mais fraca que flui, após uma liquefação ou deformação plástica. Se a camada inferior for relativamente grossa, o bloco partido da camada superior poderá afundar, virar, girar, desintegrar, liquefazer ou até mesmo fluir.

A área afetada pelo movimento pode variar, começando em uma parte pequena do terreno e evoluindo para centenas de metros de amplitude. Da mesma forma, as velocidades variam de lentas a moderadas chegando a ser rápidas, conforme a saturação aquosa das camadas de solo (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 19-20).

Figura 13 – Espalhamento Lateral



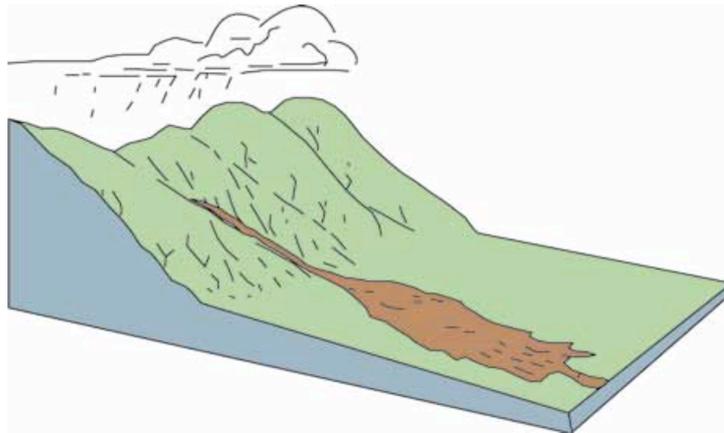
(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 21)

A ocorrência de espalhamentos laterais está ligada a características do solo e do local, por isso eventos de movimento de massa desse tipo acontecem somente onde há solos os quais possam sofrer liquefação ou em áreas com atividades sísmicas. Eles são desencadeados por mecanismos que desestabilizem a camada inferior menos rígida, como: terremotos (causam liquefação), sobrecarga do terreno, saturação das camadas do subsolo, erosão na base de um talude (causa liquefação), deformação plástica de uma camada de solo profunda e instável. Os danos causados por escoamentos geralmente são restritos a danos a estruturas e propriedades, como rodovias e edifícios, podendo ser elevados (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 19-20).

3.2.5 Corridas

Corridas ou fluxos são um dos tipos de movimentos de massa mais rápidos e com maior raio de alcance e, por isso, são um dos mais destrutivos. Carvalho et al. (2007, p. 39) apontam que “As corridas de massa são movimentos gravitacionais de massa complexos, ligados a eventos pluviométricos excepcionais [...], sendo o seu escoamento ao longo de um ou mais canais de drenagem [...]”, como pode ser visto na figura 14. Highland e Bobrowsky caracterizam com mais detalhe o fluxo de detritos, que é um movimento que carrega grandes quantidades de solo solto, rochas e, às vezes, material orgânico, misturados à água, formando um fluxo cujo comportamento se assemelha a um líquido viscoso (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 22).

Figura 14 – Fluxo de detritos



(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 24)

Os fluxos de detritos ocorrem por todo o mundo, especialmente em ravinas íngremes e cânions. Eles podem ser delgados ou espessos, seu tamanho e extensão são geralmente associados com a dimensão dos taludes nos quais são originados e sua velocidade varia conforme a consistência da massa deslocada e a inclinação do talude, alcançando magnitudes de até aproximadamente 60 km/h. Ao cessar o movimento, os detritos e a lama formam depósitos triangulares e cônicos nas bases dos taludes de origem dos materiais, conhecidos como cone de detritos (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 22).

As consequências de corridas são bastante danosas devido à alta velocidade de movimento das partículas, do grande volume de sedimentos e potencial de transporte e soterramento de estruturas, veículo e residências pelos detritos e sedimentos deslizados talude abaixo. Também, como a previsão desse tipo de movimento de massa é difícil, quando da ocorrência de corridas, muitas vítimas fatais podem acontecer (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 23).

3.2.6 Rastejos

Segundo Highland e Bobrowsky, os rastejos são os movimentos de massa mais frequentes no mundo, com maior número de ocorrências se comparados com deslizamentos mais rápidos e mais danosos. Podem chegar a movimentar massas de dimensões regionais ou somente áreas de proporções pequenas, mas em todos os casos, devido a sua velocidade extremamente lenta

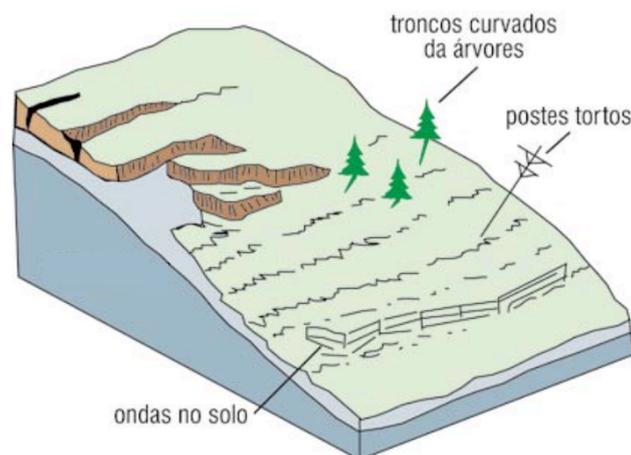
(inferior a um metro por década – mm ou cm por ano), se torna complicado definir os limites da movimentação (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 33).

Highland e Bobrowsky ainda complementam (2008, p. 33):

Este tipo de deslocamento é causado por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar rupturas. Geralmente, existem três tipos de rastejo: (1) sazonal, no qual o movimento ocorre [...] afetado por alterações sazonais, em sua mistura e temperatura; (2) contínuo, no qual a tensão de cisalhamento contínua excede a resistência do material; e (3) progressivo, no qual os taludes atingem o ponto de ruptura gerando outros tipos de movimentação do terreno.

Os rastejos se caracterizam principalmente pelo movimento nas camadas superiores do solo (figura 15) e nas camadas de transição entre solo e rocha, mas também há a possibilidade de ocorrência de rastejos em rocha, neste caso, em profundidades bem maiores. Quando há a movimentação em solo, são incluídos na mesma categoria movimentos em solos de alteração (saprolíticos) e em solos transportados, como os colúvios e tálus (CARVALHO et al., 2007, p. 33).

Figura 15 – Rastejo de solo



(fonte: adaptado de HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 34)

Devido às suas características, os danos relacionados a este tipo de movimentação ocorrem, mesmo que de maneira mais lenta, afetando estruturas, tubulações e rodovias. Caso eles apresentem caráter progressivo e levem à ruptura do solo, os danos serão mais destrutivos (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 34).

3.3 FATORES PREPARATÓRIOS E ELEMENTOS DESENCADEADORES

O conhecimento dos fatores preparatórios e dos elementos desencadeadores de movimentos de massa são de extrema importância para a realização de uma análise de risco geotécnico de taludes. Alguns autores classificam esses dois conceitos como condicionantes, que podem ser subdivididos em naturais, antrópicos ou ambos. Os condicionantes naturais podem ser agentes predisponentes (fatores preparatórios) ou efetivos (elementos desencadeadores) (CARVALHO et al., 2007, p. 40). Segundo Carvalho et al. (2007, p. 40-41), agentes predisponentes são:

[...] o conjunto das características intrínsecas do meio físico natural, podendo ser diferenciados em complexo geológico-geomorfológico (comportamento das rochas, perfil e espessura do solo em função da maior ou menor resistência da rocha ao intemperismo) e complexo hidrológico-climático (relacionado ao intemperismo físico-químico e químico). A gravidade e a vegetação natural também podem estar inclusos nesta categoria.

Holcombe lista alguns exemplos de fatores preparatórios (2015, tradução nossa):

- a) Inclinação do talude;
- b) Intemperismo, orientação e estrutura dos estratos de material;
- c) Tipo, resistência, propriedades hidrológicas do material;
- d) Vegetação;
- e) Água superficial e de subsuperfície e drenagem;
- f) Convergência ou divergência topográfica;
- g) Fatores antropogênicos.

Para cada tipo de movimento, uma combinação de certas características das condicionantes acima é necessária para haver a possibilidade do movimento. Por exemplo, como descrito na seção acima no subitem sobre escorregamentos rotacionais, eles são característicos de maciços com materiais homogêneos e de taludes com inclinação de 20 a 40 graus. Para os outros tipos de movimento de massa, alguns dos fatores preparatórios estão incluídos na descrição dos movimentos, na seção anterior.

Já com relação aos elementos desencadeadores de movimentação, em termos gerais, eles são muito similares para todos os movimentos de massa. Para Carvalho et al. (2007, p. 41), os elementos desencadeadores são:

[...] pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação de temperatura e umidade, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação do nível de lagos e marés e do lençol freático, ação de animais e humana, inclusive desflorestamento [...] chuva intensa, vibrações, fusão do gelo e neves, erosão, terremotos, ondas, vento, ação do homem, etc.

Este último grupo de elementos desencadeadores são considerados como sendo de caráter imediato, ou seja, logo após o acontecimento de um ou mais desses elementos, o movimento de massa ocorre (CARVALHO et al., 2007, p. 41). Highland e Bobrowsky são mais detalhistas e especificam os elementos desencadeadores conforme a classificação do movimento de massa. A seguir são apresentados os elementos desencadeadores citados pelos autores que se enquadram ao quadro climático brasileiro (CARVALHO et al., 2007, p. 37, 39; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 8-9, 11, 13, 16, 23, 33):

- a) Quedas: subpressões devidas ao acúmulo de água, penetrações de raízes nas discontinuidades do maciço, erosões regressivas, grande amplitude térmica e ações antrópicas, como vibrações geradas de explosões;
- b) Rolamentos: remoção do apoio de base dos matacões por consequência de processos erosivos ou ações antrópicas;
- c) Tombamentos: o envergamento de um bloco de rocha pode ser causado pela presença de água ou gelo nas fraturas do maciço rochoso, já o movimento em si pode ser gerado pela gravidade exercida na parte superior da massa deslocada, por erosões regressivas, escavações, vibrações e amplitude térmica elevada;
- d) Escorregamentos Rotacionais: precipitações intensas e/ou contínuas que aumentam o nível d'água no maciço de solo, fluxos rápidos de rios após enchentes e aumento no nível d'água de rios, lagos ou outros corpos d'água, causando erosão no pé dos taludes;
- e) Escorregamentos Translacionais: principalmente precipitações intensas, elevação da saturação do solo pelas chuvas, inundações, elevação do nível d'água (causada por irrigação e vazamento de tubulações de água) e erosão regressiva;
- f) Corridas: eventos de chuva intensos, que ocasionam elevados fluxos superficiais de água, erosão superficial das encostas e movimentação do solo solto e rochas presentes nos taludes. Além disso, corridas podem surgir a partir de outros tipos de deslizamentos em áreas inclinadas;
- g) Rastejos: no caso de rastejos sazonais a chuva é o principal elemento desencadeador existente no Brasil, para os outros tipos, condições do clima, vazamento de tubulações, drenagem com mau funcionamento e construções que promovem a desestabilização do maciço são alguns dos elementos.

Além dos condicionantes naturais, os condicionantes antrópicos podem ser bastante decisivos para o início de movimentação de um talude. Alguns dos condicionantes que podem ser

encontrados na situação em estudo são: “[...] remoção da cobertura vegetal, lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas, [...] execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação), [...] lançamento de lixo nas encostas/taludes, retirada do solo superficial [...]” (CARVALHO et al., 2007, p. 41). No caso específico de rastejos, a execução de cortes na região central-inferior do maciço é o principal condicionante antrópico para deflagração de movimento (CARVALHO et al., 2007, p. 34).

3.4 INDICADORES VISUAIS DE MOVIMENTAÇÃO

Os indicadores visuais de movimentação de solo variam conforme o tipo de movimento.

Para as quedas de rocha, que consistem na separação de um solo e/ou de uma rocha de um talude íngreme, alguns indicadores visuais de movimentação são as presenças de rochas pendentes, partidas ou reincorporadas aos taludes (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 8-9). No caso de tombamento de rochas, um indicador visual importante é a mudança de inclinação de taludes próximos a fissuras e de áreas com maior movimentação vertical (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 12).

Com relação a escorregamentos/deslizamentos, os indicadores visuais são representados pelo aparecimento de “[...] fendas de tração na superfície dos terrenos ou pelo aumento de fendas preexistentes, devido ao embarrigamento de estruturas de contenção, pela inclinação de estruturas rígidas, [...] pelo surgimento de degraus de abatimento e trincas no terreno e moradias” (CARVALHO et al., 2007, p. 37).

Já com relação a rastejos, os indicadores visuais são “[...] trincas observadas em toda a extensão do terreno natural, que evoluem vagarosamente, e árvores ou qualquer outro marco fixo, que apresentam inclinações variadas” (CARVALHO et al., 2007, p. 33-34).

4 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES E *FRAMEWORK* PARA AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO

As definições dos conceitos de **eventos**, **eventos adversos**, **ameaças** e **risco** foram apresentadas no capítulo Introdução com o fim de esclarecer melhor os objetivos e a metodologia deste trabalho, descritos no capítulo 2 Diretrizes da Pesquisa, já a definição de movimentos de massa foi exposta no capítulo 3 de mesmo nome. Entretanto, como a definição de risco é uma das mais importantes para o desenvolvimento do trabalho, ela será retomada aqui. Segundo ABGE; ABMS (2013, p. 26), o risco é “Uma medida de probabilidade e severidade de um feito adverso à saúde, à propriedade ou ao meio ambiente. O risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade de um fenômeno de uma dada magnitude, multiplicado por suas consequências”. Como pode ser visualizado na fórmula 3 abaixo (CARVALHO⁸, 1998 apud COSTA, 2005, p. 72):

$$R = \sum (P_i \times C_i) \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

R = Risco geotécnico devido a “n” eventos aleatórios (“i” varia de 1 a “n”);

P_i = Probabilidade de ocorrência do evento aleatório E_i;

C_i = Consequência ou dano do evento aleatório E_i.

Alguns autores utilizam também uma versão estendida (fórmula 4) para a definição de risco, na qual a parcela de consequência é desdobrada em exposição e vulnerabilidade (HOLCOMBE, 2015, tradução nossa). Por isso, além da apresentação desses conceitos introdutórios, é necessário abordar outras definições e a terminologia pertencentes à metodologia de análise de risco geotécnico geralmente utilizadas para estudos nessa área.

⁸ CARVALHO, C. S. Risco geotécnico em favelas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., COBRAMSEG, Brasília, 1998. *Anais...* Brasília, 1998, v.4, p.123-141.

$$\text{Risco} = \text{Perigo} \times \text{Exposição} \times \text{Vulnerabilidade} \quad (\text{fórmula 4})$$

Este capítulo aborda os conceitos definidos por Fell et al. em 2008 no trabalho de nome Diretrizes para o Zoneamento da Suscetibilidade, Perigo e Risco de Deslizamentos para Planejamento do Uso do Solo (*Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazards and Risk Zoning Land use Planning*) pelo Comitê Técnico em Deslizamentos e Taludes Artificiais (*Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes – JTC-1*). Nesta publicação, é expressa a importância de que todos os documentos relacionados a esse assunto se utilizem do mesmo conjunto de conceitos, para evitar “mau entendimento de seus termos” (ABGE; ABMS, 2013, p. 25). Além das principais definições, será exibido o *framework* para análise de risco geotécnico apresentado por Fell et al. em 2005, no qual este trabalho será baseado.

4.1 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES PARA AVALIAÇÕES DE RISCO GEOTÉCNICO

É importante saber que análises de risco de encostas e taludes sempre existiram, mesmo que não formalizadas, porém sem que houvesse uma estrutura para padronizar essas avaliações. As primeiras aplicações formais de uma estrutura para análise de risco de movimentos de massa foram utilizadas para zoneamento de deslizamentos para planejamento urbano e gerenciamento de taludes rodoviários na década de 1970, de forma qualitativa. Nas décadas seguintes, abordagens quantitativas começaram a ser utilizadas e o uso dessas análises foi estendido para encostas individuais, dutovias e gerenciamento global de risco de encostas (FELL et al., 2005, p. 3, tradução nossa).

Entretanto, a análise de risco propriamente dita é o último nível de detalhamento de um zoneamento de movimentos de massa. Esses zoneamentos são geralmente realizados “[...] para o planejamento regional, local e específico de uma região”, sendo que seus resultados são “[...] apresentados em uma ou mais das seguintes formas: inventário de deslizamentos⁹, suscetibilidade, mapas de zoneamento de perigo ou de risco e seus relatórios associados”

⁹ Referindo-se a todos os tipos de movimento de massa.

(ABGE; ABMS, 2013, p. 39). Há a necessidade, então, de se definir o que é cada um desses termos citados acima, segundo ABGE; ABMS (2013, p. 25-27, 84):

- a) **Inventário de deslizamento** é “Um inventário do local com tipo, volume, atividade, data de ocorrência e outras características de um deslizamento em uma área”;
- b) **Suscetibilidade de deslizamento** é “Uma avaliação quantitativa ou qualitativa do tipo, do volume (ou área) e da distribuição espacial de deslizamentos que existem ou potencialmente podem ocorrer em uma área”. A velocidade e a intensidade do movimento de massa potencial ou existente também podem ser consideradas, porém esse nível de análise não avalia o período de tempo (frequência) dos deslizamentos de forma explícita;
- c) **Perigo** é “Uma condição com o potencial de causar uma consequência indesejável dentro de um certo período de tempo”. A análise do perigo de movimentos de massa “[...] deve incluir o local, volume (ou área), classificação (tipo) e velocidade dos deslizamentos em potencial e materiais destes resultantes, e a probabilidade de sua ocorrência dentro de um período de tempo determinado”;
- d) **Análise de Risco** é utilizar todos os dados e informações disponíveis para “[...] estimar o risco aos indivíduos, população, propriedades ou meio ambiente, pelos perigos”. Na maioria das Análises de Risco, há a realização das seguintes etapas: “[...] definição do escopo, identificação de perigos e estimativa de risco”;
- e) **Zoneamento** é “A divisão do solo em áreas ou domínios homogêneos e sua classificação de acordo com graus de suscetibilidade, perigo ou risco de deslizamentos reais ou potenciais [...]”.

A quantidade de dados, documentos e o valor dos investimentos necessários para se realizar cada um desses tipos de zoneamento crescem de acordo com o detalhamento de cada um deles. Portanto, o tipo do zoneamento que deverá ser executado e as escalas dos mapas com os resultados da análise dependem de vários fatores, como (ABGE; ABMS, 2013, p. 39-40):

- a) Objetivo de se realizar o zoneamento;
- b) Estágio de desenvolvimento do plano de planejamento do uso do solo;
- c) Tipo de construção;
- d) Tipo e características físicas do movimento de massa;
- e) Financiamento disponível para o projeto;
- f) Quantidade e qualidade de informações disponíveis;
- g) Histórico da área a ser analisada;
- h) Diferença entre os métodos (qualitativos ou quantitativos);
- i) Qualidade e exatidão necessárias para os resultados do zoneamento;

- j) Uso do zoneamento como passo preliminar para outros processos mais detalhados de análise.

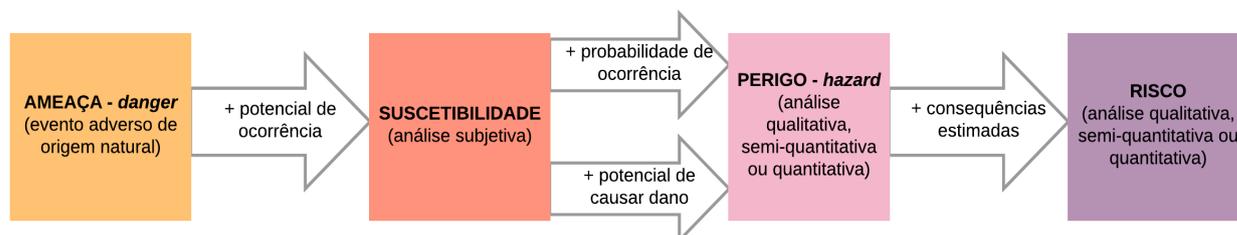
ABGE; ABMS (2013, p. 39) indicam que zoneamentos de risco geralmente serão mais utilizados em situações nas quais o número de elementos em risco já está definido, ou pelo menos, previsto. Além disso, no que tange a ameaça de movimentos de massa, uma análise de risco é normalmente mais necessária quando a velocidade e intensidade (medida através da combinação da própria velocidade e do volume deslocado) do deslizamento tenham maior probabilidade de serem elevadas (ABGE; ABMS, 2013, p. 39).

ABGE; ABMS (2013, p. 40) acrescentam que quando da inexistência ou da inconfiabilidade de dados sobre frequência de deslizamentos, zoneamentos de perigo e risco não podem ser realizados, sendo recomendado o zoneamento de suscetibilidade. Já Carvalho¹⁰ (1998 apud COSTA, 2005, p. 77-78) explica que essa condição não impede o uso da Teoria das Probabilidades na quantificação do risco, apenas determina que, nesses casos, a probabilidade deve adquirir um conceito subjetivo, respectivo ao conhecimento de especialistas da área geotécnica e aos seus graus de confiança na ocorrência do evento adverso. Isso vai de encontro à afirmação de ABGE; ABMS (2013, p. 40) que ressalta a importância de se utilizar métodos quantitativos mesmo para zoneamentos de suscetibilidade e perigo quando for possível, sendo que para zoneamentos de risco, a abordagem quantitativa é obrigatória, segundo esses autores.

A fim de explicitar melhor a relação dos diversos níveis de zoneamento de movimentos de massa, e também dos diversos conceitos envolvidos nesses níveis, é apresentado o diagrama a seguir (figura 16).

¹⁰ CARVALHO, C. S. Risco geotécnico em favelas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., COBRAMSEG, Brasília, 1998. *Anais...* Brasília, 1998, v.4, p.123-141.

Figura 16 – Relações entre definições básicas



(fonte: elaborada pela autora)

A probabilidade de ocorrência do movimento de massa, que é incluída no processo de análise na etapa de determinação do perigo, determina se a análise de perigo e, conseqüentemente, de risco terá uma abordagem qualitativa, semi-quantitativa ou quantitativa, como já foi mencionado anteriormente. ABGE; ABMS (2013, p. 83) definem **probabilidade** como:

Uma medida do grau de certeza. Esta medida tem um valor entre zero (impossibilidade) e 1,0 (certeza). É uma estimativa da possibilidade da magnitude de uma quantidade incerta ou da possibilidade da ocorrência de um evento no futuro. Existem duas interpretações principais:

- (i) Estatística – frequência ou fração – O resultado de uma experiência repetitiva como, por exemplo, jogar cara ou coroa. Ela inclui também a ideia de variabilidade de população. Tal número é chamado um “objetivo” ou probabilidade de frequência relativa porque ele existe no mundo real e é, em princípio, mensurável pela realização de experimentos.
- (ii) Probabilidade subjetiva (grau de crença) – Medida quantificada da crença, julgamento, opinião ou confiança na possibilidade de um resultado, obtida através da consideração de toda a informação disponível, honesta e justamente, com o mínimo de tendenciosidade (viés, *bias*). A probabilidade subjetiva é afetada pelo estado de entendimento de um processo, julgamento relativo a uma avaliação, ou a qualidade e a quantidade da informação. Esta pode mudar com o tempo assim como a mudança do estado de conhecimento muda.

Assim, se forem usadas probabilidades subjetivas e “[...] escalas de classificação descritivas ou numéricas para descrever a magnitude das conseqüências em potencial [...]” (ABGE; ABMS, 2013, p. 83), o resultado será uma **Análise Qualitativa de Risco**. Uma **Análise Quantitativa de Risco** se baseia, então, “[...] em valores numéricos de probabilidade, vulnerabilidade e conseqüências [...]” (ABGE; ABMS, 2013, p. 83). Já Análises Semi-quantitativas são métodos que envolvem procedimentos quantitativos e qualitativos para análise do risco.

