



Dissertação de Mestrado

Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamentos de Taludes em Solo Residual

Autor: Marcos Antonio da Silva

Orientadores: Luiz Biondi Netto
Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia
PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Abril de 2008

Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamentos de Taludes em Solo Residual

Marcos Antonio da Silva

Dissertação apresentada ao PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Ênfase: Geotecnia.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Prof. Luiz Biondi Neto, DSc

Departamento de Engenharia Elétrica – UERJ

Prof. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira, DSc

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Rogério Luiz Feijó, DSc

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Acácio Magno Ribeiro, DSc

Departamento de Engenharia Elétrica – UFJF

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Março de 2008.

SILVA, MARCOS ANTONIO DA

Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamento de Taludes em Solo Residual, [Rio de Janeiro] 2008.

xxii , 150 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Mestrado, PGECIV - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Área de Concentração: Geotecnia, 2008.)

v, 150 f. : il. ; 30 cm

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ

1. Introdução
2. Condicionantes Geológicos e Geotécnicos na Estabilidade de Taludes
3. Lógica Nebulosa: *Fuzzy*
4. Elaboração do Modelo *Fuzzy*
5. Análises Paramétricas
6. Estudo de um Caso Histórico
7. Conclusões

I. FEN/UERJ II. Título (série)

Dedico este trabalho a meus pais, Antonio e Lúcia, que iluminaram o caminho da minha vida, à minha esposa Ana Paula e minha filha Mylena, a quem eu espero poder fazer o mesmo.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado força para concluir mais essa etapa em minha vida.

À minha esposa, Ana Paula, pelo carinho, estímulo e compreensão nos vários dias em que não pude lhe dar devida atenção durante o desenvolvimento dessa dissertação.

Aos meus orientadores, Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira e Dr. Luiz Biondi Neto pelo brilhantismo de seus conselhos durante o desenvolvimento deste trabalho. A Ana Cristina, em especial, por sua amizade, incentivo e auxílio através de suas incisivas atuações ao longo de todo o curso de mestrado.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro e ao Departamento de Estrutura e Fundações por terem me aceitado no programa do PGECIV.

A todos os professores do PGECIV pela transmissão de suas experiências e conhecimento que para mim foram valiosíssimos.

A Fundação Geo-Rio e seus técnicos, por me receberem e fornecerem dados importantes para a modelagem efetuada nesse trabalho. Em especial ao Engenheiro Dr. Rogério Feijó e ao Geólogo Nelson Paes pelo companheirismo e pela experiência transmitida ao longo de toda a fase de coleta de dados realizada nesta renomada instituição.

Aos colegas de turma agradeço nas pessoas de Daniel, Eduardo, Lúdma, Jeffson e Juliano o convívio, a solidariedade e a amizade compartilhadas todo esse tempo.

Ao Sr. Rodolfo, técnico do Labbas/UERJ por me aturar nos dias que passei no laboratório e pelo incentivo ao longo do curso.

A todos aqueles que, embora não nomeados, me presentearam com seus inestimáveis apoios em distintos momentos, o meu reconhecido e carinhoso muito obrigado!

Resumo

Silva, Marcos Antonio da; Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla (Orientador) e Neto, Luis Biondi (Orientador). **Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamento de Taludes em Solo Residual**. Rio de Janeiro, 2008. 150p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

A estabilidade de taludes naturais é um tema de grande interesse ao engenheiro geotécnico, face às significativas perdas econômicas, e até mesmo humanas, resultantes da ruptura de taludes. Estima-se que a deflagração de escorregamentos já provocou milhares de mortes, e dezenas de bilhões de dólares em prejuízos anuais em todo o mundo.

Os fenômenos de instabilização de encostas são condicionados por muitos fatores, como o clima, a litologia e as estruturas das rochas, a morfologia, a ação antrópica e outros. A análise dos condicionantes geológicos e geotécnicos de escorregamentos proporciona a apreciação de cada um dos fatores envolvidos nos processos de instabilização de encostas, permitindo a obtenção de resultados de interesse, no que diz respeito ao modo de atuação destes fatores.

O presente trabalho tem como objetivo a utilização da Lógica Nebulosa (*Fuzzy*) para criação de um Modelo que, de forma qualitativa, forneça uma previsão do risco de escorregamento de taludes em solos residuais.

Para o cumprimento deste objetivo, foram estudados os fatores envolvidos nos processos de instabilização de encostas, e a forma como estes fatores se interrelacionam. Como “experiência” do especialista para a elaboração do modelo, foi analisado um extenso banco de dados de escorregamentos na cidade do Rio de Janeiro, disponibilizado pela Fundação Geo-Rio.

Apresenta-se, neste trabalho, um caso histórico bem documentado para a validação do Modelo Fuzzy e análises paramétricas, realizadas com o objetivo verificar a coerência do modelo e a influência de cada um dos fatores adotados na previsão do risco de escorregamento.

Dentre as principais conclusões, destaca-se a potencialidade da lógica nebulosa na previsão de risco de escorregamentos de taludes em solo residual, aparecendo como uma ferramenta capaz de auxiliar na detecção de áreas de risco.

Palavras-chave

Escorregamento de Talude; Condicionantes Geológicos-Geotécnicos; Estabilidade de Talude; Solos Residuais; Movimentos de Massa; Lógica Nebulosa; Inferência Fuzzy.

Abstract

Silva, Marcos Antonio da; Sieria, Ana Cristina Castro Fontenla (Advisor) and Neto, Luis Biondi (Advisor). **Application of Fuzzy Logic for Prediction of Risk of Landslides on the Slope in Residual Soil**. Rio de Janeiro, 2008. 150p. Masters Dissertation - Post-Graduate Program in Civil Engineering, University of the State of Rio de Janeiro/UERJ.

The stability of slopes is a topic of great interest to the geotechnical engineer, given the significant economic losses, and even human, resulting from the slopes collapse. It's estimated that the landslides outbreak has already caused thousands of deaths and tens of billions of dollars in annual losses worldwide.

The phenomena of instability of slopes are conditioned by many factors, such as climate, the lithology and structures of rock, the morphology, the anthropic and others.

The analysis of geological and geotechnical conditions of landslides provides an appraisal of each of the factors involved in the processes of instability of slopes, allowing the achievement of results of interest with regard to the mode of action of factors.

The current work aims at the use of Fuzzy Logic to create a model that, in qualitative form, provide an estimate of the risk of landslides on the slope of residual soil.

To fulfill this objective, we studied the factors involved in the processes of instability of slopes, and how these factors are interrelated. As "experience" of the expert to the development of the model was examined an extensive database of landslides in Rio de Janeiro, provided by the Geo-Rio Foundation.

It is presented in this work, one history case well documented for the validation of the Fuzzy Model and parametric analysis, conducted with the objective to verify the consistency of the model and influence of each of the factors used to predict the risk of landslides.

Among the main findings includes the capability of Fuzzy Logic in predicting risk of landslides on the slope of residual soil, appearing as a tool capable of assisting in the detection of areas of risk.

Key-words

Slope Landslides; Geological - Geotechnical Conditions of Stability; Slope Stability; Residual Soil; Movements of Mass; Fuzzy Logic; Fuzzy Inference.

Sumário

Lista de Tabelas	13
Lista de Símbolos	14
Lista de Abreviaturas	15
1. Introdução	16
1.1. Introdução	16
1.2. Importância e Aplicabilidade do Estudo	17
1.3. Objetivos e Metodologia	17
1.4. Escopo	18
2. Condicionantes Geológicos e Geotécnicos na Estabilidade de Taludes	20
2.1. Introdução	20
2.2. Os Solos das Encostas Naturais	21
2.3. Os Solos Residuais do Estado do Rio de Janeiro	23
2.4. Movimentos de Massa	25
2.5. Condicionantes de Movimentos de Massa	27
2.5.1. Clima / Precipitação	27
2.5.2. Vegetação	31
2.5.3. Litologia e Estruturas	32
2.5.4. Geomorfologia	34
2.5.5. Ação Antrópica	36
2.6. Considerações Finais	37
3. Lógica Nebulosa: <i>Fuzzy</i>	38
3.1. Introdução	38
3.2. Conceito	39
3.3. Formulação	39
3.4. Vantagens e Eventuais Desvantagens	45
3.5. Aplicações de Lógica Nebulosa na Engenharia Civil	45
3.6. Comentários Finais	49

4. Elaboração do Modelo <i>Fuzzy</i>	50
4.1. Introdução	50
4.2. A Fundação GEO-RIO	50
4.3. Laudos de Escorregamentos: Experiência da GEO-RIO	53
4.3.1. Laudo de Vistoria GEO-RIO N° 718/96	54
4.4. Critérios para Concepção da Lógica Nebulosa para Análises de Encostas em Solos Residuais	58
4.5. MATLAB®	59
4.6. Fatores Adotados na Concepção do Modelo <i>Fuzzy</i>	60
4.6.1. Geometria da Encosta: Altura e Inclinação	61
4.6.2. Parâmetro de Resistência: Ângulo de Atrito	64
4.6.3. Pluviosidade	66
4.6.4. Drenagem	68
4.6.5. Vegetação	70
4.6.6. Ocupação da Encosta	72
4.6.7. Espessura de Solo	73
4.6.8. Previsão do Risco de Escorregamento (PRE)	75
4.7. Regras do Modelo <i>Fuzzy</i>	76
5. Análises Paramétricas	79
5.1. Variável: Altura do Talude	80
5.2. Variável: Inclinação do Talude	82
5.3. Variável: Ângulo de Atrito do Solo	83
5.4. Variável: Pluviosidade	84
5.5. Variável: Sistema de Drenagem	86
5.6. Variável: Vegetação	87
5.7. Variável: Ocupação da Encosta	88
5.8. Variável: Espessura de Solo	89
5.9. Considerações Finais	90
6. Estudo de um Caso Histórico	92
6.1. Descrição do Caso Histórico	92
6.2. Investigações Geotécnicas de Campo e Instrumentação	93

6.2.1. Resultados das Investigações de Campo	94
6.2.2. Resultados da Instrumentação	96
6.2.3. Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	97
6.3. Análises de Estabilidade por Equilíbrio Limite	97
6.3.1. Análise do Talude Após o Escorregamento	97
6.3.2. Análise do Talude Após Projeto/Obras de Estabilização	99
6.4. Considerações Finais	102
7. Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras	103
7.1. Conclusões	103
7.2. Sugestões	104
Referências Bibliográficas	105
Anexo 1. Laudos de Vistoria da GEO-RIO	111
Anexo 2. Fatores de Segurança Obtidos na Modelagem no GEO-SLOPE	122
Anexo 3. Detalhamento do Arquivo do MATLAB Criado na Modelagem da Lógica Fuzzy	134
Anexo 4. Tabela Completa com as Regras Utilizadas na Modelagem da Lógica Fuzzy	141

Lista de Figuras

Figura 1.1. Escopo do Trabalho	18
Figura 2.1. Horizontes de Solo Residual (Fonte IPT)	22
Figura 2.2. Tipos de escorregamento (Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998)	26
Figura 2.3. Localização dos Pluviômetros na Cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio.....	29
Figura 2.4. Condições de Chuvas na Cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio	30
Figura 2.5. Probabilidade de Escorregamentos na Cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio.....	30
Figura 2.6. Exemplos de Descontinuidades no Maciço (Salamuni, 2006)	32
Figura 2.7. Diferentes formas das vertentes (Adaptada de Chorley et al. - 1984, p.168)	35
Figura 2.8. Mudança na geometria do talude	36
Figura 3.1. Caracterização da Lógica Contemporânea (Barreto, 2001).....	38
Figura 3.2. Exemplo em Lógica Booleana	40
Figura 3.3. Exemplo em Lógica Nebulosa	41
Figura 3.4. Sistema de Inferência Fuzzy (Tanscheit, 1995)	44
Figura 4.1. Formulário de Laudo de Vistoria da GEO-RIO	52
Figura 4.2. Campos e Padrões de Preenchimento do Formulário de Laudo de Vistoria	53
Figura 4.3. Mapa de Localização do Escorregamento. (Amaral, 1997).....	54
Figura 4.4. Vista Aérea Frontal do Escorregamento (Amaral, 1997).....	56
Figura 4.5. Perfil Geológico Esquemático da Encosta Pós-Ruptura (Amaral, 1997)	56
Figura 4.6. Percentual de Cada Tipo de Movimento (Fonte: GEO-RIO)	59
Figura 4.7. Tela inicial do Toolbox FIS.....	60
Figura 4.8. Variáveis do Modelo Fuzzy.....	61
Figura 4.9. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável “Altura”	63
Figura 4.10. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável “Inclinação”	64
Figura 4.11. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Ângulo de Atrito.....	66
Figura 4.12. Percentual de Cada Classificação da Pluviosidade (Fonte: GEO-RIO).....	67
Figura 4.13. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Pluviosidade	68
Figura 4.14. Eficiência da Drenagem nas Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO.....	69
Figura 4.15. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Drenagem.....	69
Figura 4.16. Tipos de Vegetação nas Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO.....	70
Figura 4.17. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Vegetação	71
Figura 4.18. Tipo de Ocupação nas Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO	72
Figura 4.19. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Ocupação da Encosta	73
Figura 4.20. Espessuras de Solo das Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO	74
Figura 4.21. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Espessura de Solo	74
Figura 4.22. Funções de Pertinência da Variável de Saída (PRE).....	76
Figura 5.1. Geometria Inicial Adotada nas Análises Paramétricas.....	79
Figura 5.2. Visualizador de Regras do MATLAB	80
Figura 5.3. Variação de PRE com a Altura do Talude	81

Figura 5.4. Variação de PRE com a Inclinação do Talude	83
Figura 5.5. Variação de PRE com o Ângulo de Atrito do Solo.....	84
Figura 5.6. Variação de PRE com a Pluviosidade	86
Figura 5.7. Variação de PRE com a Eficiência do Sistema de Drenagem	87
Figura 5.8. Variação de PRE com a Vegetação	88
Figura 5.9. Variação de PRE com o Tipo de Ocupação da Encosta.....	89
Figura 5.10. Variação de PRE com a Espessura da Camada de Solo.....	90
Figura 6.1. Localização do Acidente (Ramos, 1991)	93
Figura 6.2. Perfil Simplificado da Encosta (Adaptado de Ramos, 1991).....	95
Figura 6.3. Pluviometria – Licurgo (Ramos, 1991).....	96
Figura 6.4. Análise Fuzzy para a Situação Após o Escorregamento.....	99
Figura 6.5. Solução Projetada (Ramos, 1991).....	100
Figura 6.6. Variação do PRE com a Eficiência do Sistema de Drenagem	102

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Características das Principais Rochas Ocorrentes no Rio de Janeiro (Tozatto, 2000).....	23
Tabela 2.2. Parâmetros de Resistência de Solos Residuais do Rio de Janeiro.....	24
Tabela 2.3. Intensidade das Chuvas: Alerta Rio.....	30
Tabela 2.4. Principais tipos de descontinuidades (Freire, 1965).....	33
Tabela 3.1. Funções de Pertinência (Neto, 2005).....	43
Tabela 3.2. Aplicações Comerciais da Lógica Nebulosa (Camargos, 2002).....	46
Tabela 4.1. Dados fornecidos pelo Instituto de Meteorologia.....	55
Tabela 4.2. Vistorias Associadas aos Principais Eventos Pluviométricos Ocorridos nos Anos de 1998 a 2002 (Fonte: GEO-RIO).....	58
Tabela 4.3. Valores Lingüísticos Propostos para as Variáveis.....	61
Tabela 4.4. Influência da Geometria na Estabilidade de Taludes (Geo-Slope).....	62
Tabela 4.5. Valores dos Números <i>Fuzzy</i> das Variáveis Altura e Inclinação.....	64
Tabela 4.6. Influência do Ângulo de Atrito na Estabilidade de Taludes (Geo-Slope).....	65
Tabela 4.7. Valores dos Números Fuzzy da Variável Ângulo de Atrito.....	66
Tabela 4.8. Valores dos Números <i>Fuzzy</i> da Variável Pluviosidade.....	68
Tabela 4.9. Valores dos Números <i>Fuzzy</i> da Variável Drenagem.....	70
Tabela 4.10. Valores dos Números Fuzzy da Variável Vegetação.....	71
Tabela 4.11. Valores dos Números <i>Fuzzy</i> da Variável Ocupação da Encosta.....	73
Tabela 4.12. Valores dos Números Fuzzy da Variável Espessura de Solo.....	75
Tabela 4.13. Valores dos Números Fuzzy da Variável de Saída (PRE).....	76
Tabela 4.14. Exemplo das Regras Utilizadas na Lógica Fuzzy.....	78
Tabela 5.1. Valores Iniciais das Variáveis.....	79
Tabela 5.2. Valores Adotados para Variável Altura.....	81
Tabela 5.3. Valores Adotados para Variável Inclinação.....	82
Tabela 5.4. Valores Adotados para Variável Ângulo de Atrito.....	84
Tabela 5.5. Valores Adotados para Variável Pluviosidade.....	85
Tabela 5.6. Valores Adotados para Variável Drenagem.....	86
Tabela 5.7. Valores Adotados para Variável Vegetação.....	87
Tabela 5.8. Valores Adotados para Variável Ocupação da Encosta.....	89
Tabela 5.9. Valores Adotados para Variável Espessura de Solo.....	90
Tabela 6.1. Valores Iniciais das Variáveis.....	98
Tabela 6.2. Valores Adotados para Variável Drenagem.....	101

Lista de Símbolos

h	Altura do talude
l	Inclinação da face do talude
ϕ	Ângulo de atrito do solo
c'	Coesão efetiva do solo
CIS	Ensaio de cisalhamento direto
h_w	Nível d'água
F.S.	Fator de Segurança
γ	Peso específico do solo
$\mu(x)$	Função de pertinência
μ	Pertinência
P(1)	Pluviosidade registrada em milímetros no período de 1 hora
P(24)	Pluviosidade registrada em milímetros no período de 24 horas
SIF	Sistema de inferência fuzzy
SPT	Standard penetration test
T (CU)	Ensaio triaxial consolidado não drenado

Lista de Abreviaturas

N.A.	Nível d'água
PGECIV	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PRE	Previsão do Risco de Escorregamento
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
DEC	Departamento de Engenharia Civil
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. Introdução

1.1. Introdução

A estabilidade de taludes naturais é um tema de grande interesse ao engenheiro geotécnico, face às significativas perdas econômicas, e até mesmo humanas, resultantes da ruptura dos mesmos. Estima-se que a deflagração de escorregamentos já provocou milhares de mortes, e dezenas de bilhões de dólares em prejuízos anuais no mundo inteiro (Brabb, 1991).

No Brasil, Amaral et al (1993) reportam a quantia de cerca de 7,1 milhões de dólares em gastos associados à execução de obras de contenção nas encostas da cidade do Rio de Janeiro, no período de 1988 a 1991.

Encostas florestadas íngremes de regiões tropicais de clima úmido, sobre embasamento rochoso cristalino, como é o caso do litoral sul do Rio de Janeiro, apresentam, com freqüência, um delicado equilíbrio físico, dadas as suas características geométricas e evolutivas. Quando sob o efeito da ação antrópica (desmatamento, terraplenagem, sobrecargas, etc) é comum ocorrer a instabilização dessas encostas, com a ocorrência de descalçamento de blocos, escorregamentos rasos e profundos, em solo ou rocha, erosões diversas e outros fenômenos típicos dessa situação de desequilíbrio.

Os agentes no processo de desestabilização de encostas podem ser naturais ou antrópicos, com um destaque maior para o segundo. Os escorregamentos consistem em movimentos rápidos, de duração relativamente curta, de massas de solo ou rocha geralmente bem definidas quanto ao seu volume, e fazem parte de um conjunto maior de processos de instabilidade de encostas, que incluem as erosões, rastejos, quedas e tombamentos, rolamento de matacões e corridas de massa.

Segundo Massad (2003), as causas dos escorregamentos nas encostas são, antes de tudo “naturais”, pois há uma tendência da natureza à peneplanização: os solos das encostas tendem a descer para atingir um nível de base. Assim, pode-se dizer que os coeficientes de segurança das encostas naturais estão, em geral, próximos de 1,0, bastando uma chuva atípica, ou uma pequena intervenção do homem para deflagrar o fenômeno de escorregamento.

Em muitos municípios do país tem sido freqüente a ocorrência de movimentos de massa capazes de causar prejuízos de alto custo, mortes e pânico às populações. Tais problemas, comuns em ambientes montanhosos do meio tropical úmido, estão diretamente

associados ao processo geológico de evolução natural das encostas, que ocorre tanto em áreas de mata virgem quanto, e principalmente, em áreas urbanas degradadas. O município do Rio de Janeiro reúne características físicas e de ocupação que propiciam tais acidentes.

1.2. Importância e Aplicabilidade do Estudo

Os fenômenos de instabilização de encostas são condicionados por muitos fatores, como o clima, a litologia e as estruturas de arcabouço rochoso, a morfologia, a ação do homem e outros. A análise dos condicionantes geológicos e geotécnicos envolvidos em escorregamentos proporciona a apreciação de cada um dos fatores envolvidos nos processos de instabilização, permitindo uma melhor compreensão em relação ao modo de atuação destes fatores.

Segundo o Tribunal de Contas do Município do Rio de Janeiro, no ano de 1996 a verba que a Prefeitura do Rio dispunha para gastos com obras de contenção em encostas era de R\$ 43,547 milhões; em 2002, os gastos com estas obras somaram R\$13,23 milhões, e no ano de 2006, estes gastos foram de apenas R\$ 2,598 milhões.

Este cenário de gastos é preocupante, pois é um indicativo de que a cada ano que passa a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro vem investindo menos em obras de contenção de encostas, adiando, desta forma, as obras de caráter preventivo. Devido a esse adiamento, as encostas sem o tratamento prévio adequado sofrem processos erosivos diversos e as obras a serem realizadas passam a ter caráter de urgência ou de emergência, elevando os custos.

Apesar dos números indicarem uma diminuição dos investimentos em obras de contenção, os técnicos da Prefeitura são unânimes em dizer que essa situação é normal, haja vista que número de obras de contenções realizadas ao longo dos anos são suficientes para minimizar os riscos de grandes acidentes geotécnicos, com isso não são necessários investimentos de vulto nesse tipo de obra.

1.3. Objetivos e Metodologia

O presente trabalho tem como objetivo a utilização da Lógica Nebulosa (*Fuzzy*) para criação de um Modelo que, de forma qualitativa, forneça uma previsão do risco de escorregamento de taludes. A área em estudo compreende o município do Rio de Janeiro, tão susceptível à ocorrência de escorregamentos de massas de solo.

Os dados de escorregamentos foram fornecidos pela Fundação Geo-Rio. Estes dados e as ocorrências de escorregamentos e situações de alarme foram utilizados como a “experiência” do especialista na elaboração da Lógica *Fuzzy*. A partir de uma avaliação

essencialmente qualitativa, foram definidos e ponderados os principais fatores intervenientes na deflagração de escorregamentos de massa em ambiente tropical úmido.

Com base nos condicionantes geológicos e geotécnicos envolvidos na estabilidade de taludes, buscou-se a idealização de um modelo inteligente *Fuzzy* capaz de prever o risco de ruptura de taludes das encostas do Rio de Janeiro.

Um caso histórico, bem documentado, foi escolhido para a validação do modelo, que pretende, de forma qualitativa, permitir a previsão de áreas potencialmente instáveis em solo residual.

1.4. Escopo

A Figura 1.1 resume o escopo do presente trabalho, de forma a facilitar a compreensão de como o mesmo foi elaborado.