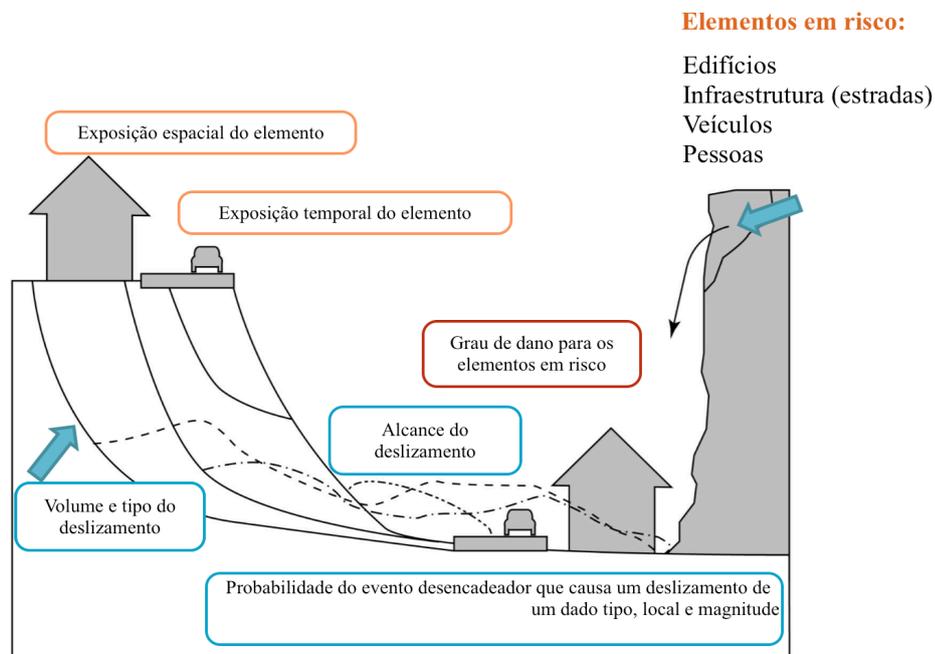
As **conseqüências**, que devem ser estimadas para caracterização de uma análise de risco, são proporcionais ao número de elementos em risco (em **exposição** à ameaça) e às suas

vulnerabilidades. São definidas como “ Os resultados, ou resultados potenciais, que surgem da ocorrência de um deslizamento, expressos quantitativa ou qualitativamente, em termos de perda, [...] danos, lesões ou perdas de vida” (ABGE; ABMS, 2013, p. 81). A exposição dos elementos em risco é função do tipo de ameaça (movimentos de massa) e da localização espacial e temporal dos elementos, como pode ser visto na figura 17.

Os **elementos em risco** são a “População, prédios e construções, atividades econômicas, serviços públicos, outros tipos de infraestrutura e valores do meio ambiente na área que é potencialmente afetada pelo perigo do deslizamento” (ABGE; ABMS, 2013, p. 26). Já a **vulnerabilidade** se refere à vulnerabilidade técnica dos elementos em risco, sendo conforme ABGE; ABMS (2013, p. 26):

O grau de perda para um dado elemento ou grupo de elementos dentro da área afetada pelo deslizamento. É expressa numa escala de zero (sem perda) até 1,0 (perda total). Para propriedades, a perda será o valor do dano relativo ao valor da propriedade; para pessoas, será a probabilidade de uma vida em particular (elemento em risco) ser perdida, dado que a pessoa seja afetada pelo deslizamento.

Figura 17 – Elementos em risco a um deslizamento

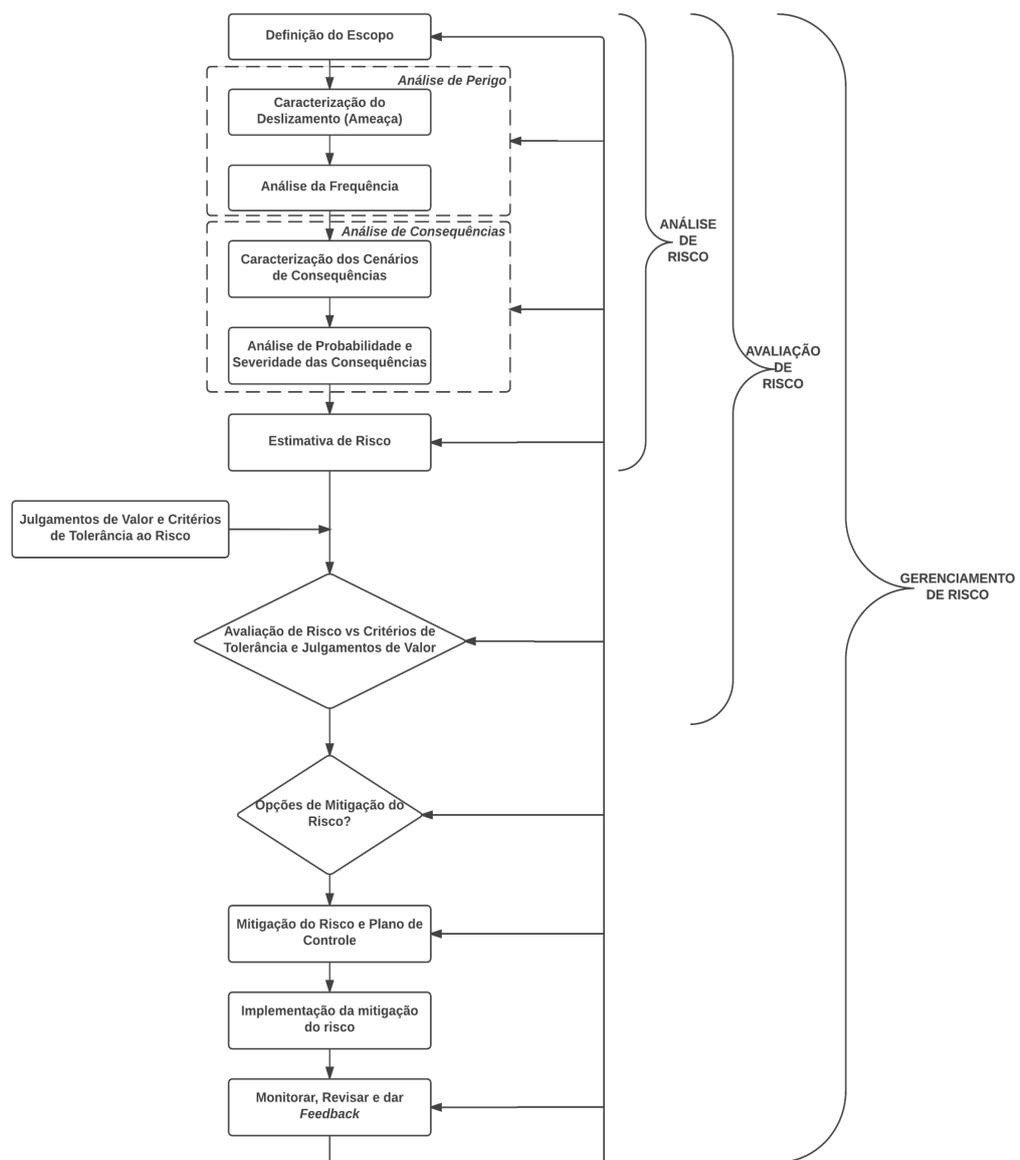


(fonte: HOLCOMBE, 2015, tradução nossa)

4.2 FRAMEWORK PARA AVALIAÇÕES DE RISCO GEOTÉCNICO

A partir das definições apresentadas na seção anterior, é possível apresentar o *framework* (figura 18) a ser utilizado para análises de suscetibilidade, perigo e risco de movimentos de massa, tanto em abordagens quantitativas quanto qualitativas (ABGE; ABMS, 2013, p. 29). O *framework* também inclui ações para avaliação e gerenciamento de risco.

Figura 18 – *Framework* para análise, avaliação e gerenciamento de risco geotécnico



(fonte: adaptado de FELL et al., 2005, p. 5, tradução nossa)

5 METODOLOGIA NACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO

Com o objetivo de desenvolver a capacitação técnica de equipes municipais brasileiras e ações de planejamento para montar sistemas municipais de gerenciamento de riscos, o Ministério das Cidades promoveu, em 2004, “[...] a elaboração de um material de treinamento para o gerenciamento de áreas de risco com ênfase no mapeamento de risco de deslizamentos, enchentes e inundações”, através da contribuição das experiências sobre o tema de pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (CARVALHO et al., 2007, p. 3, 5-6). O documento atende pelo nome de Material de Treinamento de Equipes Municipais para o Mapeamento de Riscos de Deslizamentos de Encostas e Solapamentos de Margens e tem o intuito de propor um método de mapeamento nacional unificado de baixa complexidade, baixo custo de execução e linguagem comum aos técnicos de municípios, para proporcionar a determinação e análise das áreas de risco por todo o país, tornando-se material referência nacional na área de gerenciamento de riscos, para todos os municípios que sofrem com ameaças relacionadas ao período de chuvas (CARVALHO et al., 2007, p. 3-6).

Este material apresenta uma metodologia básica de análise de risco, que permite o mapeamento dos riscos, a implementação de medidas de segurança nas áreas mapeadas, se forem necessárias, e a comparação das situações de risco através de todo o território nacional (CARVALHO et al., 2007, p. 11). Entretanto, por ter como público-alvo técnicos municipais, que usualmente são profissionais sem conhecimento técnico avançado em geologia/geotecnia, e por ser de baixo custo de execução, a metodologia apresentada no material é de abordagem qualitativa.

Esse tipo de abordagem se adapta bem à realidade das áreas urbanas das cidades brasileiras, onde a realização de ensaios de campo é relativamente difícil e o custo de ensaios de campo e laboratoriais por vezes excedem o orçamento dos municípios para esse problema. Porém, para casos mais específicos, como análises de encostas e taludes de áreas rurais dos municípios, é possível a aplicação de uma metodologia mais quantitativa para análise de risco, utilizando-se métodos probabilísticos.

A fim de contemplar os dois tipos de metodologias referentes a análises de risco existentes em bibliografia nacional (abordagens qualitativa e quantitativa), esse capítulo abordará não só o material disponibilizado pelo IPT, como também, uma metodologia proposta por Costa (2005) para análise probabilística de taludes de terra.

5.1 ABORDAGEM QUALITATIVA

O material desenvolvido por Carvalho et al. (2007) e disponibilizado pelo IPT foi realizado com a finalidade de abordar quatro questões importantes no âmbito do gerenciamento de áreas urbanas com risco de deslizamentos, enchentes e inundações. A seguir, são apresentadas as questões com seus respectivos planos de ações para respondê-las (CARVALHO et al., 2007, p. 17):

- a) **O que e como ocorre?** Refere-se aos tipos de processos presentes e como ocorrem, determinando seus fatores preparatórios e elementos deflagradores, sejam eles naturais ou antrópicos. Essa etapa é denominada de Identificação da Tipologia dos Processos;
- b) **Onde ocorrem os problemas?** A partir da etapa anterior, é feito o Mapeamento das áreas de risco, para a identificação dos locais onde os processos ocorrem ou podem ocorrer;
- c) **Quando ocorrem os problemas?** A partir de Monitoramento e de estudos de correlação com condições hidrometeorológicas adversas, definem-se quais são os momentos mais prováveis para a deflagração dos processos;
- d) **O que fazer e quem será responsável?** Com o conhecimento apreendido sobre os processos nas três etapas anteriores, planeja-se Medidas Estruturais ou Não-Estruturais a serem tomadas e quem será responsável pela implantação das mesmas.

As três primeiras questões referem-se ao primeiro fundamento na área de gerenciamento de riscos, que é chamado de Previsão, já a quarta questão é relacionada ao segundo fundamento denominado de Prevenção (CARVALHO et al., 2007, p. 18). Além dessas questões, o trabalho também seguiu o Modelo de Abordagem da ONU para o combate de acidentes naturais na composição do manual (CARVALHO et al., 2007, p. 18). Este item limita-se, então, na apresentação dos principais pontos referentes à análise de risco de movimentos de massa (deslizamentos) presentes no manual do IPT.

5.1.1 Modelo de Abordagem da ONU

Em 1991, a Agência de Coordenação das Nações Unidas para o Socorro em Desastres (UNDRO) “[...] elaborou um modelo de abordagem para o enfrentamento de acidentes naturais, baseando-se em duas atividades: prevenção e preparação” (CARVALHO et al., 2007, p. 18). As atividades de prevenção englobam estudos técnicos-científicos dos fenômenos e processos que causam acidentes naturais, análise de risco, e ações, metodologias e técnicas para a prevenção de desastres. Já as atividades de preparação são relacionadas às ações de defesa civil, de ordem logística, para o enfrentamento de situações de emergência, como a evacuação e/ou proteção da população localizada em áreas de risco elevado ou após a ocorrência de um desastre (CARVALHO et al., 2007, p. 18-19).

Nesse modelo de abordagem, há a definição de ações essenciais que devem estar presentes em programas de Mitigação de Desastres, as quais incluem (CARVALHO et al., 2007, p. 19):

- a) Identificação dos riscos;
- b) Análise dos riscos;
- c) Medidas de prevenção;
- d) Planejamento para situações de emergência;
- e) Informações públicas e treinamento.

Como o presente trabalho se limita à análise de risco, não envolvendo as demais atividades do gerenciamento de risco, serão detalhados aqui somente as duas primeiras ações do programa de Mitigação de Desastres apresentadas acima.

5.1.1.1 Identificação dos Riscos

A identificação dos riscos consiste em estudos sobre os fenômenos e processos e a pré-setorização das áreas. Eles se referem (CARVALHO et al., 2007, p. 19-20):

[...] aos trabalhos de reconhecimento de ameaças ou perigos e da identificação das respectivas áreas de risco. Para cada tipo de ameaça, deve-se entender os fatores condicionantes, os agentes deflagradores e os elementos sob risco. Os trabalhos de identificação apresentam-se, geralmente, sob a forma de mapas de identificação espacial das áreas de risco.

5.1.1.2 Análise dos Riscos

A análise de riscos é executada a partir dos resultados apresentados na ação de identificação dos riscos. Ela aborda, de uma maneira mais detalhada, as áreas nas quais os processos estão presentes, possibilitando um melhor entendimento sobre o grau de risco efetivo em cada área, para cada tipo de processo reconhecido na ação anterior (CARVALHO et al., 2007, p. 20). As atividades envolvidas nessa ação englobam (CARVALHO et al., 2007, p. 20):

- a) Zoneamento ou setorização das áreas;
- b) Quantificação relativa e/ou absoluta do risco;
- c) Cadastramento de risco;
- d) Carta de risco;
- e) Hierarquização de risco;
- f) Avaliação de possíveis cenários de acidentes.

5.1.2 Conceitos básicos para Análise de Risco

Os conceitos básicos de risco e análise de risco são praticamente os mesmos apresentados no capítulo 4, item 4.1 deste trabalho e, para evitar repetições e o alongamento da revisão bibliográfica, essas definições não serão colocadas novamente no presente capítulo.

5.1.3 Descrição dos movimentos de massa, tipos e proposta de mapeamento

Neste item, será oferecido um comentário sobre a descrição de movimentos de massa contida no manual do IPT e serão indicados os tipos e uma proposta de método de mapeamento exibidos no mesmo material de treinamento para técnicos municipais.

5.1.3.1 Descrição dos movimentos de massa

A descrição dos movimentos de massa que podem ocorrer em taludes, a partir da caracterização física e geotécnica da tipologia desses processos, dos condicionantes, causas e indicadores visuais de movimentação é apresentada no capítulo 3 deste trabalho. Novamente, não serão repetidos no presente capítulo tais definições. Porém, vale ressaltar que a

classificação de movimentos de massa adotada no manual do IPT não é a de Varnes (1978) e sim a proposta por Augusto Filho¹¹ (1992 apud CARVALHO et al., 2007, p. 32-33), que pode ser vista no quadro 3.

A diferença entre tais classificações é mínima, sendo que a principal se dá na divisão de quantos tipos de movimentos existem. Na classificação de Augusto Filho (1992), os movimentos são divididos em quatro grandes grupos, de acordo com o processo de movimentação: rastejo (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*).

Quadro 3 – Classificação de deslizamentos por Augusto Filho (1992)

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO/ MATERIAL/GEOMETRIA
RASTEJO (CREEP)	vários planos de deslocamento (internos)
	velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade
	movimentos constantes, sazonais ou intermitentes
	solo, depósitos, rocha alterada/fraturada
	geometria indefinida
ESCORREGAMENTOS (SLIDES)	poucos planos de deslocamento (externos)
	velocidades médias (m/h) a altas (m/s)
	pequenos a grandes volumes de material
	geometria e materiais variáveis:
	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
QUEDAS (FALLS)	sem planos de deslocamento
	movimento tipo queda livre ou em plano inclinado
	velocidades muito altas (vários m/s)
	material rochoso
	pequenos a médios volumes
	geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.
	ROLAMENTO DE MATAÇÃO
	TOMBAMENTO
CORRIDAS (FLOWS)	muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação)
	movimento semelhante ao de um líquido viscoso
	desenvolvimento ao longo das drenagens
	velocidades médias a altas
	mobilização de solo, rocha, detritos e água
	grandes volumes de material
	extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

(fonte: AUGUSTO FILHO, 1992 apud CARVALHO et al., 2007, p. 32-33)

¹¹ AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológica-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. p. 721-733.

5.1.3.2 Tipos de mapeamento

Carvalho et al. (2007, p. 42-43) consideram que dentre vários tipos de mapeamento, três deles podem ser destacados, já que, a partir de suas realizações, é obtido um mapeamento de risco de determinada área. Os três tipos de mapeamento são: **mapa de inventário**, **mapa de suscetibilidade** e **mapa de risco** (postos na sequência de suas execuções).

O mapa de inventário é o primeiro a ser feito e demonstra a distribuição espacial dos eventos, o tipo, tamanho, forma e estado da atividade, e informações coletadas em campo, como fotos e imagens (CARVALHO et al., 2007, p. 42). O segundo é o mapa de suscetibilidade, que depende da realização do primeiro mapa para possibilitar sua execução. O mapa de suscetibilidade expressa a suscetibilidade de áreas de risco às ameaças, de acordo com a probabilidade de ocorrência dos processos naturais ou induzidos. Esse mapa é essencial para elaborar medidas de prevenção e planejamento de uso do solo e ocupação, tendo as seguintes características: é fundamentado no mapa de inventário; inclui os fatores influentes na possibilidade de ocorrência dos eventos, explicitando sua correlação; e classifica as áreas de risco segundo graus de suscetibilidade (CARVALHO et al., 2007, p. 42-43).

Mesmo que o mapa expresse a suscetibilidade das áreas conforme graus de probabilidade de ocorrência, por se tratar de uma abordagem qualitativa, deve-se entender suscetibilidade como um potencial de que os eventos adversos ocorram na região, sem a exigência de cálculo rigoroso de probabilidade de ocorrência. Se um cálculo mais formal de probabilidade de ocorrência for feito e se houver uma avaliação do potencial do deslizamento causar danos, seria mais adequado nomear-se o mapeamento como um mapa de perigo, para ir de acordo com a terminologia internacionalmente adotada.

Por fim, com a posse dos mapas de inventário e suscetibilidade, pode ser realizado o mapa de risco. Este mapa classificará as áreas segundo graus de risco, a partir da avaliação dos danos potenciais à população, que são resultados da conjunção da probabilidade de ocorrência das ameaças com as consequências sociais e econômicas decorrentes das mesmas ameaças, se estas de fato acontecerem. Este tipo de mapa tem como características principais: contém a probabilidade espacial e temporal, tipologia e comportamento das ameaças; apresenta as vulnerabilidades dos elementos em risco e os custos dos danos; e possui aplicabilidade temporal limitada (CARVALHO et al., 2007, p. 43).

5.1.3.3 Proposta de método de mapeamento

O método de mapeamento proposto por Carvalho et al. (2007) tem como objetivo “[...] a identificação e caracterização de áreas de risco sujeitas a deslizamentos e solapamentos de margens [...]” (CARVALHO et al., 2007, p. 43), e para realização de tal propósito, usam-se duas metodologias: o zoneamento e o cadastramento de risco.

Para Carvalho et al. (2007, p. 44), “O zoneamento compreende a identificação dos processos destrutivos atuantes, a avaliação do risco de ocorrência de acidentes e a delimitação e distribuição espacial de setores homogêneos em relação ao grau de probabilidade de ocorrência do processo ou [...] de risco [...]”. Segundo o mesmo autor, o cadastramento de riscos oferece informações mais detalhadas sobre esses setores de risco, como quantidade de moradias nessas áreas, identificando quais necessitam ser removidas, e é considerado essencial para ações de intervenção dos órgãos responsáveis. O cadastramento também possibilita a análise de situações individualmente ou por grupos de mesmo grau de probabilidade de ocorrência do processo ou risco (CARVALHO et al., 2007, p. 44).

O primeiro passo do mapeamento consiste, então, em um zoneamento chamado de pré-setorização. A realização da pré-setorização depende da experiência e da vivência do profissional em trabalhos de mapeamento, e é realizada a partir da observação das seguintes características das áreas de risco (CARVALHO et al., 2007, p. 44-46):

- a) Declividade ou inclinação do talude: pode variar conforme geologia, relevo e ações humanas sobre as encostas, mas existem valores de referência acima dos quais há iminência do início de deslizamentos (17° pela Lei Federal 6766/79 e 20°-25° na Serra do Mar em São Paulo, a partir de dados históricos);
- b) Tipologia dos processos: também depende da geologia, do relevo e das intervenções humanas, como cortes e aterros;
- c) Posição das moradias em relação ao talude: indica se a moradia pode sofrer queda ou atingimento devido à ocorrência de um evento adverso (quando perto do alto do talude há a possibilidade de queda, quando próxima à base há a possibilidade de atingimento, e se estiver em meia-encosta pode ocorrer tanto a queda quanto o atingimento da moradia);
- d) Qualidade das moradias: indica a vulnerabilidade das moradias, onde moradias de madeira são mais vulneráveis às ameaças quando comparáveis a moradias construídas com alvenaria.

O segundo passo do mapeamento é chamado de setorização, envolvendo tanto princípios de zoneamento quanto de cadastramento de riscos. Essa etapa é realizada através do

preenchimento de fichas de campo, que devem conter informações sobre características do local, sobre a presença de indicadores visuais de movimentos de solo, sobre a presença de água e vegetação, e desenhos (plantas), fotos e guias de ruas para a correta delimitação das áreas. Esta etapa deve ser desempenhada por uma equipe treinada para tal tarefa e que tenha conhecimento sobre os movimentos de massa já ocorridos e/ou existentes na área a ser mapeada, com o fim de se determinar valores adequados para o grau de probabilidade de ocorrência dos deslizamentos ou para o grau de risco das áreas (CARVALHO et al., 2007, p. 46).

No fim dessas etapas, as áreas mapeadas receberão graus qualitativos de probabilidade de ocorrência de deslizamentos ou de risco, conforme a seguinte escala (CARVALHO et al., 2007, p. 47):

- a) R4 – Muito Alto;
- b) R3 – Alto;
- c) R2 – Médio;
- d) R1 – Baixo ou sem risco.

5.1.4 Roteiro metodológico para Análise de Risco e Mapeamento de Deslizamentos de Solo

O roteiro metodológico apresentado no manual do IPT apresenta um passo a passo para elaborar um cadastramento emergencial de risco de deslizamentos, por meio de vistorias em campo feitas por técnicos municipais, sem a necessidade que estes sejam especialistas em engenharia ou geologia. O objetivo da realização do cadastro com essa metodologia é obter a potencialidade de ocorrência de acidentes, e até mesmo, determinar o grau (nível) de risco da área a ser analisada (CARVALHO et al., 2007, p. 51).

O cadastramento baseia-se no preenchimento de uma ficha de campo, composta de oito passos e algumas observações, que serão abordadas a seguir. No cabeçalho da ficha de campo, e antes de cada uma dessas etapas, consta uma introdução com dicas e instruções para ajudar no preenchimento dos dados (CARVALHO et al., 2007, p. 52).

Conforme Carvalho et al. (2007, p. 52-66), os passos ou etapas para a realização do cadastramento de risco resumem-se em:

- a) **Levantamento de dados gerais da moradia:** nesse campo deverá ser colocada a localização (endereço) da moradia em análise, identificação do morador, condições de acesso à moradia e o tipo de moradia (com relação ao seu material de construção);
- b) **Caracterização do local:** identificação do tipo e do material do talude (natural ou de corte/aterro, de solo, ou aterro lançado, ou rocha), assinalando a presença de blocos de rocha (matacões), de bananeiras e lixo/entulho, determinação da inclinação do talude (escolhendo uma dentre as seguintes opções: 10°, 17°, 30°, 60° e 90°) de forma visual, e distância da moradia ao topo ou à base dos taludes;
- c) **Água:** observar a presença de água (pluvial, servida e esgoto), principalmente a respeito de sua origem e de seu destino, e se há ou não sistema eficaz de drenagem superficial, concentração de água da chuva na superfície, vazamentos em tubulações, etc.;
- d) **Vegetação nas proximidades do talude:** avaliar a área de acordo com a presença de árvores, arbustos, cultivos ou se é uma área desmatada. Especial atenção deve ser dada às áreas que possuem bananeiras, já que é amplamente aceito na comunidade acadêmica que elas prejudicam a estabilidade de encostas, pois facilitam a infiltração de água;
- e) **Sinais de movimentação:** observar a presença de juntas de alívio, fendas de tração, fraturas de alívio, trincas no terreno e nas moradias, degraus de abatimento, inclinação de estruturas rígidas (como árvores e postes), embarrigamento de muros e paredes, e, por fim, se há cicatrizes de deslizamentos. Este passo é considerado o mais importante para determinação do grau de risco, mas vale ressaltar que esses sinais são úteis para monitorar movimentos lentos, com velocidade de m/s a m/h;
- f) **Tipos de movimentos de massa esperados ou ocorridos:** esse passo considera que após a realização das etapas anteriores, o técnico responsável pelo cadastramento tenha capacidade de determinar qual(is) é(são) o(s) tipo(s) de movimentos potenciais na área. A classificação adotada no método é a de Augusto Filho (1992), mostrada no quadro 3 no item 5.1.3.1, e o roteiro traz desenhos para auxiliar na determinação do tipo de movimento. Porém, é aconselhada a consulta a um especialista em casos que impossibilitem o adequado julgamento do técnico sobre a situação;
- g) **Determinação do grau do risco:** nesse passo, considerado o ponto principal do roteiro, acumulam-se todos os julgamentos dos parâmetros relevantes para análise de risco apresentados nas seis etapas anteriores para classificar a área analisada em:
- Risco Muito Alto: exigindo ações imediatas;
 - Risco Alto: permanência do estado de observação sobre a área;
 - Risco Médio: permanência do estado de observação sobre a área;
 - Risco Baixo ou Sem Risco.
- O quadro 4 apresenta os critérios para a classificação de um determinado local em um desses quatro níveis de risco;

- h) **Necessidade de remoção:** se a área for enquadrada em risco muito alto, providências para remover as pessoas de suas moradias serão necessárias. Então, esse campo fornece informações para a Defesa Civil sobre o número de moradias e pessoas nesse nível crítico de risco.

Além dos campos para preenchimento desses oito passos na ficha de vistoria, há espaços destinados para o técnico responsável anotar outras informações sobre a moradia ou o talude em si e também para fazer desenhos. São requisitados dois desenhos, essenciais para permitir discussões sobre o cadastro entre pessoas que não o executaram, os quais são: a planta de situação da(s) moradia(s), incluindo indicadores visuais de movimentação se possível, e o perfil da encosta, com as medidas/cotas relevantes para a análise (CARVALHO et al., 2007, p. 67).

É importante ressaltar que os técnicos municipais são encorajados, por meio de um lembrete na ficha de campo, a buscar auxílio de profissionais especializados em geologia-geotecnia, caso estejam em dúvida sobre alguma situação encontrada durante o cadastramento. Os cadastros também possuem a assinatura do técnico responsável por suas realizações, e “ [...] a possibilidade de responsabilização por um diagnóstico equivocado, que possa ter causado prejuízos materiais ou sociais” existe (CARVALHO et al., 2007, p. 68).

Quadro 4 – Critérios para a determinação dos graus de risco

Grau de Probabilidade	Descrição
<p>R1 Baixo ou sem risco</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. não se observa(m) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens.</p> <p>3. mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.</p>
<p>R2 Médio</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. observa-se a presença de algum(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento.</p> <p>3. mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
<p>R3 Alto</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. observa-se a presença de significativo(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo.</p> <p>3. mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
<p>R4 Muito Alto</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. os sinais/feições/evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de deslizamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação à margem de córregos, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. É a condição mais crítica, sendo impossível monitorar a evolução do processo, dado seu elevado estágio de desenvolvimento.</p> <p>3. mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>

(fonte: CARVALHO et al., 2007, p. 64-65)

5.2 ABORDAGEM QUANTITATIVA

A abordagem quantitativa à Análise de Risco proposta por Costa (2005) envolve o uso de probabilidade e estatística para estimar as incertezas referentes aos parâmetros de entrada, que sempre estarão presentes nas análises, mesmo que o modelo de análise determinística a ser utilizado (geralmente o de equilíbrio limite) seja o mais completo possível. As incertezas têm diversas origens como “[...] a heterogeneidade e anisotropia inerentes ao solo, as dificuldades experimentais de investigação e a dificuldade de se estabelecer a superfície de ruptura crítica”, além disso há incertezas devidas às simplificações adotadas para possibilitar a análise por modelos determinísticos (COSTA, 2005, p. 17-18).

Quando a análise de estabilidade de um talude é feita por meio de métodos determinísticos, os engenheiros responsáveis pela avaliação geralmente adotam valores conservadores para as propriedades do solo, obtendo resultados na forma de um fator de segurança, que deve ter uma margem de segurança adequada, conforme o nível de controle e conhecimento que se tem sobre as incertezas e sobre o desempenho real do talude. Os métodos probabilísticos aplicados à engenharia geotécnica são, então, uma maneira de “[...] criar um procedimento sistemático de tratamento das incertezas de forma quantitativa” (COSTA, 2005, p. 20).

Além da inserção de ferramentas de probabilidade e estatística na sua proposta de metodologia, Costa (2005, p. 18) indica que “[...] o senso crítico formado pela experiência, seja pela prática ou pelo estudo de casos similares apresentados na literatura, deve ser usado na definição das regiões críticas” e, portanto, sendo utilizado em análises de risco promove a otimização e a eficácia da aplicação dos recursos financeiros.

Nesse sentido, o presente capítulo apresentará algumas considerações principais, tidas como básicas para a contextualização e o entendimento da metodologia proposta por Costa (2005), e a metodologia de análise probabilística de taludes de terra propriamente dita.

5.2.1 Considerações fundamentais

Nesta seção, serão abordadas algumas observações sobre itens pertinentes à análise de Costa (2005) que são consideradas importantes como base teórica para a compreensão da metodologia proposta pelo autor. Este item é subdividido em: Análise Determinística e

Probabilística, Origem e Tipos de Incertezas, Definições Estatísticas Básicas, Fator de Segurança e Confiabilidade, e algumas observações sobre Risco Geotécnico.

5.2.1.1 Análise Determinística e Probabilística

Os métodos de análise determinísticos e probabilísticos possuem algumas diferenças relevantes que Costa (2005), por meio de uma discussão baseada em El-Ramly (2001), aborda de forma breve.

Os **métodos determinísticos** mais utilizados por engenheiros geotécnicos nas últimas décadas, para previsão de desempenho e análise de estabilidade dos taludes, são os modelos analíticos (numéricos) como os métodos de Bishop, Spencer, Morgenstern-Price e Janbu. Nesses métodos, os parâmetros de entrada são adotados como a melhor estimativa simples de cada parâmetro, a partir de dados disponíveis e do julgamento dos especialistas. O resultado da análise é único, um fator de segurança, que é aceito como uma representação adequada do desempenho real do talude (EL-RAMLY¹², 2001 apud COSTA, 2005, p. 22-23). Segundo El-Ramly (2001 apud COSTA, 2005, p. 22):

A principal suposição envolvida na abordagem determinística é que o erro estimado, diferença entre o valor real desconhecido dos parâmetros de entrada e as nossas estimativas, seja igual a zero. No caso das Ciências da Terra, nas quais as propriedades do material tendem a ser variáveis e os dados disponíveis normalmente são esparsos, não há justificativa para essa suposição. Além disso, a suposição de que os modelos usados para a previsão de desempenho não tenham falhas e representam perfeitamente a realidade, raramente será o caso.

Como a incerteza nos métodos determinísticos não é considerada de forma explícita quantitativamente, os parâmetros de entrada e os projetos de taludes adotados pelos engenheiros geotécnicos possuem um caráter conservador, que, conseqüentemente, é embutido dentro do fator de segurança global do projeto. E, mesmo com o uso do conservadorismo na prática habitual de projeto de taludes, há a presença de um elemento de risco, que não se pode evitar. Entretanto, vale ressaltar que essa prática convencional é amparada por décadas de uso e por um grande número de experiências, que sustentam a sua aplicação ainda atualmente (EL-RAMLY, 2001 apud COSTA, 2005, p. 24-25).

¹² EL-RAMLY, H. **Probabilistic analysis of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. 2001. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada; Jan., 2001, 391p.

Já os **métodos probabilísticos** tratam os parâmetros de entrada como variáveis aleatórias, levando em consideração, então, as incertezas dos próprios parâmetros e dos modelos de previsão. A incerteza nos parâmetros é refletida na possibilidade de que os valores dos parâmetros de entrada possam assumir magnitudes variadas dentro de um determinado intervalo, sendo que cada magnitude tem sua respectiva probabilidade de ocorrência, obtida através dos dados disponíveis. Como os parâmetros de entrada são variáveis aleatórias, o resultado de um método probabilístico de análise também é um intervalo de valores possíveis para o desempenho do talude, com cada valor tendo uma probabilidade de ocorrência (EL-RAMLY¹³, 2001 apud COSTA, 2005, p. 22).

Então, o método probabilístico para análise de taludes também é executado utilizando-se métodos de equilíbrio limite, porém considerando os parâmetros de entrada do projeto variáveis. “As técnicas probabilísticas auxiliam no entendimento das principais origens de risco, melhoram o julgamento de engenharia e permitem uma comparação racional entre confiabilidade de projetos alternativos, melhorando o processo de tomada de decisão” (EL-RAMLY, 2001 apud COSTA, 2005, p. 25).

5.2.1.2 Origem e Tipos de Incertezas

Conforme Costa (2005, p. 36), todas as etapas de uma obra envolvem incertezas, a partir da caracterização do local, posteriormente o projeto e a tomada de decisões, até a construção. As incertezas podem ser muito influentes na confiabilidade da segurança estimada de um talude, o que pode ser percebido quando rupturas ocorrem em obras projetadas para serem seguras.

No âmbito da engenharia geotécnica, as incertezas foram classificadas em três categorias por Morgenstern, em 1995, facilitando a abordagem e o uso prático das mesmas (EL-RAMLY, 2001 apud COSTA, 2005, p. 37,40-41):

- a) **Incerteza dos Parâmetros:** referente a incertezas ligadas aos parâmetros geotécnicos do solo, como resistência ao cisalhamento, poro-pressão e compressibilidade. É dividida em:
 - **Dispersão dos dados:** “Dispersão das propriedades do solo em torno da tendência média”, devido à variabilidade espacial real das propriedades ou a

¹³ EL-RAMLY, H. **Probabilistic analysis of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. 2001. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada; Jan., 2001, 391p.

erros aleatórios de medida (por causa do operador ou do equipamento defeituoso);

- **Erros sistemáticos de dados:** “Incerteza na localização da tendência média em relação ao valor real (desconhecido)”, devido ao tamanho limitado da amostra ou a desvios (viés) nos procedimentos de medida;

b) **Incerteza do Modelo:** devido a questões numéricas (simplificações de hipóteses, truncamentos, etc.) ou a questões conceituais;

c) **Incerteza Humana:** resulta de enganos humanos (falta de cuidado ou comunicação, etc.), é imprevisível e aleatória.

5.2.1.3 Definições Estatísticas Básicas

Como foi dito no item 5.2.1.1, o método probabilístico para análise de estabilidade de taludes considera que os parâmetros de entrada são variáveis aleatórias. Portanto, esses parâmetros possuem uma média (μ) e um desvio padrão (σ), sendo que “A média é uma medida de localização central ou a melhor estimativa da propriedade do solo; enquanto que o desvio padrão é uma medida da dispersão dos dados ou da incerteza” (COSTA, 2005, p. 49).

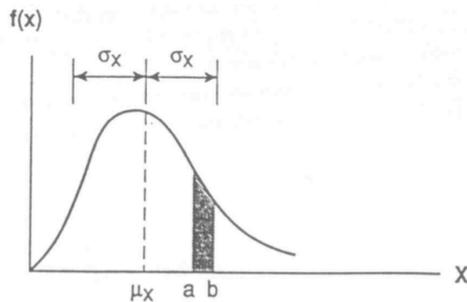
Uma definição importante na estatística é o conceito de Função Densidade de Probabilidade – PDF (*Probability Density Function*), que é representada por $f(x)$ e, conforme, Whitman¹⁴ (1984 apud COSTA, 2005, p. 49-50):

[...] descreve a incerteza sobre uma variável, ou seja, a probabilidade da variável aleatória assumir um valor particular em relação a outros possíveis. A incerteza em $f(x)$, descrita pela função de densidade de probabilidades (PDF) [...] para o caso onde a variável aleatória seja distribuída continuamente, é caracterizada por uma média μ_x e um desvio padrão s_x .

Segundo Costa (2005, p. 50) e diversos outros trabalhos lá citados, “A distribuição normal (ou Gaussiana) e as distribuições log-normais são os modelos de variáveis aleatórias mais usuais”, ver figura 19 que mostra uma distribuição normal. Porém, quando opiniões e julgamentos de especialistas em geotecnia forem utilizados para se estabelecer probabilidades de ocorrência de determinados valores para parâmetros de entrada, como probabilidades subjetivas, pode ser adotada uma distribuição triangular, onde “b” refere-se a melhor estimativa e “a” e “c” aos limites inferior e superior do intervalo, respectivamente, como pode ser visto na figura 20 (WHITMAN, 1984 apud COSTA, 2005, p. 50).

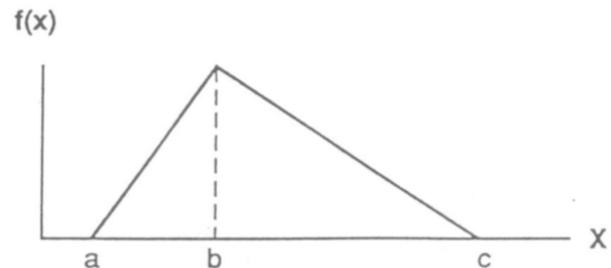
¹⁴ WHITMAN, R. V. **Evaluating calculated risk in geotechnical engineering**. Journal of Geotechnical Engineering. New York: ASCE, v.110, n.2, p.144-188. Feb. 1984, 17., Terzaghi Lecture.

Figura 19 – Função Densidade de Probabilidade Normal



(fonte: adaptado de COSTA, 2005, p. 51)

Figura 20 – Função Densidade de Probabilidade Triangular para probabilidades subjetivas



(fonte: adaptado de COSTA, 2005, p. 51)

A Função Distribuição Acumulada ou Função de Distribuição de Probabilidades – CDF (*Cumulative Distribution Function*) é a integral da probabilidade correspondente na PDF e descreve praticamente a mesma informação que aquela. A CDF “[...] mostra a probabilidade da variável assumir um valor menor ou igual a um valor selecionado” (COSTA, 2005, p. 52).

5.2.1.4 Fator de Segurança e Confiabilidade

O Fator de Segurança, resultado obtido por meio do uso de análise determinística da estabilidade do talude, é bem conhecido por engenheiros e consiste na razão entre a Resistência, valor admissível ou capacidade do solo do talude em relação à Solicitação, devida a cargas aplicáveis sobre o talude ou o próprio peso do solo (WHITMAN¹⁵, 1984 apud COSTA, 2005, p. 54). Para Whitman (1984 apud COSTA, 2005, p. 54), o valor obtido como fator de segurança tem pouca relação com a possibilidade de ruptura do talude, já que:

[...] normalmente os passos pelos quais a resistência é selecionada ou a solicitação é determinada ainda não estão bem definidos nem seguem um padrão uniforme pelos engenheiros. Portanto, um talude com um fator de segurança relatado como 1,5 pode ter, na verdade, uma margem de segurança menor ou maior probabilidade de ruptura do que outro talude com o mesmo fator de segurança.

Assim, para “[...] assegurar o desempenho satisfatório do sistema dentro das restrições econômicas, que implicam no desenvolvimento de projetos sem informações completas e sob condições de incertezas”, é utilizada a Teoria da Confiabilidade, um ramo da Teoria da Probabilidade (WHITMAN, 1984 apud COSTA, 2005, p. 54-55). Nessa Teoria da

¹⁵ WHITMAN, R. V. **Evaluating calculated risk in geotechnical engineering**. Journal of Geotechnical Engineering. New York: ASCE, v.110, n.2, p.144-188. Feb. 1984, 17., Terzaghi Lecture.

Confiabilidade, tanto a Resistência do solo quanto à Solicitação apresentam funções de densidade de probabilidade reais, e, conseqüentemente, obtém-se a função de densidade de probabilidade real para o Fator de Segurança. A partir dessa PDF para o Fator de Segurança, é possível determinar qual é a probabilidade de ruptura do talude, que corresponde à área abaixo dessa curva à esquerda do Fator de Segurança igual a 1, ou seja, a probabilidade do Fator de Segurança real ser menor que a unidade. Essa probabilidade decresce à medida que a média dos fatores de segurança se eleva e as variabilidades da resistência e da solicitação diminuem (WHITMAN, 1984 apud COSTA, 2005, p. 55).

5.2.1.5 Risco Geotécnico

Com relação aos conceitos pertinentes à Análise de Risco Geotécnico, Costa (2005) segue os conceitos apresentados por Fell em 1994. Como no presente trabalho já foram abordados os conceitos de risco e demais definições segundo um trabalho do mesmo autor, porém mais recente (ver ABGE; ABMS, 2013, capítulo 1 e item 4.1 deste trabalho), considera-se que é desnecessário apresentar todos conceitos definidos em Costa (2005) neste item.

Entretanto, a reapresentação da fórmula 5 a seguir é relevante, para ilustrar como o risco foi definido na dissertação de Costa (2005). Esta expressão é adotada por Carvalho¹⁶ (1998 apud COSTA, 2005, p. 72) e tem o mesmo significado do conceito definido por ABGE; ABMS (2013), já apresentado neste trabalho no capítulo Introdução e no capítulo 4, página 43.

$$R = \sum (P_i \times C_i) \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

R = Risco geotécnico devido a “n” eventos aleatórios (“i” varia de 1 a “n”);

P_i = Probabilidade de ocorrência do evento aleatório E_i;

C_i = Conseqüência ou dano do evento aleatório E_i.

¹⁶ CARVALHO, C. S. Risco geotécnico em favelas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., COBRAMSEG, Brasília, 1998. *Anais...* Brasília, 1998, v.4, p.123-141.

Neste item serão apresentados os seguintes tópicos: Método de Monte Carlo, Índice de Confiabilidade, Consequências dos eventos adversos e Aceitabilidade do Risco.

5.2.1.5.1 Método de Monte de Carlo

O Método de Monte Carlo é um método probabilístico direto, no qual a função distribuição do Fator de Segurança é obtida a partir das funções distribuição das variáveis aleatórias dos parâmetros de entrada (GUEDES¹⁷, 1997 apud COSTA, 2005, p. 81). Segundo Costa (2005, p. 83), os passos do Método de Monte Carlo são:

- a) Seleção do modelo determinístico de base para função de desempenho [geralmente o fator de segurança], como o método de Bishop;
- b) Tomada de decisão relativa à quais parâmetros irão ser modelados probabilisticamente, bem como as funções de distribuição das variáveis de entrada;
- c) Estimativa, respeitando a curva de distribuição de frequência de Gauss (Normal), dos parâmetros de entrada do modelo determinístico adotado. Para isso, se usa um falso gerador de números aleatórios que seleciona um valor aleatório para cada variável de entrada baseado na sua distribuição de probabilidades. E após isso, usam-se esses valores para resolver a função de desempenho, calculando o fator de segurança (estes cálculos são normalmente efetuados considerando-se somente a superfície crítica obtida a partir da análise determinística realizada previamente);
- d) O processo é repetido diversas vezes para se construir a distribuição de frequências da variável de desempenho (Fator de Segurança), de onde se obtém suas principais características de variação, o FS [Fator de Segurança] médio e probabilidade de ruptura do talude P_r , que no caso será a probabilidade de $FS \leq 1$.

5.2.1.5.2 Índice de Confiabilidade

O Índice de Confiabilidade é outra maneira de se realizar análises de confiabilidade em um projeto geotécnico. Conforme Costa (2005, p. 84-85), “O Índice de Confiabilidade (β) é definido em termos da média (μ) e do desvio padrão (σ) dos fatores de segurança das iterações [...]”. Este parâmetro de segurança do talude nada mais é que a descrição da estabilidade de um talude pelo número de desvios padrão que distanciam o fator de segurança médio do fator de segurança na iminência da ruptura ($FS = 1,0$) (COSTA, 2005, p. 85). O Índice de Confiabilidade é apresentado na fórmula 6 e uma visualização dos termos utilizados nessa fórmula é oferecida na figura 22.

¹⁷ GUEDES, M. C. S. **Considerações sobre análise probabilística da estabilidade de taludes**. 1997. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 1997, 202p.

$$\beta = (\mu - 1,0) / \sigma \quad (\text{fórmula 6})$$

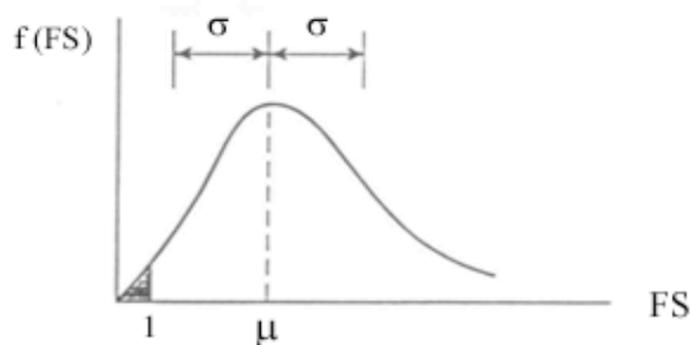
Onde:

β = Índice de confiabilidade;

μ = Média dos fatores de segurança;

σ = Desvio Padrão dos fatores de segurança.

Figura 21 – Termos utilizados para o cálculo do Índice de Confiabilidade



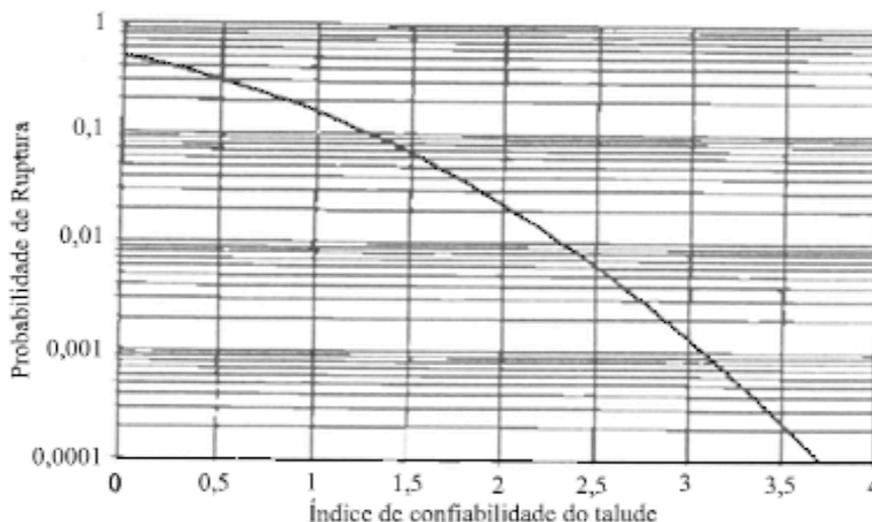
(fonte: COSTA, 2005, p. 85)

Para se utilizar o Índice de Confiabilidade em uma análise, é preciso que a hipótese de que a função distribuição Normal do Fator de Segurança é consistente com as funções distribuição das variáveis de entrada, seja verdadeira. Através de estudos de laboratório, vários autores puderam confirmar essa hipótese, já que a curva de distribuição de probabilidades de Gauss foi considerada adequada para representar o comportamento de variáveis geotécnicas envolvidas em análises de estabilidade de taludes, como a coesão (c') e a tangente do ângulo de atrito interno ($\tan(\phi')$) (COSTA, 2005, p. 85-86, 112).