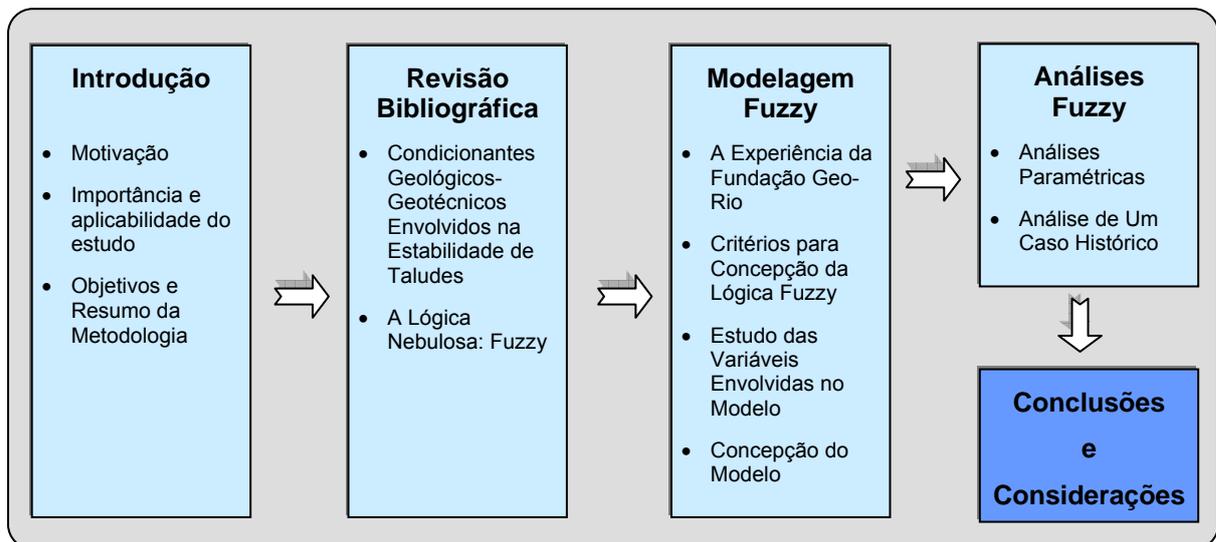


Figura 1.1. Escopo do Trabalho

O presente capítulo apresentou os fatos que motivaram a realização deste trabalho. Foi elaborado um breve resumo sobre os gastos com obras de contenção na cidade do Rio de Janeiro, os objetivos do presente trabalho e a metodologia aplicada para a concepção do modelo proposto.

No capítulo 2, são apresentados os principais tipos de movimentos de massa, os fatores que condicionam estes movimentos, e a forma como estes fatores se relacionam.

O capítulo 3 apresenta o conceito da lógica nebulosa (lógica *fuzzy*), destacando suas principais características, vantagens e eventuais desvantagens, além de aplicações desta ferramenta na Engenharia Civil.

O capítulo 4 reúne os fatores de influência e os dados utilizados para a concepção do modelo proposto neste trabalho. Inicialmente, descreve-se a experiência da Fundação Geo-Rio na avaliação de áreas potencialmente instáveis, seguido da análise dos critérios adotados para a concepção do modelo. Finalmente, propõe-se o modelo inteligente Fuzzy, a partir da ponderação e da análise dos fatores envolvidos.

O capítulo 5 apresenta uma análise paramétrica, que teve como objetivo checar a coerência do modelo a variações nos fatores adotados (altura e inclinação do talude, tipo de vegetação, ocupação e eficiência do sistema de drenagem da encosta, resistência e espessura de solo, e pluviosidade). A comparação entre os resultados obtidos e o comportamento esperado, baseado em experiência, permitiu a aferição do modelo.

O capítulo 6 apresenta um caso histórico de escorregamento ocorrido na Rua Licurgo, no bairro de Madureira (Ramos, 1991). Este caso, bem documentado, possui registros de pluviosidade, geometria, investigações de campo, e resultados de análises de estabilidade. Os condicionantes envolvidos no escorregamento em questão foram analisados e inseridos na Lógica Nebulosa, sendo feita a validação do Modelo proposto neste trabalho.

Finalmente, o capítulo 7 resume as principais conclusões do trabalho, sugerindo alguns temas para pesquisas futuras.

2. Condicionantes Geológicas e Geotécnicas na Estabilidade de Taludes

2.1. Introdução

Movimentos de massa são episódios de extrema importância, resultantes da atuação de processos geomorfológicos nas mais diversas escalas temporais. Dentro deste cenário, destacam-se os escorregamentos, ou deslizamentos nas encostas, os quais trazem enormes prejuízos econômicos, bloqueiam vias expressas e, com frequência, levam à perda de muitas vidas, em especial na cidade do Rio de Janeiro (Amaral, 1997).

Nos grandes centros urbanos, os escorregamentos assumem frequentemente proporções catastróficas, uma vez que os inúmeros cortes, aterros, depósitos de lixo, desmatamentos, modificações na drenagem, entre outras agressões, geram novas relações com os fatores condicionantes naturais associados à geomorfologia e à geologia (Anderson e Richards, 1987; Fernandes e Amaral, 1996; Augusto Filho e Virgili, 1998). Conseqüentemente, torna-se muito difícil a efetiva previsão destes fenômenos em uma determinada paisagem.

A questão da previsão da ocorrência dos escorregamentos vem assumindo importância crescente na literatura geotécnica, com diferentes concepções do problema e formas de investigação. Grande parte das metodologias propostas visa a definição de áreas mais susceptíveis à ocorrência do processo (Barros et al., 1992; Guzzetti et al., 1999). Outros estudos, por sua vez, buscam caracterizar o risco envolvido, englobando tanto a possibilidade de ocorrência do processo quanto os danos decorrentes (Cerri, 1993; Augusto Filho e Wolle, 1996; Cruden, 1997).

A utilização de modelos matemáticos de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos depende, diretamente, de uma melhor compreensão dos diferentes mecanismos e fatores condicionantes envolvidos (Montgomery et al., 2001).

O presente capítulo apresenta os principais aspectos envolvidos na instabilidade de taludes, enfocando os tipos de solos encontrados nas encostas naturais, os tipos de movimentos de massa e os condicionantes geológicos e geotécnicos envolvidos na estabilidade de taludes. Estes condicionantes serão fundamentais no estabelecimento de um modelo *Fuzzy* que permita avaliar o potencial de ruptura de taludes em solo residual.

2.2. Os Solos das Encostas Naturais

Os solos são formados a partir da decomposição das rochas, que se apresentam fraturadas ou fragmentadas, em função da própria origem, em virtude de movimentos tectônicos, ou pela ação do meio ambiente.

Em função do processo de formação, os solos podem ser classificados como residuais ou transportados. Na formação dos solos residuais, os sedimentos oriundos da decomposição da rocha permanecem no local de origem, enquanto na formação dos solos transportados, estes sedimentos são transportados pela ação da gravidade, do vento, das águas, etc.

Zimback (2003) cita os seguintes fatores de formação de solos:

- (a) Material de Origem;
- (b) Clima;
- (c) Organismos;
- (d) Relevo;
- (e) Tempo.

O material de origem pode ser constituído de rochas (magmáticas, metamórficas e sedimentares), sedimentos e material de decomposição de rochas transportado. Vários minerais constituintes do material de origem permanecem inalterados, enquanto outros sofrem decomposição, por ação química. O material de origem assume uma grande importância, visto que as propriedades e características do solo dependem, primariamente, da composição do material de origem (Tozatto, 2000).

O clima assume grande importância na formação dos solos, uma vez que o solo, produto do intemperismo do material de origem, apresenta propriedades e características diferenciadas em função do clima. Solos formados em clima tropical são solos bastante intemperizados. Quanto mais quente e úmido o clima, maior a lixiviação de minerais.

Os organismos influem na formação do solo, considerando-se que são fornecedores de matéria orgânica, bem como contribuem com determinados compostos orgânicos que podem promover diferenciação entre alguns solos.

O relevo influencia o solo resultante condicionando a penetração de água no solo, e interferindo na intensidade de intemperismo. Em áreas planas, ocorre penetração de grande quantidade de água, com pequena formação de enxurrada, ocasionando uma lixiviação interna significativa, com a formação de solos profundos, e altamente intemperizados. Em áreas com declividade acentuada, a penetração de água é menor, com formação de mais enxurrada, ocasionando uma lixiviação menos intensa, e formando solos mais rasos, e menos intemperizados.

O tempo é um fator formador de solo, uma vez que essa formação é resultado de reações químicas, bem como da ação das forças físicas de atração de partículas, que demandam tempo para se manifestarem.

Vargas (1977) propôs uma classificação para solos residuais, subdividindo-os em três horizontes, com graus de intemperização decrescentes. O horizonte mais superficial corresponde ao solo residual maduro, que se caracteriza pela perda total da estrutura original da rocha matriz. Abaixo deste horizonte, encontra-se o solo residual jovem, que apresenta aparência de rocha, porém desintegra-se com a pressão dos dedos ou com o uso de ferramentas pontiagudas. Finalmente, ocorre a rocha alterada, que se trata de um material de transição entre o solo e a rocha. Na formação da rocha alterada, a ação do intemperismo progride ao longo de zonas de menor resistência deixando intactos grandes blocos da rocha original, envolvidos por solo. A Figura 2.1 apresenta os diferentes horizontes de solo.

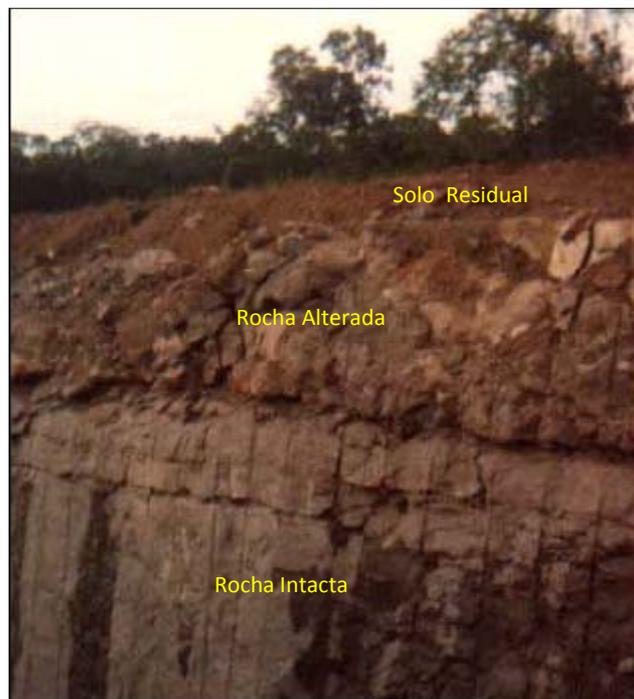


Figura 2.1. Horizontes de Solo Residual (Fonte IPT)

Os solos transportados são solos residuais que sofreram transporte pela ação da gravidade (coluvionares), da água (aluvionares), ou do vento (eólicos).

No Estado do Rio de Janeiro, é muito comum a ocorrência de solos coluvionares (depósitos de tálus) em regiões mais baixas dos taludes. Estes depósitos constituem materiais pouco consolidados, sujeitos a movimentações de rastejo.

O presente trabalho tem como foco principal escorregamentos em solo residual. Desta forma, serão apresentadas as principais características dos solos residuais do Rio de Janeiro.

2.3. Os Solos Residuais do Estado do Rio de Janeiro

Vários são os fatores que influenciam na velocidade do processo de intemperismo (desagregação e decomposição da rocha). Dentre eles, citam-se: a mineralogia das rochas, o clima, a topografia; os organismos, etc.

A natureza da rocha mãe predominante no Estado do Rio de Janeiro é a metamórfica, ocupando cerca de 50% do território. Observa-se também, a ocorrência de rochas sedimentares e magmáticas, porém em menores proporções (Fonseca et al, 1994).

Dentre os tipos de rochas metamórficas, as mais freqüentes no Estado são os gnaisses, rochas usualmente formadas por quartzo e feldspato, de granulometria média a grossa, e os migmatitos, que são rochas de composição e estruturas heterogêneas, de granulometria média a grossa, geralmente foliadas (Frasca e Sartori, 1998).

As rochas sedimentares ocorrem principalmente no delta de rios de grande porte. Os principais tipos de rochas sedimentares encontradas no Estado do Rio de Janeiro são as rochas calcárias e os arenitos (Fonseca et al, 1994).

As rochas magmáticas se restringem a ocorrências pontuais, sendo as mais freqüentes: granitos e sienitos (Fonseca et al, 1994). A Tabela 2.1 apresenta a composição mineralógica, bem como a cor predominante das principais rochas encontradas no Estado.

Tabela 2.1. Características das Principais Rochas Ocorrentes no Rio de Janeiro (Tozatto, 2000)

Rocha	Cor	Minerais Essenciais
Granito	Cinza a rosa avermelhada	Quartzo, plagioclásio, feldspato potássico
Gnaisse	Tons de cinza, rosados	Feldspato, quartzo, biotita
Migmatito	Tons de cinza, rosados	Feldspato, quartzo, biotita
Calcário	Branca, bege, cinza-claro	Calcita ou dolomita
Arenito	Branca, avermelhada	Quartzo (mais abundante)

Em relação ao clima, a Cidade do Rio de Janeiro vem experimentando mudanças climáticas ao longo dos últimos anos (Tozatto, 2000). Uma das principais alterações é o aumento da temperatura média global (Moreira Neto, 1998), acompanhado de elevação do nível do mar e aumento das precipitações totais anuais.

Fonseca et al (1994) dividem o território Fluminense em três blocos ou formas de relevo: o Bloco Cabo Frio, caracterizado por uma estrutura planar; o Bloco Serra dos Órgãos e o Segmento das Zonas de Cisalhamento, caracterizados por colinas, escarpas e reversos.

As características mineralógicas, climáticas e topográficas têm contribuído para que o processo de intemperismo ocorra com maior velocidade.

Diversos autores apresentam resultados de ensaios de laboratório em solos residuais ocorrentes no Rio de Janeiro. Sandroni (1985) recomenda que a seleção de

parâmetros de resistência para projeto em solos residuais considere aspectos como: existência ocasional de estrutura reliquiar com resistência inferior à massa global, anisotropia, curvatura da envoltória de resistência, condição parcialmente saturada do solo, influência do tipo de ensaio, e efeitos de amostragem. A Tabela 2.2 reúne resultados de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto publicados na literatura, executados em solos residuais oriundos de diferentes tipos de rocha. Observa-se uma grande variabilidade nos valores dos parâmetros de resistência, com ângulos de atrito entre 20° e 44°, e interceptos coesivos entre 9 e 80kPa.

Cabe ressaltar que os parâmetros de resistência listados na Tabela 2.2 serão utilizados na elaboração do modelo Fuzzy.

Tabela 2.2. Parâmetros de Resistência de Solos Residuais do Rio de Janeiro

Rocha Mãe	c (kPa)	ϕ (°)	Grau de Saturação	Ensaio	Referência
Quartzito Férrico	20	37	Parcial. Saturado	CIS	Sandroni, 1985
	50	44	Parcial. Saturado		
Quartzito Micáceo	40	22	Parcial. Saturado		
	45	27	Parcial. Saturado		
Gnaiss Migmatito	40	20	Parcial. Saturado	CIS	Campos, 1974
	52	23	Parcial. Saturado		
	30	21	Submerso		
	49	22	Submerso		
Gnaiss rico em feldspato	30	43	Natural	CIS	Seraphin, 1974
	20	44	Submerso		
Gnaiss rico em mica	40	29,5	Natural		
	18	29,5	Submerso		
Gnaiss rico em feldspato	80	34	Natural	CIS	Sandroni e Maccarini, 1981
	32	36	Submerso		
	70	30	Natural		
	34	32	Submerso		
	60	30	Natural	CIS	Sandroni, 1985
	33	30	Submerso		
Granito	9	30	Saturado	CIS	Lacerda e Silveira, 1992
Gnaiss	20	26	54%	T (CU)	Barata et al, 1978
	10	33	49,5%		
	20	29	49,7%		
	35	32	79,1%		
	20	29	54,5%		
	30	25	47,6%		
	35	26	67,3%		
	30	27	45,6%		
	25	23	47,8%		
	40	25	69%		

Legenda: c = coesão; ϕ = ângulo de atrito; CIS: cisalhamento direto; T (CU): triaxial consolidado não drenado

2.4. Movimentos de Massa

A formação e a dinâmica do relevo relacionam-se tanto à interação de variáveis endógenas, como o tipo e estrutura das rochas, quanto exógenas, como as variáveis climáticas, atuação de fauna e flora, etc. Como parte dessa dinâmica ocorrem os processos de vertente, entre os quais, os movimentos de massa, que envolvem o desprendimento e transporte de solo e/ou material rochoso vertente abaixo. A mobilização de material deve-se à sua condição de instabilidade, devido à atuação da gravidade, podendo ser acelerada pela ação de outros agentes, como a água. O deslocamento de material ocorre em diferentes escalas e velocidades, variando de rastejos a movimentos muito rápidos (Fernandes e Amaral, 1996).

Existem na literatura diversas propostas de classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1958; Varnes, 1978; Hansen, 1984b; Hutchinson, 1988; Sassa, 1989). No entanto, a classificação proposta por Varnes (1978) ainda é a mais utilizada.

No Brasil, porém, destaca-se a classificação proposta por Guidicini e Nieble (1984), a qual divide os movimentos de massa em escoamentos (englobando rastejos e corridas), escorregamentos (translacionais e rotacionais), e subsidências. Sabe-se, no entanto, que a aplicação direta desses sistemas de classificação aos movimentos observados na natureza não é uma tarefa simples. Além das dificuldades derivadas das atividades antrópicas e das rápidas transformações que ocorrem nas cicatrizes dos deslizamentos, há problemas associados à própria complexidade dos fenômenos. Muitos movimentos são deflagrados como escorregamentos translacionais e se transformam gradativamente em corridas de massa devido ao excesso de água (Kochel, 1987). Independente do tipo de movimento de massa, o quanto mais rápido o engenheiro geotécnico puder chegar ao local do acidente, melhor será sua avaliação sobre como se deu a deflagração movimento.

Os escoamentos são deformações ou movimentos contínuos, com ou sem superfície definida de movimentação. Os escoamentos podem ser divididos em dois tipos, as corridas e os rastejos. As corridas são movimentos fluido-viscosos ocasionados pela perda de atrito interno, devido à presença de excesso de água na massa de solo. São movimentos rápidos, com velocidade superior a 10km/h.

Os rastejos são movimentos descendentes, lentos e contínuos da massa de solo de um talude, estes correspondem a uma deformação de caráter plástico e não apresentam o desenvolvimento de superfície de ruptura definida.

Os escorregamentos são movimentos rápidos, de duração relativamente curta, de massas de solo ou rocha geralmente bem definidas quanto ao seu volume. Os escorregamentos podem ser dos seguintes tipos: rotacional, que possuem superfície de

ruptura curva; ou translacional, que possuem superfície de ruptura plana, como indica a Figura 2.2.

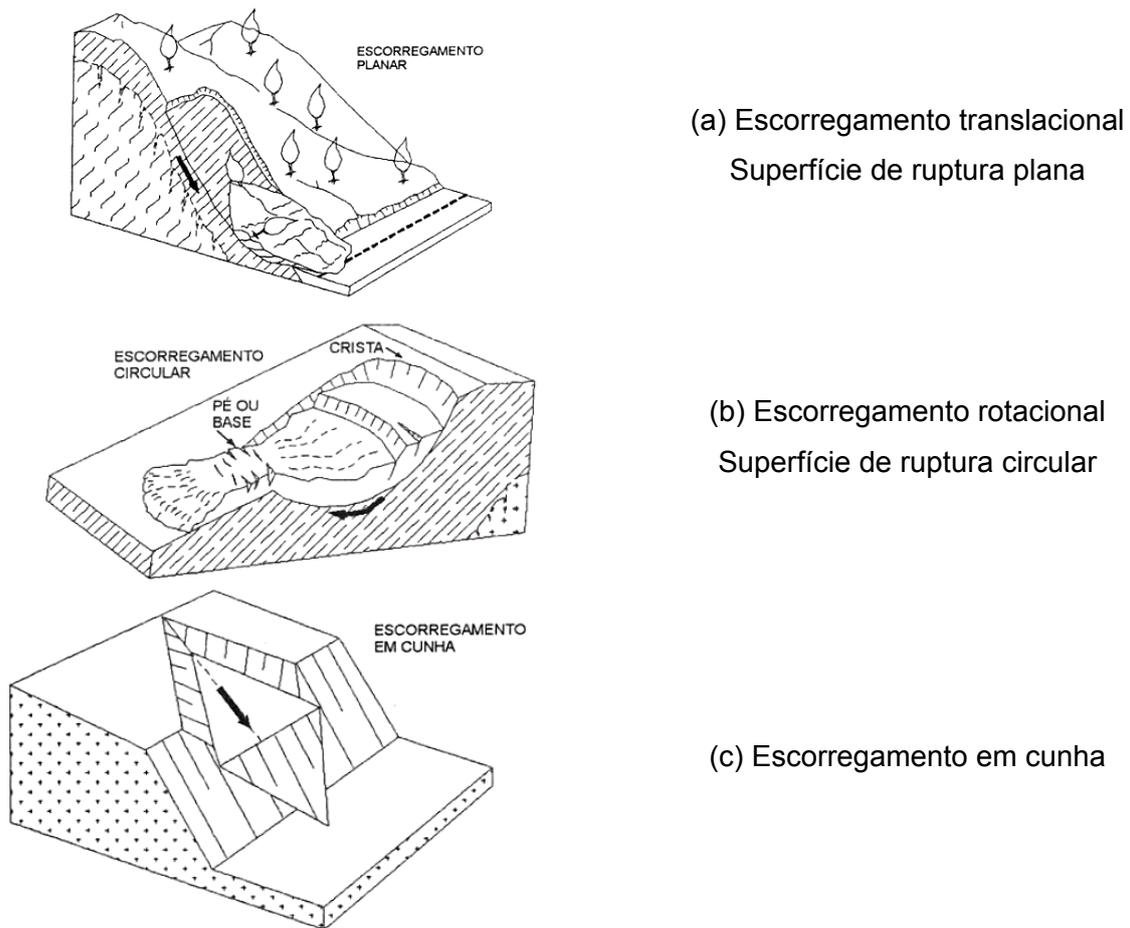


Figura 2.2. Tipos de escorregamento (Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998)

As subsidências ocorrem devido ao recalque súbito (colapso) da superfície do solo devido a uma variação no estado de tensão na superfície. A subsidência por definição é o resultado do deslocamento da superfície gerado por adensamento ou afundamento de camadas, como resultado da remoção de uma fase sólida, líquida ou gasosa. Em geral envolve grandes áreas e as causas mais comuns são: ação erosiva das águas subterrâneas, atividades de mineração, efeito de vibração em sedimentos não consolidados, exploração de petróleo e bombeamento de águas subterrâneas.

Os desabamentos são subsidências bruscas, envolvendo colapso na superfície. As quedas de blocos e detritos estão incluídas nesta classificação.

Amaral (1997) salienta que, na cidade do Rio de Janeiro, os escorregamentos rasos de solo, geralmente sob a forma de movimentos translacionais, são os mais importantes, respondendo por cerca de 38% de todos os processos ocorridos entre 1962 e 1992. Diversos estudos indicam que tal comportamento não se limita a cidade do Rio de Janeiro, sendo característico de todo o escarpamento da Serra do Mar (Wolle e Carvalho, 1989; Lacerda, 1997). Dessa forma, devido à sua importância e representatividade espacial,

tornam-se urgentes procedimentos metodológicos voltados para a previsão da ocorrência desses movimentos translacionais, embora tenham sido realizados pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro monitoramentos e obras de contenção.

2.5. Condicionantes de Movimentos de Massa

Os fenômenos de acidentes geotécnicos envolvem uma variedade de processos e fatores que dispõem possibilidades ilimitadas de classificação. O termo escorregamento é utilizado no sentido de abranger todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independentemente da diversidade de processos, causas, velocidades, formas e demais características (Guidicini e Nieble, 1983).