O Índice de Confiabilidade também pode ser relacionado à probabilidade de ruptura, caso a forma da função distribuição de probabilidades do Fator de Segurança seja conhecida. A figura 23 mostra a relação entre o Índice de Confiabilidade e a Probabilidade de Ruptura se a

distribuição de probabilidades for Normal (Gaussiana) para o Fator de Segurança (MACHADO; RIBEIRO¹⁸, 2001 apud COSTA, 2005, p. 86).

Figura 22 – Relação entre Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura para um Fator de Segurança com distribuição de probabilidades Normal



(fonte: MACHADO; RIBEIRO, 2001 apud COSTA, 2005, p. 86)

5.2.1.5.3 Consequências dos eventos adversos

Para Costa (2005, p. 93), análises de risco quantitativas envolvem a determinação de dois modelos, que juntos consistem no modelo de risco: modelo do processo de instabilização e modelo de consequências. Como um exemplo simplificado desse tipo de análise, Costa (2005) apresentou uma análise quantitativa feita por Carvalho (1998).

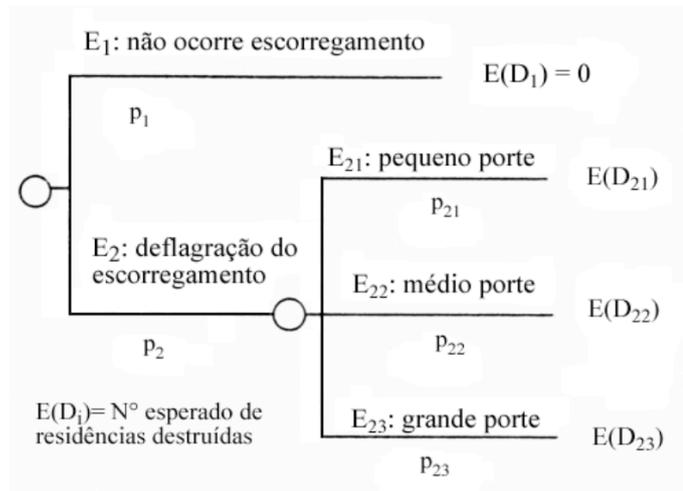
Neste exemplo, Carvalho¹⁹ (1998 apud COSTA, 2005, p. 94) utilizou como uma representação gráfica do modelo do processo de instabilização uma árvore de eventos, onde os eventos aleatórios (E_{is}) relacionados às possíveis formas de evolução do processo de instabilização estão colocados em ordem cronológica (figura 24). As consequências foram divididas entre custos associados à destruição das propriedades localizadas na área de risco e mortes das pessoas residentes nessas moradias. Ambos os elementos em risco (moradias e

¹⁸ MACHADO, S. L.; RIBEIRO, M. P. Estudo estatístico de parâmetros de resistência de um solo residual de Granulito. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 3., COBRAE, Rio de Janeiro, 2001. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 2001, p.345-353.

¹⁹ CARVALHO, C. S. Risco geotécnico em favelas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., COBRAMSEG, Brasília, 1998. **Anais...** Brasília, 1998, v.4, p.123-141.

habitantes) receberam um grau de vulnerabilidade máximo (igual a 1,0), para simplificar o problema. Então, o modelo de consequência referente aos custos (fórmula 7) e às mortes (fórmula 8) foi determinado como segue (CARVALHO, 1998 apud COSTA, 2005, p. 95).

Figura 23 – Árvore de Eventos para modelo do processo de instabilização



(fonte: CARVALHO, 1998 apud COSTA, 2005, p. 95)

$$Cst = Dmd * V \quad (\text{fórmula 7})$$

$$M = Dmd * T \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

Dmd = Número de moradias destruídas;

Cst = Prejuízo monetário;

V = Valor de uma moradia (admitido constante);

M = Número de mortes;

T = Número de habitantes em uma moradia (admitido constante).

O risco foi determinado a partir do uso das probabilidades apresentadas na árvore de eventos, das fórmulas 7 e 8 (para o cálculo das consequências) e da fórmula 5 (CARVALHO²⁰, 1998 apud COSTA, 2005, p. 95). Vale ressaltar que no trabalho de Carvalho (1998), as probabilidades utilizadas para a análise de risco foram probabilidade subjetivas. Portanto, Carvalho (1998 apud COSTA, 2005, p. 96) faz algumas ponderações sobre o uso de probabilidades subjetivas em análises, que merecem ser expostas neste trabalho também:

- a) Mais de um avaliador de probabilidades de ocorrência dos processos devem fazer a estimativa das probabilidades subjetivas, de forma independente, e quando houver muita divergência entre os resultados, isso indicará a necessidade de se realizar estudos mais profundos;
- b) Em casos nos quais não há amostras suficientes que sejam representativas estaticamente dos processos de instabilização, o uso de probabilidades subjetivas, adotadas por meio de julgamento de profissionais geotécnicos especialistas nos fenômenos físicos envolvidos nas situações as quais se deve analisar, permite uma abordagem quantitativa à análise de risco em questão.

5.2.1.5.4 Aceitabilidade do Risco Geotécnico

Este trabalho se limitará a apresentar apenas uma das formas que Costa (2005) explicitou em seu trabalho, a fim de evitar delongas e reproduzir explicações sobre técnicas que não são possíveis de serem utilizadas no Brasil atualmente, uma vez que necessitam de um banco de dados e posterior tratamento estatístico.

Uma das maneiras mais correntes de se analisar a aceitabilidade de um risco geotécnico é compará-lo com outros riscos aceitáveis que existem no cotidiano das pessoas. Conforme Fell²¹ (1994 apud COSTA, 2005, p. 99-100, 103-104):

- a) Há indícios que a população aceite níveis de risco voluntários (como esportes e dirigir) maiores que níveis de risco involuntário (que são impostos à ela);
- b) A escala do risco muda sua aceitabilidade: muitos eventos adversos com poucas mortes são mais aceitáveis que poucos eventos com um número grande de fatalidades, mesmo que esse número de morte seja o mesmo;
- c) Riscos comuns de 10^{-3} e 10^{-4} por ano são aceitáveis para riscos voluntários, mas a população exige riscos 1000 vezes menores para riscos involuntários serem aceitos, da ordem de 10^{-6} , no máximo chegando a 10^{-5} ao ano;

²⁰ CARVALHO, C. S. Risco geotécnico em favelas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., COBRAMSEG, Brasília, 1998. **Anais...** Brasília, 1998, v.4, p.123-141.

²¹ FELL, R. Landslide risk assessment and acceptable risk. **Canadian Geotechnical Journal**. Canada, v.31, p.261-272, 1994.

- d) No âmbito de escorregamentos/deslizamentos, a sociedade aceita riscos maiores para os eventos naturais, se isso evitar evacuações de moradores das áreas de riscos. Isso acontece porque parece haver uma preocupação maior com a desvalorização ou perda da propriedade do que com a possibilidade da perda de vidas;
- e) Ainda no contexto de deslizamentos de terra, Fell concluiu que: para danos materiais, a sociedade aceitaria riscos da ordem de 10^{-2} ao ano, para escorregamentos naturais, riscos anuais de perdas de vidas da ordem de 10^{-3} , e para escorregamentos que envolvam estruturas/taludes melhorados ou construídos pelo homem, um risco anual de perdas de vidas da ordem de 10^{-5} seria o máximo aceitável;
- f) Possivelmente, níveis de risco menos conservadores possam ser aceitos em rodovias, se comparados com os níveis aceitáveis para taludes urbanos.

5.2.2 Proposta de Metodologia para Análise Probabilística de Taludes de Terra

A proposta metodológica para análise probabilística de taludes de terra que consta nessa seção, e que foi apresentada por Costa (2005) na sua dissertação de mestrado, é adaptada de uma metodologia desenvolvida por El-Ramly²² (2001). Essa metodologia representa a tentativa de se introduzir métodos probabilísticos na prática de análises e projetos geotécnicos atuais no Brasil (COSTA, 2005, p. 105).

5.2.2.1 Considerações iniciais

Inicialmente, deve-se indicar as condições para as quais a metodologia proposta pode ser utilizada. De acordo com Costa (2005, p. 105):

Devido à dificuldade em quantificar a incerteza do modelo de forma confiável, esta proposta de metodologia será focada principalmente nos problemas onde esta incerteza não seja tão importante. Isso inclui os taludes de solo granulares grosseiros não estruturados, solos granulares finos saturados e não estruturados, deslizamento ao longo de planos de cisalhamento pré-existentes que venham a mobilizar a resistência residual e aterros adequadamente compactados.

Além disso, a análise probabilística necessita ser levada em consideração desde a primeira etapa do projeto, no nível de planejamento da investigação geotécnica, até a análise de

²² EL-RAMLY, H. **Probabilistic analysis of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. 2001. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada; Jan., 2001, 391p.

estabilidade propriamente dita. Para a análise de estabilidade do talude, é feito uso de um programa computacional que realiza a Simulação de Monte Carlo e que possibilita a interação com planilhas eletrônicas comerciais. No caso da dissertação, utilizou-se o programa Slope/W, da Geo-slope International Ltd., versão 5, tanto para a análise determinística quanto para a probabilística (COSTA, 2005, p. 106, 110).

5.2.2.2 Análise Determinística Prévia

A realização de uma análise determinística previamente à análise probabilística é muito importante, principalmente para guiar o estudo subsequente e, também, para ajudar na interpretação dos resultados finais. Na análise determinística prévia feita na dissertação de Costa (2005), o método de equilíbrio limite utilizado foi o de Spencer, que considera tanto equilíbrio de forças quanto o equilíbrio de momentos (COSTA, 2005, p. 106, 109).

Matematicamente, métodos que consideram os dois tipos de equilíbrios geram resultados melhores, mas no momento da escolha de qual método usar para a análise, procedimentos e práticas locais e a experiência do projetista podem ser levados em consideração também (COSTA, 2005, p. 108-109).

De uma maneira breve e geral, as principais etapas de uma solução determinística de um projeto de estabilidade de taludes são (BRESSANI²³, 2004 apud COSTA, 2005, p. 106-107):

- a) Estudos preliminares de escritório e levantamento de campo;
- b) Estudo de campo inicial;
- c) Projeto de investigação de campo e análise de dados;
- d) Reavaliação do modo e extensão do escorregamento;
- e) Investigações de campo e laboratório;
- f) Determinação do modelo geomecânico;
- g) Análises de estabilidade e avaliação do risco;
- h) Projeto de estabilização;
- i) Construção.

5.2.2.3 Análise Probabilística

As principais etapas da análise probabilística são (COSTA, 2005, p. 109):

- a) identificação dos fenômenos e modos de ruptura envolvidos no problema através da Geologia, Topografia e Geomorfologia;
- b) definição dos mecanismos. Avaliar os tipos de movimentos, estabelecer o modelo geomecânico preliminar, planejar a investigação geotécnica e definir o modelo geomecânico final. Adotam-se valores para os parâmetros de entrada com base na investigação geotécnica, bibliografia e conhecimento prévio do projetista;
- c) estabelecimento do fator de segurança (FS). A metodologia probabilística é inserida para auxiliar a investigação geotécnica (planejamento de quais dados buscar e sua quantidade); obter a variabilidade dos parâmetros de resistência e poro-pressão (médias e desvios padrão) definindo suas incertezas; além de estimar da probabilidade de desempenho insatisfatório (ameaça) [probabilidade de ruptura] e o índice de confiabilidade (β) através dos métodos probabilísticos;
- d) avaliação das consequências (danos) do processo de instabilização, do risco geotécnico e da sua aceitabilidade.

Nessa proposta de metodologia, as incertezas dos parâmetros de entrada são abordadas de forma total, sem diferenciação quanto às suas origens, a partir da consideração da média e do desvio padrão das variáveis aleatórias de entrada do modelo. “Os parâmetros de resistência e poro-pressão tipicamente serão os primeiros a serem considerados como variáveis aleatórias”, sendo que outros parâmetros, como espessura de uma determinada camada, podem ser tratados como variável aleatória dependendo de sua variabilidade, e se for necessária essa consideração (COSTA, 2005, p. 110).

Quando o número de dados referentes aos parâmetros de entrada se apresenta em grande quantidade (mais que 1000 dados), a função distribuição de probabilidades real obtida diretamente dos dados é razoável e pode ser usada na análise sem ajustes. Quando essa quantidade for menor que o mínimo exigido para a utilização da distribuição real dos dados, uma distribuição paramétrica é ajustada aos dados amostrais e, então, lança-se mão dessa distribuição paramétrica para servir de parâmetro de entrada para o método probabilístico. Já quando os dados são em pequeno número ou ausentes, distribuições paramétricas são assumidas (COSTA, 2005, p. 111). Como já foi mencionado anteriormente, distribuições normais e log-normais são as mais utilizadas em engenharia geotécnica.

Idealmente, para cada conjunto de parâmetros de entrada gerados aleatoriamente pelo Método de Monte Carlo, uma nova superfície de ruptura crítica para o talude deveria ser gerada para então analisar-se o fator de segurança, a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade. Entretanto, isso demandaria um elevado esforço computacional e tempo de cálculo. Então, a

²³ BRESSANI, L. A. **Comunicação Pessoal**. 2004. Notas de aula.

metodologia propõe que o problema seja simplificado, utilizando-se uma superfície de ruptura fixa para todos os cálculos, e essa superfície é a superfície de ruptura crítica encontrada a partir da análise determinística prévia (COSTA, 2005, p. 112-113).

O Método de Monte Carlo é utilizado nessa metodologia exatamente como foi descrito no item 5.2.1.5.2 do presente trabalho, a partir do uso do programa Slope/W. O programa é responsável pela modelagem da variabilidade espacial dos parâmetros aleatórios de entrada, e para tal, gera números aleatórios para a estimativa dos parâmetros de entrada e dos coeficientes de correlação, que expressam a ligação entre os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (COSTA, 2005, p.115-116). Estes parâmetros (c' e ϕ') são geralmente correlacionados negativamente, ou seja, maiores valores de coesão diminuem o ângulo de atrito interno do solo. Esses coeficientes de correlação podem variar entre -0,72 e 0,35, dependendo do tipo de solo (SLOPE/W USER'S GUIDE²⁴, 2002 apud COSTA, 2005, p.116).

O número de iterações do Método de Monte Carlo é fundamental para a acurácia da análise probabilística. Para descobrir qual é o número mínimo de iterações do método que deve ser utilizado para um resultado razoável, Costa (2005, p. 117) propõe executar:

[...] a mesma análise algumas vezes com o mesmo número de iterações. Se as duas soluções forem bastante diferentes, deve-se elevar o número de iterações até que as diferenças entre as soluções atinjam um valor tolerável, ou seja, a resposta da simulação estabilize com a elevação do número de iterações.

Finalmente, “o principal resultado da análise probabilística é a função densidade de probabilidades (PDF) do fator de segurança, da qual a média e o desvio padrão podem ser inferidos” (EL-RAMLY²⁵, 2001 apud COSTA, 2005, p. 118). O resultado obtido é similar ao ilustrado na figura 22. A probabilidade de ruptura pode ser entendida como a probabilidade das forças instabilizantes ultrapassarem as resistentes em um talude, sendo calculada como a razão entre o número de iterações para os quais o $FS \leq 1$ e número total de iterações feitas pelo Método de Monte Carlo (COSTA, 2005, p. 118).

Vale ressaltar que os resultados dessa análise probabilística, assim como todos os resultados de análises de risco, não consideram os efeitos do tempo. Segundo Costa (2005, p. 121), “[...]”

²⁴ SLOPE/W USER'S GUIDE. Slope/W for slope stability analysis. [Manual do Slope/W]. **Geo-slope Office, version 5.13**. Calgary, Alberta, Canada: Geo-slope International Ltd., 2002, 504 p. 1 CD-ROM.

²⁵ EL-RAMLY, H. **Probabilistic analysis of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. 2001. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada; Jan., 2001, 391p.

o impacto do tempo sobre a estabilidade somente poderá ser avaliado por outra análise com as distribuições de probabilidade dos parâmetros de resistência revisadas”.

6 METODOLOGIA INTERNACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO

Este capítulo apresentará a metodologia proposta por Fell et al. no artigo denominado “*A framework for landslide risk assessment and management*”, que é um dos oito artigos considerados como “estado-da-arte” no assunto e publicados no livro “*Landslide Risk Management*” em 2005. O artigo aborda os processos necessários para a execução de uma avaliação de risco conforme o *framework* apresentado na seção 4.2 deste trabalho, tanto para uma abordagem qualitativa quanto quantitativa, e oferece alguns exemplos simplificados de avaliação de risco. Quando houve necessidade, os conceitos e práticas apresentados por Fell et al. foram complementados por diretrizes fornecidas pela *Australian Geomechanics Society* para Gerenciamento de Risco de Deslizamento, divulgadas nos anos de 2000 e 2007.

O capítulo também descreve um exemplo hipotético de uma avaliação de risco em um aterro rodoviário, que consta no artigo escrito por Fell et al. (2005), a fim de ilustrar os processos apresentados, e algumas aplicações internacionais dessa metodologia em avaliações de risco de deslizamentos. Geralmente, essas aplicações são adaptações necessárias da metodologia para a realidade de cada país, devido às diferentes necessidades e restrições impostas aos responsáveis pelas análises de risco geotécnico.

6.1 AVALIAÇÃO DE RISCO DE DESLIZAMENTOS

A terminologia utilizada na metodologia e os passos para a realização da avaliação de risco geotécnico são as mesmas apresentadas na Introdução e no capítulo 4 deste trabalho e, por isso, não serão postas nessa seção novamente. Este item tem como objetivo detalhar as diversas etapas contidas no *framework* (item 4.2, página 49).

6.1.1 Definição do Escopo

Segundo Fell et al. (2005, p. 7, tradução nossa), a definição do Escopo é útil para “Garantir que a análise de risco atenda os problemas relevantes, satisfaça as necessidades daqueles

interessados, e para evitar mal-entendidos”. Essa primeira etapa do processo de avaliação de risco de deslizamentos consiste em responder os seguintes itens referentes à avaliação que se quer realizar (FELL et al., 2005, p. 7, tradução nossa):

- a) Qual é o objeto e o objetivo de análise (sítio específico, ou um número de sítios, ou zoneamento de perigo para planejamento do uso do solo, ou uma avaliação de risco global para uma determinada área ou infraestrutura);
- b) Quais são os limites geográficos do(s) movimento(s) de massa;
- c) A que será limitada a avaliação de risco (aos danos de propriedades ou também incluirá potencial de perda de vida ou lesões às pessoas atingidas);
- d) Qual é a extensão dos estudos geológicos e geotécnicos necessários para a realização da avaliação de risco;
- e) Quais serão as abordagens a serem utilizadas para a caracterização dos movimentos de massa e para determinação da frequência de ocorrência desses e suas consequências;
- f) Se a análise de risco será qualitativa ou quantitativa;
- g) Quem irá decidir os critérios de aceitabilidade do risco ou por qual processo isso será avaliado;
- h) Quais são as restrições financeiras e operacionais para a análise;
- i) Responsabilidades legais de cada parte envolvida na avaliação de risco;
- j) Qual será o resultado final da análise de risco (relatório ou mapa) e como ele será comunicado às diversas partes interessadas.

6.1.2 Análise de Perigo

A etapa de análise de Perigo é subdividida em: caracterização do deslizamento potencial (caracterização da ameaça) e análise da frequência de ocorrência do deslizamento. A primeira parte dessa etapa independe do tipo de abordagem da avaliação de risco, já a segunda parte, referente à frequência, muda com o tipo de análise, se qualitativa ou quantitativa.

6.1.2.1 Caracterização do movimento de massa (ameaça)

Fell et al. (2005, p. 8, tradução nossa) indicam que a caracterização do deslizamento exige, por parte dos profissionais geotécnicos responsáveis pela execução dessa etapa, conhecimento dos mecanismos de ruptura e de deslizamentos de taludes e entendimento da relação desses mecanismos com a geomorfologia, geologia, hidrologia, clima e vegetação presentes em cada caso de estudo. É importante, portanto, que eles tenham experiência e treinamento em

deslizamentos de taludes, uma vez que o resultado da análise de risco tende a ser controlado pelos efeitos dos movimentos de massa determinados nessa etapa. A omissão, subestimação ou superestimação desses efeitos pode prejudicar o resultado do estudo. Durante a etapa de caracterização da ameaça, deve ser possível realizar (FELL et al., 2005, p. 8, tradução nossa):

- a) Uma classificação dos deslizamentos potenciais conforme o sistema de Varnes, considerando que um determinado sítio pode ser afetado por mais de um movimento de massa e, por isso, uma lista dos possíveis deslizamentos deve ser desenvolvida;
- b) Uma avaliação da extensão física de cada movimento em potencial com determinação do local, da extensão de área e do volume envolvido em cada um;
- c) Uma avaliação do provável evento desencadeador do movimento, das características geotécnicas dos materiais envolvidos, como resistência ao cisalhamento, poro-pressões, e da mecânica do deslizamento;
- d) Uma estimativa antecipada dos prováveis percurso, distância, profundidade e velocidade do deslizamento, se ele ocorrer, e uma estimativa da probabilidade do deslizamento atingir a área onde o elemento em risco está ($P_{T:L}$);
- e) Uma identificação dos possíveis sinais de movimentação, que possam servir de aviso pré-ruptura e ser monitorados.

Os autores observam que além dos movimentos presentes dentro do sítio em análise, movimentações de solo/rocha acima ou abaixo do talude em estudo também devem ser considerados, já que eles podem afetar os elementos em risco. Além disso, a caracterização das diversas ameaças, e conseqüentemente a estimativa do risco, deve ser feita levantando-se todos os eventos possíveis (dos mais frequentes e de menor magnitude, até os mais raros e, por isso, de magnitudes maiores), mesmo que o risco frequentemente seja dominado pelos eventos de maior frequência. Se há propostas de desenvolvimento e de mudanças estruturais ou geotécnicas na área em análise, essas devem também ser consideradas na análise de risco, porque podem alterar a natureza e a frequência dos movimentos de massa (FELL et al., 2005, p. 8, tradução nossa).

6.1.2.2 Análise de frequência

Para se determinar a frequência de ocorrência de deslizamentos, os responsáveis pela execução da análise de risco podem optar entre seguir uma abordagem qualitativa ou adotar um dos métodos quantitativos. Fell et al. (2005, p. 8, tradução nossa) preferem o uso da abordagem quantitativa para a estimativa da frequência, pois, segundo os autores, ela

proporciona resultados uniformes em termos quantitativos e permite que o resultado da análise de risco seja comparado com critérios quantitativos de aceitabilidade de riscos e também com riscos causados por outras ameaças, os quais as partes interessadas na análise poderão associar com o risco geotécnico.

6.1.2.2.1 Abordagem qualitativa

Na abordagem qualitativa, são utilizados descritores para determinar uma frequência de ocorrência qualitativa para o movimento de massa. Ferramentas como sistemas e matrizes de classificação e esquemas de pontuação são algumas das possibilidades para abordar a frequência qualitativamente (FELL et al., 2005, p. 12, tradução nossa).

A tabela 1, a seguir, mostra um exemplo adaptado da *Australian Geomechanics Society* (AGS) para determinar a possibilidade de um deslizamento. Nesse caso, a possibilidade engloba a frequência do deslizamento, a probabilidade do deslizamento alcançar o elemento em risco e probabilidade espacial temporal que o elemento em risco esteja na área a ser atingida pelo deslizamento na hora de sua ocorrência (FELL et al., 2005, p. 12, tradução nossa).

Tabela 1 – Medidas qualitativas de possibilidade de um deslizamento

<i>Medidas qualitativas de possibilidade de deslizamento</i>		
Nível	Descritor	Descrição
A	Quase certo	É esperado que o evento ocorra
B	Provável	O evento vai provavelmente ocorrer sob condições adversas
C	Possível	O evento poderia ocorrer sob condições adversas
D	Improvável	O evento poderia ocorrer sob circunstâncias muito adversas
E	Raro	O evento é concebível mas somente sob circunstâncias excepcionais
F	Não é crível	O evento é inconcebível ou irreal

(fonte: adaptado de AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2000, p. 87, tradução nossa)

Em 2007, a AGS publicou uma nova diretriz para ajudar na uniformização e interpretação de medidas qualitativas de possibilidade de deslizamentos para perdas em propriedades. O quadro A.1 no Anexo A mostra a complementação da tabela 1 com as considerações e experiências adquiridas nos anos seguintes à publicação feita em 2000 (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007, p. 76, tradução nossa).

6.1.2.2.2 Abordagem quantitativa

Há várias formas de se expressar uma frequência de ocorrência de deslizamento quantitativamente, como: o número de um certo tipo de movimento de massa que pode ocorrer em uma determinada área em um ano; a probabilidade de que um deslizamento ocorra em um talude específico em um ano; e a probabilidade de que as forças instabilizantes ultrapassem as resistentes em um talude, através da consideração da probabilidade anual da poro-pressão crítica ser excedida. Entretanto, o que há de comum entre todas as metodologias é que a análise da frequência deve ser feita para cada tipo de deslizamento identificado e caracterizado na etapa anterior (INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SOCIETY²⁶, 1997 apud FELL et al., 2005, p. 8, tradução nossa).

Conforme o INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SOCIETY (1997 apud FELL et al., 2005, p. 8, tradução nossa), algumas maneiras de se calcular a frequência de ocorrência de deslizamentos são:

- a) Dados históricos dentro da área de estudo, ou áreas com características similares, por exemplo, geologia, geomorfologia;
- b) Métodos empíricos baseados em correlações em conformidade com sistemas de classificação de instabilidade de taludes;
- c) Uso de evidências geomorfológicas (juntamente com dados históricos), ou baseadas em julgamento de especialistas;
- d) Relação com a frequência e a intensidade do evento desencadeador, por exemplo, chuva, terremoto;
- e) Avaliação direta baseada em julgamento de especialistas, a qual pode ser realizada com referência a um modelo conceitual, por exemplo, uso de uma metodologia de árvore de falhas;

²⁶ INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES. Quantitative risk assessment for slopes and landslides – the State of the Art. In: CRUDEN, D.; FELL, R. (Ed.) **Landslide Risk Assessment**. Balkema, Rotterdam, 1997, p. 3-12.

- f) Modelagem da variável primária, por exemplo, pressões piezométricas versus evento desencadeador, acompanhado da variação de níveis de conhecimento de geometria e resistência ao cisalhamento;
- g) Aplicação de métodos probabilísticos, levando em consideração a incerteza na geometria do talude, na resistência ao cisalhamento, no mecanismo de ruptura, e nas pressões piezométricas [...];
- h) Combinações dos métodos acima.

Fell et al. (2005, p. 8, tradução nossa) recomendam que é apropriado usar mais que um dos métodos acima na análise de risco e que é importante que a probabilidade de deslizamento (P_L) seja expressa como um frequência “por ano”, já que os critérios quantitativos de aceitabilidade do risco para perda de vidas costumam ser expressos dessa forma. Esses autores ainda comentam que, devido às várias incertezas envolvidas no processo e às restrições de dados, para a maioria dos casos, calcular a estimativa da frequência de deslizamento através de dados históricos, evidências geomorfológicas e relações com o evento desencadeador é geralmente mais confiável que utilizar métodos probabilísticos mais detalhados e rigorosos (FELL et al., 2005, p. 9, tradução nossa).

6.1.3 Análise de Consequências

A etapa de análise das consequências no processo de avaliação de risco geotécnico depende também do tipo de abordagem que será seguida (qualitativa ou quantitativa). Mas, de uma forma geral, em ambas metodologias são necessárias uma identificação e quantificação dos elementos em risco e uma avaliação da vulnerabilidade desses, em termos de danos à propriedade e lesão/perda de vida, como apropriado ao estudo de caso (FELL et al., 2005, p. 9, tradução nossa).

O significado de elemento em risco adotado por Fell et al. (2005) já foi apresentado neste trabalho e, por isso, sua exposição nesta seção está dispensada. Entretanto, esses autores adicionaram algumas observações relevantes, principalmente quando o objeto de estudo da análise de risco se trata de uma rodovia com diversos tipos de movimentos de massa. A primeira observação é a que, dentro de uma série de elementos em risco (como prédios, população, infraestrutura, etc.), os veículos usualmente seriam categorizados em: carros, caminhões e ônibus, uma vez que o número provável de pessoas que estariam nesses veículos difere. Já a segunda observação refere-se a uma ressalva: os elementos em risco são

provavelmente dependentes da natureza do movimento de massa e, portanto, a análise de consequência deve ser executada para cada tipo de deslizamento identificado e caracterizado nas etapas anteriores (FELL et al., 2005, p. 9, tradução nossa).

6.1.3.1 Abordagem qualitativa

Assim como para a determinação da frequência de ocorrência de deslizamentos, para a avaliação das consequências na abordagem qualitativa são utilizados descritores e as mesmas ferramentas elencadas anteriormente no item 6.1.2.2.1. Como continuação do exemplo adaptado da AGS, a tabela 2 mostra descritores para avaliação das consequências de danos à propriedade. A AGS recomenda que abordagens qualitativas (como a da figura abaixo) sejam somente aplicadas a casos de análises de risco a propriedades (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2000, p. 62, 87, tradução nossa). Nesses casos, as consequências incluem as vulnerabilidades e os valores dos elementos em risco.

Tabela 2 – Medidas qualitativas de consequências à propriedade

<i>Medidas qualitativas de consequências à propriedade</i>		
1	Catastrófico	Estrutura completamente destruída ou danos em larga escala exigindo grandes obras de engenharia para estabilização
2	Grande	Danos extensivos à maior parte da estrutura, ou estendendo além das fronteiras da área estudada exigindo obras significantes de estabilização
3	Médio	Danos moderados em partes da estrutura, ou parte significativa da área estudada exigindo grandes obras de estabilização
4	Pequeno	Danos limitados a uma parte da estrutura, ou parte da área estudada exigindo alguma obra de readmissão/estabilização
5	Insignificante	Pouco dano

(fonte: adaptado de AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2000, p. 87, tradução nossa)

Também foram feitas complementações à tabela 2 pela AGS em 2007. O quadro A.2 no Anexo A apresenta as medidas qualitativas de consequências à propriedade atualizadas. Essa atualização foi feita direcionada ao desenvolvimento residencial, mas também pode ser

utilizada em outras situações (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007, p. 76, tradução nossa).

6.1.3.2 Abordagem quantitativa

Em uma abordagem quantitativa, além da identificação e caracterização dos elementos em risco, é necessário avaliar a probabilidade do deslizamento alcançar o elemento em risco ($P_{T:L}$), a probabilidade espacial temporal ($P_{S:T}$) e a vulnerabilidade dos mesmos, geralmente distinta para danos a propriedades ($V_{prop:T}$) e para perda de vida ($V_{D:T}$). Porém, Fell et al. (2005, p. 9, tradução nossa) complementam que as consequências podem não estar limitadas somente aos danos a propriedades e perdas de vida, mas também podem incluir custos indiretos, como indenizações, processos e perdas econômicas (se uma rodovia for interditada por dias, impedindo o tráfego e afetando empresas) no caso da ocorrência de um desastre.

A **probabilidade do deslizamento atingir o elemento em risco ($P_{T:L}$)** varia de acordo com a localização do elemento em risco em relação à fonte do movimento de massa e o provável trajeto a ser percorrido pelo mesmo a partir da fonte. Essa probabilidade é expressa por um valor entre 0 e 1, sendo (FELL et al., 2005, p. 9, tradução nossa):

- a) Para prédios que são localizados na fonte do deslizamento $P_{T:L}=1$;
- b) Para prédios ou pessoas localizados abaixo da fonte do deslizamento e no caminho do trajeto resultante do deslizamento, $P_{T:L}$ é calculada levando em consideração a distância do trajeto do deslizamento, a localização da fonte do deslizamento, e o elemento em risco;
- c) Para veículos e pessoas em veículos, ou pessoas caminhando na área abaixo da fonte do deslizamento no caminho do trajeto resultante (rastros) do deslizamento, $P_{T:L}$ é calculada levando em consideração a distância do trajeto do deslizamento, e o caminho a ser seguido pelo veículo ou pessoa. Se o veículo ou pessoa está no caminho no momento do deslizamento é considerado através da probabilidade espacial temporal ($P_{S:T}$).

A **probabilidade espacial temporal ($P_{S:T}$)** é “[...] a probabilidade que o elemento em risco esteja na área afetada pelo perigo no momento de sua ocorrência. É uma probabilidade condicional, e é entre 0 e 1” (FELL et al., 2005, p. 9, tradução nossa). Conforme Fell et al. (2005, p. 9-10, tradução nossa), essa probabilidade muda dependendo do elemento em risco:

- a) Para prédios sobre ou no caminho do deslizamento, a probabilidade espacial temporal é 1;

- b) Para um único veículo que passa abaixo de um único deslizamento, é a proporção de tempo em um ano em que ele estará no caminho do deslizamento;
- c) Para todos os veículos que passam abaixo de um único deslizamento, é a proporção de tempo em um ano em que um veículo estará no caminho do deslizamento. [...];
- d) Para pessoas em um prédio, é a proporção de tempo em um ano que as pessoas ocupam o prédio (0-1.0). Isso é provavelmente diferente para cada pessoa.

Os autores completam que “Para pessoas em veículos, a probabilidade espacial temporal será como para b) e c). Entretanto ela pode variar para uma pessoa em um carro, e quatro pessoas em um carro”, e, em alguns casos, será necessário levar em consideração no cálculo da probabilidade espacial temporal se haverá possibilidade de um aviso para evacuação da área afetada pelo deslizamento. Em todas as situações, o tipo de deslizamento, seu volume e sua velocidade, a presença ou não de sinais de movimentação, de sistemas de aviso e evacuação, e os próprios elementos em risco (como a mobilidade das pessoas) devem ser avaliados para a determinação da probabilidade espacial temporal (FELL et al., 2005, p. 10, tradução nossa).

Por fim, para determinar a **vulnerabilidade de propriedades** ($V_{prop:T}$) ao deslizamento é importante saber os fatores que mais afetam esse parâmetro, que são: o volume (com relação ao da propriedade) e a velocidade do deslizamento; a posição relativa do elemento em risco e do deslizamento; e a magnitude dos deslocamentos do deslizamento e dos deslocamentos diferenciais dentro do mesmo. Os autores observam que, no que diz respeito à vulnerabilidade de propriedades, “Deslizamentos que se movem devagar (particularmente aqueles com superfície de ruptura horizontal quase plana) podem causar poucos danos, com exceção para as estruturas que estão nas fronteiras do deslizamento e por isso experimentam deslocamentos diferenciais” (FELL et al., 2005, p. 10, tradução nossa).

Já os fatores que mais influenciam na **vulnerabilidade de pessoas** ($V_{D:T}$) são: a velocidade do deslizamento (independentemente do volume); o volume do deslizamento; o grau de proteção da pessoa contra o impacto do deslizamento (se a pessoa está dentro de um prédio ou veículo, ou não); e a resistência à ruptura e o tipo de ruptura de um prédio se ele for atingido por um deslizamento (se houver pessoas dentro do mesmo) (FELL et al., 2005, p. 10, tradução nossa).

6.1.4 Estimativa de Risco

A última etapa de uma análise de risco é a estimativa do risco e, como as duas etapas anteriores, essa também depende da abordagem adotada para a análise. Por isso, esse item será subdividido em: abordagem qualitativa e abordagem quantitativa.

6.1.4.1 Abordagem qualitativa

Como a frequência de ocorrência de deslizamentos e as consequências, a estimativa do risco na abordagem qualitativa é feita através de descritores, a partir do uso de uma das ferramentas citadas no item 6.1.2.2.1. Fell et al. (2005, p. 12, tradução nossa) propõem que uma análise de risco qualitativa tem uma função importante em um programa de gerenciamento de riscos de deslizamentos, porque oferece uma comparação relativa de riscos de diferentes sítios em um mesmo estudo de caso, possibilitando uma priorização de ações futuras para diminuir o risco apresentado pelo grande número de sítios. Além disso, quando utilizada juntamente com julgamento de especialistas, pode determinar se um determinado perigo está colocando vidas sob significativo risco, exigindo medidas de redução de risco imediatas, sem a necessidade de elaborar um estudo quantitativo. Entretanto, essa metodologia possui muitas limitações, como a subjetividade e imprecisão dos descritores, que podem resultar em um análise com resultados muito variados, os quais não poderão ser avaliados contra critérios de aceitabilidade de risco, pois estes não existem em termos qualitativos (FELL et al., 2005, p. 12-13, tradução nossa).

Para que a análise de risco qualitativa agregue valor e forneça resultados coerentes, Fell et al. (2005, p. 12, tradução nossa) advertem que ela deve ser realizada de maneira crítica e preferencialmente supervisionada através de revisões de especialistas na área. Ainda, quando for utilizada para estimar riscos de perda de vida e como suporte para decisões em sítios específicos, extremo cuidado deve ser tomado, devido às deficiências associadas a este tipo de abordagem (FELL et al., 2005, p. 13, tradução nossa). A tabela 3 mostra uma matriz de uma análise de risco geotécnico qualitativa, seguindo o exemplo da AGS.

Em 2007, a tabela 3 foi complementada pela AGS, seguindo as atualizações feitas nas tabelas 1 e 2, de possibilidade de deslizamentos e consequências respectivamente. O quadro A.3, presente no Anexo A, mostra a versão atualizada para a matriz qualitativa de análise de risco à propriedade. Já o Quadro A.4 mostra as implicações dos níveis de risco que podem ser

obtidos como resultado de uma análise de risco (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007, tradução nossa).

Tabela 3 – Matriz qualitativa de análise de risco – classes de risco à propriedade

Possibilidade	Consequências à propriedade				
	Catastrófico	Grande	Médio	Pequeno	Insignificante
Quase certo	VH	VH	H	H	M
Provável	VH	H	H	M	L-M
Possível	H	H	M	L-M	VL-L
Improvável	M-H	M	L-M	VL-L	VL
Raro	M-L	L-M	VL-L	VL	VL
Não é crível	VL	VL	VL	VL	VL

Legenda – VH: risco muito alto; H: risco alto; M: risco moderado; L: risco baixo; VL: risco muito baixo.

(fonte: adaptado de AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2000, p. 87, tradução nossa)

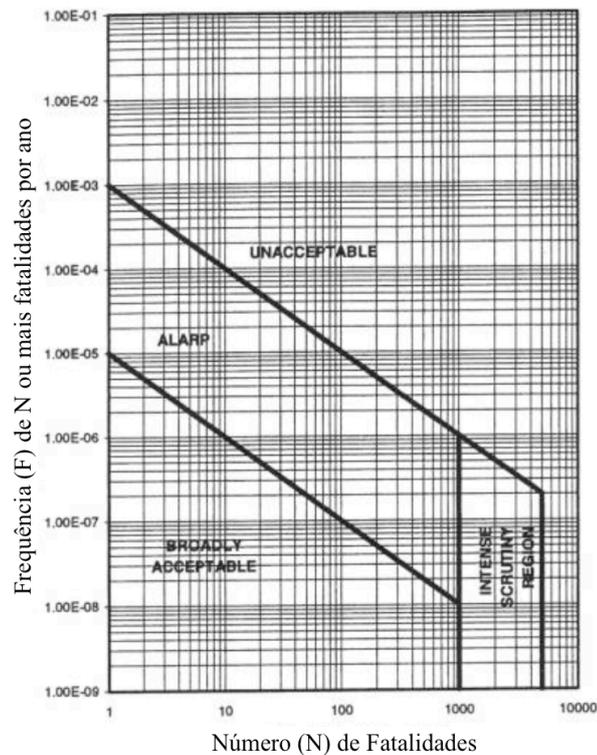
6.1.4.2 Abordagem quantitativa

Conforme Fell et al. (2005, p. 10, tradução nossa), há várias formas de se calcular o risco e apresentá-lo, e é útil determiná-lo de diferentes maneiras, sendo que as mais praticadas são as seguintes:

- Calcular o risco anual (valor esperado) através da soma das multiplicações da probabilidade de ocorrência da ameaça com suas consequências, para todos os perigos identificados. Para danos a propriedades e custos indiretos, o risco anual é expresso como um valor em dinheiro relativo aos danos por ano (\$x danos por ano), já para perda de vida, o risco anual é o número potencial de vidas perdidas em um ano, devido a esses perigos;
- Apresentar pares de frequência e consequência (f-N), que seriam as expressões das probabilidades anuais separadamente, de acordo com seu respectivo grau de consequência. Por exemplo: probabilidade anual de poucos danos (\$x), de danos médios (\$y) e de grandes danos (\$z), probabilidade anual de perda de uma vida, de cinco vidas, de 100 vidas;
- Plotar o par frequência cumulativa e consequência (F-N) em um gráfico representando o critério de tolerância ao risco da sociedade (como o da figura

25). Nesse caso, a frequência (F) plotada no gráfico indica a probabilidade anual de N ou mais vidas serem perdidas.

Figura 24 – Exemplo de gráfico indicando o critério de tolerância ao risco de uma sociedade (Curva F-N)



(fonte: adaptado de GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE²⁷, 1998 apud FELL et al., 2005, p. 11, tradução nossa)

A fórmula 9 expressa o cálculo para a determinação do risco anual a propriedades, já a fórmula 10 indica como pode ser calculada a probabilidade anual de uma pessoa em particular perder sua vida (FELL et al, 2005, p. 10-11, tradução nossa).

$$R_{(\text{prop})} = P_{(L)} * P_{(T:L)} * P_{(S:T)} * V_{(\text{prop:S})} * E \quad (\text{fórmula 9})$$

²⁷ GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE. **GEO Report No. 75:** Landslides and Boulder Falls from Natural Terrain: Interim Risk Guidelines. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 1998.

$$P_{(LOL)} = P_{(L)} * P_{(T:L)} * P_{(S:T)} * V_{(D:T)} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

$R_{(prop)}$ = É a perda anual de valor de propriedade;

$P_{(L)}$ = É a frequência de deslizamento;

$P_{(T:L)}$ = É a probabilidade do deslizamento alcançar o elemento em risco;

$P_{(S:T)}$ = É a probabilidade espacial temporal do elemento em risco;

$V_{(prop:S)}$ = É a vulnerabilidade do elemento em risco (propriedade) ao evento do deslizamento;

E = É o elemento em risco, por exemplo, o valor ou o valor presente líquido da propriedade;

$P_{(LOL)}$ = É a probabilidade anual de uma pessoa ser morta;

$V_{(D:T)}$ = É a vulnerabilidade da pessoa ao evento do deslizamento.

A fórmula 10 pode ser estendida para a fórmula 9 acrescentando-se o fator “E” que, nesse caso, seria o número de pessoas em risco. O resultado dessa multiplicação representa o risco anual de perda de vida (FELL et al., 2005, p. 11, tradução nossa).

Em algumas situações, é necessário obter o risco total, que é a soma dos riscos referentes a cada um dos perigos identificados e caracterizados na área em estudo. Para esses casos, há duas alternativas que podem ser seguidas (FELL et al., 2005, p. 11, tradução nossa):

- a) Aplicar as fórmulas 9 e/ou 10 a cada um dos perigos, conforme o resultado que se quer obter (risco à propriedade ou risco de perda de vida), e depois somar os resultados das multiplicações. Esta alternativa assume que os perigos são independentes, o que pode ser incorreto se eles foram causados por um mesmo evento desencadeador (como um único evento de chuva, um terremoto);
- b) Se os perigos forem dependentes entre si, a teoria de limites uni-modais deverá ser usada para estimar as probabilidades:
 - Limite superior: utilizando-se a regra de Morgan, a estimativa superior para a probabilidade condicional é dada pela fórmula 11. “Este cálculo deve ser feito antes de aplicar a probabilidade anual do evento causador comum”. Se todas as probabilidades condicionais ($P_1 - P_N$) forem menores que 0,01, esta fórmula leva ao a um resultado igual ao obtido somando-se todas as probabilidades condicionais estimadas, com uma precisão aceitável;
 - Limite inferior: será a máxima probabilidade condicional individual.

$$P_{LS} = 1 - (1 - P_1).(1 - P_2).....(1 - P_N) \quad (\text{f\u00f3rmula 11})$$

Onde:

P_{LS} = Estimativa do limite superior para a probabilidade condicional;

P_1 a P_N = Estimativas das probabilidades condicionais individuais de v\u00e1rios perigos.

6.1.5 Crit\u00e9rios de aceitabilidade do risco

Inicialmente, Fell et al. (2005, p. 13, tradu\u00e7\u00e3o nossa) consideram que para o correto entendimento dos conceitos envolvidos em uma avalia\u00e7\u00e3o de risco, \u00e9 necess\u00e1rio saber a diferen\u00e7a entre risco aceit\u00e1vel e risco toler\u00e1vel:

Risco Aceit\u00e1vel: Um risco que todos impactados est\u00e3o preparados para aceitar. A\u00e7\u00e3o futura para reduzir tal risco \u00e9 geralmente n\u00e3o exigida a menos que medidas razoavelmente pratic\u00e1veis estejam dispon\u00edveis a baixo custo em termos de dinheiro, tempo e esfor\u00e7o.

Risco Toler\u00e1vel: Um risco dentro de uma extens\u00e3o com o qual a sociedade pode viver a fim de assegurar certos benef\u00edcios l\u00edquidos. \u00c9 uma extens\u00e3o de risco considerado como n\u00e3o-negligenci\u00e1vel, e necessita ser mantido sob revis\u00e3o e reduzido futuramente se poss\u00edvel.

Segundo o INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SOCIETY²⁸ (1997 apud FELL et al., 2005, p. 13, tradu\u00e7\u00e3o nossa), h\u00e1 alguns princ\u00edpios gerais que devem ser considerados para a an\u00e1lise de riscos toler\u00e1veis para a perda de vida:

- a) O risco incremental a que uma pessoa est\u00e1 exposta devido a um perigo, n\u00e3o pode ser significante se comparado a um risco o qual ela normalmente est\u00e1 sujeita cotidianamente;
- b) Este risco incremental deve ser reduzido, seguindo-se o princ\u00edpio do ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), que significa em portugu\u00eas “T\u00e3o baixo quanto razoavelmente pratic\u00e1vel”. Este princ\u00edpio \u00e9 aplicado tamb\u00e9m nos gr\u00e1ficos (curvas) F-N, como p\u00f4de ser visto na figura 25;
- c) Se a consequ\u00eancia de um determinado perigo for alta, em termos de perda de vida, ent\u00e3o sua probabilidade de ocorr\u00eancia deve ser baixa, consentindo com a intoler\u00e2ncia da sociedade para eventos que acarretem em muitas fatalidades simultaneamente;

²⁸ INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES. Quantitative risk assessment for slopes and landslides – the State of the Art. In: CRUDEN, D.; FELL, R. (Ed.) **Landslide Risk Assessment**. Balkema, Rotterdam, 1997, p. 3-12.

- d) Pessoas que não têm condições financeiras ou possuem outras limitações, que as impedem de reduzir ou controlar riscos, geralmente toleram riscos maiores do que eles consideram como aceitável. Além disso, trabalhadores de indústrias com encostas perigosas (por exemplo, mineiros) toleram riscos maiores que a sociedade em geral.

Há outros princípios que se aplicam especificamente a riscos relacionados a encostas e deslizamentos, mesmo que não existam critérios de aceitabilidade de risco de perda de vida mundialmente estabelecidos para esses casos (INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SOCIETY²⁹, 1997 apud FELL et al., 2005, p. 14, tradução nossa):

- a) A sociedade tolera riscos mais altos para taludes naturais se comparados com aqueles projetados;
- b) Se algum monitoramento e/ou medida de mitigação de risco for implantado em um talude natural, o risco tolerável relativo a esse talude se tornará próximo ao risco tolerável para taludes projetados;
- c) Os riscos toleráveis podem variar de acordo com o histórico de deslizamentos e com o sistema de controle e propriedade dos taludes com presença de ameaças, podendo ser diferentes de um país para outro ou, até mesmo, dentro do mesmo país.

A AGS (2000, p. 63-65, tradução nossa) possui algumas sugestões de critérios de aceitabilidade para riscos individuais e riscos sociais. Para riscos individuais, é considerado que a tabela 4 pode ter uma aplicação razoável em determinar critérios para riscos toleráveis em taludes projetados. A AGS ainda sugere que a ordem de grandeza dos riscos aceitáveis é geralmente uma ordem de magnitude menor que a dos riscos toleráveis.