Os condicionantes geoambientais à ocorrência de escorregamentos são aqueles que compõem o sistema físico, o meio ambiente, e que influenciam no desenvolvimento dos movimentos de massa. Pode-se incluir entre esses condicionantes os que formam os agentes preparatórios ou predisponentes dos eventos, compreendendo os aspectos lito-estruturais, geomorfológicos e climáticos. Distinguem-se ainda, as consequências da interação desses condicionantes, constituindo elementos como os perfis de intemperismo, vegetação e hidrogeologia das encostas, diretamente ligados à deflagração de escorregamentos, sob determinadas condições. A ação antrópica, em geral, constitui um importante condicionante de instabilização de encostas.

A seguir, serão discutidos os principais fatores condicionantes de movimentos de massa em encostas naturais. Estes fatores serão considerados durante a elaboração do modelo inteligente *Fuzzy*, com os respectivos pesos, caracterizando o grau de influência de cada um. Ressalta-se que os condicionantes geológicos e geotécnicos de escorregamentos serão apresentados e discutidos de forma individualizada. No entanto, estes condicionantes agem conjuntamente.

2.5.1. Clima / Precipitação

O papel do clima relaciona-se, principalmente, à precipitação e suas conseqüências sobre os processos morfogenéticos. Nos domínios morfoclimáticos tropicais, a elevada umidade provoca o encharcamento do solo, favorecendo os movimentos de massa. A intensidade da chuva relaciona-se à energia cinética, que está relacionada à erosividade (habilidade potencial em promover a erosão de um determinado tipo de solo ou terreno geológico).

As medidas de pluviosidade (totais diários, médias mensais, etc.) fornecem uma aproximação da intensidade da chuva (Guerra, 1994). Com uma precipitação pluvial

prolongada, a infiltração é contínua. Como consequência, ocorre a saturação do solo, reduzindo a coesão, e a resistência desse material à erosão. As variações micro climáticas, como diferenças de precipitação ao longo de uma vertente, podem determinar pontos preferenciais de ocorrência de deslizamentos.

Augusto Filho e Virgili (1998) comentam que as chuvas atuam como o principal agente não antrópico na deflagração de escorregamentos no Brasil. Os grandes acidentes relacionados a processos de escorregamentos sempre ocorrem durante o período chuvoso.

A água é, portanto, o mais importante agente natural na predisposição à ocorrência de escorregamentos, podendo atuar das seguintes formas:

(a) Elevação do nível piezométrico no maciço, aumentando a poropressão e reduzindo a resistência;

(b) Aumento da pressão hidrostática em descontinuidades. A ocorrência e o comportamento da água subterrânea são condicionados pelas rochas e estruturas geológicas presentes no local em questão. No caso de maciços de rochas fraturadas com baixa porosidade, a subida do N.A. acontece de forma rápida.

(c) Erosão subterrânea retrogressiva (“*piping*”). Este processo, resultante da força de percolação, inicia-se a partir de uma surgência de água e através da erosão e carreamento das partículas forma cavidades que podem apresentar muitos metros de comprimento.

(d) Diminuição do efeito da coesão aparente;

(e) Enfraquecimento dos materiais, pela ação do intemperismo químico;

(f) Erosão superficial, agindo diretamente sobre o talude. A água superficial contribui para a erosão laminar, que será tanto maior quanto menos protegido estiver o solo, podendo inclusive criar cicatrizes erosivas (ravinas ou voçorocas) que mais tarde resultarão, eventualmente, em escorregamentos.

A detecção, instrumentação e controle da água subterrânea é, portanto, de grande valia nos estudos e nas aplicações práticas relativas à ocorrência de movimento de massa. Carregã e Balzan (1997) ressaltam que as rupturas de taludes são acidentes comumente ocasionados por condições excepcionais de água subterrânea.

Diante do exposto, fica clara a importância do acompanhamento das precipitações na identificação de áreas de risco. Gusmão Filho (1997) resalta que a ocorrência de escorregamentos nas mais variadas cidades brasileiras está sempre associada a episódios de chuva. O autor destaca o conhecimento de diversas correlações entre os episódios de precipitação e os escorregamentos em diferentes regiões do Brasil. Cada local apresenta características próprias de chuva, relevo, materiais naturais, vegetação e uso do solo,

impondo um modelo regional de interação distinto. Segundo Gusmão Filho (1997), uma vez conhecida a correlação local, é possível estabelecer níveis de alerta e emergência para a mobilização da defesa civil.

Com este objetivo, a Fundação Geo-Rio implementou o Sistema Alerta Rio, na cidade do Rio de Janeiro. Este sistema foi criado em setembro de 1996, com 32 estações distribuídas pela cidade do Rio de Janeiro, como mostra a Figura 2.3 (http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/alerta/estacao_local.htm#), com o objetivo de emitir boletins de aviso à população sobre a chegada de chuvas intensas, capazes de gerar inundações de vias públicas ou deslizamentos em encostas.



Figura 2.3. Localização dos Pluviômetros na Cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio

Cada estação pluviométrica tem seus dados repassados após o intervalo de 15 min, via rádio, à Estação Central, com resolução de 0,2 mm. A intensidade das chuvas é classificada de acordo com a Tabela 2.3. O sistema permite a elaboração de mapas com as condições de chuva na cidade (Figura 2.4) e a respectiva probabilidade de escorregamentos (Figura 2.5).

Elbachá et al (1992) salientam que a correlação entre escorregamentos e precipitação, utilizando-se totais diários, não é satisfatória, devendo-se considerar a variação da intensidade de precipitação ao longo do dia.

Tabela 2.3. Intensidade das Chuvas: Alerta Rio

Classificação	Intensidade da chuva (mm/h)
Leve	1,1 a 5,0
Moderada	5,1 a 25,0
Forte	25,1 a 50,0
Muito Forte	> 50,0

Condição das chuvas na Cidade
(atualizado em 04/02/2008 às 09h00min)

Nível	Descrição
Vigilância	Ausência de chuva ou chuva leve nas próximas 6 horas
Atenção	Possibilidade de chuva moderada, ocasionalmente forte, nas próximas horas
Alerta	Chuva forte nas próximas horas podendo causar alagamentos e deslizamentos isolados
Alerta Máximo	Chuva muito forte nas próximas horas podendo causar alagamentos e deslizamentos generalizados

Figura 2.4. Condições de Chuvas na Cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio

Probabilidade de Escorregamentos na Cidade
(atualizado em 04/02/2008 às 09h00min)

Nível	Descrição
Baixa	Possibilidade de ocorrências de escorregamentos circunstanciais
Média	Possibilidade de ocorrências de escorregamentos ocasionais
Alta	Ocorrências de escorregamentos esparsos
Muito Alta	Ocorrências de escorregamentos generalizados

Figura 2.5. Probabilidade de Escorregamentos na Cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio

Kanji et al (2000) apresentam gráficos relacionando chuvas acumuladas em 24h com chuvas em 1h. Os autores deduziram a seguinte relação entre a provável precipitação em 1h (P_{1h}) e a precipitação em 24h (P_{24h}), em mm:

$$P_{1h} = 10 + 0,237 \cdot P_{24h} \quad \text{Eq. 2-1}$$

que pode ser útil quando se dispõe apenas de medidas diárias.

2.5.2. Vegetação

A vegetação, de maneira geral, protege o solo de fatores que condicionam os deslizamentos, como o aumento de escoamento superficial. A cobertura vegetal intercepta as águas pluviais reduzindo a energia cinética e favorecendo a infiltração. Além disso, certos tipos de sistemas radiculares contêm a erosividade por manterem a agregação do solo. No entanto, em regiões tropicais úmidas, nem sempre isso ocorre.

Nos períodos de elevada pluviosidade, a água das chuvas penetra entre as discontinuidades do estrato superior da formação vegetal, o dossel, atingindo o solo, gerando e/ou reativando ravinas e canais de primeira ordem, que ocorrem especialmente se não houver uma cobertura composta de flora de porte arbustivo (Guerra, 1994).

A presença de vegetação em taludes e encostas naturais é de grande importância no processo de estabilização. As raízes das plantas tendem a melhorar a qualidade do solo, aumentando sua resistência através do reforço mecânico das raízes e reduzindo o teor de umidade do solo, função desenvolvida pelas plantas através dos processos de transpiração e absorção.

Kanji (1997), no entanto, salienta que esta contribuição fica restrita à espessura alcançada pelo comprimento das raízes. Suarez (1997) ressalta que um efeito positivo importante é a ancoragem das massas de solo pelas raízes.

A avaliação da importância da cobertura vegetal na estabilidade de encostas é bastante difícil. No entanto, fica clara a ação da vegetação nos seguintes aspectos:

1. Aumento da resistência pela trama de raízes;
2. Prevenção de erosão superficial. Tal efeito ocorre pela diminuição da velocidade de escoamento superficial da água das chuvas e pela redução da desagregação devida ao impacto de gotas de chuva no solo;
3. Diminuição do nível d'água pelo efeito da transpiração e interceptação. O rebaixamento do lençol freático diminui as poropressões no interior do maciço, fato benéfico à estabilidade;

De acordo com Suarez (1997), a influência da vegetação na estabilidade de taludes tem sido muito debatida nos últimos anos, deixando dúvidas na quantificação dos efeitos de estabilização da vegetação. No entanto, a experiência tem demonstrado o efeito positivo da vegetação. O autor comenta que o desmatamento tem sido identificado como um importante agente na instabilização de encostas urbanas.

2.5.3. Litologia e Estruturas

A existência das diferentes formas de relevo, assim como dos diferentes tipos de estratos terrosos, dependem fundamentalmente da litologia dos materiais constituintes ou que lhes deram origem.

Wolle (1988) divide a atuação do condicionante litológico em dois níveis, um referente a uma escala regional, associado ao esculpimento do relevo (condicionante geomorfológico) e outro referente a uma escala local, na qual a presença de contatos entre litologias pode funcionar como uma descontinuidade capaz de provocar escorregamentos. Pode-se acrescentar ainda a possível presença de minerais expansivos na constituição da rocha, que pode levar a instabilização quando submetida a processo de intemperismo. Associado ao intemperismo é que pode-se ressaltar a importância da litologia como condicionante a escorregamentos. O intemperismo e a erosão diferencial podem criar inúmeras situações de ocorrência de movimentos de massa. A Figura 2.6 apresenta exemplos de descontinuidades no maciço.



Figura 2.6. Exemplos de Descontinuidades no Maciço (Salamuni, 2006)

Os condicionantes de caráter litológico são fundamentais nos processos de formação dos solos residuais e, portanto, nos fenômenos de instabilidade que ocorrem nos taludes constituídos por este tipo de solo.

O tipo de rocha define as características de permeabilidade e, portanto, o tipo de drenagem e textura, além da resistência ao intemperismo. A presença de fraturas tectônicas, ou resultantes de alívio de pressão, pode gerar pontos de descontinuidade e

menor resistência, constituindo-se em caminhos preferenciais à erosão e movimentos de massa (Wolle, 1988).

O granito, por exemplo, apresenta forte resistência ao intemperismo e porosidade e permeabilidade baixas. No entanto, em regiões tropicais úmidas, este tipo de rocha é fortemente intemperizado (Chorley et al., 1984).

As estruturas presentes nas rochas e remanescentes nos solos residuais constituem um fator extremamente importante no desencadeamento de escorregamentos. No caso de rochas, como granitos, gnaisses e migmatitos, as características geomecânicas do maciço são ditadas muito mais pelas estruturas que pela litologia. A estrutura assume, por vezes, a importância de um condicionante principal em certos escorregamentos, quando há presença de zonas de falha na rocha e ocorrência de juntas de alívio de tensões.

Desse modo, em função do ângulo da descontinuidade em relação à face do talude, e de características como ângulo de atrito, preenchimentos presentes no plano e presença de água percolando na fratura, pode haver uma maior ou menor susceptibilidade a movimentos de massa. Este fato pode ser ainda agravado com a ação do homem, por meio de cortes, etc. A Tabela 2.4 apresenta os principais tipos de descontinuidades (Freire, 1965).

Tabela 2.4. Principais tipos de descontinuidades (Freire, 1965)

1. FRATURAS OU JUNTAS
1.1 De contração por resfriamento (solidificação)
1.2 De contração por dessecação
1.3 De origem externa (alternância térmica por insolação e resfriamento, alívio de tensões, alteração química)
1.4 De origem interna ou tectônica, diaclases (por compressão, trações, flexões), falhas.
2. PLANOS DE XISTOSIDADE
3. PLANOS DE SEDIMENTAÇÃO
4. CONTATOS
5. SUPERFÍCIES LIMITES OU ZONAS DE TRANSIÇÃO
5.1 Entre rocha sã e manto intemperizado
5.2 Entre formações de solo diferente

Dentre as descontinuidades geológicas, as de maior extensão e por este motivo de influência sobre maiores regiões, são as falhas geológicas, que podem condicionar a evolução do relevo de extensas regiões, definir a localização de morros, cadeias de montanhas e vales. Grandes zonas de falha podem dar origem a formas de relevo abruptos que se tornam palco de fenômenos de instabilização de encostas.

A xistosidade das rochas, decorrente da orientação paralela dos minerais, permite a formação de descontinuidades litológicas que mergulham para fora do talude. Esses planos de fraqueza tornam-se mais instáveis com a presença do intemperismo diferencial. Rochas gnáissicas apresentam xistosidade marcante.

Ponce (1984) reporta que no domínio das rochas homogêneas, os condicionantes estruturais, representados pelas juntas de alívio, são os de maior importância, em função de sua continuidade nos maciços, dos volumes de rocha envolvidos e da tendência à formação de horizontes de iso-intemperismo. Quanto às rochas heterogêneas, a xistosidade é o principal condicionante estrutural da estabilidade.

As juntas de alívio dão condições para o desenvolvimento de um perfil de alteração abrupta entre o solo residual e a rocha sã. Os horizontes de iso-intemperismo, limitados por juntas de alívio, especialmente no contato entre a rocha alterada e a rocha parcialmente sã causam problemas de instabilidade.

2.5.4. Geomorfologia

Entende-se por geomorfologia o estudo das formas de relevo associado à gênese e à evolução destas formas. A geomorfologia estuda os processos responsáveis pelas ações de criar, destruir, deslocar, ampliar, reduzir, preservar e alterar as formas de relevo.

A declividade natural ou resultante da intervenção humana nas encostas é também fundamental no desencadeamento de movimentos de massa, o que é largamente comprovado pelas leis da mecânica dos solos e das rochas.

Os condicionantes geomorfológicos incluem as formas de vertentes e as variáveis morfométricas, como a dissecação, declividade, aspecto, amplitude de relevo, etc. Conforme observado por Netto (1994), a drenagem exerce papel fundamental sobre o modelamento do relevo (formas de vertentes e vales), sendo uma variável especialmente importante em regiões tropicais úmidas.

A declividade fornece a medida de inclinação (em graus ou percentual) do relevo em relação ao plano do horizonte. A velocidade de deslocamento de material e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional à declividade. Esta variável tem grande importância nos processos geomorfológicos, condicionando cursos de água e deslocamento de solos coluvionares (Thomas, 1979).

As declividades acima de 30° apresentam risco de deslizamentos mais frequente. Acima de 60°, a camada de solo residual é menos espessa o que, teoricamente, diminuiria o risco de escorregamentos. No entanto, fenômenos desse tipo já foram verificados em áreas

cujo manto de solo residual era pouco espesso, principalmente em épocas de pluviosidade elevada, tornando exposta a rocha de base (Fernandes e Amaral, 1996).

A amplitude de relevo refere-se à variação de altura, em metros, dada pela diferença entre as cotas máxima e mínima. Quando esta variação tem como cota mínima o nível de base geral, tem-se a altitude. A amplitude está relacionada ao encaixamento dos vales. Quanto mais elevado o valor da amplitude, maior a energia cinética aplicada às vertentes e, conseqüentemente, maior é a capacidade de deslocamento de material, principalmente se associada a elevadas declividades (Thomas, 1979).

Com relação à forma das vertentes, existem três tipos básicos: as formas côncavas, convexas e retilíneas. Estas formas encontram-se combinadas na natureza, gerando os demais tipos (côncavo-convexas, retilíneo-convexas, etc.).

Segundo Moreira e Neto (1998), uma vertente com perfil côncavo apresenta curvatura negativa, com ângulos decrescentes para baixo. Vertentes convexas caracterizam-se por uma curvatura positiva, com ângulos que aumentam continuamente para baixo. Já as vertentes retilíneas apresentam ângulos de declividade aproximadamente constantes.

Segundo Pinto (2002), taludes convexas são menos estáveis que os taludes côncavos, por apresentarem maior peso de material disponível para escorregamento, e conseqüente aumento das tensões cisalhantes.

A Figura 2.7 ilustra os diferentes tipos de forma das vertentes, que são caracterizadas da seguinte forma: LL (retilínea), LX (convexo-retilínea), LV (côncavo-retilíneo), XL (retilíneo-convexo), XX (convexo), XV (côncavo-convexo), VL (retilíneo-côncavo), VX (convexo-côncavo), VV (côncavo).

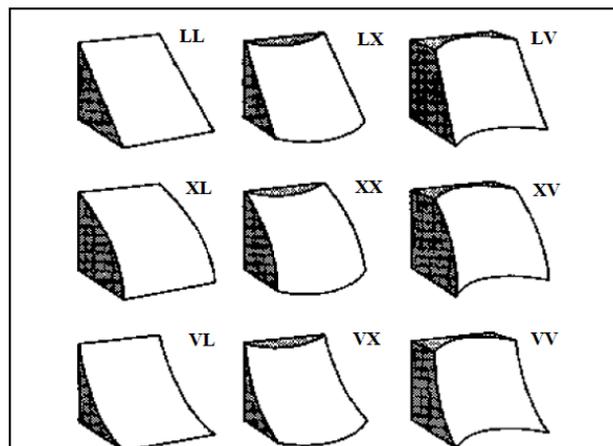


Figura 2.7. Diferentes formas das vertentes (Adaptada de Chorley et al. - 1984, p.168)

O tipo de material depositado sobre as vertentes também é importante. A presença tanto de mantos espessos de solo residual quanto de tálus contribuem para a ocorrência de escorregamentos (Fernandes e Amaral, 1996). Os depósitos de tálus são resultantes de

movimentos de massa pretéritos e servem de fonte para novos movimentos de massa, principalmente em períodos de elevada pluviosidade (Guidicini e Nieble, 1993).

2.5.5. Ação Antrópica

O homem constitui o mais importante agente modificador da dinâmica das encostas. O avanço de diversas formas de uso e ocupação, para áreas naturalmente susceptíveis aos movimentos de massa, acelera e amplia os processos de instabilização.

As principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos são:

1. Modificação da geometria do talude, através de cortes ou aterros (Figura 2.8);
2. Alteração do regime hidrológico do talude;
3. Eliminação ou modificação da cobertura vegetal da encosta;

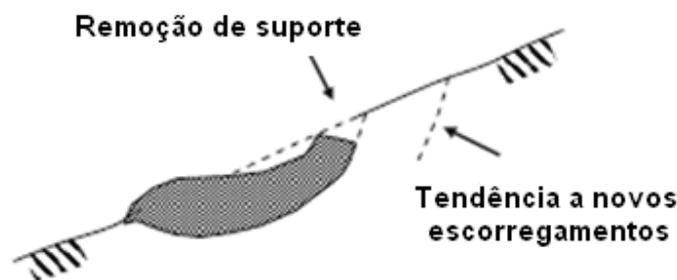


Figura 2.8. Mudança na geometria do talude

Tais modos de atuação podem ser favoráveis ou desfavoráveis à manutenção da estabilidade, dependendo das peculiaridades da encosta. Em geral, a intervenção humana contribui para uma aceleração dos processos de denudação.

Na região litorânea sul do Rio de Janeiro existem desmatamentos antigos, para a constituição de pastos ou culturas. Outras áreas foram desmatadas para permitir a passagem da rodovia BR-101 e, a partir do início da operação da via, ocorreram desmatamentos subsequentes, com o aumento da população da área. Nesta região, foram observados diversos casos de instabilidade de encostas. A maioria dos casos ocorreu em faces de taludes de corte, onde estão expostos horizontes diversos dos perfis de intemperismo.

A ação antrópica destrutiva sobre a vegetação tem gerado e/ou acelerado processos geomorfológicos de degradação. Estes processos têm ocorrido de forma intensa no sudeste brasileiro, devido tanto às atividades agrícolas quanto à urbanização, sendo que a instabilização de encostas tem sido agravada pela remoção das matas (Wolle, 1988). Sem

esta interferência, os processos de decomposição seriam mais rápidos que os de transporte, devido a fatores como a alta taxa de infiltração induzida pela umidade, a temperatura do solo, a ação bioquímica, e o intenso intemperismo químico (Chorley et al, 1984).

Os cortes de estradas, e outras obras em áreas de declividade desfavorável e/ou que possuam características geológicas e geomorfológicas sujeitas a deslizamentos, aceleram estes processos (Guerra, 1994; Fernandes e Amaral, 1996). Além disso, o tráfego de veículos pesados provoca vibrações que detonam processos de instabilização de encostas (Guidicini e Nieble, 1993). O papel das atividades antrópicas como indutoras de deslizamentos é muito significativo, sendo muito freqüentes os deslizamentos em encostas ocupadas durante períodos de chuvas intensas. O volume de material removido e transportado por água pluvial está relacionado à densidade de cobertura vegetal e à declividade, de forma que com o desmatamento, esses processos se tornam mais intensos, principalmente em pontos de alta declividade.

2.6. Considerações Finais

Como descrito neste capítulo, muitos são os fatores que condicionam os movimentos de massa e muitos são os tipos de movimento que podem ocorrer em uma encosta, ou em um talude natural ou construído. Dentre os principais condicionantes, citam-se clima e precipitação, geomorfologia da encosta, litologia e estruturas das rochas, vegetação, e ação antrópica.

Apesar da apresentação dos diferentes tipos de movimentos de massa (escorregamentos, escoamentos, subsidências, etc), ressalta-se que o foco do presente trabalho consiste na análise de escorregamentos de massas de solo.

Somente um estudo minucioso dos condicionantes possibilita o conhecimento necessário para o desenvolvimento de novas abordagens e modelos capazes de prever o risco de escorregamentos. Em geral, os métodos de análise de estabilidade necessitam do conhecimento dos parâmetros de resistência dos materiais envolvidos. A possibilidade de previsão de deslizamentos de massa de solo com dados retirados de laudos de vistoria no campo aparece como uma alternativa atraente para um parecer preliminar do comportamento da encosta.

3. Lógica Nebulosa: *Fuzzy*

3.1. Introdução

A palavra 'lógica' está presente em nossa vida desde muito cedo, mas a sua compreensão, assim como ocorre com muitas outras palavras e suas respectivas definições, sofre variações à medida que vamos crescendo e observando o mundo com outros olhos. (Camargos, 2002)

Os primeiros estudos sobre a Lógica foram realizados por filósofos gregos, sendo o principal organizador da lógica clássica o grande filósofo Aristóteles (384 - 322 a.C.), com a obra chamada Organon. Muitos estudos foram realizados ao longo do tempo, sucedendo o trabalho deste filósofo.

Barreto (2001) caracterizou a lógica contemporânea, como retratada na Figura 3.1, em dois pontos principais:

- (a) A Lógica Padrão: atribuída aos trabalhos Boole (1848), de Frege (1884) e Russel et al. (1910-1913). Nestes dois últimos, seus autores iniciaram simultaneamente a investigação dos fundamentos do pensamento matemático, publicados no final do século dezoito e início do século dezenove. O resultado destes trabalhos revolucionou a lógica, pois foi desenvolvida a lógica de predicados ou cálculo de predicados; e
- (b) O reconhecimento das Lógicas não-padrão, dentre estas a lógica nebulosa.