Tabela 4 – Critérios para riscos toleráveis e aceitáveis em taludes projetados

Situação	Riscos toleráveis sugeridos para perda de vida	Riscos aceitáveis sugeridos para perda de vida
Taludes projetados existentes	10^{-4} /ano para pessoa em maior risco	10^{-5} /ano para pessoa em maior risco
	10^{-5} /ano para média de pessoas em risco	10^{-6} /ano para média de pessoas em risco
Taludes projetados novos	10^{-5} /ano para pessoa em o maior risco	10^{-6} /ano para pessoa em o maior risco
	10^{-6} /ano para média de pessoas em risco	10^{-7} /ano para média de pessoas em risco

(fonte: adaptado de AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2000, p. 65, tradução nossa)

²⁹ INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES. Quantitative risk assessment for slopes and landslides – the State of the Art. In: CRUDEN, D.; FELL, R. (Ed.) **Landslide Risk Assessment**. Balkema, Rotterdam, 1997, p. 3-12.

No caso de riscos sociais, o uso de curvas F-N (figura 24) é uma alternativa que pode refletir a realidade de que a sociedade, geralmente, é mais tolerante a eventos frequentes que causam menos mortes individualmente, a eventos mais raros que causam um número grande de fatalidades por evento. As linhas presentes na curva F-N são variáveis, de acordo com os sistemas legais e dos próprios países onde os deslizamentos estão sendo analisados (FELL et al., 2005, p. 14, tradução nossa). Segundo Christian³⁰ (2004 apud FELL et al., 2005, p. 14, tradução nossa), a curva F-N pode representar uma ferramenta importante para descrever o significado de probabilidades e riscos, já que mesmo entre engenheiros, há problemas na compreensão de pequenas probabilidades, o que pode prejudicar o resultado e a avaliação de análises probabilísticas.

Entretanto, os limites de tolerabilidade ao risco não devem ser pensados como fronteiras absolutas. As sociedades possuem uma ampla extensão de tolerância ao risco e esses números são tentativas de se expressar matematicamente o senso comum de uma população. Além disso, essa questão deverá ser abordada no nível de governo nacional, estatal ou local, já que o estabelecimento de padrões e diretrizes universais não é prático (INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SOCIETY³¹, 1997 apud FELL et al., 2005, p. 14, 16, tradução nossa).

Por fim, os autores concluem que, apesar das incertezas e limitações, decisões deverão ser tomadas e, nesse contexto, ter uma estimativa de riscos da situação em análise é melhor do que não ter ciência do possível risco presente no talude em estudo. “O nível de sofisticação a ser adotado na estimativa do risco para um problema particular somente necessita ser suficiente para facilitar uma decisão informada” (FELL et al., 2005, p. 24, tradução nossa).

6.2 EXEMPLO DE SITUAÇÃO HIPOTÉTICA: DESLIZAMENTO EM ATERRO RODOVIÁRIO

O artigo escrito por Fell et al. fornece três exemplos simplificados que ilustram como funcionam os conceitos básicos de sua metodologia para uma avaliação de risco geotécnico.

³⁰ CHRISTIAN, J.T. Geotechnical Engineering reliability: how well do we know what we are doing? **Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 130, n. 10, p. 985-1003, 2004.

³¹ INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES. Quantitative risk assessment for slopes and landslides – the State of the Art. In: CRUDEN, D.; FELL, R. (Ed.) **Landslide Risk Assessment**. Balkema, Rotterdam, 1997, p. 3-12.

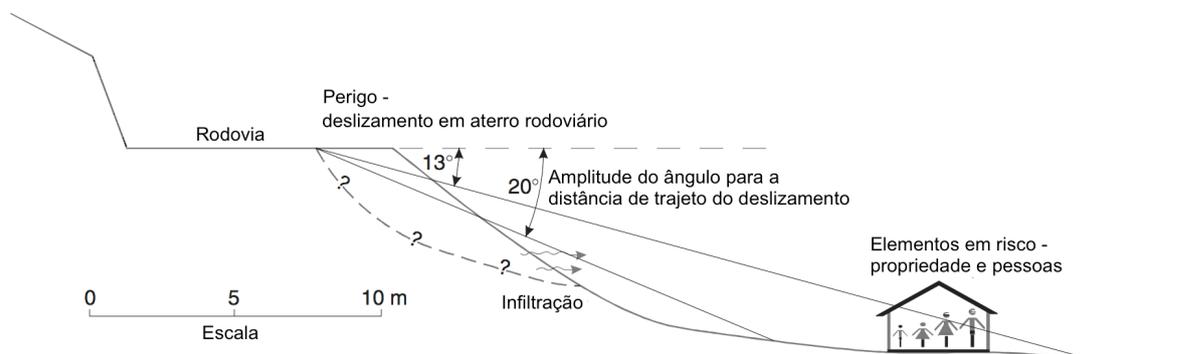
Para a etapa de julgamento de valor e aplicação de critérios de tolerância e aceitabilidade do risco estimado, foram considerados que a figura 25 e a tabela 4 são aplicáveis para as situações exemplificadas, por conveniência (FELL et al., 2005, p. 16, tradução nossa).

Nesta seção, será exposto o primeiro exemplo, que trata de um deslizamento presente em um aterro rodoviário (FELL et al., 2005, p. 17-18, tradução nossa). Caso seja do interesse do leitor, os outros dois exemplos encontram-se nas páginas 19 a 23 do artigo (FELL et al., 2005).

6.2.1 Definição do escopo do exemplo

Este exemplo tem como escopo calcular o risco de perda de vida a que pessoas morando numa residência próxima a um aterro rodoviário estão expostas (figura 26).

Figura 25 – Deslizamento em um aterro rodoviário



(fonte: FELL et al., 2005, p. 17, tradução nossa)

6.2.2 Caracterização do deslizamento

A caracterização do perigo é feita através da análise do histórico da rodovia em questão. A rodovia foi construída há 50 anos, com corte e aterro feitos com uma escavadeira. O local tem como fundação rochas graníticas e o aterro é originado de solos residuais e granito completamente alterado, sendo classificado como uma areia siltosa. Registros acusam que não foi realizada uma compactação apropriada no aterro e que, ao longo de toda a extensão dessa

rodovia, que possui topografia, geologia e condições climáticas similares às encontradas neste aterro, houve quatro deslizamentos em um total de 60 aterros rodoviários.

Com os dados da geometria do aterro e dos deslizamentos já ocorridos na rodovia, foi avaliado que o volume provável do deslizamento seja de aproximadamente 1000 m³. Devido ao estado solto e saturado do aterro, especialistas consideram que poderia ocorrer uma perda elevada de resistência não drenada no deslizamento (caracterizando uma “liquefação estática”) e, por isso, o movimento resultante possivelmente seria rápido.

Através da utilização de métodos empíricos, a amplitude do ângulo para a distância de trajeto do deslizamento foi estimada ser entre 13° e 20°. A partir dessa estimativa e das dimensões geométricas do talude, a probabilidade do deslizamento atingir os elementos em risco foi estimada em 0,4 ($P_{(T:L)}=0,4$).

6.2.3 Estimativa da frequência

A frequência de deslizamento no aterro pode ser obtida considerando o número de deslizamentos registrados para a totalidade dos aterros (quatro em 60 aterros) durante os 50 anos de vida útil da rodovia, conforme a seguinte expressão:

$$P_{(L)} = \frac{4}{60 \times 50} = 1,33 \times 10^{-3} / \text{ano} \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

$P_{(L)}$ = Frequência de deslizamento do aterro.

Esse valor de frequência pode ser considerado apropriado para o estudo se as seguintes suposições forem atendidas: o aterro em questão é similar aos outros 59 aterros existentes na rodovia e a performance da rodovia durante seus 50 anos de funcionamento é representativa do futuro.

6.2.4 Análise das consequências

Para se estimar as prováveis consequências de um deslizamento, é necessário determinar a probabilidade espacial temporal ($P_{(S:T)}$) das pessoas que residem na casa e sua vulnerabilidade ($V_{(D:T)}$). Quatro pessoas moram na casa: uma delas está na casa 20 horas por dia, sete dias por semana, e as outras três estão na casa 12 horas por dia, dois dias por semana. Assim sendo, as $P_{(S:T)}$ para a pessoa em maior risco e para as outras três pessoas são como as seguintes expressões, respectivamente:

$$P_{(S:T)} = \frac{20}{24} \times \frac{7}{7} = 0,83 \text{ para a pessoa em maior risco} \quad (\text{fórmula 13})$$

$$P_{(S:T)} = \frac{12}{24} \times \frac{2}{7} = 0,14 \text{ para as outras três pessoas} \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

$P_{(S:T)}$ = Probabilidade espacial temporal, assumindo que não existe aviso prévio ao evento.

A vulnerabilidade das pessoas, em serem mortas se o deslizamento atingir a casa enquanto elas estiverem no interior da residência, foi estimada ser igual a 0,4 ($V_{(D:T)}=0,4$), considerando os prováveis volume e velocidade do deslizamento quando este atingir a casa.

6.2.5 Estimativa do risco geotécnico

O risco de perda de vida de uma ou mais pessoas pode ser estimado através da aplicação da fórmula 10. A probabilidade anual da pessoa em maior risco perder sua vida, devido ao deslizamento, é como a fórmula 15. O risco calculado com a ajuda dessa fórmula é um risco individual.

$$P_{(LOL)} = (1,33 \times 10^{-3}) \times (0,4) \times (0,83) \times (0,4) / \text{ano} = 1,7 \times 10^{-4} / \text{ano} \quad (\text{f\u00f3rmula 15})$$

Onde:

$P_{(LOL)}$ = Probabilidade anual da pessoa em maior risco ser morta, devido ao deslizamento.

J\u00e1 para determinar a probabilidade anual das quatro pessoas estarem na resid\u00eancia quando esta \u00e9 atingida pelo deslizamento, deve-se utilizar a probabilidade espacial temporal que assume que todas as pessoas est\u00e3o simultaneamente no interior da casa, conforme a f\u00f3rmula 16. Como a vulnerabilidade das pessoas \u00e9 0,4, ent\u00e3o para um total de quatro pessoas dentro da resid\u00eancia, isso resultaria em 1,6 pessoas (1 para 2) que seriam mortas pelo deslizamento se o mesmo atingisse a propriedade.

$$P_{(LOL)} = (1,33 \times 10^{-3}) \times (0,4) \times (0,14) / \text{ano} = 0,74 \times 10^{-4} / \text{ano} \quad (\text{f\u00f3rmula 16})$$

Onde:

$P_{(LOL)}$ = Probabilidade anual das quatro pessoas estarem na casa, a qual ser\u00e1 atingida pelo deslizamento.

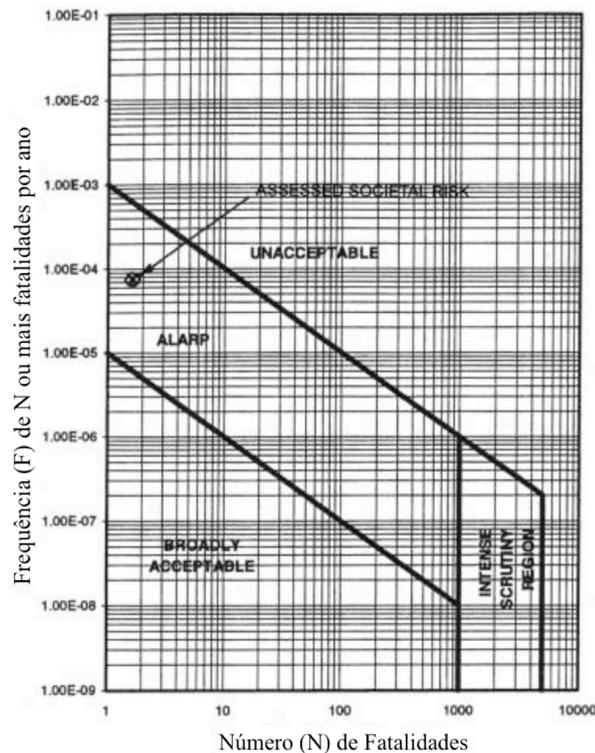
6.2.6 Avalia\u00e7\u00e3o do risco geot\u00e9cnico estimado

O risco estimado para a pessoa em maior risco de perda de vida deve ser confrontado com os limites de tolerabilidade para riscos individuais fornecidos pela tabela 4. Segundo dados dessa tabela, para taludes projetados existentes, o risco individual toler\u00e1vel para a pessoa em maior risco \u00e9 de $1,0 \times 10^{-4}$ /ano. Nesse caso, o risco obtido atrav\u00e9s da f\u00f3rmula 15 ($P_{(LOL)} = 1,7 \times 10^{-4}$ /ano) est\u00e1 na classe intoler\u00e1vel, devendo ser mitigado. Ressalta-se que a toler\u00e2ncia e a aceitabilidade ao risco de taludes depende de cada popula\u00e7\u00e3o.

O risco calculado considerando as quatro pessoas residentes na propriedade \u00e9 avaliado utilizando-se os crit\u00e9rios de toler\u00e2ncia ao risco de uma sociedade, pois se trata de um grupo de pessoas e n\u00e3o somente de um indiv\u00edduo em particular. Nessas situa\u00e7\u00f5es, o par Freq\u00fc\u00eancia –

Número de Fatalidades pode ser plotado em um gráfico como o da figura 25, sendo possível a verificação da tolerabilidade ou aceitabilidade do risco obtido, conforme os padrões da sociedade envolvida no estudo. A figura 27 mostra que o risco para o grupo de pessoas, calculado neste exemplo e plotado na Curva F-N ($0,74 \times 10^{-4}$ por 1,6), está abaixo da linha limite de tolerabilidade, mas se encontra na região de ALARP. A partir dessa avaliação deve-se: minimizar o risco, se medidas razoavelmente praticáveis estiverem disponíveis, ou considerar a realização de investigações geotécnicas mais profundas para melhorar a precisão do resultado da análise.

Figura 26 – Avaliação da tolerabilidade de risco para sociedade através de uma Curva F-N



(fonte: FELL et al., 2005, p. 18, tradução nossa)

6.3 APLICAÇÕES DA METODOLOGIA A CASOS REAIS

Esta seção tem como objetivo apresentar algumas experiências reais encontradas em países do exterior na tentativa de aplicar a metodologia apresentada na seção 6.1 para a realização de avaliações de risco de deslizamentos em taludes rodoviários. Essas experiências são descritas em artigos presentes no livro “*Landslide Risk Management*”, publicado em 2005.

A primeira a ser apresentada é uma aplicação de um sistema de gerenciamento de risco de deslizamentos na malha rodoviária de Saskatchewan no Canadá, seguida de uma avaliação preliminar de risco de deslizamentos na rede rodoviária do Nepal e de uma aplicação de avaliação quantitativa de risco em um projeto rodoviário na Austrália.

A experiência canadense será descrita de maneira mais detalhada no subitem 6.3.1, pois utiliza uma abordagem qualitativa e numérica da metodologia internacional, relacionada ao Fator de Segurança dos taludes, que representa um nível de precisão mais elevado, se comparado com abordagens qualitativas com o uso de descritores para a estimativa do risco, como a utilizada no Nepal. Além disso, a aplicação australiana é mais complexa e exige conhecimentos e dados que não estão disponíveis para a maioria dos taludes brasileiros atualmente, sendo de pouca utilidade, então, sua apresentação aprofundada no presente trabalho.

Então, as aplicações de avaliação de risco de deslizamentos em taludes rodoviários no Nepal e na Austrália são descritas, de forma resumida, nos subitens 6.3.2 e 6.3.3, respectivamente. Elas são apresentadas com o objetivo de demonstrar possíveis soluções para aplicar a metodologia internacional de avaliação de risco, independentemente da quantidade e qualidade dos dados e conhecimentos disponíveis para realizar a análise de risco geotécnico.

6.3.1 Aplicação na malha rodoviária de Saskatchewan no Canadá

Este subitem pretende apresentar os pontos principais relacionados à metodologia do artigo escrito por Kelly et al. (2005), que expõe a aplicação de um sistema de gerenciamento de risco na malha rodoviária de Saskatchewan, no Canadá. Em 2003, a malha rodoviária de Saskatchewan, gerenciada pela *Saskatchewan Highways and Transportation* (SHT), recebeu, pela primeira vez, a implementação de um sistema de gerenciamento de risco de deslizamentos, baseado no modelo do Alberta Transportation, com o objetivo de priorizar locais que necessitam de maior monitoramento e de medidas de remediação imediatas e também fornecer níveis de resposta a partir dos níveis de risco identificados (KELLY et al., 2005, p. 571, tradução nossa).

6.3.1.1 Classificação de perigos

Para a análise de risco na malha rodoviária, foram considerados perigos que afetassem motoristas e/ou bens físicos do sistema rodoviário. Os perigos foram divididos em: perigos geotécnicos e perigos de deslizamentos. Exemplos desses perigos são (KELLY et al., 2005, p. 571, tradução nossa):

- a) Perigos geotécnicos: erosão, recalque (adensamento) e fenômenos relacionados à interação solo-estrutura;
- b) Perigos de deslizamentos: movimentos de massa do solo, cujos volumes modificam as linhas e greides das rodovias e podem causar impactos aos motoristas ou à operação da rodovia. Esses perigos envolvem tanto taludes naturais quanto taludes projetados.

6.3.1.2 Sistema de Gerenciamento de Deslizamentos

Nesse item serão especificadas as práticas utilizadas pela SHT a fim de se aplicar um sistema moderno de gerenciamento de deslizamentos. Conforme Kelly et al. (2005, p. 571-572, tradução nossa), os seguintes passos são necessários para a prática de um sistema de gerenciamento eficiente e atual:

- a) Avaliar o grau de perigo que pode estar associado com locais instáveis;
- b) Avaliar a necessidade de monitoramento contínuo e inspeção;
- c) Fornecer aviso antecipado e resposta de emergência onde preocupações com segurança pública são justificadas; e,
- d) Estabelecer prioridades para investimento de recursos.

O Sistema de Gerenciamento de Deslizamento do Alberta Transportation foi considerado adequado para aplicação às condições das rodovias, sendo utilizado como modelo inicial, porque já estava em uso e poderia ser facilmente modificado para esta aplicação (KELLY et al., 2005, p. 572, tradução nossa).

6.3.1.3 Análise de Risco

A análise do risco de deslizamentos na malha rodoviária de Saskatchewan foi baseada no modelo do Alberta Transportation, no qual o risco é definido por (KELLY et al., 2005, p. 572, tradução nossa):

$$R = PF \times CF \quad (\text{fórmula 17})$$

Onde:

R = Risco de deslizamentos;

PF = Fator de Probabilidade;

CF = Fator de Consequência.

O Fator de Probabilidade (PF) significa a possibilidade de um deslizamento ocorrer durante a vida útil de uma estrutura, sendo avaliado por um engenheiro geotécnico qualificado, e é um valor não anualizado. O Fator de Probabilidade é adotado a partir de valores pré-estabelecidos em uma escala de 20 pontos, que foi modificada a partir da escala PF do modelo da Alberta Transportation. A principal modificação foi distinguir a instabilidade de um talude entre taludes naturais e taludes construídos (KELLY et al., 2005, p. 572, tradução nossa).

Segundo Kelly et al. (2005, p. 572, tradução nossa), a distinção entre taludes naturais e taludes projetados se dá no plano de cisalhamento: enquanto que em taludes naturais o plano de cisalhamento encontra-se no interior do talude (antes de qualquer interferência de obras de engenharia), nos taludes artificiais a estabilidade do terreno natural já foi previamente atestada, e o deslizamento pode ocorrer devido a uma instabilidade no talude construído. A tabela 5 mostra a escala utilizada na aplicação na SHT.

Tabela 5 – Fatores de Probabilidade (PF)

PF	Talude Natural	Talude Projetado
1	Geologicamente estável. Probabilidade muito baixa de ocorrência de deslizamento	$F > 1,5$ baseado em análise de tensão efetiva com dados calibrados e modelo*. Historicamente estável. Probabilidade de deslizamento muito baixa
3	Inativo, talude aparentemente estável. Probabilidade baixa de ocorrência de deslizamentos ou remobilização	$1,5 > F > 1,3$ baseado em análise de tensão efetiva com dados calibrados e modelo. Historicamente estável. Probabilidade de deslizamento baixa

* Se as condições descritas para análise do talude forem desconhecidas ou não encontradas, aumente o PF em uma categoria, por exemplo: se a qualidade dos dados usados na análise for desconhecida, aumente o PF de 1 para 3. F = Fator de Segurança.

continua

continuação

PF	Talude Natural	Talude Projetado
5	Deslizamento inativo com probabilidade moderada de remobilização. Nível de incerteza moderado; ou, talude ativo com taxa constante de movimentação muito baixa; ou, padrão de movimentação indeterminado	$1,3 > F > 1,2$ baseado em análise de tensão efetiva com dados calibrados e modelo. Sinais pequenos de movimentação visível. Probabilidade moderada de deslizamento
7	Deslizamento inativo com probabilidade alta de remobilização, ou perigos adicionais presentes. Nível de incerteza alto. Taxa de movimentação perceptível com zonas de movimentação definidas	$1,2 > F > 1,1$ baseado em análise de tensão efetiva com dados calibrados e modelo. Sinais de movimentação perceptíveis, ou perigos adicionais presentes. Probabilidade alta de deslizamento
9	Deslizamento ativo com taxa de movimentação moderada, estável ou decrescente em zona definida de cisalhamento	$F < 1,1$ baseado em análise de tensão efetiva com dados calibrados e modelo. Sinais óbvios de movimentação contínua lenta a moderada
11	Deslizamento ativo com taxa de movimentação moderada, crescente	Deslizamento ativo com taxa de movimentação moderada, crescente
13	Deslizamento ativo com alta taxa de movimentação a uma taxa estável ou crescente	Deslizamento ativo com alta taxa de movimentação a uma taxa estável ou crescente
15	Deslizamento ativo com alta taxa de movimentação com perigos adicionais**	Deslizamento ativo com alta taxa de movimentação com perigos adicionais
20	Deslizamento catastrófico está ocorrendo	Deslizamento catastrófico está ocorrendo

** Perigos adicionais são fatores que podem aumentar muito a taxa de movimentação, por exemplo: pé erodindo, nível d'água, etc.

(fonte: KELLY et al., 2005, p. 572, tradução nossa)

O Fator de Consequência (CF) “[...] é a consequência do deslizamento na infraestrutura de transporte ou segurança do motorista”. Os critérios incluídos na análise das consequências são: segurança do público, fechamento da rodovia e perda de infraestrutura. A classificação e o volume de tráfego da rodovia são considerados nos itens de segurança do público e perda de infraestrutura (KELLY et al., 2005, p. 573, tradução nossa).

O Fator de Consequência é assumido a partir de valores pré-estabelecidos em uma escala de 10 pontos (tabela 6). Essa escala é basicamente a mesma escala CF do modelo da Alberta Transportation, com poucas alterações (KELLY et al., 2005, p. 573, tradução nossa).

Para determinar os fatores PF e CF de cada um dos 69 locais monitorados pela SHT na malha rodoviária de Saskatchewan, foi necessário reunir um painel especializado em análise de risco de taludes que era familiarizado com as características dos locais estudados. Cada um dos membros do painel avaliou os fatores independentemente e, para determinar o nível de risco,

foi feita a média das avaliações de cada membro posteriormente (KELLY et al., 2005, p. 573, tradução nossa).

Tabela 6 – Fatores de Consequência (CF)

CF	Consequências Típicas
1	Taludes de corte rasos nos quais o deslizamento pode se espalhar para dentro de trincheiras ou aterros nos quais o deslizamento não impacta o pavimento para a segurança do condutor, problema de manutenção
2	Aterros e cortes moderados, não incluindo aterros de aproximação ou cabeceiras de pontes, perda de parte da rodovia ou possível deslizamento sobre a rodovia, volume pequeno. Aterros rasos onde terras privadas, corpos d'água ou estruturas podem ser impactadas. Deslizamentos afetando uso da rodovia e segurança de motoristas, mas não exigindo fechamento da rodovia. Lugares com perigo potencial de queda de rocha
4	Aterros e cortes associados com pontes, tratamentos de interseções, bueiros e outras estruturas, aterros altos, cortes profundos, áreas históricas de perigo de queda de rocha. Locais onde fechamento parcial da rodovia ou desvios significantes seriam resultados diretos e evitáveis de uma ocorrência de deslizamento
6	Locais onde fechamento da rodovia seria um resultado direto e inevitável de uma ocorrência de deslizamento
10	Locais onde a segurança do público e uma significativa perda de instalações de infraestrutura (como um encontro de uma ponte) ou estruturas privadas irão ocorrer se um deslizamento acontecer. Locais onde rápida remobilização de um deslizamento de larga escala é possível.

(fonte: KELLY et al., 2005, p. 573, tradução nossa)

A partir da determinação do nível de risco dos 69 locais analisados, os mesmos foram categorizados em quatro níveis de resposta: urgente, prioridade, rotina e inativo. Os níveis de resposta variam com o nível de risco e, como consequência, as ações a serem tomadas para o gerenciamento do risco do local também mudam, como pode ser visto na tabela 7 (KELLY et al., 2005, p. 573, tradução nossa).

Segundo Kelly et al. (2005, p. 573, tradução nossa), quando novos locais são incluídos no sistema de gerenciamento de risco, eles recebem uma classificação de “urgente”, independentemente do seu nível de risco calculado. O nível de resposta permanece nesse grau até três anos de monitoramento durante a primavera e o outono, quando os locais poderão ser caracterizados.

Tabela 7 – Níveis de resposta sugeridos e suas respectivas abordagens de gerenciamento, conforme os níveis de risco

Nível de Risco	Nível de Resposta	Abordagem de Gerenciamento
> 125	Urgente	Inspecionar pelo menos uma vez ao ano. Monitorar instrumentação pelo menos duas vezes ao ano na primavera e no outono. Investigar e avaliar medidas de mitigação
75 a 125	Prioridade	Inspecionar uma vez ao ano. Monitorar instrumentação pelo menos uma vez ao ano
27,5 a 75	Rotina	Inspecionar a cada 3 anos. Monitorar instrumentação pelo menos a cada 3 anos com uma frequência aumentada para locais selecionados como exigido
< 27,5	Inativo	Não estabelecer agenda de monitoramento de instrumentação e inspeção. Monitorar e inspecionar conforme exigido em resposta a solicitações de manutenção

(fonte: adaptado de KELLY et al., 2005, p. 574, tradução nossa)

6.3.1.4 Circuito de Inspeção

Para finalizar a análise de risco, o painel de especialistas conduziu circuitos de inspeção em todos os locais analisados para confirmar o nível de risco de cada um. Os especialistas completaram um Formulário de Inspeção (exemplo fornecido no Anexo B) e deram recomendações para investigações futuras. A presença de especialistas durante as inspeções de campo é muito importante para fornecer uma avaliação mais precisa do nível de risco, já que essa avaliação depende do conhecimento das condições de campo. Além dos perigos de deslizamentos, os perigos geotécnicos também são identificados nas inspeções, porque eles influenciam nos movimentos de massa (KELLY et al., 2005, p. 573-574, tradução nossa).

No artigo, também são apresentados dois estudos de casos. Nessas aplicações, além dos preenchimentos dos formulários de inspeção de campo, um programa de instrumentação foi adotado para determinar opções de remediação. Inclínômetros e piezômetros foram instalados em posições estratégicas para caracterizar a movimentação do talude em estudo. Ensaios de laboratório também foram realizados, juntamente com a utilização de modelos de estabilidade de taludes em 2D e 3D, para caracterizar a movimentação do talude e avaliar a estabilidade do estudo de caso (KELLY et al., 2005, p. 574-580).

6.3.2 Avaliação preliminar de risco de deslizamentos na rede rodoviária do Nepal

No Nepal, aproximadamente 80% do território nacional se encontra em terreno montanhoso e a rede rodoviária é de extrema importância para o país, uma vez que não há outros meios de transporte terrestre disponíveis. A maior parte do transporte de bens e serviços depende dessa malha rodoviária que possui 16.800 km de extensão, das quais 3.000 km são consideradas rodovias de grande porte, constituindo ligações entre centros de serviços importantes. Mais da metade da extensão dessas rodovias de grande porte estão em regiões montanhosas e são constituídas de taludes de corte, onde um grau elevado de perigo relacionado a deslizamentos é esperado, devido às características geológicas das montanhas do país, combinadas com chuvas concentradas que ocorrem anualmente (SUNUWAR et al., 2005, tradução nossa).

O Himalaia do Nepal é conhecido por possuir montanhas frágeis, com várias falhas inversas (falhas compressivas) proeminentes no sopé da cordilheira. As regiões entre essas falhas inversas formam as grandes unidades geológicas do país e quase todas as grandes rodovias atravessam uma ou mais dessas descontinuidades geológicas. As chuvas que ocorrem anualmente de junho a setembro (estação da monção) podem facilmente desencadear deslizamentos nos trechos de rodovias que cruzam essas falhas inversas. Várias unidades geológicas do Nepal também possuem características estratigráficas não favoráveis à estabilidade dos taludes, como, por exemplo, a presença de materiais altamente heterogêneos na superfície das encostas, consequência dos tipos de rochas prevalentes nas unidades geológicas encontradas no país (SUNUWAR et al., 2005, tradução nossa).

Usualmente, há dois fatores desencadeadores principais de deslizamentos no Nepal, os quais são as chuvas intensas e os terremotos, sendo que as chuvas são as maiores causadoras de deslizamentos frequentes todos os anos no Nepal, podendo também ocasionar desastres de enchentes em algumas partes do país. As precipitações pluviais são concentradas no período de monção, de junho a setembro, e às vezes chuvas intensas ocorrem dentro de um período de poucos dias, causando extensa erosão e deslizamentos. Mais de 80% da precipitação anual para as cidades do país ocorre durante esses quatro meses da monção (SUNUWAR et al., 2005, tradução nossa).

Em 2000, o Departamento de Rodovias do Nepal adotou um sistema de coleta de dados sobre interrupções e fechamentos de rodovias, com o objetivo de implantar uma maneira sistemática

de alocar recursos de manutenção para as rodovias, devido a deslizamentos e enchentes. Os dados coletados incluem: nome e localização do escritório responsável pela rodovia, nome e extensão (em km) da rodovia interrompida pelo deslizamento, dia e hora do fechamento e da reabertura da rodovia, e recursos utilizados para abrir a rodovia (equipamentos, mão de obra e gastos, se possível). Além disso, como o número de locais com instabilidades ao longo das rodovias é grande, o Departamento de Rodovias implementou uma avaliação qualitativa preliminar de risco de deslizamentos, para priorizar as instabilidades de taludes presentes na malha rodoviária do Nepal, em termos de manutenção e medidas emergenciais, de acordo com níveis de risco potencial (SUNUWAR et al., 2015, tradução nossa).

O risco de instabilidade do talude foi definido como uma combinação de perigo e vulnerabilidade. Para a identificação do nível de perigo, são definidos três tipos de rupturas de taludes: deslizamento, fluxo de detritos e ruptura de aterro (ver tabela 8). No contexto do Nepal, fluxo de detritos é qualquer deslizamento que apresente material fluindo através de um canal de drenagem, independentemente do tipo de material e da taxa de movimento. Na categoria de deslizamentos, são incluídos todos os tipos de rupturas que geralmente ocorrem em taludes rodoviários, como: quedas de rochas, escorregamentos translacionais e escorregamentos rotacionais (SUNUWAR et al., 2005, tradução nossa).

Tabela 8 – Matriz qualitativa de perigo de instabilidades de taludes, de acordo com o tipo de ruptura

Nível de Perigo	Alto (A)	Médio (B)	Baixo (C)
Deslizamento	Deformações claras e movimentos visíveis de fissuras	Topografia de deslizamento óbvia mas sem movimento visível	Deslizamento suspeito mas sem evidência de deformação visível
Fluxo de Detritos	Frequência dentro de cada dois anos	Frequência superior a três anos	Ocorrência é rara
Ruptura de Aterro	Deformações visíveis e condições de tráfego prejudicadas	Deformações visíveis mas fluxo de tráfego normal	Sem deformações mas necessidade de reparo de estruturas e drenagem

(fonte: SUNUWAR et al., 2005, p. 419, tradução nossa)

A tabela 9 mostra os graus qualitativos de vulnerabilidade (consequência ao deslizamento) da rodovia, de acordo com a importância da mesma (dada pelo Tráfego Diário Médio Anual) e dos bens públicos afetados, com a quantidade de propriedades privadas prejudicadas, e com o

tempo necessário para a abertura temporária da rodovia. Combinando-se os níveis de perigo e vulnerabilidade, é obtido o grau de risco potencial para a ruptura do talude, dado pela tabela 10. Foram definidos quatro níveis de risco, a partir dos quais a priorização para medidas emergenciais e de manutenção dos taludes rodoviários possa ser realizada convenientemente (SUNUWAR et al., 2005, tradução nossa).

Tabela 9 – Matriz qualitativa de vulnerabilidade da rodovia

Item de Avaliação	Alto (a)	Médio (b)	Baixo (c)
Tráfego Diário Médio Anual	≥ 1.000	$1.000 > T \geq 500$	< 500
Bens públicos	Importante	Média	Baixa
Número de casas privadas	≥ 10	$10 > C \geq 3$	< 3
Tempo necessário para a abertura temporária do tráfego	≥ 3 dias	$3 > P \geq 1$	< 1 dia

(fonte: SUNUWAR et al., 2005, p. 419, tradução nossa)

Tabela 10 – Níveis de risco e soluções possíveis

Combinação	Nível de Risco	Solução
Aa, Ab, Ba	I	Implementação imediata de contramedidas
Ac, Bb, Ca	II	Monitoramento frequente (inspeção de frequência uma vez por mês)
Bc, Cb	III	Inspeção periódica (antes e depois da monção)
Cc	IV	Sem acompanhamento até algumas mudanças serem notadas

(fonte: SUNUWAR et al., 2005, p. 419, tradução nossa)

6.3.3 Aplicação de avaliação quantitativa de risco ao projeto de *Lawrence Hargrave Drive* na Austrália

Lawrence Hargrave Drive (LHD) é uma rodovia costeira localizada em New South Wales na Austrália, que foi construída em aproximadamente 20 a 45 m acima do nível do mar junto a

penhascos que alcançam 300 m de altura acima da rodovia. A rodovia tem um histórico de sérios problemas de instabilidade dos aterros, de quedas de rochas e de fluxos e escorregamentos de detritos, muitos deles causados por erosão marinha agressiva. Em 2003, o Ministério de Rodovias fechou um trecho de 1350 m de rodovia (entre Coalcliff e Clifton) por medidas de segurança. Uma aliança entre a autoridade responsável pela rodovia, construtores civis e engenheiros consultores foi formada para desenvolver uma solução de engenharia que reduzisse a probabilidade anual de perda de vida de aproximadamente 10^{-2} para aproximadamente 10^{-5} (WILSON et al., 2005, tradução nossa).

O trecho de rodovia em estudo foi dividido em cinco Domínios Geotécnicos diferentes, sendo três promontórios e duas baías. Esta divisão foi feita com intuito de realizar a análise de risco por domínio geotécnico, além do risco total do trecho da rodovia, e possibilitar o estudo do impacto das soluções de engenharia sobre a probabilidade anual de perda de vidas em cada um dos domínios. A geologia é bastante semelhante ao longo de todo o trecho estudado da rodovia, compreendendo uma sequência de unidades de arenito e argilito intercaladas. As unidades de arenito formam os penhascos sub-verticais, já as unidades de argilito formam os taludes intervenientes entre os arenitos (WILSON et al., 2005, tradução nossa).

Os perigos geotécnicos estão presentes por toda a escarpa desde o seu topo até a costa. A maioria dos deslizamentos dos penhascos consiste de quedas de rochas e rolamentos de matações, enquanto que os deslizamentos provenientes dos taludes de argilito são fluxos e deslizamentos de detritos (misturas de solo e rocha). Além disto, o aterro da rodovia é suscetível à ruptura devido a erosão marinha. A maioria dos deslizamentos são desencadeados por chuvas intensas (precipitação pluvial anual de cerca de 1500 mm). Entretanto, os processos de instabilidade dos taludes estão sendo acelerados pela erosão marinha, que aumenta a declividade dos taludes e remove material da base dos penhascos, causando tombamento da camada de arenito e deslizamentos nas camadas de argilito, sucessivamente até o topo da escarpa, ao longo da rodovia (WILSON et al., 2005, tradução nossa).

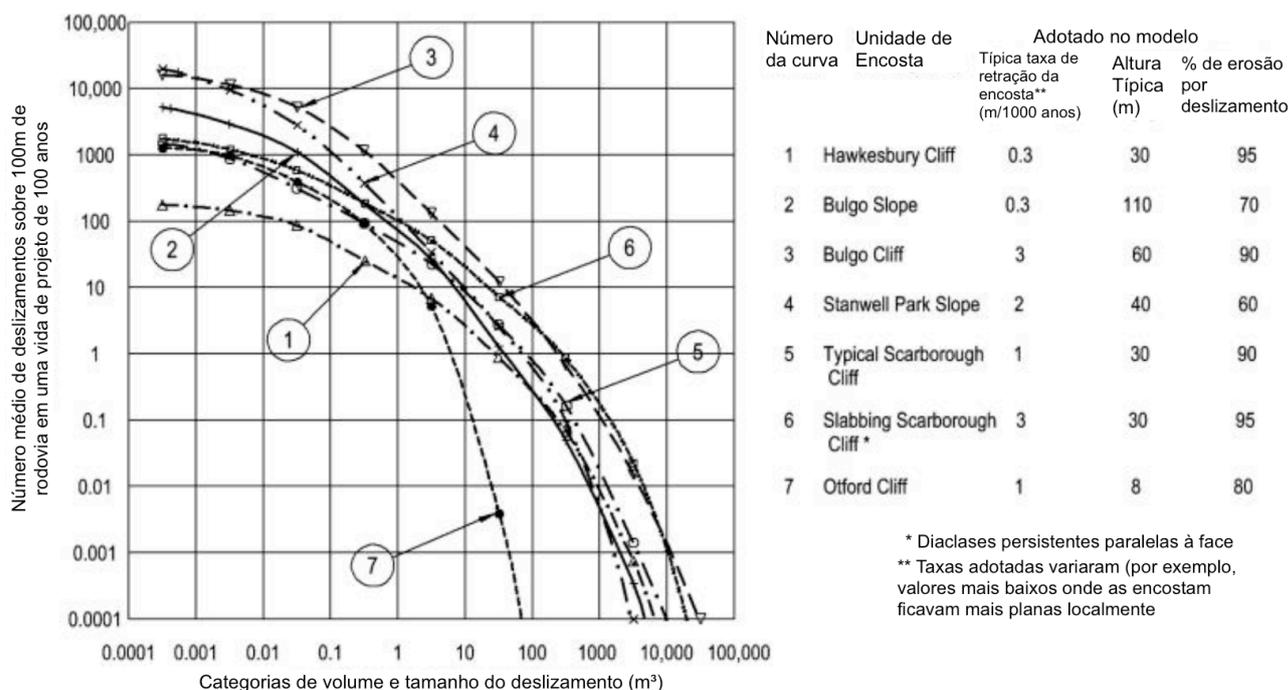
Para determinar a frequência ou possibilidade de deslizamentos impactando a rodovia foram desenvolvidos modelos de frequência e volumes de deslizamentos para cada uma das “unidades de encosta”. Essa distribuição de frequência x volume de deslizamentos dentro de uma unidade de encosta depende da forma da superfície de cada unidade e dos materiais geológicos que a compõem. A figura 28 mostra curvas de frequência x volume de

deslizamentos para cada uma das unidades de encosta, que indicam o número de eventos esperados de acordo com a ordem de magnitude dos deslizamentos. As curvas foram normalizadas para apresentar o número de deslizamentos/100 m de rodovia em uma vida de projeto de 100 anos (WILSON et al., 2005, p. 592-593, tradução nossa).

Para determinar as consequências dos possíveis deslizamentos, o estudo adotou um valor de 4000 veículos/dia (sendo este o valor do Tráfego Diário Médio Anual), referido nos cálculos como 2000 veículos/faixa/dia. Para consideração da vulnerabilidade das pessoas foram considerados dois níveis, dependendo da situação em que as pessoas se encontram em relação ao deslizamento (WILSON et al., 2005, p. 593-594, tradução nossa):

- Vulnerabilidade de pessoas em um veículo diretamente atingido pelo deslizamento. Sendo maior no caso de o deslizamento atingir o topo do carro verticalmente, se comparado com o que atinge a lateral do carro em um movimento horizontal;
- Vulnerabilidade de pessoas em um carro que vai de encontro ao deslizamento. Assumindo que o deslizamento atinge a rodovia a 40 m ou menos do carro e que o motorista não consegue evitar a colisão. Esta distância é baseada em um tempo de resposta de 2 s e o carro numa velocidade de 60 km/h.

Figura 27 – Modelos de frequência x volume dos deslizamentos para as várias unidades de encosta



(fonte: WILSON et al., 2005, p. 593, tradução nossa)

A tabela 11 apresenta algumas das vulnerabilidades adotadas no projeto (WILSON et al., 2005, p. 594, tradução nossa).

Tabela 11 – Algumas vulnerabilidades para deslizamentos adotadas no projeto

Ordem de magnitude do deslizamento atravessando a rodovia (m ³) *	Quedas de rocha do Penhasco Scarborough		Fluxos de detritos do Domínio Geotécnico 4	
	Deslizamento atinge o carro	Carro atinge o deslizamento	Deslizamento atinge o carro	Carro atinge o deslizamento
0,03	0,05	0,0006	-	-
0,3	0,1	0,002	-	-
3	0,3	0,03	0,001	-
30	0,7	0,03	0,01	0,001
300	1	0,03	0,1	0,003
3.000	1	0,03	1	0,003

* Nem todos os volumes considerados de eventos estão mostrados nessa tabela

(fonte: WILSON et al., 2005, p. 594, tradução nossa)

Por fim, para determinar o risco devido a cada perigo encontrado em cada unidade de encosta e em cada Domínio Geotécnico foi utilizada uma planilha de Excel para conduzir os cálculos (o modelo desta planilha pode ser visto na figura 29). A probabilidade anual de uma ou mais mortes no trecho da LHD entre Coalcliff e Clifton foi obtido ao somar o resultado das 59 planilhas produzidas no estudo. O risco para os usuários da rodovia foi calculado usando as fórmulas 18 a 20 (WILSON et al., 2005, p. 595-596, tradução nossa):

$$R_D = P_S * V_D \quad (\text{fórmula 18})$$

$$P_S = 1 - (1 - P_{S:H})^{NR} \quad (\text{fórmula 19})$$

$$P_{S:H} = (N_V * L_{C:R} * N_L) / (24 * 1000 * V_V) \quad \text{(fórmula 20)}$$

Sendo:

R_D = probabilidade anual de perda de vida;

P_S = probabilidade do carro ser atingido ou atingir um deslizamento;

V_D = vulnerabilidade do indivíduo (probabilidade de morte) dado o impacto do deslizamento no carro;

$P_{S:H}$ = probabilidade do impacto espacial do deslizamento na rodovia dado o evento;

NR = número anual de deslizamentos atingindo a rodovia;

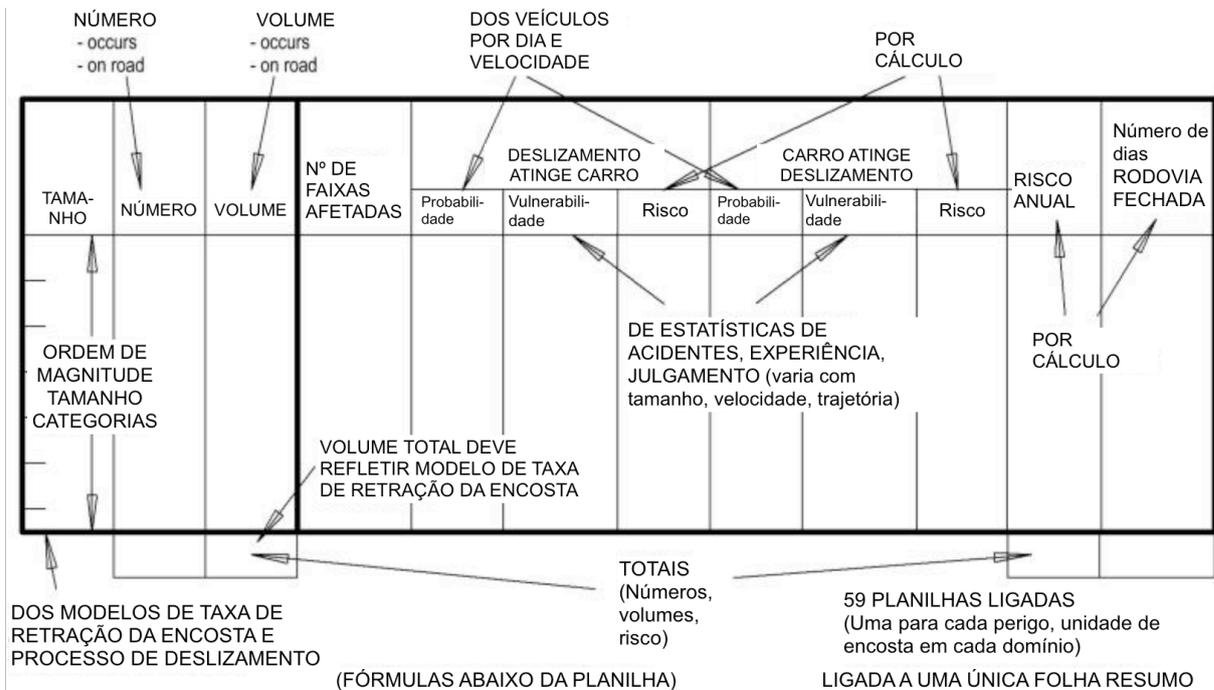
N_V = número de carros por dia por faixa;

N_L = número de faixas afetadas pelo deslizamento;

$L_{C:R}$ = comprimento do carro (assumido em 5 m) ou a distância de reação (como apropriado, nesse caso assumida em 40 m);

V_V = velocidade do carro em km/h (assumida como sendo o limite de velocidade de 60 km/h).

Figura 28 – Leiaute de planilha utilizada para um perigo, local e unidade de encosta em particular



(fonte: WILSON et al., 2005, p. 595, tradução nossa)

Várias simplificações foram feitas ao realizar a análise de risco de forma quantitativa, devido ao comportamento complexo dos deslizamentos e suas interações com os elementos em risco. As simplificações consideradas diretamente na condução da análise quantitativa de risco foram (WILSON et al., 2005, p. 593, tradução nossa):

- a) O modelo de frequência x volume de deslizamentos assume que não há deposição de material no local, ou seja, todo o material erodindo da encosta irá atravessar a rodovia, por deslizamento ou outro processo erosivo. Mas ele não assume que todos os detritos de cada deslizamento irão atravessar a rodovia toda vez que ocorrer um deslizamento;
- b) Além das duas situações consideradas para se estimar a vulnerabilidade das pessoas, outros eventos ou combinações de eventos poderiam ocorrer, como pedras atingindo pessoas se protegendo junto ao penhasco, veículo atingindo estrutura afetada pelo deslizamento, etc.. Porém, devido à dificuldade em prever a probabilidade desses eventos, eles não foram considerados na análise.

Além dessas, outras simplificações foram adotadas indiretamente na análise de risco (WILSON et al., 2005, p. 597, tradução nossa):

- a) Quedas de rochas não atingindo ou permanecendo na rodovia;
- b) Variações no número de veículos durante o dia;
- c) Comprimento adotado do veículo e largura do deslizamento;
- d) Variações em como as pessoas nos veículos são impactadas;
- e) Ônibus;
- f) Veículos pesados;
- g) Distâncias de visibilidade.

Wilson et al. apontam que, a partir de resultados anteriores de outras análises de risco quantitativas, esses fatores iriam produzir apenas efeitos de segunda ordem no resultado para o risco total do trecho em análise (diferença de valores menor que metade de uma ordem de magnitude), se fossem incluídos. E como alguns dos fatores são a favor da segurança e outros contra, os autores julgaram essas simplificações como não significativas para o resultado da análise (2005, p. 597, tradução nossa).