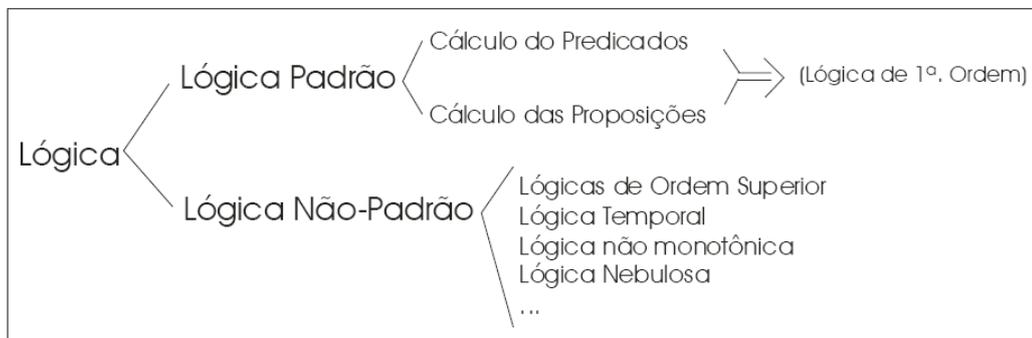


Figura 3.1. Caracterização da Lógica Contemporânea (Barreto, 2001)

3.2. Conceito

A Teoria dos Conjuntos Nebulosos, desenvolvida por Lofti A. Zadeh (Zadeh, 1965) durante a década de 1960, executa o tratamento de informações incertas, imprecisas e vagas comumente encontradas nos problemas cotidianos e fornece a base matemática que permite o manuseio destas incertezas por intermédio da lingüística e cognição humanas.

A teoria dos conjuntos nebulosos, quando utilizada em um contexto lógico, como o de sistemas baseados em conhecimento, é conhecida como lógica nebulosa, lógica difusa ou lógica "fuzzy" (Sandri et al,1999).

Segundo Kosko (1992), o principal objetivo da lógica nebulosa é generalizar a idéia representada pela teoria dos conjuntos ordinários, ou convencionais, aproximando-se da imprecisão e do aspecto vago do raciocínio humano.

Oliveira Jr. (1999) cita que o aspecto mais notável dessa metodologia é a possibilidade de se capturar, em um modelo matemático, conceitos intuitivos como graus de satisfação, conforto, adequação, etc. sem a necessidade de "violentá-los" por meio de enquadramento obrigatório em modelos por vezes incompatíveis com o grau de difusão apresentado no contexto em questão.

Pinto (2002), afirma que a Lógica Difusa é uma poderosa ferramenta que obtém soluções viáveis para problemas de difícil tratamento por técnicas convencionais, pois tem a capacidade de efetuar a análise de sistemas de extrema complexidade, cuja modelagem por ferramentas convencionais se mostra extremamente difícil, ou até impossível.

Portanto, a Lógica Nebulosa é uma lógica multivalorada capaz de absorver informações vagas, normalmente descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação computacional, procurando modelar o modo impreciso do raciocínio humano e auxiliar na habilidade humana de tomar decisões.

3.3. Formulação

A Teoria dos Conjuntos Nebulosos tem toda a sua base formal na Teoria Clássica dos Conjuntos. Um fato imprescindível para o entendimento de onde se insere a lógica nebulosa no contexto das lógicas não-padrão (Figura 3.1) está em conhecer o trabalho de George Boole (Boole, 1848), que associou à lógica dois estados de verdade e que passou a ser conhecida como Lógica de Boole ou Lógica Padrão. (Camargos, 2002)

Um conjunto é uma coleção de objetos que possuem determinada característica em comum. Na Lógica de Boole, um objeto possui apenas duas maneiras de se relacionar com um conjunto, ou seja, um dado objeto pertence ou não pertence a um determinado conjunto.

A Lógica de Boole usa apenas os valores 0 e 1 para representar o grau de pertinência “ μ ” da variável, isto é “ $\mu=0$ ” não pertence ao conjunto e “ $\mu=1$ ” pertence ao conjunto.

Tomando como exemplo a representação da escala da velocidade de um automóvel através da Lógica Booleana, Figura 3.2, pode ser observado que houve uma mudança abrupta na pertinência (μ) dos conjuntos quando é atingida a velocidade V . O grau de pertinência do conjunto *Veloz* passa de 0 para 1, enquanto o do conjunto *Lento* passa de 1 para 0. Esta mudança abrupta de grau de pertinência ocorre porque é impossível representar variáveis que apresentam graus de pertinência diversificados dentro do domínio 0 e 1.

Supondo que V seja igual a 100km/h e a velocidade do automóvel seja inferior a V , este não pertence ao conjunto *Veloz*, mesmo que esteja a uma velocidade de 99 km/h, pois a Lógica Booleana nos dá uma visão de conjunto “Crisp”. Todavia, a velocidade de 99km/h está muito próxima do conjunto *Veloz*, tendo apenas 1 unidade separando-a deste conjunto.

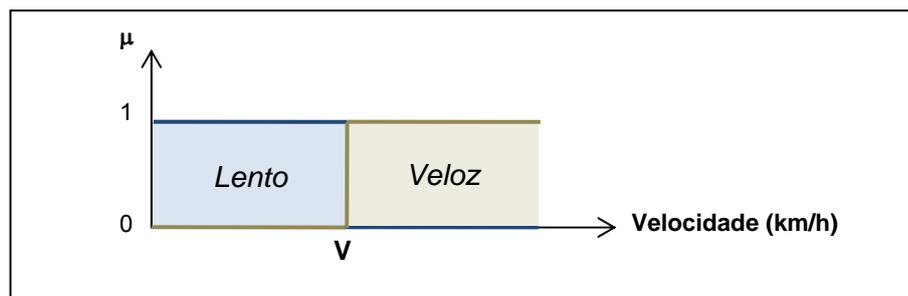


Figura 3.2. Exemplo em Lógica Booleana

Na Figura 3.2, os valores do domínio “Velocidade” são dados pelos conjuntos *Lento* e *Veloz*, caracterizados pelas equações 3.1 e 3.2:

$$\text{Lento: } \{\text{automóvel} \in \text{Lento} / \text{Velocidade} < V\} \quad (3.1)$$

$$\text{Veloz: } \{\text{automóvel} \in \text{Veloz} / \text{Velocidade} \geq V\} \quad (3.2)$$

Na Teoria de Zadeh (1965), um conjunto nebuloso é uma coleção de objetos com características comuns. No entanto, estes objetos possuem diversas maneiras de se relacionarem ao conjunto, além de pertencente ou não pertencente, pois estão associados ao mesmo através de um grau de pertinência (μ) que varia de 0 a 1. Com isso, há uma suavização na transição entre as condições de pertinência e não pertinência, de modo que a mesma não ocorra de modo abrupto, mas sim progressivamente.

Pinto (2002) citou que um conjunto *fuzzy* é uma coleção de pares de números que consistem em membros, e graus de “suporte” para estes membros. Em uma forma discreta,

o conjunto *fuzzy* “aproximadamente 7” deve ser expresso da seguinte forma: {0.1/5, 0.7/6, 1.0/7, 0.7/8, 0.1/9}. Na notação de conjunto *fuzzy*, os números após a barra (/) são membros do conjunto e os valores antes da barra são os graus de pertinência daqueles números. O uso de conjuntos *fuzzy* para representar termos lingüísticos nos habilita a representar de forma mais adequada e consistente algo que é *fuzzy* (Juang et al., 1992).

Tomando como base o exemplo supracitado e utilizando a Lógica Nebulosa para a configuração dos conjuntos *Lento* e *Veloz*, tornou-se possível uma suavização na transição entre estes, pois o grau de pertinência pode variar de 0 a 1, diferentemente da Lógica de Boole.

Na Figura 3.3, observa-se que, dependendo da velocidade, o automóvel pode pertencer ao conjunto *Lento*, ao conjunto *Veloz* ou até mesmo aos dois conjuntos, com diferentes graus de pertinência. Por exemplo: um automóvel com velocidade V , pertence ao conjunto *Lento* com grau de pertinência baixo ($\mu_{\text{Lento}} \approx 0,15$) e ao conjunto *Veloz* com grau de pertinência alto ($\mu_{\text{Veloz}} \approx 0,65$).

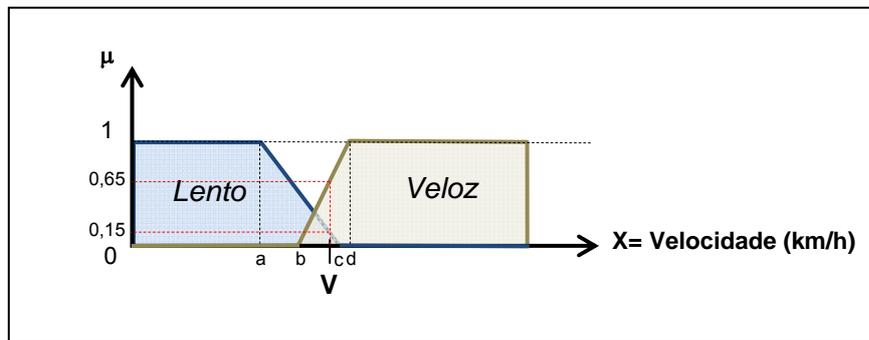


Figura 3.3. Exemplo em Lógica Nebulosa

Neste caso, as funções de pertinência ou MFs (*memberships functions*) dos conjuntos *Fuzzy* mapeiam cada elemento de X para um grau de pertinência (ou valor de pertinência) entre 0 e 1, conforme as equações 3.3 e 3.4:

$$\mu_{\text{Lento}} = \begin{cases} 1 & X \leq a \\ \frac{(c-X)}{(c-a)} & a < X < c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\mu_{\text{Veloz}} = \begin{cases} 0 & X \leq b \\ \frac{(X-b)}{(d-b)} & b < X < d \\ 1 & x \geq d \end{cases} \quad (3.4)$$

Segundo Neto (2005), os conjuntos *fuzzy* possuem características específicas, como:

(a) Altura. É o maior grau de pertinência da função de pertinência;

(b) Normalização. O conjunto *Fuzzy* está na Forma Normal Mínima se pelo menos um elemento possui " $\mu(u)=1$ ". O conjunto *Fuzzy* está na Forma Normal Máxima se pelo menos um elemento possui " $\mu(u)=1$ " e um elemento " $\mu(u)=0$ ";

(c) Domínio. É o universo total de valores possíveis dos elementos do conjunto. Dependendo do contexto, o domínio pode ser aberto ou fechado e cresce monotonicamente da esquerda para direita;

(d) Universo do Discurso. É o espaço *Fuzzy* completo de variação de uma variável do modelo.

A Tabela 3.1 apresenta os tipos mais comuns de funções de pertinência, além de indicar em que área as mesmas são comumente utilizadas.

A Função Verdade de um Conjunto *Fuzzy* representa as propriedades semânticas do conceito. A modelagem do sistema será tão melhor quanto mais próxima a função verdade mapear o comportamento do fenômeno. Para tanto, o conhecimento/experiência de especialistas é levado em consideração, transformando subjetividade em graus de pertinência, raciocínio em base de regras, tomada de decisão em inferência/defuzzificação (Oliveira Jr, 1999).

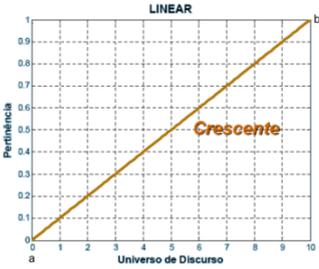
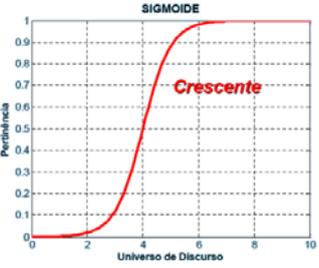
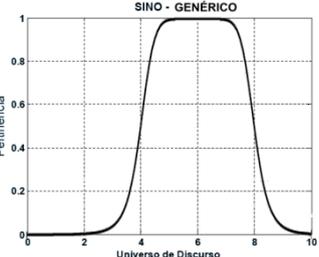
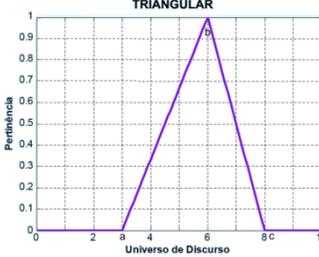
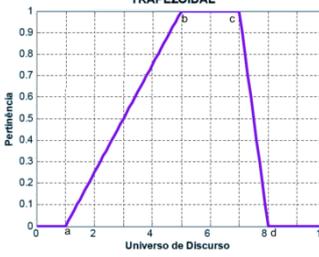
Um tratamento *fuzzy* possui as seguintes etapas típicas: fuzzificação, inferência, defuzzificação. Tanscheit (1995) sintetizou na Figura 3.4 um típico sistema de inferência *Fuzzy*, visando facilitar a compreensão.

A Fuzzificação é primeira etapa do tratamento *fuzzy*, pois é através da fuzzificação que se efetua a transformação das variáveis que se encontram na forma determinística ou *Crisp* (número) em forma *Fuzzy* (pertinência).

Em um Raciocínio *Fuzzy* o conhecimento é representado através de regras ou proposições. Estas Regras (Memória associativa *Fuzzy*) são declarações que relacionam as variáveis do modelo com os conjuntos *Fuzzy*, ou seja, relacionam os antecedentes com os consequentes. No caso de um sistema de controle, estas regras relacionam o estado atual do processo com a ação de controle adequada para levá-lo ao estado desejado. No caso de um sistema de decisão, previsão ou diagnóstico, estas regras conduzem à conclusão.

As regras podem ser condicionais ou incondicionais e sua ordem de execução depende do modelo adotado. No caso de modelos com somente regras condicionais ou incondicionais, a ordem é irrelevante. Se o modelo contém ambos os tipos de regras, a ordem é importante. As regras incondicionais devem ser executadas antes e são geralmente usadas como "*DEFAULT*" isto é, se nenhuma regra condicional é executada, então o valor da solução é determinado pela regra incondicional.

Tabela 3.1. Funções de Pertinência (Neto, 2005)

Função	Utilização
<p>Linear (Crescente e Decrescente)</p> 	<p>Aproximação de conceitos não bem compreendidos.</p> $f(x, a, b) = \frac{x - a}{b - a}$
<p>Sigmoide (Crescente e Decrescente), Curva S ou Curva Z</p> 	<p>Modelagem Dinâmica. Problema das Filas.</p> <p>Qualificadores de freqüência: usualmente, maioria, quase todos.</p> $f(x, a, c) = \frac{1}{1 + \varepsilon^{-a(x-c)}}$ <p>Sendo: a=10 (maior valor de x com pertinência igual a 1) c= 4 (x onde há mudança de curvatura)</p>
<p>Sino</p> 	<p>Qualificadores de quantidade: poucos alguns.</p> <p>Número Fuzzy: aproximadamente, entorno de.</p> $f(x, \sigma, c) = \frac{1}{1 + \left \frac{x - c}{a} \right ^{2b}}$ <p>Sendo: a = 2 (x onde se inicia a curva) b = 4 (x onde há mudança de curvatura, antes do centro) c = 6 (x no centro da curva)</p>
<p>Triangular</p> 	<p>Uso corrente.</p> <p>Engenharia de Processos.</p> $f(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x - a}{b - a}, \frac{c - x}{c - b}\right), 0\right)$
<p>Trapezoidal</p> 	<p>Uso corrente.</p> $f(x, a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x - a}{b - a}, 1, \frac{d - x}{d - c}\right), 0\right)$

Sendo: a, b, c e d parâmetros do modelo

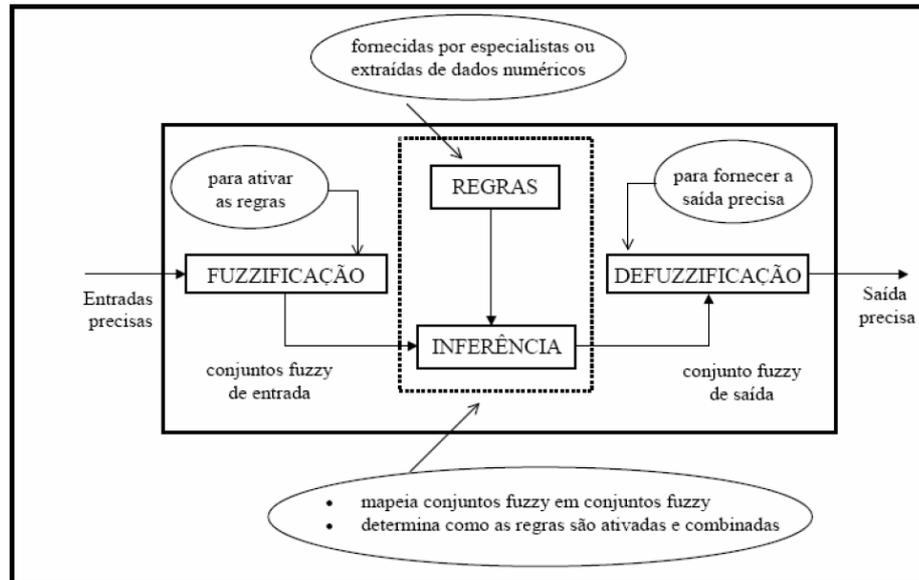


Figura 3.4. Sistema de Inferência Fuzzy (Tanscheit, 1995)

Ressalta-se que, se nenhuma regra condicional possui um antecedente com força maior que a interseção máxima das regras incondicionais, as regras condicionais não contribuirão para a solução do modelo.

As seguintes propriedades são desejáveis para as regras:

- (a) Qualquer combinação das variáveis de entrada deve ativar pelo menos uma regra;
- (b) Duas ou mais regras com as mesmas entradas devem ter saídas mutuamente exclusivas. Caso contrário, as regras são inconsistentes;
- (c) Não deverão existir regras vizinhas com saídas cujas funções de pertinência não apresentem interseção.

A segunda etapa é a Inferência *Fuzzy* é o procedimento de avaliação das regras que relacionam as variáveis e que levam a conclusão final do sistema. O raciocínio é efetuado através da inferência, que permite tirar conclusões (deduzir, concluir) partindo de fatos conhecidos (Min-Max) e as variáveis lingüísticas, de entrada e saída, representam o conhecimento em inferência *Fuzzy*. A inferência possui duas fases distintas, a avaliação da implicação de cada regra e a composição das conclusões de todas as regras em um valor consolidado. Existem muitos procedimentos inferenciais na lógica *fuzzy*, porém os mais utilizados são o Mamdani e o Takagi-Sugeno-Kang (Mendel, 2001).

A Defuzzificação é última etapa do tratamento *fuzzy*. Nesta etapa, ocorre a transformação das variáveis que se encontram na forma fuzzificada para forma determinística (*Crisp*), determinando o valor real da(s) saída(s). Os principais métodos para efetuar a defuzzificação são o Centro-de-Área (Centróide), o Centro-do-Máximo, a Média-do-Máximo e a Média-Ponderada (Shaw e Simões, 1999).

3.4. Vantagens e Eventuais Desvantagens

Tendo em vista que a Lógica Nebulosa vem sendo estudada e aperfeiçoada desde a sua criação, a seguir serão apresentadas algumas características, vantagens e eventuais desvantagens da utilização desta Ferramenta.

Dentre as características pode-se salientar que a Lógica Nebulosa:

(a) Está baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores verdadeiros são expressos lingüisticamente (quente, muito frio, verdade, longe, perto, rápido, vagaroso, médio);

(b) Possui vários modificadores de predicado (muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio);

(c) Possui um amplo conjunto de quantificadores (poucos, vários, em torno de, usualmente);

(d) Faz uso das probabilidades lingüísticas (como, por exemplo, provável e improvável) que são interpretados como números nebulosos;

(e) Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes, como um limite apenas (Camargos, 2002).

A lógica nebulosa apresenta uma série de vantagens, dentre as quais se citam: possibilidade de captura do pensamento humano a partir da utilização de variáveis lingüísticas; necessidade de poucas regras, valores e decisões; simplicidade de solução de problemas e de aquisição da base do conhecimento; possibilidade de avaliar variáveis advindas de simples observações, tendo em vista que a Lógica Nebulosa pode absorver o conhecimento de especialistas.

Adicionalmente, sistemas baseados em lógica Nebulosa são mais fáceis de entender, manter e testar, são robustos e operam com falta de regras ou com regras defeituosas. A utilização da Lógica Nebulosa proporciona um rápido protótipo dos sistemas.

As desvantagens existentes na utilização da Lógica Nebulosa são poucas e dentre elas podemos destacar que a especificação das funções de pertinência é trabalhosa, por isso há a necessidade de muita simulação/teste para o ajuste fino destas funções. Outra desvantagem é a grande dificuldade do estabelecimento de regras consistentes, pois, para tal há a necessidade da captura do conhecimento de um especialista e/ou de dados históricos.

3.5. Aplicações de Lógica Nebulosa na Engenharia Civil

A lógica nebulosa foi desenvolvida a partir de 1965, com os trabalhos de Lotfi Zadeh, professor da Universidade da Califórnia (Zadeh, 1965). Sua utilização se intensificou e

avançou, principalmente, nas áreas de controle, otimização e planejamento, e análise de sinais. Atualmente, diversas empresas multinacionais fazem uso desta ciência, como indica a Tabela 3.2.

Desde então, sua utilização tem sido crescente e diversos pesquisadores têm buscado aplicações desta ciência em diversas áreas de conhecimento, como: Economia, Administração, Contabilidade, Medicina, Informática, Biologia, Física, Arquitetura, Urbanismo e Engenharias, para a elaboração de Sistemas Especialistas, Computação com Palavras, Raciocínio Aproximado, Linguagem Natural, Controle de Processos, Robótica, Modelagem de Sistemas Parcialmente Abertos, Reconhecimento de Padrões, Processos de Tomada de Decisão (Decision Making), entre outras.

Quanto ao potencial de aplicação da Lógica Nebulosa em Engenharia Civil, pode-se dizer que as decisões de engenharia são baseadas na combinação de conhecimento científico “objetivo” com informação e julgamentos de engenharia “subjettivos”; Assim, a teoria fuzzy pode ser usada para realizar esta combinação de maneira lógica (Chameau et al, 1983).

Tabela 3.2. Aplicações Comerciais da Lógica Nebulosa (Camargos, 2002)

Área	Aplicação	Empresa
Controle	Controle de Aeronave	Rockwell Corp.
	Operação do Metrô de Sendai	Hitachi
	Transmissão Automática	Nissan, Subaru
	Space Shuttle Docking	NASA
Otimização e Planejamento	Elevadores	Hitachi, Fujitech, Mitsubishi
	Análise do Mercado de Ações	Yamaichi
Análise de Sinais	Ajuste da Imagem de TV	Sony
	Autofocus para Câmera de Video	Canon
	Estabilizador de Imagens de Video	Panasonic

Na Engenharia, Geotecnia, os primeiros trabalhos datam da década de 90, e estão relacionados à classificação dos solos (Juang et al, 1996), análise do potencial de erosão (Mitra et al, 1998; Alves et al, 2002; Alves, 2004), avaliação de áreas susceptíveis a escorregamentos (Pinto, 2002; Oliveira et al, 2005; Lee e Juang, 1992), avaliação da estabilidade de barragens (Fontenelle e Vieira, 2002); avaliação de modelos de susceptibilidade a movimentos de massa em uma faixa de dutos (Rabaco, 2005), dentre outros. No âmbito da Geotecnia Ambiental, tem-se aplicado a lógica Fuzzy a diversas finalidades, dentre elas a escolha de áreas para aterros sanitários (Macbean et al, 1995; Champratheep e Ganer, 1996; Lima, 1995; Ramos e Mendes, 2001; Calijuri et al, 2002), e o diagnóstico dos impactos de áreas de resíduos (Menezes, 1995).