7 ANÁLISE DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, as diversas metodologias e adaptações nacionais e internacionais pesquisadas no trabalho e descritas nos capítulos 5 e 6 são comparadas e analisadas. Também são feitos alguns comentários sobre as mesmas, no que diz respeito à utilização de tais metodologias em projetos e estudos brasileiros. A norma brasileira ABNT NBR 11.682:2009 sobre Estabilidade de encostas teve alguns de seus aspectos levantados, a fim de ilustrar como o risco é abordado nesse documento, que representa uma indicação da melhor prática a ser executada por um profissional da área.

Algumas sugestões de adaptações das metodologias que poderiam ser utilizadas no Brasil, com o objetivo de aprofundar os estudos e conhecimentos sobre a situação de risco geotécnico em talude rodoviários brasileiros, são apresentadas ao fim do capítulo.

7.1 COMPARAÇÃO DAS METODOLOGIAS E ADAPTAÇÕES

No que diz respeito à complexidade das metodologias pesquisadas, fica claro que os países desenvolvidos possuem técnicas mais precisas e avançadas para a determinação do risco envolvendo deslizamentos. Isso se dá principalmente pela maior quantidade de dados disponíveis, recolhidos por várias décadas através de registros de precipitações pluviais e dos próprios movimentos de massa. A existência de um banco de dados históricos de fenômenos naturais, por si só, já possibilita a criação de modelos numéricos que relacionem os fatores desencadeadores de deslizamentos com os tipos e intensidades de movimentos de massa decorrentes. Ou, como é mais comum, modelos que explicitem a relação entre as magnitudes dos deslizamentos com sua frequência/probabilidade de ocorrência. Além disso, o fato de alguns países possuírem sérios e recorrentes problemas com deslizamentos há muito tempo, acaba por fomentar o desenvolvimento de pesquisas e estudos para mitigar o risco em encostas e taludes, como no caso de Hong Kong, que iniciou uma política de controle de risco de deslizamentos no final da década de 1970, após a ocorrência de dois grandes incidentes causados por chuvas intensas em um mesmo dia.

No Brasil, grandes desastres promovidos por deslizamentos começaram a acontecer nas últimas décadas, agravados por ocupações desordenadas das encostas, e a falta de registros históricos sobre deslizamentos ocorridos no país, com seus respectivos dados de caracterização física e geotécnica, prejudica um avanço rápido das metodologias para análise de risco de deslizamentos. Como pôde ser visto nas apresentações das metodologias, a técnica brasileira existente como diretriz nacional para mapeamento de risco em encostas, publicada pelo IPT e escrita por Carvalho et al. (2007), possui um grau de subjetividade bastante elevado.

Nessa metodologia, a caracterização da ameaça é realizada a partir de parâmetros visuais por membros de equipes municipais, que não são necessariamente engenheiros geotécnicos ou possuem experiência em inspeções de deslizamentos. A frequência ou a probabilidade de ocorrência do deslizamento é inferida a partir dos sinais de movimentação que podem ser observados durante a vistoria de campo. As consequências são estimadas a partir da qualidade das moradias e da distância das mesmas aos taludes. Por fim, os graus qualitativos de risco são obtidos, em categorias: de R1 – baixo ou sem risco até R4 – risco muito alto.

Uma das principais conveniências desse método é a facilidade de aplicação, entretanto, devido ao caráter qualitativo de todas as etapas e, principalmente, do resultado da análise, a compreensão e implicação para a sociedade do nível de risco resultante para a encosta pode ser mal entendida. Este mesmo problema pode ocorrer ao se adotar uma metodologia com a do Nepal (SUNUWAR, 2005), que é em vários aspectos similar a de Carvalho et al. (2007), embora aquela seja preliminar por definição. Ao se enquadrar o risco em quatro categorias, e numerá-las de 1 a 4, a maioria das pessoas pode interpretar o número relativo ao nome da categoria com o risco ao qual ela se refere, inferindo uma relação de proporção aos níveis de risco que não necessariamente é válida. Por exemplo, se uma encosta é enquadrada no nível 2 ou (II), seu risco de deslizamento não corresponde à metade do risco de outra encosta avaliada com nível 4 (IV). Especialmente em se tratando do Fator de Segurança (FS) da encosta, não é necessário que o FS da encosta 1 seja reduzido à metade, para que seu risco de ruptura seja igualado ao da encosta 2.

Isso pode ser comprovado analisando a escala de 20 pontos para o Fator de Probabilidade (PF) na adaptação canadense da metodologia internacional, descrita por Kelly et al. (2005). Nessa adaptação, o PF do talude (que significa a possibilidade de um deslizamento ocorrer

durante um determinado intervalo de tempo) varia em proporções maiores que o FS do talude analisado. Em outras palavras, uma variação pequena no FS, por exemplo de 1,5 para 1,3, equivale a um aumento no PF de 1 para 5. Como o risco é considerado equivalente ao resultado da multiplicação do PF com o CF (Fator de Consequência), se para um determinado talude, as consequências resultantes do deslizamento se mantiverem constantes, o risco se elevará em 5x somente pelo diminuição de 0,2 no FS do talude, de acordo com o método canadense.

De fato, o Fator de Segurança de um talude possui um enfoque importante na norma NBR 11.682 de estabilidade de encostas. Segundo a NBR 11.682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 17):

[...] o valor do fator de segurança (FS) tem relação direta com a resistência ao cisalhamento do material do talude [...]. Entretanto, no caso de encostas, a variabilidade dos materiais naturais pode reduzir significativamente a segurança, aumentando a probabilidade de ocorrência de uma ruptura da encosta.

Na metodologia adotada na norma, o FS mínimo de uma encosta ou talude deve ser adotado segundo o risco a que pessoas, propriedades e meio ambiente estejam sujeitos, considerando situações atuais e futuras. Dessa forma, o FS apresentados pela NBR 11.682 devem “[...] cobrir as incertezas naturais das diversas etapas de projeto e construção” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 17).

Os projetos são, então, enquadrados pelo engenheiro civil geotécnico responsável pela obra em um dos seguintes níveis de segurança desejados contra a perda de vidas humanas e contra danos materiais e ambientais, mostrados nas tabelas 12 e 13, respectivamente. O FS mínimo para o projeto, de acordo com os níveis de segurança esperados, é dado pela tabela 14 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 17-18).

Conforme a NBR 11.682, “Os fatores de segurança indicados [...] referem-se às análises de estabilidade interna e externa do maciço, sendo independentes de outros fatores de segurança recomendados por normas de dimensionamento dos elementos estruturais de obras de contenção [...]”(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 18).

Tabela 12 – Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas

Nível de segurança	Crítérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 17)

Tabela 13 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Crítérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 18)

Tabela 14 – Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
	Alto	1,5	1,5
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 18)

Em casos especiais, como explicitado na nota 1 da tabela 14 e em situações nas quais o risco potencial de perdas de vidas humanas e de danos for elevado, a NBR 11.682 recomenda que, a critério do engenheiro civil geotécnico responsável, a probabilidade de ruptura do talude pode ser quantificada e estimada por um profissional especialista (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 19). Nesses casos, a metodologia para análises probabilísticas de risco em taludes de terra proposta por Costa (2005) é uma opção que fornece os resultados necessários satisfatoriamente, uma vez que consiste em uma abordagem quantitativa de análise de risco.

A metodologia sugerida por Costa (2005) segue os mesmos princípios e conceitos apresentados por Fell et al. (2005) no seu *framework* para avaliação e gerenciamento de risco de deslizamentos. As principais diferenças entre essas duas metodologias se dão na determinação das consequências e nos critérios de tolerância ao risco. No que tange às consequências, Fell et al. (2005) propõem uma diferenciação entre os fatores exposição e vulnerabilidade do elemento em risco, já Costa (2005) indica, com base na literatura, uma metodologia que engloba esses fatores em um só termo. A diferenciação é possível quando se tem um conhecimento grande dos processos que envolvem os deslizamentos e os elementos em risco, como pôde ser visto na adaptação australiana para o projeto da *Lawrence Hargrave Drive*. Entretanto, na maioria das vezes, mesmo em países que possuem uma base de conhecimento consistente em análises de risco de deslizamento, valores numéricos para as vulnerabilidades são adotados, ao invés de calculados, devido ao alto grau de incerteza que existe nesse fator.

Os critérios de tolerância ao risco, que sugerem os valores aceitáveis e toleráveis pela sociedade e para um indivíduo em particular, são dependentes dos órgãos regulatórios em que se realiza o estudo. Por isso, as metodologias brasileiras não apresentam critérios tão definidos quanto às internacionais, já que não há critérios que regulamentam limites toleráveis e aceitáveis para riscos de deslizamentos no Brasil. Nesses casos, a população, de acordo com seu poder econômico e cultura, define os limites toleráveis e aceitáveis para si.

7.2 SUGESTÕES DE ADAPTAÇÕES DE PRÁTICAS INTERNACIONAIS

Como foi demonstrado na seção anterior, a norma técnica brasileira relacionada à estabilidade de encostas (NBR 11.682:2009), baseia-se no Fator de Segurança do talude para cobrir as

incertezas relacionadas a encostas e taludes e garantir o desempenho esperado dos projetos e um nível de segurança adequado para pessoas, propriedades e meio ambiente. Além disso, é sabido que o conceito do Fator de Segurança é amplamente conhecido por engenheiros civis geotécnicos, desde a sua formação até a prática de projetos de construção de taludes ou estabilização de encostas e/ou taludes existentes.

Considerando o contexto brasileiro de projetos geotécnicos, acredita-se que a utilização de descritores numéricos para probabilidade de ruptura de taludes relacionados aos Fatores de Segurança dos mesmos, como a escala apresentada na adaptação canadense (modelo do Alberta Transportation – tabela 5, páginas 100-101), é considerada uma boa opção para se abordar os problemas menos complexos de análise de risco de deslizamentos de uma forma menos subjetiva no Brasil. Para a estimativa das consequências, o mesmo raciocínio poderia ser aplicado. É importante que o risco seja determinado a partir de valores numéricos, para que somente depois de obtidos os resultados da análise, estes sejam categorizados por descritores subjetivos, como: urgente, prioritário, médio e baixo risco. Isso permite uma melhor interpretação e entendimento dos fatores que influenciam no resultado da análise, sem detrimento da possibilidade de utilizar o risco geotécnico como ferramenta de priorização de recursos e gastos em manutenções de encostas e taludes.

Para casos em que uma abordagem quantitativa do risco é necessária, como situações complexas que envolvem riscos elevados a pessoas e propriedades, a metodologia proposta por Costa (2005) de uma análise probabilística de risco de deslizamentos em taludes de terra é adequada e produz resultados satisfatórios. Ressalta-se que, ao se optar por essa metodologia, é necessário obter um número elevado de dados, que consumirão custo e tempo proporcionais à quantidade de informação a ser levantada.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Trabalho de Diplomação teve como objetivo pesquisar, analisar e comparar diferentes metodologias nacionais e internacionais para avaliação de risco geotécnico em taludes, com abordagens qualitativas e quantitativas, possibilitando a identificação de práticas internacionais que poderiam ser utilizadas em projetos brasileiros. A fim de se completar o objetivo proposto, vários assuntos pertinentes a este campo de estudo na área geotécnica da Engenharia Civil foram abordados.

Os movimentos de massa, que são os eventos considerados importantes no âmbito da geotecnia, foram apresentados e classificados, conforme a classificação de Varnes (1978). As principais definições e o *framework* amplamente utilizado mundialmente para se realizar uma avaliação de risco geotécnico foram descritos em um capítulo à parte, com fins de possibilitar o acesso rápido a esses conceitos e, também, uniformizar a terminologia utilizada durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Além disso, foi proporcionada uma descrição das metodologias qualitativas e quantitativas presentes no Brasil para a condução de análises de risco geotécnico. A abordagem qualitativa é a adotada pelo IPT, que propõe seu uso em todos os municípios para combater os problemas causados por movimentos de massa. Já a abordagem quantitativa se refere ao estudo de Costa (2005) na sua dissertação de mestrado, no qual métodos probabilísticos são incorporados a uma análise de estabilidade de taludes, com o objetivo de proporcionar uma metodologia que introduza os conceitos probabilísticos e estatísticos nesse tipo de análise, considerando algumas das incertezas envolvidas nos problemas geotécnicos.

A metodologia internacional foi apresentada através da descrição detalhada do artigo escrito por Fell et al. (2005), complementado por diretrizes da AGS sobre avaliações qualitativas de risco de deslizamentos a propriedades. Para ilustrar a abordagem quantitativa internacional para análises de risco, foi exposto um exemplo de uma situação hipotética de deslizamento em aterro rodoviário. Também foram descritas experiências com adaptações da metodologia internacional a casos reais de estabilidade de taludes no Canadá, no Nepal e na Austrália. Ao completar essa parte do trabalho, os objetivos secundários do trabalho foram alcançados.

Por fim, uma análise da pesquisa bibliográfica realizada, comparando-se as metodologias apresentadas entre si e com as diretrizes de boa prática recomendadas pela NBR 11.682 (2009) sobre Estabilidade de encostas, permitiu que sugestões fossem feitas sobre possíveis aplicações de práticas internacionais no contexto brasileiro de avaliação de risco geotécnico, em projetos corriqueiros e de baixa complexidade.

A validação da aplicabilidade dessas técnicas em projetos no Brasil ainda necessita de comprovação, através de estudos de caso, o que não foi abordado no presente trabalho. Sendo, portanto, possível assunto de futuros trabalhos e pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ABGE; ABMS. **Diretrizes para o Zoneamento da Suscetibilidade, Perigo e Risco de Deslizamentos para Planejamento do Uso do Solo**. Coordenadores: Eduardo Soares de Macedo, Luiz Antônio Bressani. 1 ed., São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABMS – Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY. **Landslide risk management concepts and guidelines**. Sydney: Sub-Committee on Landslide Risk Management, 2000. Australian Geomechanics 35, p. 49-92.
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY. **Practice note guidelines for landslide risk management**. Sydney: Landslide Practice Note Working Group, 2007. Australian Geomechanics 42, p. 63-114.
- BRESSANI, L. A., COSTA, E. A. Avaliação do Risco Geotécnico e Probabilidade de Ruptura. In: **Notas de aula de Estabilidade de Taludes**. Jun. 2007. Notas de aula.
- BRESSANI, L. A. **Notas de aula de Estabilidade de Taludes**. 29 fev. 2016, 09 jul. 2016. Notas de aula.
- CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Org.) **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007.
- COSTA, E. A. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- CRUDEN, D.M.; VARNES, D.J. Landslides Types and Processes. In: **LANDSLIDES: INVESTIGATION AND MITIGATION**, Washington D. C., USA. **Special Report 247...** Transportation Research Board, National Academy of Science, 1996, p. 36-75.
- FELL, R.; HO, K. K. S.; LACASSE, S.; LEROI, E. A framework for landslide risk assessment and management. In: HUNGR, O.; FELL, R.; COUTURE, R.; EBERHARDT, E. (Ed.) **Landslide Risk Management**. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 3-25.
- HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O Manual do Deslizamento**: um guia para a compreensão de deslizamentos. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey, 2008.
- HOLCOMBE, E. Landslide Hazards: reducing risk to roads and communities. In: **Hazards and Infrastructure 2**. Jan. 2015, May 2015. Lecture Notes.
- KELLY, A. J.; CLIFTON, A. W.; ANTUNES, P. J.; WIDGER, R. A. Application of a landslide risk management system to the Saskatchewan highway network. In: HUNGR, O.;

FELL, R.; COUTURE, R.; EBERHARDT, E. (Ed.) **Landslide Risk Management**. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 571-580.

KREIMER, A.; ARNOLD, M.; CARLIN, A. (Ed.) **Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk**. Washington, D.C.: The World Bank, 2003. 324p. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/pt/2003/08/2811960/building-safer-cities-future-disaster-risk>>. Acesso em: 25 mai. 2016.

SUNUWAR, L.; KARKEE, M. B.; SHRESTHA, D. A preliminary landslide risk assessment of road network in mountainous region of Nepal. In: HUNGR, O.; FELL, R.; COUTURE, R.; EBERHARDT, E. (Ed.) **Landslide Risk Management**. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 411-421.

THE GEOLOGICAL SOCIETY. Landslide & Slope Instability Geohazards: Landslide Classification. [S. l.]: Engineering Group Working Party on Geological Hazards, [s. d.]. Disponível em: <http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification.htm>. Acesso em: 30 mai. 2016.

THE UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. Geneva: UNISDR, 2015. Publication: UN. Disponível em: <<http://www.preventionweb.net/publications/view/43291>>. Acesso em: 25 mai. 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL; CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES/RS. Capítulo 2: Entendo os conceitos. In: **Capacitação em Gestão de Riscos**. Porto Alegre: UFRGS e CEPED/RS, 2014.

WILSON, R. A.; MOON, A. T.; HENDRICKX, M.; STEWART, I. E. Application of quantitative risk assessment to the Lawrence Hargrave Drive Project, New South Wales, Australia. In: HUNGR, O.; FELL, R.; COUTURE, R.; EBERHARDT, E. (Ed.) **Landslide Risk Management**. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 589-598.

**ANEXO A – Terminologia Qualitativa para uso em Análises de Risco à
Propriedade (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007)**

Quadro A.1 – Medidas qualitativas de possibilidade de deslizamentos

QUALITATIVE MEASURES OF LIKELIHOOD

Approximate Annual Probability		Implied Indicative Landslide Recurrence Interval		Description	Descriptor	Level
Indicative Value	Notional Boundary					
10 ⁻¹	5x10 ⁻²	10 years	20 years	The event is expected to occur over the design life.	ALMOST CERTAIN	A
10 ⁻²		100 years		The event will probably occur under adverse conditions over the design life.	LIKELY	B
10 ⁻³	5x10 ⁻³	1000 years	200 years	The event could occur under adverse conditions over the design life.	POSSIBLE	C
10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁴	10,000 years	2000 years	The event might occur under very adverse circumstances over the design life.	UNLIKELY	D
10 ⁻⁵	5x10 ⁻⁵			100,000 years	20,000 years	The event is conceivable but only under exceptional circumstances over the design life.
10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁶	1,000,000 years	200,000 years	The event is inconceivable or fanciful over the design life.	BARELY CREDIBLE	F

Note: (1) The table should be used from left to right; use Approximate Annual Probability or Description to assign Descriptor, not *vice versa*.

(fonte: AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007, p. 91)

Quadro A.2 – Medidas qualitativas de consequências à propriedade

QUALITATIVE MEASURES OF CONSEQUENCES TO PROPERTY

Approximate Cost of Damage		Description	Descriptor	Level
Indicative Value	Notional Boundary			
200%	100%	Structure(s) completely destroyed and/or large scale damage requiring major engineering works for stabilisation. Could cause at least one adjacent property major consequence damage.	CATASTROPHIC	1
60%		Extensive damage to most of structure, and/or extending beyond site boundaries requiring significant stabilisation works. Could cause at least one adjacent property medium consequence damage.	MAJOR	2
20%	40%	Moderate damage to some of structure, and/or significant part of site requiring large stabilisation works. Could cause at least one adjacent property minor consequence damage.	MEDIUM	3
5%	10%	Limited damage to part of structure, and/or part of site requiring some reinstatement stabilisation works.	MINOR	4
0.5%	1%	Little damage. (Note for high probability event (Almost Certain), this category may be subdivided at a notional boundary of 0.1%. See Risk Matrix.)	INSIGNIFICANT	5

Notes: (2) The Approximate Cost of Damage is expressed as a percentage of market value, being the cost of the improved value of the unaffected property which includes the land plus the unaffected structures.

(3) The Approximate Cost is to be an estimate of the direct cost of the damage, such as the cost of reinstatement of the damaged portion of the property (land plus structures), stabilisation works required to render the site to tolerable risk level for the landslide which has occurred and professional design fees, and consequential costs such as legal fees, temporary accommodation. It does not include additional stabilisation works to address other landslides which may affect the property.

(4) The table should be used from left to right; use Approximate Cost of Damage or Description to assign Descriptor, not vice versa

(fonte: AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007, p. 91)

Quadro A.3 – Matriz qualitativa para análise de risco à propriedade

QUALITATIVE RISK ANALYSIS MATRIX – LEVEL OF RISK TO PROPERTY

LIKELIHOOD	Indicative Value of Approximate Annual Probability	CONSEQUENCES TO PROPERTY (With Indicative Approximate Cost of Damage)				
		1: CATASTROPHIC 200%	2: MAJOR 60%	3: MEDIUM 20%	4: MINOR 5%	5: INSIGNIFICANT 0.5%
A – ALMOST CERTAIN	10 ⁻¹	VH	VH	VH	H	M or L (5)
B – LIKELY	10 ⁻²	VH	VH	H	M	L
C – POSSIBLE	10 ⁻³	VH	H	M	M	VL
D – UNLIKELY	10 ⁻⁴	H	M	L	L	VL
E – RARE	10 ⁻⁵	M	L	L	VL	VL
F – BARELY CREDIBLE	10 ⁻⁶	L	VL	VL	VL	VL

Notes: (5) For Cell A5, may be subdivided such that a consequence of less than 0.1% is Low Risk.

(6) When considering a risk assessment it must be clearly stated whether it is for existing conditions or with risk control measures which may not be implemented at the current time.

(fonte: AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007, p. 92)

Quadro A.4 – Implicações dos níveis de risco

RISK LEVEL IMPLICATIONS

Risk Level		Example Implications (7)
VH	VERY HIGH RISK	Unacceptable without treatment. Extensive detailed investigation and research, planning and implementation of treatment options essential to reduce risk to Low; may be too expensive and not practical. Work likely to cost more than value of the property.
H	HIGH RISK	Unacceptable without treatment. Detailed investigation, planning and implementation of treatment options required to reduce risk to Low. Work would cost a substantial sum in relation to the value of the property.
M	MODERATE RISK	May be tolerated in certain circumstances (subject to regulator's approval) but requires investigation, planning and implementation of treatment options to reduce the risk to Low. Treatment options to reduce to Low risk should be implemented as soon as practicable.
L	LOW RISK	Usually acceptable to regulators. Where treatment has been required to reduce the risk to this level, ongoing maintenance is required.
VL	VERY LOW RISK	Acceptable. Manage by normal slope maintenance procedures.

Note: (7) The implications for a particular situation are to be determined by all parties to the risk assessment and may depend on the nature of the property at risk; these are only given as a general guide.

(fonte: AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2007, p. 92)

ANEXO B – Formulário de Inspeção de Campo
(KELLY et al., 2005, p. 575)



RISK MANAGEMENT SYSTEM FOR LANDSLIDES IN SASKATCHEWAN SITE INSPECTION FORM



CONTROL SECTION AND LOCATION 37-02 Frenchman South Cut		PREVIOUS INSPECTION DATE	INSPECTION DATE AND TIME DATE: 20 Sept 2004 FROM:16:40 TO:17:30	
LEGAL DESCRIPTION	NAD 83 COORDINATES N5466761 E687744	Zone:12 H936	RISK ASSESSMENT PF:12 CF:10 TOTAL:120	WEATHER Clear, windy
SUMMARY OF SITE INSTRUMENTATION: S17: minor movement to the west direction at approximate elevations 886 m and 929 m. S1203: minor movement to the west direction at elevation 922.5 m. S18: Movement to the west direction at elevation 904 m, decreased rate of movement. S1102: Movement to southwest direction at elevation 899 m. LAST READING DATE: 15 Sept 2004				INSPECTED BY: Jorge Antunes Dennis Klimochko George Put Allen Kelly Hung Vu
PRIMARY SITE ISSUE:				
APPROXIMATE DIMENSIONS:				
DATE OF REMEDIAL ACTION:				

ITEM	CONDITION EXISTS		DESCRIPTION AND LOCATION	NOTICABLE CHANGE FROM LAST INSPECTION	
	YES	NO		YES	NO
Pavement Distress					
Slope Movement					
Erosion	Y		Photos 371, 372, 377.		
Seepage					
Culvert Distress					

OBSERVATIONS AND COMMENTS
18 in. CSP culvert across slope. Armoured south ditch was short on culvert place (Photo 371); erosion has started. Erosion has also started on west ditch, which was not armoured (Photo 372). Erosion channels (0.5 m wide, 0.3 – 0.5 m depth) were found on west ditch (Photo 377).
RECOMMENDATIONS
Provide erosion protection for the above-identified area.
Response level: priority