Alves (2004) avaliou o potencial de erosão dos solos através de uma análise por Lógica Fuzzy. A erosão acelerada de solos é um problema mundial de grandes impactos ambientais e econômicos e tem origem tanto em causas naturais quanto em ações antrópicas. Planos de conservação de solos em áreas de alta erosão necessitam de mapas de risco da ocorrência do fenômeno, que são criados a partir de modelos de erosão. Os principais modelos existentes levam em consideração os fatores envolvidos no processo de erosão, incluindo características climáticas, propriedades dos solos, topografia e práticas de uso dos solos. No entanto, a maioria desses modelos possui limitações, tais como: (1) necessitam de um grande volume de dados, alguns deles de difícil obtenção; (2) são geralmente desenvolvidos para regiões diferentes daquelas nas quais são aplicados; (3) são criados, na maioria das vezes, para escalas nas quais diferentes interações e processos podem ser importantes. Os conceitos de Lógica Fuzzy foram utilizados propondo-se uma metodologia para estimar a distribuição espacial das classes de potencial de erosão. Dois modelos distintos foram propostos. O primeiro modelo é composto por duas variáveis: mapas de declividade e cobertura. O segundo modelo é representado por 3 variáveis: mapas de fator topográfico, fator de erodibilidade dos solos e cobertura. Estes modelos foram aplicados na microbacia do Rio Pimentel, localizada no município de São Fidélis (Rio de Janeiro), classificando as áreas em três classes distintas quanto ao potencial à erosão: Moderado, Moderado Alto e Alto. Os resultados apresentados por Alves (2004) mostraram que o modelo Fuzzy de duas variáveis obteve sucesso em estimar áreas de alto potencial a erosão com um número reduzido de variáveis, tornando tal opção muito interessante para aplicação em regiões onde os recursos para projetos ambientais são limitados e o nível de degradação ambiental é elevado.

Fontenelle e Vieira (2002) apresentaram uma análise de risco aplicada à estabilidade do talude de jusante de uma barragem de terra no Estado do Ceará, para a condição de reservatório cheio. Para tanto, os autores utilizaram a simulação de Monte Carlo para distribuições triangular, normal e metodologia de Larson, e a Teoria dos Conjuntos Difusos, considerando-se a aleatoriedade dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) do solo compactado. Foi concluído que, em função da variabilidade do fator de segurança em estabilidade de taludes a análise de risco é uma metodologia aconselhável e adequada. Também foi verificado que é altamente válido estender as análises considerando a variabilidade dos outros materiais e posicionamento da linha freática (poropressões).

A utilização de lógica nebulosa na avaliação de modelos de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa em uma faixa de dutos foi estudada Rabaco (2005). A avaliação foi realizada em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), incluindo modelos matemáticos baseados em equações de hidrologia associadas a equações de estabilidade do talude infinito. Os resultados fornecidos por este modelo foram comparados aos

resultados de modelos empíricos dirigidos pelo conhecimento do usuário e de lógica nebulosa. A área estudada, nas escalas 1:1.000, 1:10.000 e 1:50.000, foi um trecho de faixa de dutos da Petrobrás, na Serra do Mar perto de Coroa Grande. O trabalho teve como objetivo principal apresentar resultados comparativos entre modelos com controle topográfico para a previsão de susceptibilidade a movimentos de massa, utilizando parâmetros do Modelo Digital de Terreno (declividade, curvatura, área de contribuição da encosta e direção de fluxo). O autor concluiu que os modelos nebulosos não tiveram desempenho superior aos modelos empíricos. A justificativa seria o fato de uma parcela de subjetividade e de conhecimento do usuário já estar embutida nos modelos empíricos originais. Os resultados deste trabalho de pesquisa indicaram que a modelagem nebulosa é uma variação da modelagem empírica onde os limites de atuação das variáveis, possuem uma faixa flexível de valores favorecendo o mapeamento mais homogêneo.

Pinto (2002) apresenta a avaliação da susceptibilidade a escorregamentos em solo fazendo uso da abordagem Fuzzy. O objetivo do trabalho consistiu em gerar um modelo inteligente para avaliar a susceptibilidade a escorregamentos em solo, em áreas de taludes naturais pertencentes ao perímetro urbano do Município de Itaperuna/RJ. Sendo assim, através de avaliação essencialmente qualitativa e considerando fatores que são sabidamente importantes na deflagração de movimentos de massa em ambiente tropical úmido, gerar cartas de susceptibilidade através da obtenção de um índice denominado Índice de Potencial de Ruptura de Taludes (IPRT). A área estudada foi subdividida em células, que são polígonos que dividem a área a ser cartografada em unidades menores. Com isso, foi possível estabelecer setores mais ou menos susceptíveis a escorregamentos em solo com o uso de qualificadores correspondentes a faixas de valores de IPRT (muito alta susceptibilidade, alta susceptibilidade, média susceptibilidade, baixa susceptibilidade, muito baixa susceptibilidade). O autor destaca dentre as principais vantagens apresentadas por esta abordagem: menor custo envolvido na avaliação, comparativamente aos métodos tradicionais de análise de estabilidade (esta vantagem torna-se mais notável à medida que a área a ser cartografada aumenta); possibilidade de capturar, para o modelo concebido, a experiência e conhecimento de especialistas, assim como seu importante e apropriado julgamento de engenharia, transportando para o campo matemático características subjetivas não consideradas em outros métodos de análise de estabilidade atualmente utilizados; especialmente para regiões com perfil de ocorrência de escorregamentos de menor porte, torna-se vantajosa a característica de tratamento localizado da encosta, podendo-se atacar setores mais instáveis porventura identificados, mitigando a encosta como um todo. Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a realidade verificada no campo e entende-se que os setores apontados como de média susceptibilidade a

escorregamentos devem ser objeto de atenção e cuidados a fim de evitar a ocorrência de escorregamentos.

Lee e Juang (1992) propuseram um esquema qualitativo para avaliação do potencial de ruptura de taludes. Este esquema baseia-se em uma avaliação formada por fatores que são sabidamente considerados pelos especialistas como atuantes na estabilidade de taludes. A seleção dos fatores e dos pesos relativos atribuídos a cada um deles foi baseada em resultados de pesquisa de opinião de especialistas na área de estabilidade, dados estatísticos disponíveis, e busca de estudos em áreas e regiões com condições climáticas, ambientais e geológicas similares àquelas da área avaliada. Juang et al (1992) salientam que deve-se ter cautela quando se adotam fatores e pesos estabelecidos para uma determinada área, na avaliação do potencial de ruptura de taludes de outras áreas.

Calijuri et al (2002) apresentam uma metodologia para identificação de áreas para implantação de aterros sanitários no município de Cacheira de Itapemirim, com o uso de análise de estratégia de decisão. A metodologia fez uso de lógica fuzzy e análise multicritério e compreendeu o levantamento e a análise de condicionantes operacionais, legais, ambientais e socioeconômicos, seguidos de aquisição, armazenamento, descrição e análise desses dados geo-referenciados. Para cada um dos condicionantes foram atribuídos pesos, quantificando a importância relativa de cada um deles no processo de decisão. Os resultados apresentados por Calijuri et al (2002) mostraram que o método de análise estratégica de decisão, viabilizado pela potencialidade do SIG, permite a integração de informações espaciais para a tomada de decisão no processo de avaliação e seleção de áreas para a implantação de aterros sanitários.

Ressalta-se que estudos mostram que a utilização de operações booleanas (método baseado na lógica binária – base matemática dos SIGs convencionais) conduz a uma falha de 35% na seleção de áreas potenciais para implantação de aterros sanitários, quando comparadas às análises utilizando lógica fuzzy (Champratheep e Ganer, 1996).

3.6. Comentários Finais

Diante do exposto, é clara a utilização da Lógica Nebulosa como ferramenta para análises de problemas que envolvem incertezas. Neste contexto, a aplicabilidade desta ferramenta na solução de problemas geotécnicos é viável e adequada.

O presente trabalho apresenta a utilização da lógica nebulosa na avaliação da susceptibilidade de escorregamentos de taludes em solo residual, fazendo uso de um banco de dados de escorregamentos ocorridos na cidade do Rio de Janeiro. Estes dados, fornecidos pela Fundação GEO-RIO, serviram como a base do conhecimento e do julgamento de especialistas, e serão apresentados no Capítulo 4 deste trabalho.

4. Elaboração do Modelo *Fuzzy*

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para elaboração do Modelo *Fuzzy* proposto neste trabalho de dissertação.

Inicialmente, comentar-se-á sobre a Fundação GEO-RIO, que foi de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho, fornecendo dados históricos sobre acidentes geológico/geotécnicos no município do Rio de Janeiro, e permitindo a troca de experiência com seus técnicos. A descrição detalhada sobre a Fundação GEO-RIO pode ser obtida no site <http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/principal.htm>.

Os itens subseqüentes apresentam os condicionantes geológico-geotécnicos utilizados como variáveis na lógica *fuzzy*, juntamente com o tratamento estabelecido durante a inclusão no *toolbox Fuzzy Logic* do *software* MATLAB[®] da empresa The Mathworks, Inc. As variáveis lingüísticas, as funções de pertinência, o conjunto de regras, a inferência (método Mandani) e o método de defuzzificação (Centro de Gravidade) serão discutidos, e justificados para análises de escorregamentos em solos residuais.

Finalmente, será demonstrada a forma de interpretação dos resultados obtidos através da utilização do Modelo *Fuzzy*.

4.2. A Fundação GEO-RIO

Antigo Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, hoje Fundação GEO-RIO, órgão da Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura, foi criada em 12 de maio de 1966. O Instituto surgia no rastro das fortes chuvas de janeiro daquele ano, que provocaram inúmeros acidentes geotécnicos nas encostas, com saldo de mortos e feridos em uma situação de repercussão internacional. (Site da GEO-RIO em <http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/principal.htm>)

No ano de criação, 1966, foram executadas 39 obras de contenção, com o desenvolvimento de metodologias pioneiras de execução em locais de difícil acesso e grande altitude. Em 1967, após outro trágico período chuvoso, e conseqüente morte de mais de 100 pessoas, foram executadas mais 50 obras.

No entanto, foi em 1988, também em um verão de chuvas torrenciais, que o Instituto de Geotécnica iniciou um período de grande desenvolvimento, com a execução de um número elevado de obras e a ampliação de seu quadro de funcionários técnicos. A literatura

reporta muitos acidentes fatais, destacando-se os deslizamentos ocorridos no Morro da Formiga no bairro da Tijuca, no Morro Santa Marta, em Botafogo e em Santa Tereza, onde um deslizamento catastrófico atingiu a Clínica Santa Genoveva. (site da GEO-RIO em <http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/principal.htm>).

A partir de 1996, após mais um período de intensas chuvas e vários incidentes catastróficos, a GEO-RIO vem experimentando uma nova fase de desenvolvimento com a aplicação de novas técnicas de contenção e mapeamento de áreas de risco. Dentre as novas metodologias de contenção, destacam-se a adoção de materiais alternativos como pneus. O mapeamento das áreas de risco, em conjunto com a implantação de um sistema de alerta de chuvas intensas (Alerta-Rio) visa inibir a ocupação habitacional nas principais favelas e alertar a população em situações de risco.

Da necessidade de avaliar, cadastrar e mapear criteriosamente as condições das encostas do município do Rio de Janeiro, a Geo-Rio criou um Banco de Dados de Acidentes Geológicos/Geotécnicos, o Inventário de Escorregamentos do Rio de Janeiro, que é uma importante fonte de consulta sobre escorregamentos de taludes no município.

Tal importância se deve ao fato do mesmo conter o registro histórico dos acidentes, com informações referentes ao tipo de acidente, local de ocorrência, magnitude, e características físicas envolvidas nos processos de deflagração (uso e ocupação do solo, declividade, geologia e características geológico-geotécnicas dos materiais, condições hidrológicas e climáticas). Com isso, torna-se possível o reconhecimento das condições geológico-geotécnicas das encostas do município, de modo a permitir a análise das várias situações de risco, gerando dados técnicos que servem de subsídios à administração pública no planejamento urbano.

A alimentação do banco de dados de Acidentes Geológicos/Geotécnicos se dá através da digitação dos dados da vistoria de campo em um formulário, denominado Laudo de Vistoria da GEO-RIO. Este formulário possui campos que localizam, descrevem e caracterizam os diversos tipos de problemas geológicos/geotécnicos nas encostas. A Figura 4.1 mostra um exemplo de formulário de laudo de vistoria preenchido e na Figura 4.2 são mostrados os padrões de preenchimento dos campos deste Formulário.

O balanço dos últimos anos da Fundação GEO-RIO é, sem dúvida, o mais fértil da sua história e inclui investimentos tanto em novas obras, como na pesquisa de novas soluções e materiais, na informatização do órgão, na implantação de um novo modelo administrativo e no aperfeiçoamento de pessoal.

Hoje, a GEO-RIO é reconhecida como um dos principais centros mundiais de aplicação de soluções inovadoras em proteção e estabilização de encostas, atuando não apenas no Rio de Janeiro, mas também no repasse dessa tecnologia para diversas cidades

brasileiras. O principal objetivo desta Fundação é trazer novas e diversificadas contribuições para maior proteção do Estado e da população.

RIO PREFEITURA OBRAS GEO-RIO		
LAUDO DE VISTORIA GEO RIO Nº 123/2006		
1 - LOCAL: Rua Caieiras, nº 70/casa 11 – Morro Tuliuti – São Cristóvão RA: VII		
AP: 1.0 Favela: Setor:		
1.1 - PONTO DE REFERÊNCIA:	1.2 - : Coordenadas UTM:	
2 - DATA DO PEDIDO: 28/01/2006	DATA DA VISTORIA: 28/01/2006	
3 - ORIGEM/MOTIVO DO PEDIDO: G/COSIDEC		
4 - SOLICITANTE: Tel.:		
5 - TIPO DE SOLICITAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Ocorrência Geotécnica <input type="checkbox"/> Possibilidade de Ocorrência Data: 27/01/2006 Hora: 19:00 h		
6 - ASPECTOS REGIONAIS		
6.1 - Tipo de ocupação:	6.1.2 - Densidade Ocupacional:	
<input type="checkbox"/> Favela <input type="checkbox"/> Área urbana estruturada <input type="checkbox"/> Área de preservação ambiental <input type="checkbox"/> Área não ocupada <input type="checkbox"/> Loteamento irregular <input checked="" type="checkbox"/> Interface de favela <input type="checkbox"/> Outras:___	<input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Baixa	
6.2 - Tipo de Vegetação:	6.2.1 - Densidade:	
<input type="checkbox"/> Arbórea <input type="checkbox"/> Arbustiva <input checked="" type="checkbox"/> Rasteira <input type="checkbox"/> Nenhuma	<input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Esparsa	
6.3 - Drenagem:	6.3.1 - Condições:	
<input type="checkbox"/> Natural <input checked="" type="checkbox"/> Construída <input type="checkbox"/> Inexistente	<input type="checkbox"/> Satisfatória <input checked="" type="checkbox"/> Insuficiente <input type="checkbox"/> Obstruída <input checked="" type="checkbox"/> Danificada	
6.4 - Relevô	6.4.1 - Perfil da encosta	
<input type="checkbox"/> Escarpado <input type="checkbox"/> Montanhoso <input checked="" type="checkbox"/> Ondulado <input type="checkbox"/> Suave	<input type="checkbox"/> Côncavo <input type="checkbox"/> Convexo <input checked="" type="checkbox"/> Retilíneo	
7 - CARACTERÍSTICAS LOCAIS		
7.1 - Sítio vistoriado:		
<input type="checkbox"/> Encosta natural <input checked="" type="checkbox"/> Talude de corte <input checked="" type="checkbox"/> Talude de aterro <input type="checkbox"/> Talvegue <input type="checkbox"/> Escavação <input type="checkbox"/> Extração mineral <input type="checkbox"/> Outros:___		
7.2 - Geometria:		
Altura (m): 05 Largura (m): = 15m Inclinação (°): = 30		
7.3 - Obras de contenção:		
<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Pública <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Privada		
7.4 - Condições de umidade:		
<input type="checkbox"/> Seco <input type="checkbox"/> Úmido <input checked="" type="checkbox"/> Saturado <input checked="" type="checkbox"/> Com surgência <input checked="" type="checkbox"/> Tubulações rompidas		
7.5 - Natureza do Material		
<input type="checkbox"/> Rocha <input type="checkbox"/> Fraturada <input type="checkbox"/> Solo <input checked="" type="checkbox"/> Sem fraturas <input checked="" type="checkbox"/> Com trincas <input type="checkbox"/> Sem trincas		
Espessura estimada (m):		
<input type="checkbox"/> Bloco Tipo de apoio: Forma: Volume:		
<input type="checkbox"/> Tálus <input type="checkbox"/> Entulho <input type="checkbox"/> Lascas <input checked="" type="checkbox"/> Lixo <input checked="" type="checkbox"/> Aterro		
8 - CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA OU SITUAÇÃO		
8.1 - Situação	8.1.1 - Grau de Risco	8.1.2 - Número de pessoas atendidas: 15
<input checked="" type="checkbox"/> Possibilidade de ocorrência de movimento de massa com atingimento de moradias, prédios ou bens públicos. <input type="checkbox"/> Possibilidade de ocorrência de movimento de massa <u>sem</u> atingimento de moradias, prédios ou bens públicos	<input checked="" type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Baixo <input type="checkbox"/> Inexistente	
8.2 - Tipologia do Movimento ou Movimento Possível		8.3 - Superfície de deslizamento
<input checked="" type="checkbox"/> Escorregamento de solo <input checked="" type="checkbox"/> Escorregamento de lixo <input type="checkbox"/> Escorregamento de entulho <input type="checkbox"/> Escorregamento de rocha <input type="checkbox"/> Escorregamento de tálus/colúvio <input type="checkbox"/> Ruptura de talude corte <input checked="" type="checkbox"/> Ruptura de talude aterro <input type="checkbox"/> Ruptura de obras de contenção <input type="checkbox"/> Deslocamento de blocos ou lascas <input type="checkbox"/> Corridas de massa <input type="checkbox"/> Processo erosivo <input type="checkbox"/> Outros		<input checked="" type="checkbox"/> Sobre solo <input type="checkbox"/> Sobre rocha <input type="checkbox"/> Sem superfície definida
8.5 - Descrição da Ocorrência ou Situação		8.4 - Conseqüências
Em vistoria ao local solicitado, constatamos a ruptura de um horizonte de coberturas de encosta, com aproximadamente 2m de espessura, constituído por solo colúvionar, material detrítico e lixo, predominantemente rico na fração argilosa da sua matriz. O deslizamento trouxe como consequência o descolamento das fundações da casa de nº 11 da Rua Caieiras nº 70, rachaduras de acomodação nas moradias de nºs 10 da mesma rua, na de nº 05 da Rua Caieira 70 A e o soterramento parcial da moradia de nº 236 da rua Itabuna, situada a jusante. O volume de material mobilizado foi da ordem de 250m ³ . A causa provável da ocorrência foi a ausência de qualquer dispositivo de drenagem superficial e/ou subterrânea que permitisse o escoamento disciplinado das águas pluviais, durante o severo evento chuvoso ocorrido no Município na noite de 27/01/2006.		<input type="checkbox"/> Vítimas fatais nº <input type="checkbox"/> Vítimas não fatais <input checked="" type="checkbox"/> Danos a bens particulares <input checked="" type="checkbox"/> Danos a bens públicos <input checked="" type="checkbox"/> Riscos para terceiros <input type="checkbox"/> Sem danos
9 - PROVIDÊNCIAS:		
9.1 - À G/COSIDEC para:		
a) interdição das moradias sito à Memº nº 001/2006/GEO-RIO/DFL) - Rua Caieiras nº 70 casas 10 e 11; - Rua Caieiras nº 70A casa 05;		
b) acionamento do DOE/SMO no sentido de providenciar o escoramento da moradia sito à rua Caieiras nº 70, casa 11; 9.2 - À GEO-RIO/DOC para estudar a possibilidade de incluir o local na programação de obras desta Fundação.		
10 - OBSERVAÇÕES GERAIS:		
11 - RESPONSÁVEL PELA VISTORIA: Geólogo Nelson Paes		
12 - ANEXOS: <input type="checkbox"/> Fotos <input type="checkbox"/> Mapas <input type="checkbox"/> Outros		
Rio de Janeiro, 03 de fevereiro de 2006		
NELSON/cgpp/MENS/Laudo123.06 Visito em / /		

Figura 4.1. Formulário de Laudo de Vistoria da GEO-RIO

LOCALIZAÇÃO E TIPO DE SOLICITAÇÃO		
1 – Local da Vistoria 1.1 – Ponto de referência 1.2 – Coordenadas UTM	2 – Data do Pedido 2.1 – Data da Vistoria	3 – Origem do Pedido 4 – Solicitante
5 – Tipo de Solicitação: <i>Ocorrência geotécnica ou Possibilidade de Ocorrência</i> Data e Hora:		
ASPECTOS REGIONAIS		
6.1 – Tipo de Ocupação: <i>Favela, Área urbana estruturada, Área de preservação ambiental, Área não ocupada, Loteamento irregular, Interface favela ou Outras</i> 6.1.2 – Densidade Ocupacional: <i>Alta, Média ou Baixa</i> 6.2 – Tipo de Vegetação: <i>Arbórea, Arbustiva, Rasteira ou Nenhuma</i> 6.2.1 – Densidade: <i>Alta, Média ou Esparsa</i> 6.3 – Drenagem: <i>natural, Construída ou Inexistente</i> 6.3.1 – Condições: <i>Satisfatória, Insuficiente, Obstruída ou Danificada</i> 6.4 – Relevo: <i>Escarpado, Montanhoso, Ondulado ou Suave</i> 6.4.1 – Perfil da Encosta: <i>Côncavo, Convexo ou Retilíneo</i>		
CARACTERÍSTICAS LOCAIS		
7.1 – Sítio Vistoriado: <i>Encosta natural, Talude de corte, Talude de aterro, talvegue, Escavação, Extração mineral ou Outros</i> 7.2 – Geometria - Altura (m), Largura(m) e Inclinação (°): 7.3 – Obras de Contenção: <i>Sim ou não</i> 7.3.1 – Constr.: <i>Pública ou Privada</i> 7.4 – Condições de Umidade: <i>Seco, Úmido, Saturado, Com Surgência ou Tubulações rompidas</i> 7.5 – Natureza do Material - Rocha (Fraturada ou Sem fraturas), Solo (Com trincas ou Sem trincas e Espessura estimada), Bloco (Tipo de Apoio, Forma e Volume), Tálus, Lascas, Aterro, Entulho e lixo 7.3.1 – Construção: <i>Pública ou Privada</i>		
CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA OU SITUAÇÃO		
8.1 – Situação: <i>Possibilidade de ocorr.movimento de massa com atingimento de estruturas, Possibilidade de Ocorr.movimento de massa sem atingimento de estruturas ou Ocorrência de movimento de massa</i> 8.1.1 – Grau de Risco: <i>Alto, Médio, Baixo ou Inexistente</i> 8.1.2 – Número de pessoas atendidas: 8.2 – Tipologia do Movimento ou Movimento Possível: <i>Escorregamento de solo, Escorregamento de lixo, Escorregamento de entulho, Escorregamento de rocha, Escorregamento de tálus, Ruptura de talude corte, ruptura de talude aterro, Ruptura de obras de contenção, Deslocamento de blocos/lascas, Corridas de massa, Processo erosivo ou outros</i> 8.3 – Superfície de deslizamento: <i>Sobre solo, Sobre rocha ou Sem superfície definida</i> 8.4 – Conseqüências: <i>Vítimas fatais, nº, Vítimas não fatais, Obstrução de vias, Danos a bens particulares, Danos a bens públicos, Riscos para terceiros ou Sem danos</i> 8.5 – Descrição da Ocorrência ou Situação: <i>(Descrição detalhada da Ocorrência)</i>		

Figura 4.2. Campos e Padrões de Preenchimento do Formulário de Laudo de Vistoria

4.3. Laudos de Escorregamentos: Experiência da GEO-RIO

A GEO-RIO efetua em média 2200 vistorias anuais, tendo realizado, desde sua criação, mais de 3500 obras de contenção nas encostas da Cidade, contribuindo para o aumento da segurança e o aprimorando do conhecimento da Geotecnia no Rio de Janeiro. Por este motivo, esta Fundação, que é referência incontestável na área de Geotecnia, foi

escolhida como fonte de dados, e principalmente, fonte de experiência a ser capturada pela lógica nebulosa.

O Anexo 1 apresenta uma tabela com os 100 casos da GEO-RIO, analisados no presente trabalho para elaboração do modelo *fuzzy*. O item 4.3.1 descreve o caso referente ao Laudo nº 718/96.

4.3.1. Laudo de Vistoria GEO-RIO N° 718/96

De acordo com a GEO-RIO, o mês de fevereiro do ano de 1996 foi marcado por intensas precipitações pluviométricas, que chegaram a atingir picos da ordem de 300mm/dia, no Município do Rio de Janeiro. Tal fenômeno trouxe como consequência a ocorrência de diversos movimentos de massa nos maciços que compõe a morfologia da cidade, alguns com proporções catastróficas.

O Laudo de Vistoria nº 718/96 apresenta a descrição e a análise do escorregamento que ocorreu a montante da Rua Capuri, no dia 13/02/1996, às 06h00min aproximadamente. Este escorregamento atingiu, parcialmente, as moradias de números 403 e 641, e provocou o soterramento da moradia de número 510, sem causar vítimas.

O local em estudo situa-se na vertente sul do Morro do Cochrane, pertencente ao conjunto de elevações que constituem o flanco sul do Maciço da Tijuca. A morfologia na região do escorregamento é do tipo montanhosa, com desníveis abruptos e declividades acentuadas. A Figura 4.3 mostra o mapa de localização do escorregamento que, segundo Amaral (1997), é representativo do tipo de processo de instabilidade que predomina nas encostas do Rio de Janeiro.

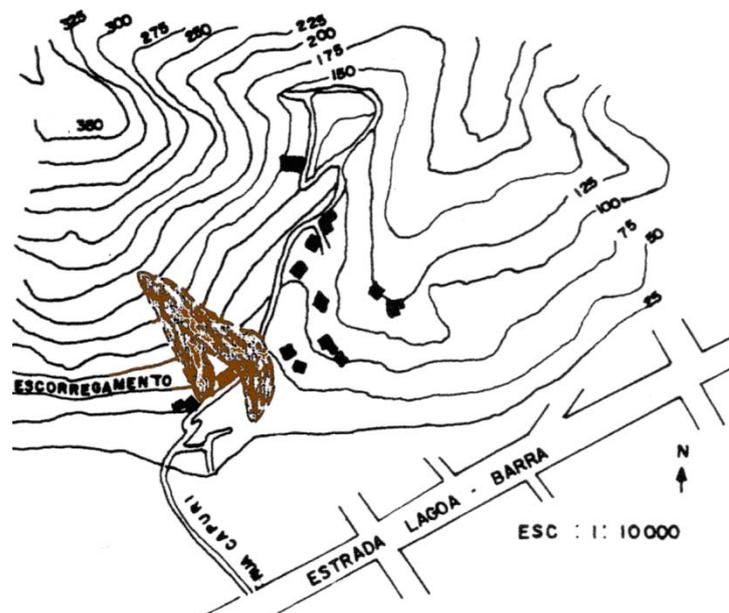


Figura 4.3. Mapa de Localização do Escorregamento. (Amaral, 1997)

A cobertura vegetal da encosta é densa, com árvores de médio a alto porte. O sistema radicular se desenvolve paralelamente à superfície topográfica condicionada pelo substrato rochoso impenetrável. A capacidade de penetração das raízes está relacionada à persistência das descontinuidades do maciço rochoso no contato solo/rocha.

Como o escorregamento da Rua Capuri está associado a um evento de intensas precipitações pluviométricas, a Tabela 4.1 apresenta os índices pluviométricos obtidos nas estações mais próximas ao local do escorregamento.

Tabela 4.1. Dados fornecidos pelo Instituto de Meteorologia

Estações	Precipitação (mm)				
	11/02	12/02	13/02	14/02	Acumulada em 4 Dias
Alto da Boa Vista	15,0	2,5	190,6	202,5	410,6
Jacarepaguá	16,6	0	110,6	304,1	431,3
Jardim Botânico	-	4,7	199,8	97,0	301,5*

* p/03 dias

Em vistoria ao local, os técnicos constataram que o escorregamento foi do tipo planar ao longo da superfície definida pelo contato solo-rocha, ou próximo a este. Segundo relato de um morador do local, o movimento foi desencadeado às 06 horas do dia 13, quando se definiu na encosta florestada uma cicatriz (“clareira”), na altura da cota 200m. Com o aumento da intensidade das chuvas, a cicatriz foi gradativamente se ampliando até atingir a cota 100m, em torno de 08:00 horas. Neste momento, o movimento de massa adquiriu velocidade e deslizou, subdividindo-se em duas frentes no entorno de um núcleo resistente, configurando uma cicatriz remanescente sobre a encosta com formato de um “A”, como mostrado na Figura 4.4.

O material deslizado era constituído predominantemente de solo residual/colúvio, blocos de rocha e árvores de grande porte. A cicatriz gerada foi de aproximadamente 130m de extensão e 150m de altura, limitada pelas cotas 50m na Rua Capuri e 200m na crista. O volume deslizado foi da ordem de 20.000m³, configurando um rejeito vertical na crista com altura de 1,5m.

No local do escorregamento, o substrato rochoso era constituído por gnaiss facoidal, com mergulhos da ordem de 45° para NW, sendo, de forma isolada, favorável à estabilidade da encosta. Sobreposto a esse substrato, encontrava-se um horizonte de solo residual maduro/coluvionar com espessura da ordem de 1,5m composto basicamente por materiais argilo-arenosos com razoável consistência.

O maciço mostrava um fraturamento de alívio, com espaçamento de 1m na cicatriz do escorregamento, e um sistema de fraturas tectônicas com direção NE/SW. Na base da

encosta, um depósito de solo coluvionar de 2 metros de espessura recobre o solo residual, como mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.4. Vista Aérea Frontal do Escorregamento (Amaral, 1997)

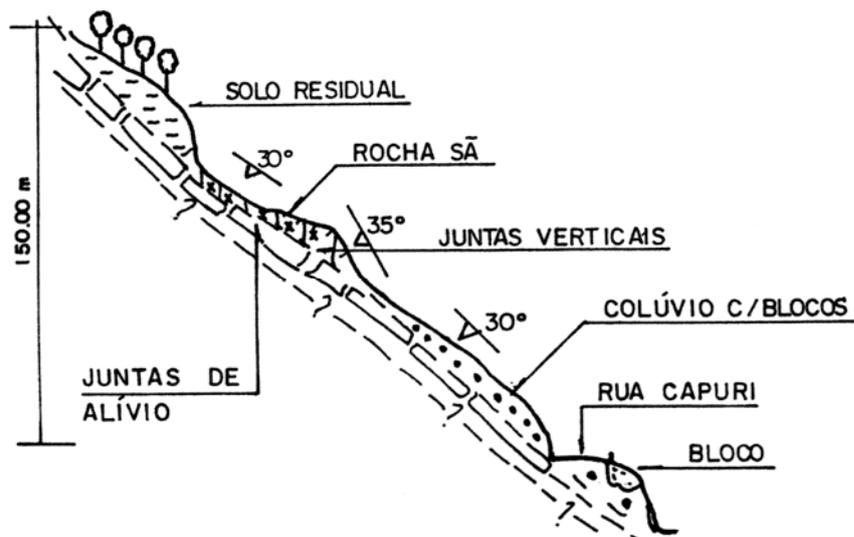


Figura 4.5. Perfil Geológico Esquemático da Encosta Pós-Ruptura (Amaral, 1997)

Quanto ao mecanismo de ruptura, Amaral (1997) cita que em transições abruptas solo-rocha, poropressões positivas elevadas podem se desenvolver em solos inicialmente não saturados, quando a condutividade saturada diminui com a profundidade e o fluxo é vertical (Vargas Jr. et al, 1986).

Estas duas condições estão presentes na rua Capuri, não só pela presença de rocha sã a 1,5m de profundidade, como pela persistência de juntas verticais que facilitam a infiltração dentro da massa de solo residual e a recarga junto ao contato solo-rocha.

O flanco esquerdo do escorregamento atingiu os fundos das moradias de números 403 e 641, causando danos às instalações (muros divisórios, captações de água, etc.) enquanto que no flanco direito o material atravessou a Rua Capuri, soterrou a moradia de número 510 e entulhou parcialmente a calha do Rio Pires, que corre paralelamente à Rua neste trecho.

A preservação do núcleo do talude, Figura 4.4, pode ser atribuída à maior espessura do substrato (>5,0m), às elevadas características mecânicas do material (alta compactidade) e à maior estanqueidade do contato solo/rocha neste local. Finalmente, ressalta-se que não foi observada nenhuma causa antrópica para instabilidade da encosta.

No Laudo em questão foram sugeridas as seguintes medidas para a minimização do risco a novos escorregamentos no local:

- (a) Tratamento do talude deslizado, passando pela limpeza do material inconsolidado e depositado na face do talude remanescente, bem como a elaboração de obras de drenagem e consolidação de blocos e lascas instáveis no flanco direito do escorregamento;
- (b) Contenção no rejeito da crista do escorregamento, como forma de se evitar reativações a montante do movimento de massa; e
- (c) Execução de investigações geológico/geotécnicas e instrumentações geotécnicas (piezômetros, inclinômetros, etc.) nas áreas a montante, e adjacentes ao local deslizado, visando a obtenção de dados que permitam a melhor compreensão do mecanismo de ruptura da encosta e a possibilidade de risco de moradias de jusante, em ocasiões de eventos chuvosos. Com os dados obtidos poderão ser estabelecidos, também, níveis de alerta de risco potencial de deslizamento e a definição de correlações entre índices pluviométricos e potencialidades de acidentes.

Os técnicos da GEO-RIO concluíram que o principal condicionante para o escorregamento na Rua Capuri foram as precipitações pluviométricas que vieram se acumulando desde o início do mês de fevereiro/96, até atingir concentrações elevadas na manhã do dia 13 de fevereiro de 1996, provocando o desequilíbrio da encosta no local e, conseqüentemente, a deflagração do escorregamento.

Como condicionantes secundários na instabilidade local têm-se a alta declividade da encosta associada às características do perfil de alteração do maciço rochoso (pequena espessura da camada de solo).

4.4. Critérios para Concepção da Lógica Nebulosa para Análises de Encostas em Solos Residuais

Segundo dados fornecidos pela GEO-RIO, foram realizadas 1179 vistorias, nos anos de 1998 a 2002, associadas aos principais eventos pluviométricos. A Tabela 4.2 reúne o quantitativo das ocorrências ordenadas pela tipologia do movimento, e a classificação desenvolvida pela GEO-RIO para a codificação destes movimentos. O gráfico apresentado na Figura 4.6 fornece o percentual de cada tipologia dos laudos supracitados.

Observa-se que o maior percentual de vistorias, 28%, está relacionado à Tipologia “Pânico”, que corresponde ao medo de uma eventual movimentação da encosta, por parte do solicitante da vistoria, em dias chuvosos. Porém, os escorregamentos em taludes de corte ou naturais, quando agrupados, representam 40% das vistorias. Por esta razão, a Lógica *Fuzzy* proposta neste trabalho tem como premissa a Tipologia “Escorregamento de Solo”.

Tabela 4.2. Vistorias Associadas aos Principais Eventos Pluviométricos Ocorridos nos Anos de 1998 a 2002 (Fonte: GEO-RIO)

Tipologia do Movimento	Classificação	Ocorrências
Escorregamento de solo em talude de corte	ES/TC	278
Escorregamento de solo e rocha em talude de corte	ES/R/TC	139
Escorregamento de solo em encosta natural	ES/EM	41
Escorregamento de solo e rocha em encosta natural	ES/R/EM	15
Corrida de detritos	C	4
Escorregamento de lixo e entulho	EL/E	56
Processo erosivo	PE/A	49
Pânico	Pânico	326
Ruptura de Estruturas de Contenção	REC	173
OUTROS	Outros	98
Total		1179

Cabe ressaltar que as condições existentes nas regiões de clima tropical são favoráveis à degradação mais rápida da rocha, e conseqüente formação dos solos residuais. Antunes e Barroso (1988) afirmam que os casos mais freqüentes de instabilidade nas encostas do Rio de Janeiro estão relacionados a escorregamentos de massas de solo residual.

Face ao exposto, e tendo em vista o banco de dados de escorregamentos analisado, optou-se por aplicar a lógica *fuzzy* na previsão do risco de ruptura de taludes em solo residual, tendo em vista que a área em estudo compreende o município do Rio de Janeiro, tão susceptível à ocorrência deste tipo de escorregamento.

Os itens subseqüentes discutem os principais condicionantes desencadeadores de escorregamentos, e a forma de avaliação de cada um deles na concepção do modelo *fuzzy*.

Laudos de Vistoria

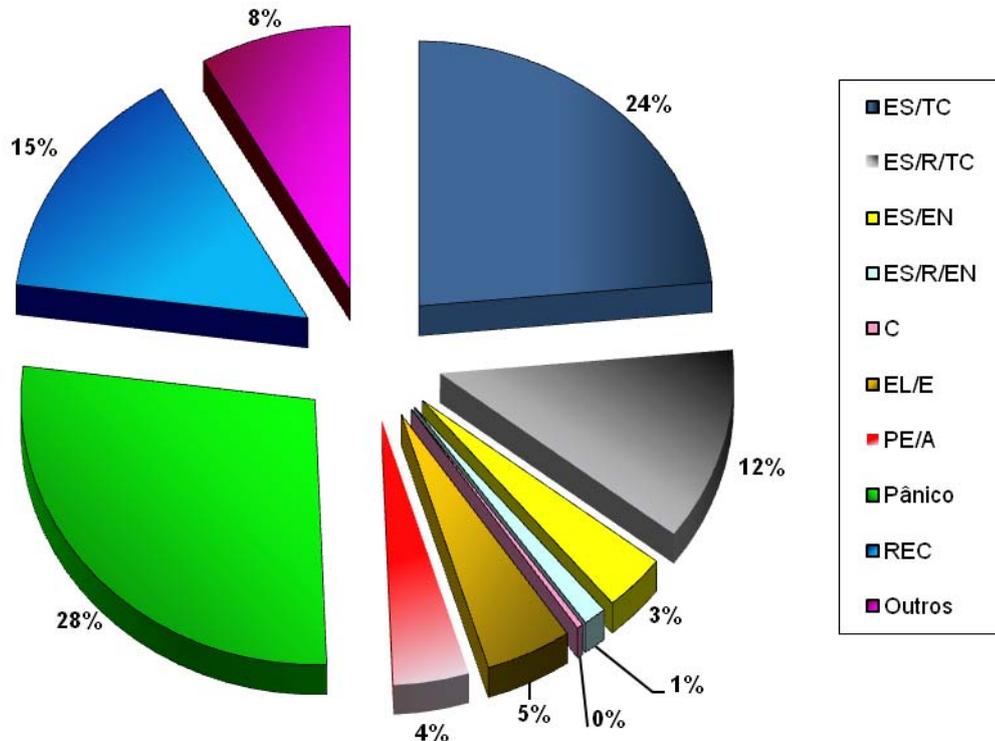


Figura 4.6. Percentual de Cada Tipo de Movimento (Fonte: GEO-RIO)

4.5. MATLAB®

O software utilizado para a implementação da lógica fuzzy foi o MATLAB®, da empresa The Mathworks, Inc., que é uma ferramenta que dispõe de recursos gráficos úteis para um bom gerenciamento na criação do modelo.

Através do toolbox Fuzzy Inference System (FIS) foi modelado todo o raciocínio fuzzy (Figura 4.7) que, como visto no Capítulo 3, é composto por um conjunto de transformadores difusos (variáveis lingüísticas), funções de pertinência (*membership functions* - MFs) e por uma base de regras, que, após o processo de defuzzificação possibilita a visualização da variável ou das variáveis de saída do sistema.

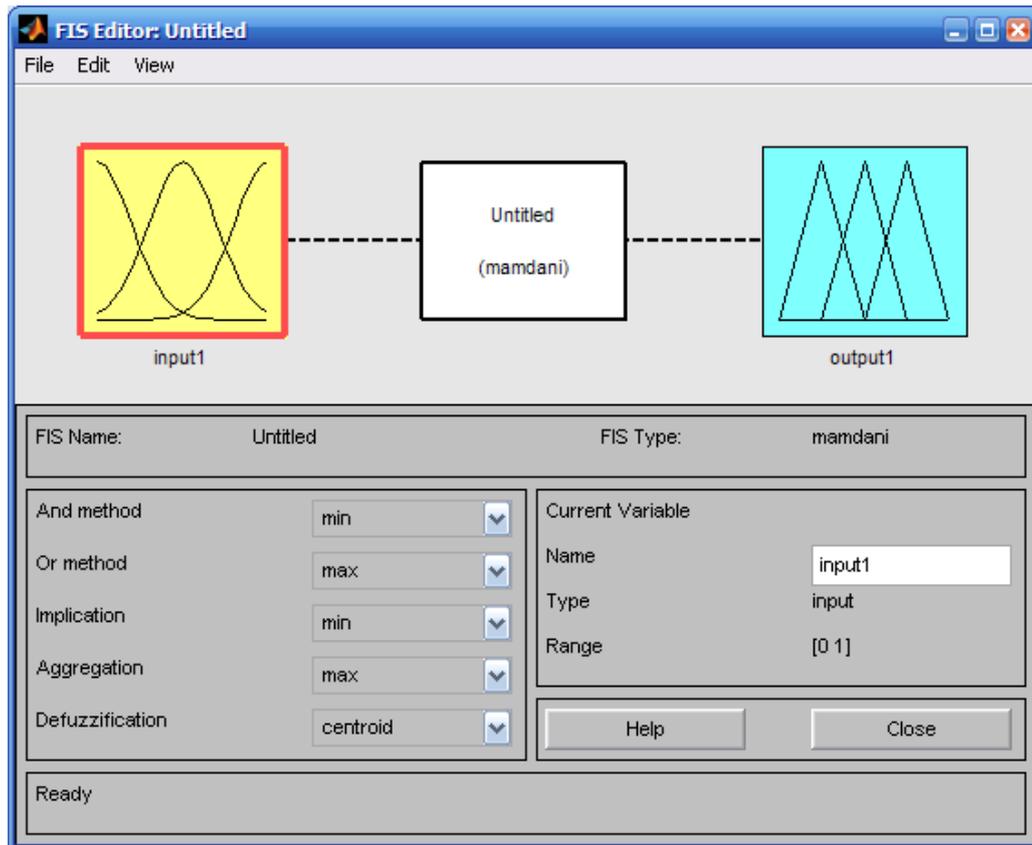


Figura 4.7. Tela inicial do Toolbox FIS

4.6. Fatores Adotados na Concepção do Modelo *Fuzzy*

Para criação do Modelo *Fuzzy* foram inseridas oito variáveis de entrada, que estão associadas a fatores condicionantes para instabilização de taludes; uma variável de saída, que é a previsão do risco de escorregamento de talude; e foram definidas as regras que fazem parte do processo de inferência *Fuzzy*.

A Figura 4.8 esquematiza as variáveis do Modelo *Fuzzy*, e a Tabela 4.3 apresenta os valores lingüísticos (adjetivos) que foram adotados para cada variável. Ressalta-se que a escolha das variáveis de entrada e dos adjetivos procurou considerar as informações coletadas sobre estabilidade de taludes, e as particularidades a respeito do meio tropical úmido brasileiro. Adicionalmente, o julgamento de engenharia e a experiência da GEO-RIO foram fundamentais na definição de cada variável e nos pesos correspondentes, tendo em vista que algumas variáveis são mais significativas do que outras no desencadeamento de processos de escorregamento.

Os itens 4.6.1 a 4.6.8 apresentam e discutem, isoladamente, os fatores utilizados para a concepção do modelo *Fuzzy*, juntamente com as funções de pertinência associadas a cada um deles.

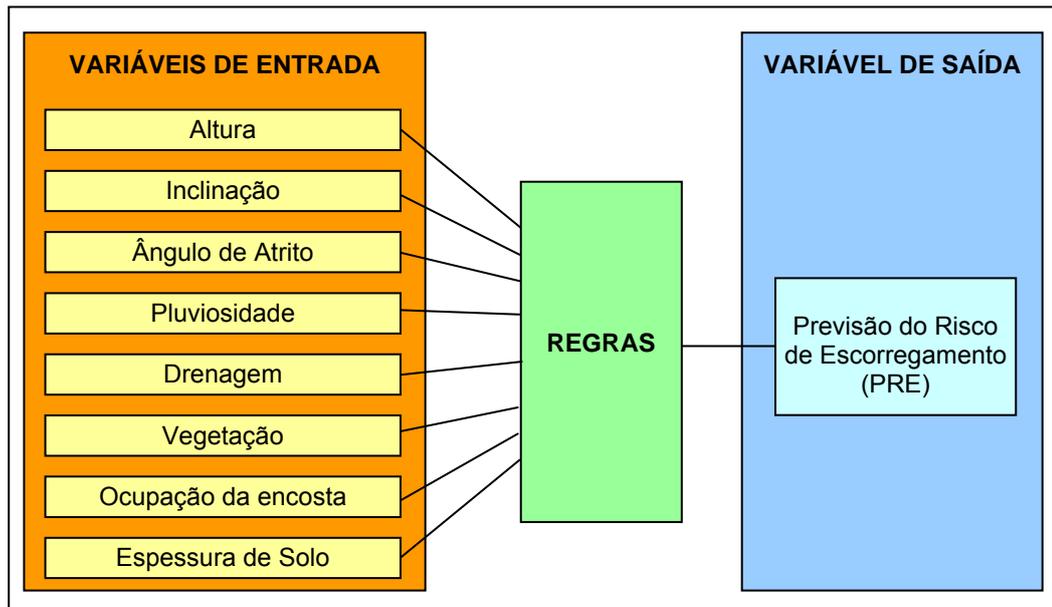


Figura 4.8. Variáveis do Modelo Fuzzy

Tabela 4.3. Valores Lingüísticos Propostos para as Variáveis

Variável Lingüística	Valores Lingüísticos (Adjetivos)			
Entrada				
Altura	Baixa	Média	Alta	
Inclinação	Baixa	Média	Alta	
Ângulo de Atrito	Baixo	Médio	Alto	
Pluviosidade	Leve	Moderada	Forte	
Drenagem	Ineficiente	Pouco Eficiente	Eficiente	
Vegetação	Rasteira	Arbustiva	Arbórea	
Ocupação da Encosta	Desordenada	Pouco Ordenada	Ordenada	
Espessura de Solo	Delgada	Espessa	Muito Espessa	
Saída				
Previsão do Risco	Inexistente	Baixo	Médio	Alto

4.6.1. Geometria da Encosta: Altura e Inclinação

O efeito das variáveis geométricas (altura e inclinação) foi inicialmente avaliado com o programa de equilíbrio limite Slope-W pertencente ao pacote de aplicativos da GEO-STUDIO, conhecido no meio técnico como Geo-Slope. Com esta ferramenta, foram analisadas diversas geometrias distintas, de forma a adquirir sensibilidade em termos da influência da altura e da inclinação na estabilidade de taludes.

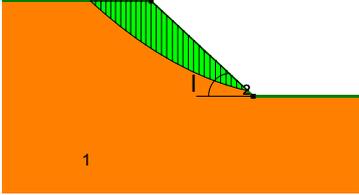
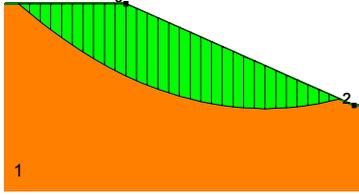
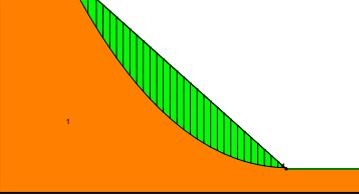
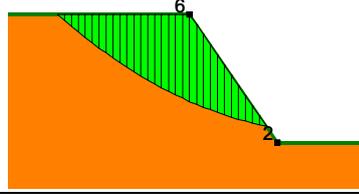
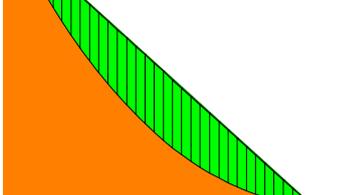
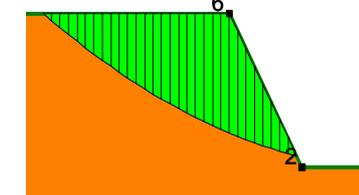
Cabe ressaltar que o programa de equilíbrio limite fornece um valor de fator de segurança para o talude analisado, sendo, portanto, um método determinístico. A lógica *Fuzzy*, ao contrário, fornece apenas uma previsão do risco de ruptura, ou o risco expresso em percentual. Nesta etapa do trabalho, não se pretendeu comparar os dois métodos, e sim,

adquirir sensibilidade para estabelecer as funções de pertinência para os adjetivos relativos à altura e à inclinação.

Para cada geometria analisada, foram considerados alguns parâmetros fixos como: peso específico do solo (γ) = 19 KN/m³, ângulo de atrito (ϕ) = 25° e coesão nula. Procedeu-se à variação da altura (h) e da inclinação (l) do talude, determinando-se o fator de segurança correspondente. As diferentes geometrias analisadas pelo programa Geo-Slope, bem como seus respectivos resultados estão apresentados no Anexo 2.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de duas análises. Na primeira análise, todos os parâmetros do solo e a inclinação (l=20°) do talude foram mantidos constantes, variando-se apenas a altura do talude. Na segunda análise, a variável consistiu na inclinação do talude, mantendo-se a altura constante e igual 5 m. Os resultados indicam que o fator de segurança do talude diminui com o aumento da altura ou da inclinação, o que é contrário à estabilidade. Estes parâmetros influenciam de forma significativa a estabilidade e podem ser considerados como condicionantes importantes.

Tabela 4.4. Influência da Geometria na Estabilidade de Taludes (Geo-Slope)

1ª Análise			2ª Análise		
Influência da Altura do Talude			Influência da Inclinação do Talude		
h (m)	Superfície Crítica	F.S.	l (°)	Superfície Crítica	F.S.
5		1,662	10		2,657
20		1,283	30		1,561
45		1,275	40		1,459

No estabelecimento dos adjetivos das variáveis geométricas (altura e inclinação), a lógica *Fuzzy* baseou-se na literatura existente e principalmente em observações de campo

da GEO-RIO (descritas nos Laudos de Vistoria), tomando como base as alturas e as inclinações mais susceptíveis a escorregamentos.

A Figura 4.9 mostra as funções de pertinência dos adjetivos (Baixa, Média e Alta) da Variável Altura. Observa-se que a função de pertinência do adjetivo Baixa é do tipo linear decrescente, com pertinência igual a 1 quando o talude é muito baixo, decrescendo à medida que a altura do talude aumenta, até o valor de pertinência 0 quando o talude possui 8 metros de altura. A função de pertinência do adjetivo Média é do tipo triangular, com grau de pertinência 0 quando o talude apresenta altura inferior a 5 metros, grau de pertinência igual a 1 para a altura de 15 metros, e grau de pertinência igual a 0 para a altura de 25 metros. Finalmente, a função de pertinência do adjetivo Alta é do tipo trapezoidal com pertinência 0 para taludes menores do que 20 metros, crescendo linearmente até o valor 1 quando a altura do talude atinge 25 metros. Para alturas superiores a este valor, a função de pertinência mantém-se constante e igual a 1.

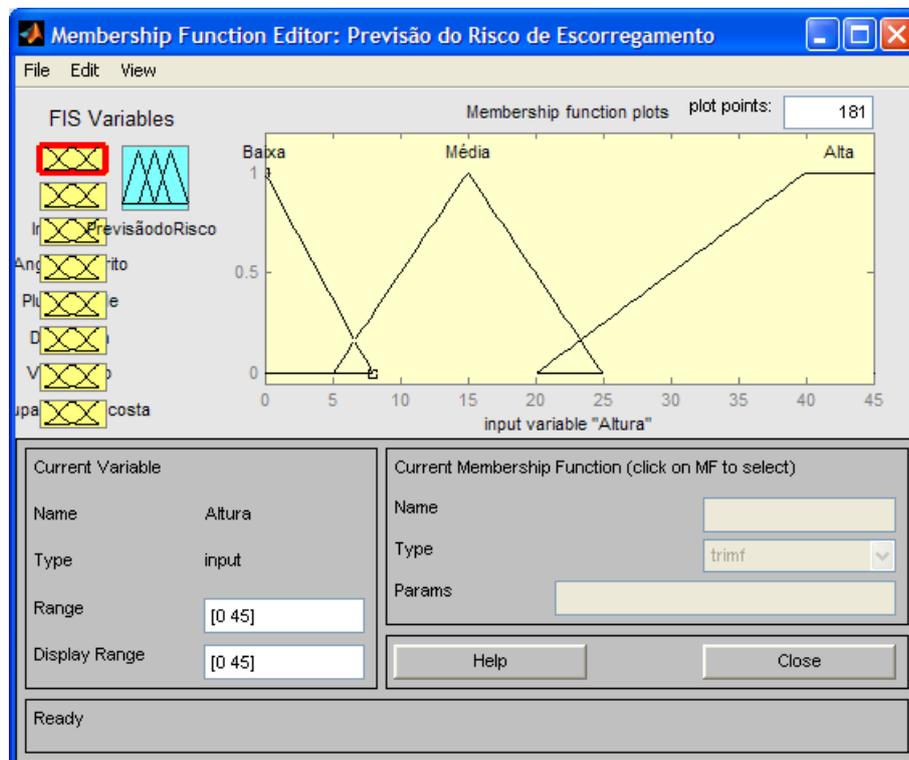


Figura 4.9. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável “Altura”

Para a variável Inclinação também foram atribuídos os adjetivos Baixa, Média e Alta. A Figura 4.10 mostra as funções de pertinência dos adjetivos da variável Inclinação. Nota-se que as funções de pertinência dos adjetivos Baixa, Média e Alta são, respectivamente, linear decrescente, triangular e trapezoidal.

A Tabela 4.5 apresenta de forma resumida os valores dos números *Fuzzy* dos Adjetivos das variáveis Altura e Inclinação.

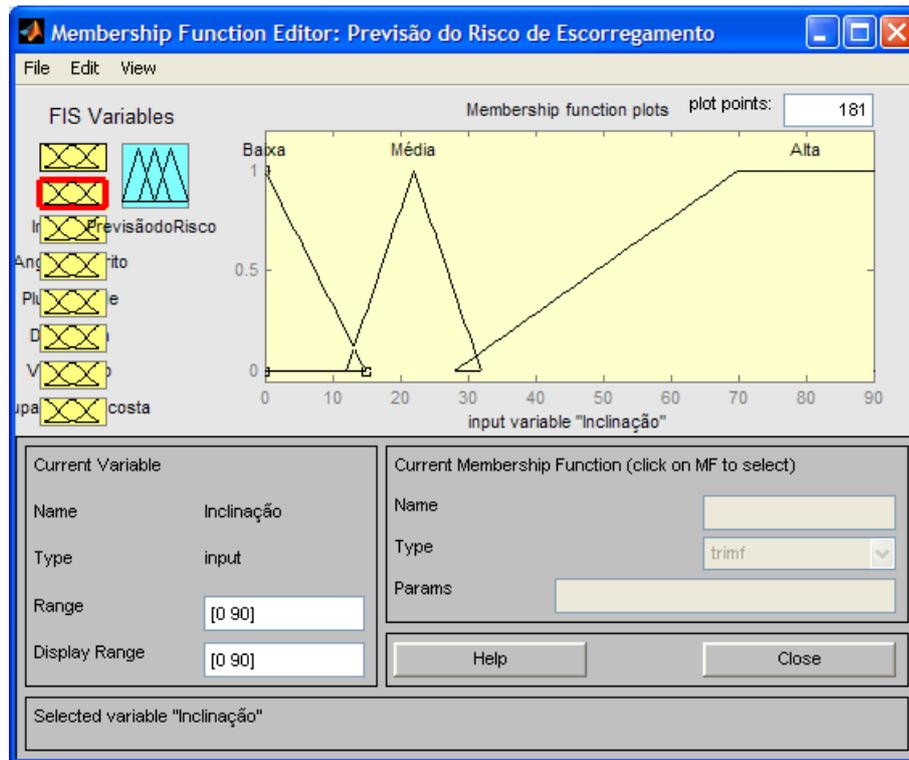


Figura 4.10. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável “Inclinação”

Tabela 4.5. Valores dos Números *Fuzzy* das Variáveis Altura e Inclinação

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Altura (m)				
Baixa	Linear Decrescente	-	0	8
Média	Triangular	5	15	25
Alta	Trapezoidal	20	25 a 45	-
Inclinação (°)				
Baixa	Linear Decrescente	-	0	15
Média	Triangular	12	22	32
Alta	Trapezoidal	28	40 a 90	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.6.2. Parâmetro de Resistência: Ângulo de Atrito

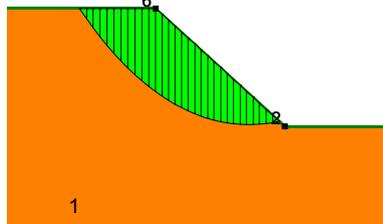
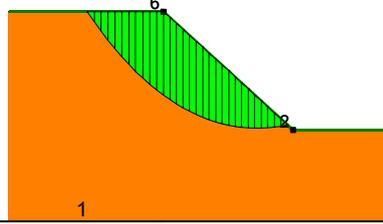
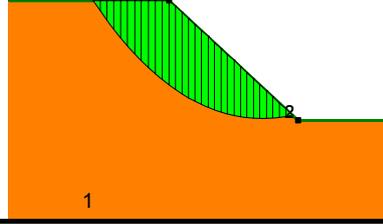
Para estabelecer os termos lingüísticos da variável Ângulo de Atrito, foram realizadas algumas análises preliminares com o programa Geo-Slope, de forma a adquirir sensibilidade quanto à influência deste parâmetro na estabilidade de taludes.

Para tanto, admitiu-se um talude homogêneo, com geometria fixa ($h=5\text{m}$ e $l=20^\circ$), peso específico igual 19 KN/m^3 e coesão nula. A influência do ângulo de atrito foi verificada, variando-se este parâmetro e determinando-se o fator de segurança correspondente.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados das análises por equilíbrio limite executadas com o programa Geo-Slope, que indicam que, coerentemente, o fator de segurança aumenta à medida que o ângulo de atrito aumenta, tendo em vista que este parâmetro está relacionado com a resistência do solo.

Os resultados mostraram que o ângulo de atrito influencia de forma significativa a estabilidade, sendo considerado como condicionante importante na elaboração da lógica *Fuzzy*.

Tabela 4.6. Influência do Ângulo de Atrito na Estabilidade de Taludes (Geo-Slope)

Influência do Ângulo de Atrito		
ϕ ($^\circ$)	Superfície Crítica	F.S.
20		1,219
29		1,850
36		2,470

Legenda: ϕ = Ângulo de Atrito

A Tabela 2.2, apresentada no Capítulo 2, reúne resultados de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto publicados na literatura, executados em solos residuais oriundos de diferentes tipos de rocha. A partir dos dados desta tabela, foi possível estabelecer uma faixa de valores de ângulo de atrito (entre 20° e 44°) para os solos do Rio de Janeiro.

A lógica *Fuzzy* incorporou os valores 20° e 44° , como limites inferior e superior da variável Ângulo de Atrito, sendo definidas as funções de pertinência dos adjetivos com base na literatura existente. A Figura 4.11 apresenta as funções de pertinência dos adjetivos

Baixo, Médio e Alto da variável Ângulo de Atrito, que são do tipo trapezoidal, triangular e trapezoidal, respectivamente.

A Tabela 4.7 resume os valores dos números *Fuzzy* dos Adjetivos da variável Ângulo de Atrito.

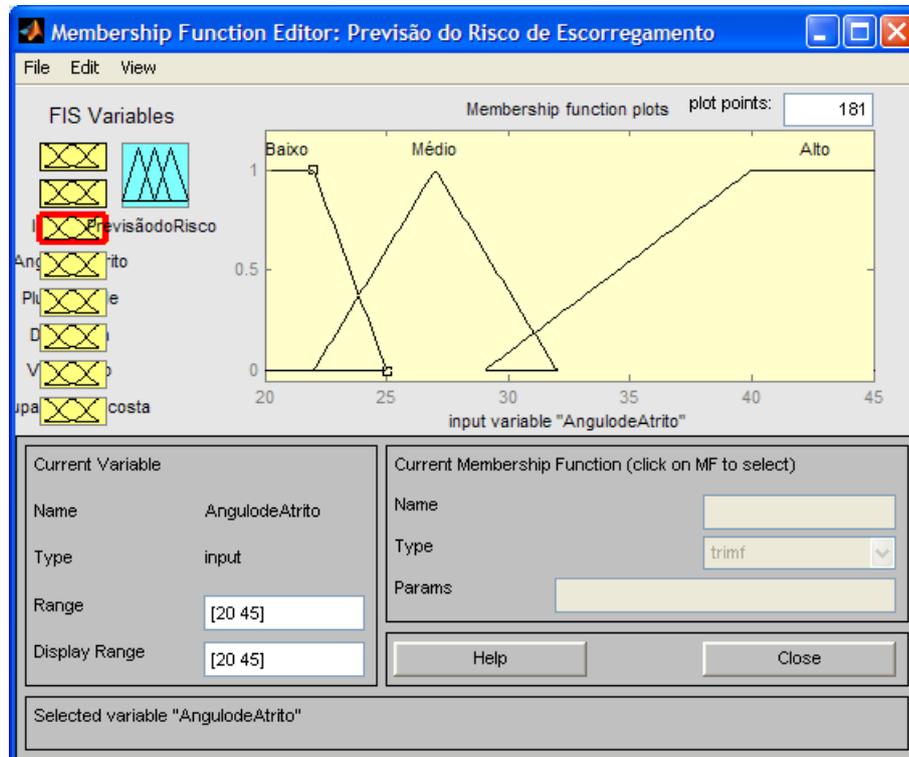


Figura 4.11. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Ângulo de Atrito

Tabela 4.7. Valores dos Números Fuzzy da Variável Ângulo de Atrito

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Ângulo de Atrito (°)				
Baixo	Trapezoidal	-	20 a 22	25
Médio	Triangular	22	27	32
Alto	Trapezoidal	29	34 a 45	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.6.3. Pluviosidade

A pluviosidade é um fator preponderante na avaliação da susceptibilidade a escorregamentos de talude, pois uma precipitação pluvial prolongada implica em uma infiltração contínua. Como conseqüência, ocorre a saturação do solo, reduzindo a coesão e a resistência do solo.

Como apresentado na Tabela 2.3 (Capítulo 2), a GEO-RIO classifica o tipo de chuva de acordo com a intensidade, baseando-se em episódios de escorregamentos relacionados a precipitações intensas (Sistema Alerta-Rio). Essa classificação segue a lógica convencional, ou seja, quando ocorre uma precipitação horária de 25mm, a chuva é classificada como Moderada. É interessante notar que este valor se encontra mais próximo da classificação Forte, que tem início com chuvas de intensidade de 25,1 mm/h. No entanto por ser uma classificação baseada na lógica padrão prevalece a primeira classificação.

Para definição dos adjetivos e pertinências nos conjuntos *Fuzzy* da variável pluviosidade, tomou-se como base a classificação da GEO-RIO (Tabela 2.3) e as vistorias associadas aos principais eventos pluviométricos ocorridos nos anos de 1998 a 2002 (Tabela 4.2). A Figura 4.12 apresenta a distribuição percentual de cada classificação (leve, moderada, forte e muito forte), onde se observa que a classificação Muito Forte obteve um percentual pequeno em relação às outras.

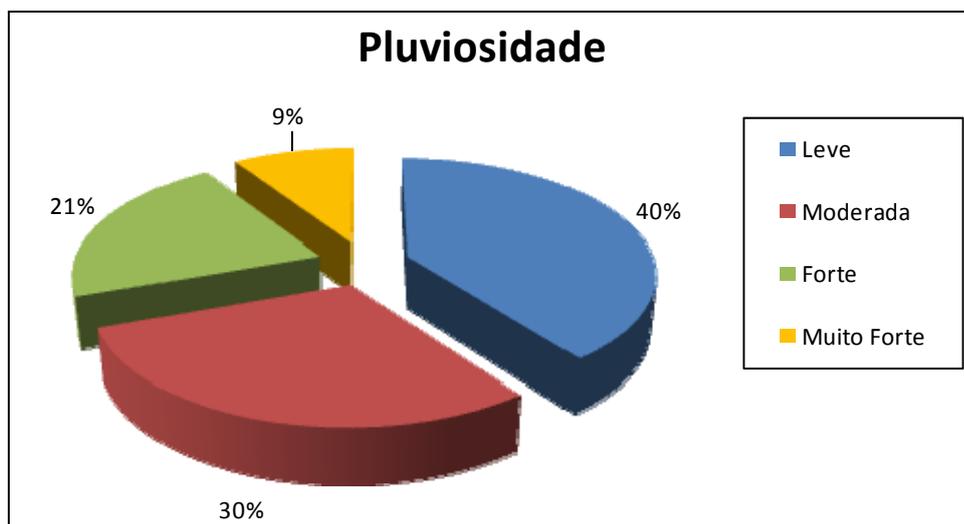


Figura 4.12. Percentual de Cada Classificação da Pluviosidade (Fonte: GEO-RIO)

Sendo assim, de forma a minimizar o número de adjetivos e conseqüente número de regras, optou-se por agrupar as classificações Forte e Muito Forte, sem que haja perda na eficiência do modelo *Fuzzy*.

As funções de pertinência dos adjetivos (Leve, Moderada e Forte) da variável Pluviosidade, são do tipo linear decrescente, triangular e trapezoidal, como mostra a Figura 4.13. Nota-se que a referida chuva de 25 mm seria classificada como Forte, com grau de pertinência de 0,4, indicando uma condição de transição entre as classificações Moderada e Forte. Os valores dos números *Fuzzy* apresentam-se resumidos na Tabela 4.8.

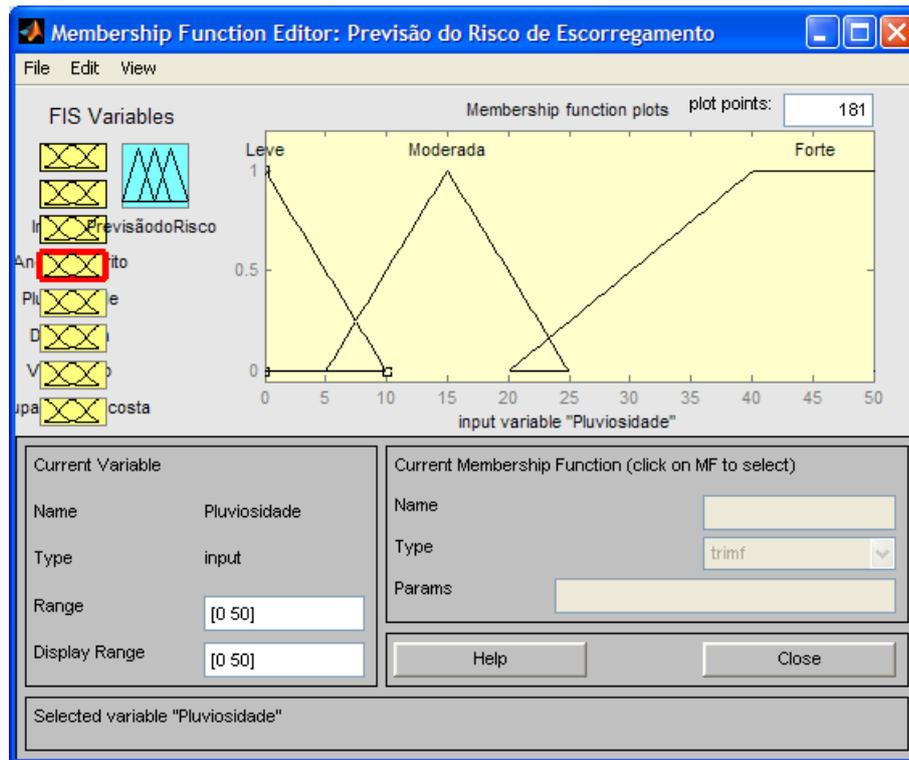


Figura 4.13. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Pluviosidade

Tabela 4.8. Valores dos Números *Fuzzy* da Variável Pluviosidade

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Pluviosidade (mm/h)				
Leve	Linear Decrescente	-	0	10
Moderada	Triangular	5	15	25
Forte	Trapezoidal	20	30 a 50	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.6.4. Drenagem

A drenagem é o fator que interfere no comportamento das águas superficiais e de subsuperfície, que por sua vez, têm influência direta na dinâmica dos processos erosivos e dos movimentos gravitacionais de massa.

Quanto mais eficiente for o sistema de drenagem, menor será a infiltração de água no solo e, portanto, menor será a susceptibilidade de escorregamento do talude.

A Figura 4.14 foi elaborada a partir da análise dos Laudos de Vitoria da GEO-RIO. Observa-se que apenas 23% dos casos analisados ocorreram em taludes com sistema de drenagem eficiente, o que salienta a importância da eficiência da drenagem, seja natural ou construída.

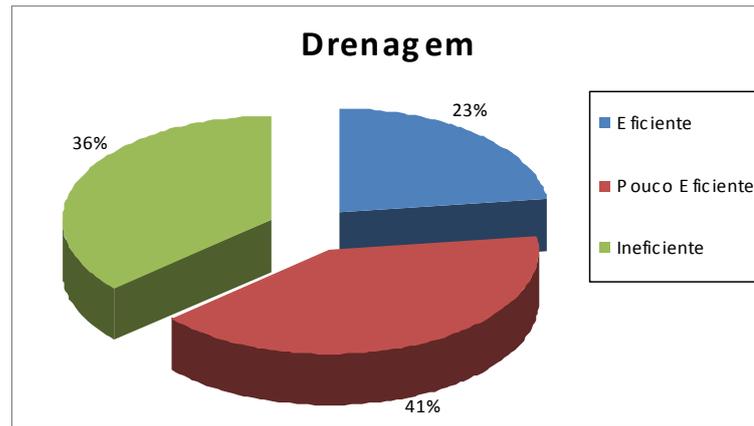


Figura 4.14. Eficiência da Drenagem nas Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO

A Figura 4.15 apresenta os adjetivos (Ineficiente, Pouco Eficiente e Eficiente) da variável Drenagem. Estes adjetivos refletem a eficiência da drenagem do talude analisado, variando de 0 % para drenagem ineficiente a 100 % para drenagem eficiente.

Observa-se que uma drenagem com eficiência de 20% situa-se na classificação Ineficiente, com grau de pertinência 0,5, e na classificação Pouco Eficiente, com grau de pertinência 0,25. A Tabela 4.9 apresenta de forma resumida as variáveis lingüísticas e os valores dos números *Fuzzy* de cada variável.

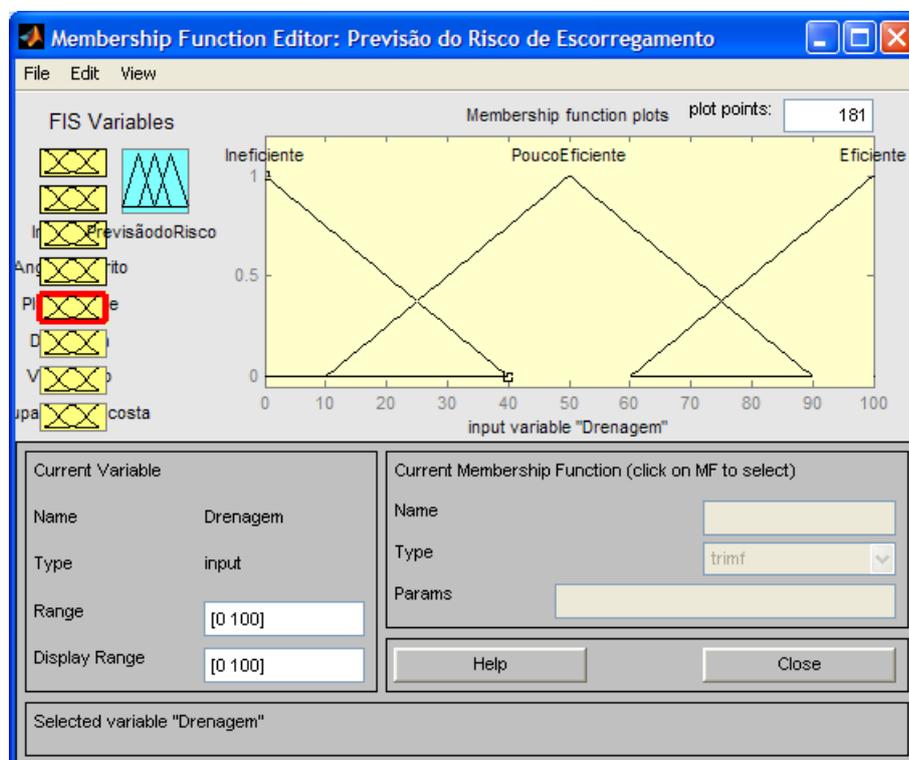


Figura 4.15. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Drenagem

Tabela 4.9. Valores dos Números *Fuzzy* da Variável Drenagem

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Drenagem (%)				
Ineficiente	Linear Decrescente	-	0	40
Pouco Eficiente	Triangular	10	50	90
Eficiente	Linear Crescente	60	100	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.6.5. Vegetação

Segundo Rabaco (2005), a vegetação é um fator de redistribuição da água sobre a encosta, e pode ser considerado como um fator mecânico que influi positivamente ou negativamente na encosta.

Os fatores positivos seriam a interceptação das águas da chuva, e o sistema radicular das raízes resultando na redução da erosão superficial e da poropressão, e no aumento de resistência do solo. Os fatores negativos seriam o efeito cunha e o efeito alavanca provocado pelas raízes, e o aumento da infiltração (Santos, 2000).

Já o desmatamento provoca a perda do equilíbrio do conjunto vegetação e maciço, devido à perda da resistência ao cisalhamento conferida pelo sistema radicular, acelerando processos erosivos, aumentando temporariamente o nível do lençol freático, com conseqüente redução dos efeitos estabilizadores da vegetação (Riedel et al., 2005).

A análise dos Laudos da GEO-RIO indica que as encostas vistoriadas no Município do Rio de Janeiro têm aproximadamente 35% de vegetação arbórea, 30% de vegetação arbustiva, 27% de vegetação rasteira e 8% sem qualquer tipo de vegetação, como mostrado na Figura 4.16.

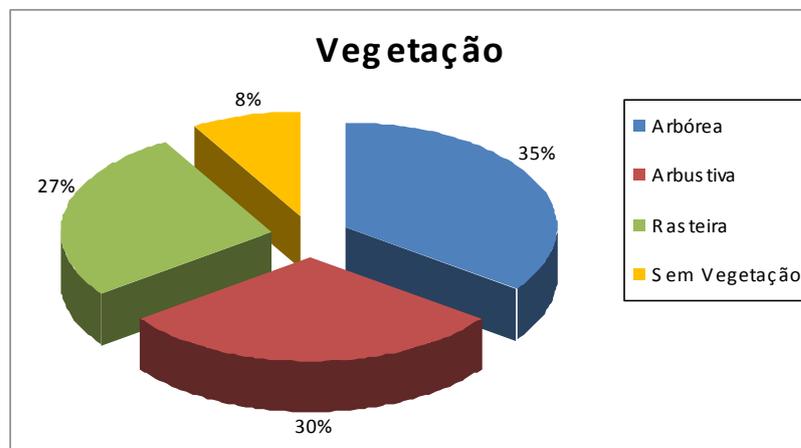


Figura 4.16. Tipos de Vegetação nas Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO

De acordo com considerações da literatura referentes aos tipos de vegetação, adotou-se como premissa, neste trabalho, a altura da vegetação para a definição dos adjetivos (Rasteira, Arbustiva e Arbórea). O adjetivo Rasteira refere-se à vegetação com altura média inferior ou igual a 1,5m. A vegetação com altura média entre 1,5m e 3,0m é classificada como Arbustiva. A partir de 3,0m de altura, a vegetação é considerada Arbórea. A Figura 4.17 apresenta as funções de pertinência dos adjetivos adotados para a representação da variável Vegetação.

Nota-se que uma árvore com altura média de 3,0 m de altura pertence a classificação Arbórea com grau de pertinência de 0,40 e à classificação Arbustiva com grau de pertinência 0,20.

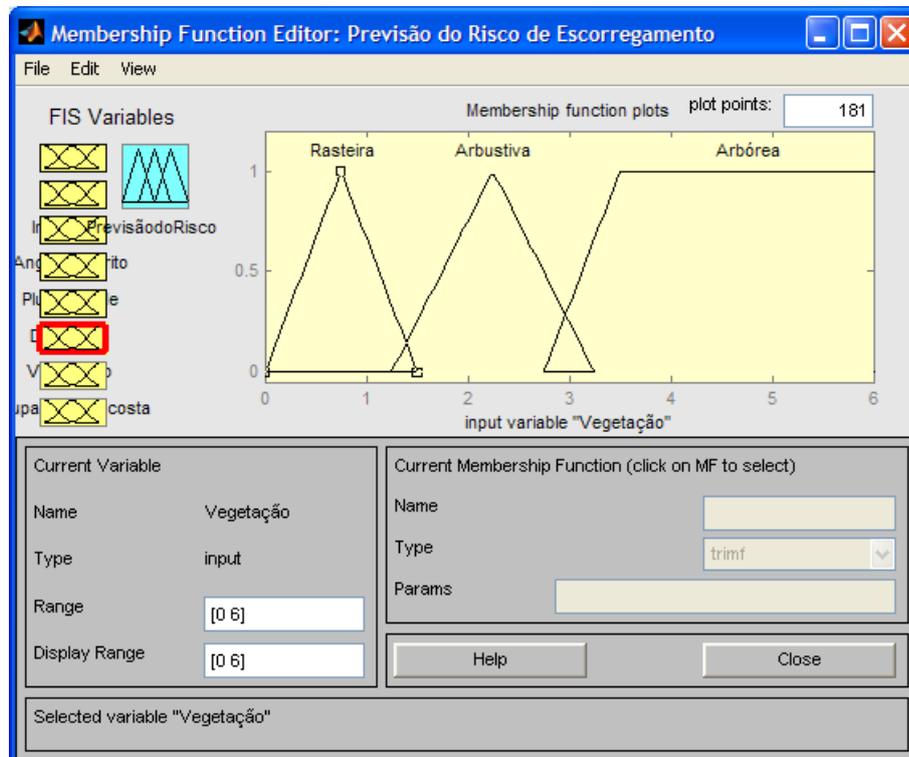


Figura 4.17. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Vegetação

Tabela 4.10. Valores dos Números Fuzzy da Variável Vegetação

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Vegetação (m)				
Rasteira	Triangular	0	0,75	1,5
Arbustiva	Triangular	1,25	2,25	3,25
Arbórea	Trapezoidal	2,75	3,5 a 6	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.6.6. Ocupação da Encosta

A forma de ocupação de uma encosta influencia diretamente na estabilidade, podendo criar, acelerar e/ou ampliar processos de instabilização.

Segundo análise dos laudos da GEO-RIO (Figura 4.18), 60% das vistorias foram realizadas em áreas onde a ocupação da encosta é desordenada. Nestas áreas, são realizados desmatamentos, cortes e aterros para construção de moradias, sem acompanhamento técnico. Como implicações, observam-se taludes de corte sem a devida estabilização e áreas irregulares de descarte de lixo. Ou seja, as áreas com ocupação desordenada apresentam maior susceptibilidade de escorregamento.

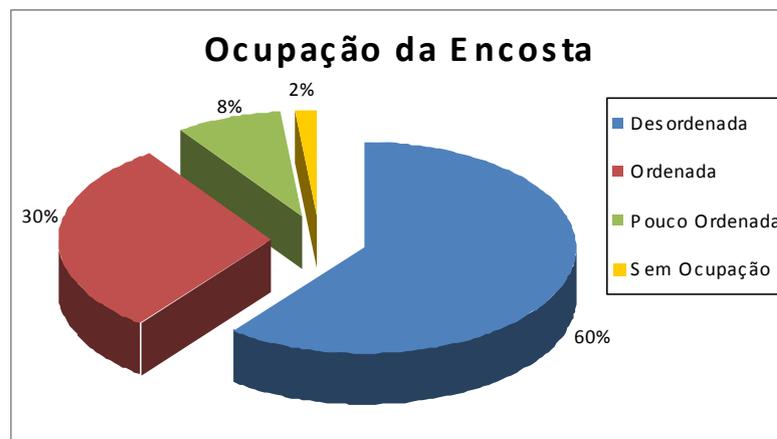


Figura 4.18. Tipo de Ocupação nas Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO

Cabe ressaltar que, quanto mais ordenada a ocupação de uma encosta, menor será o risco de acidente geotécnico. Desta forma, estabeleceu-se uma escala de 0 a 100 para valores da variável Ocupação da Encosta. Foi adotado o valor 100 para encostas ocupadas de forma Ordenada, em que a interferência humana não ocasiona risco de escorregamentos. Na medida em que se aumenta o grau de desordem na ocupação da encosta, diminui-se o valor atribuído a esta variável.

Com base no gráfico da Figura 4.18, foram definidos os adjetivos Desordenada, Pouco Ordenada e Ordenada da variável Ocupação da Encosta. As funções de pertinência destes adjetivos estão apresentadas na Figura 4.19, sendo do tipo triangular para os adjetivos Desordenada e Pouco Ordenada, e trapezoidal para o adjetivo Ordenada.

A Tabela 4.11 apresenta os valores dos números *Fuzzy* da variável Ocupação da Encosta. Observa-se que se o valor atribuído à ocupação for 35, a variável Ocupação da encosta pertence a classificação Desordenada e a classificação Pouco Ordenada, ambas com grau de pertinência 0,20.

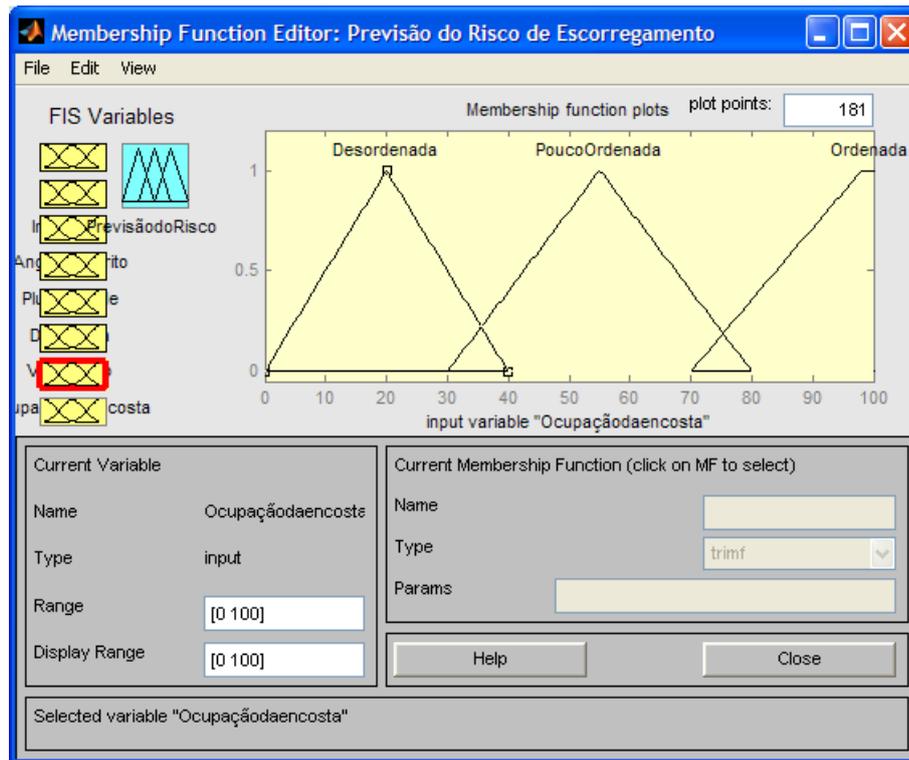


Figura 4.19. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Ocupação da Encosta

Tabela 4.11. Valores dos Números Fuzzy da Variável Ocupação da Encosta

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Ocupação da Encosta				
Desordenada	Triangular	0	20	40
Pouco Ordenada	Triangular	30	55	80
Ordenada	Trapezoidal	70	98 a 100	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.6.7. Espessura de Solo

A Espessura de Solo residual é um fator importante no desencadeamento de escorregamentos. Em regiões de clima tropical, é usual a ocorrência de capas espessas, tendo em vista o favorecimento dos fenômenos de intemperismo químico.

A experiência da GEO-RIO, apresentada na Figura 4.20, mostra que 63% das encostas vistoriadas apresentam espessura de solo delgada. Na maior parte dos casos vistoriados, detectou-se a ocorrência de risco instalado, sugerindo que espessuras de solo delgadas são susceptíveis à ocorrência de escorregamentos.

Uma justificativa para isso seria o fato de que camadas de solo delgadas saturam mais rapidamente em períodos chuvosos, favorecendo a ocorrência de movimentos de massa.

Por outro lado, quanto maior a espessura de solo, maior será o volume de material disponível para escorregamento. Pinto (2002) assume que quanto maior a espessura de solo, maior a susceptibilidade a escorregamentos.

No presente trabalho, no entanto, considerou-se que camadas de solo delgadas apresentam risco de escorregamento, e camadas de solo muito espessas também, existindo uma faixa intermediária (espessa) mais favorável à estabilidade.

Com base no gráfico da Figura 4.20, foram definidos os adjetivos Delgada, Espessa e Muito Espessa da variável Espessura de Solo. As funções de pertinência destes adjetivos estão apresentadas na Figura 4.21, sendo do tipo trapezoidal para os 3 adjetivos propostos.

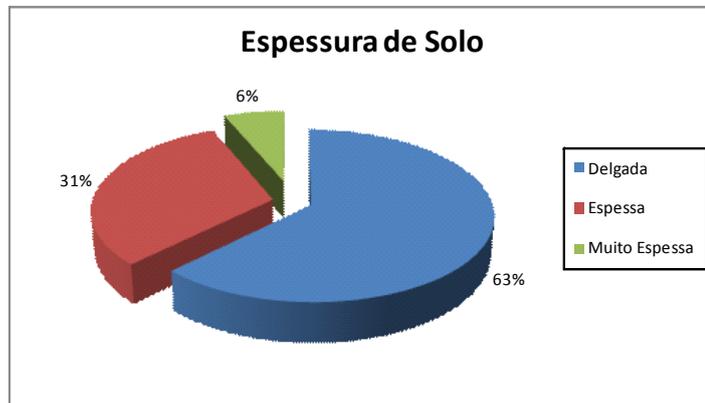


Figura 4.20. Espessuras de Solo das Encostas Vistoriadas pela GEO-RIO

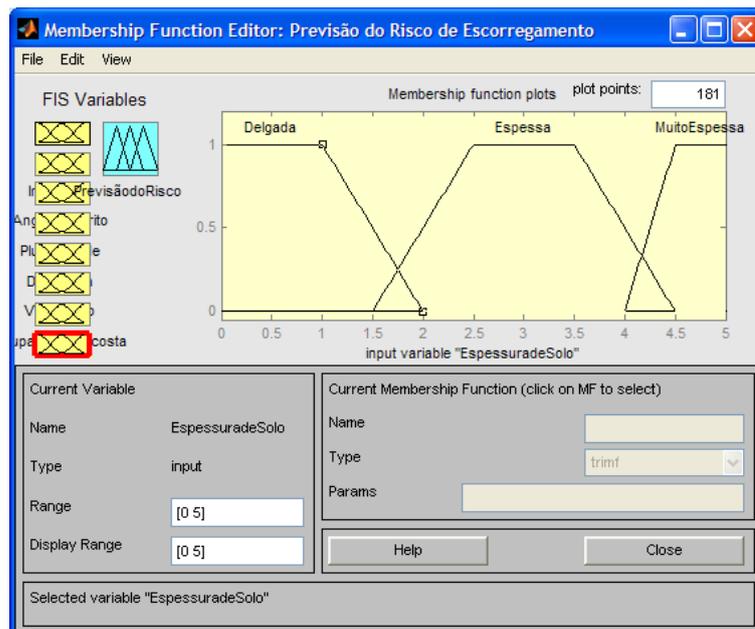


Figura 4.21. Funções de Pertinência dos Adjetivos da Variável Espessura de Solo

Tabela 4.12. Valores dos Números Fuzzy da Variável Espessura de Solo

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Espessura de Solo (m)				
Delgada	Trapezoidal	-	0 a 1	2
Espessa	Trapezoidal	1,5	2,5 a 3,5	4,5
Muito Espessa	Trapezoidal	4	4,5 a 5	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.6.8. Previsão do Risco de Escorregamento (PRE)

A variável de saída do sistema *Fuzzy* proposto neste trabalho é a Previsão do Risco de Escorregamento (PRE), que possui quatro adjetivos (Inexistente, Baixo, Médio, Alto).

Para a variável PRE adotou-se uma escala de 0 a 100, onde se convencionou que quanto menor o valor desta variável, menor será o risco de escorregamento da encosta ou talude em questão. A Figura 4.22 apresenta as funções de pertinência dos adjetivos da variável de saída (PRE).

O adjetivo Inexistente apresenta uma função de pertinência trapezoidal, com grau de pertinência igual a 1, para PRE inferiores a 20. Os adjetivos Baixo e Médio são representados por funções triangulares, e o adjetivo Alto apresenta função trapezoidal, com grau 1 para PRE superiores a 98.

Os números Fuzzy, associados à variável de saída, estão apresentados na Tabela 4.13. Verifica-se que se a lógica nebulosa, após o processo de inferência apresentar um valor de 60, a variável Previsão do Risco será classificada com o adjetivo Baixo e grau de pertinência 1.

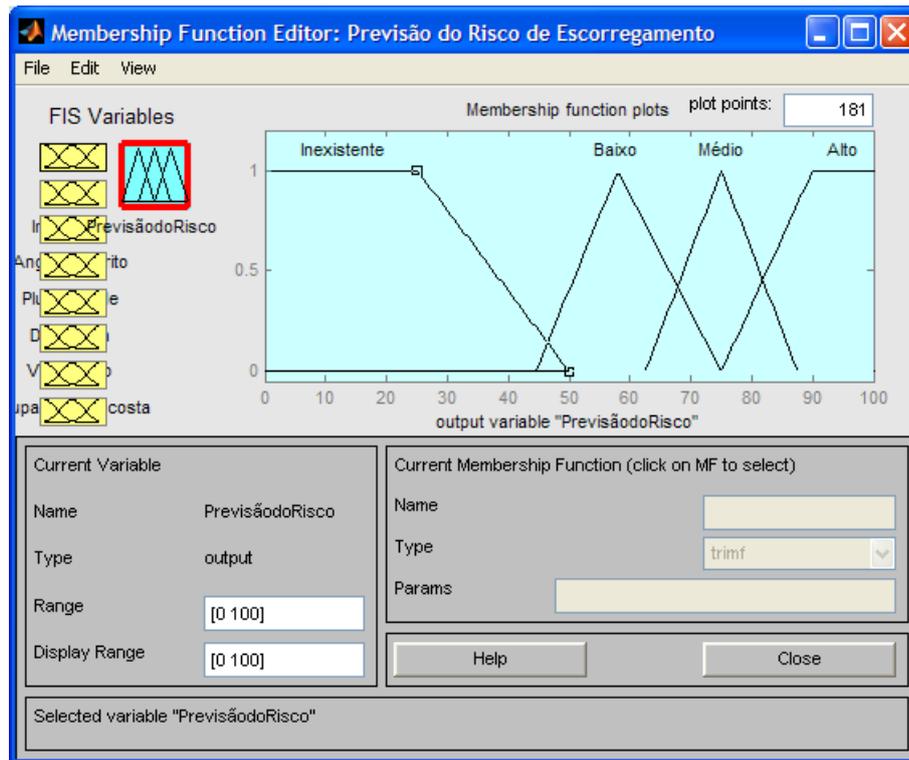


Figura 4.22. Funções de Pertinência da Variável de Saída (PRE)

Tabela 4.13. Valores dos Números Fuzzy da Variável de Saída (PRE)

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=0$
Previsão do Risco de Escorregamento (%)				
Inexistente	Trapezoidal	-	0 a 25	50
Baixo	Triangular	45	60	75
Médio	Triangular	62.5	75	87.5
Alto	Trapezoidal	75	90 a 100	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

4.7. Regras do Modelo Fuzzy

O Sistema de Inferência Fuzzy (SIF) adotado neste trabalho foi baseado no Método de Mandani (1975), tendo em vista a facilidade que este método possui para expressar as regras lógicas, aproximando-se do modo de raciocínio dos especialistas.

Segundo Maranhão (2005), o Método Mandani foi o primeiro SIF construído a partir da Teoria dos Conjuntos Nebulosos (Zadeh, 1975). A principal característica deste sistema de inferência Fuzzy é que tanto o antecedente (variáveis de entrada e seus adjetivos) quanto o conseqüente (variáveis de saída e seus adjetivos) das regras lógicas são

expressos em forma de variáveis lingüísticas. Isto facilita a utilização e construção das regras já que as aproxima do modo com que são expressas diariamente pelos especialistas da área de conhecimento em questão. O Método de Mandani encontra-se disponível para uso em diversos softwares, inclusive no MATLAB 7.0.

Como função de interseção, representando o “e” nas proposições lógicas, escolheu-se o método do mínimo, e para representar a função de agregação das proposições lógicas (união) foi escolhido o método do máximo. Ambos os métodos foram sugeridos inicialmente por Zadeh (1965). Para realizar a “defuzzificação” foi utilizado o método do centróide. O detalhamento do arquivo com as funções do Sistema de Inferência Fuzzy utilizados no MATLAB consta do Anexo 3 da presente dissertação.

Após o estudo dos diversos fatores condicionantes, análise dos dados da GEO-RIO e reuniões com especialistas desta Fundação, foram estabelecidas as regras lógicas que fazem parte da base de regras do Sistema de Inferência Fuzzy existente na metodologia apresentada.

Foram estabelecidas 144 regras, procurou-se excluir as regras que não se aplicavam a nenhuma situação possível, como por exemplo, a seguinte regra **Se** Drenagem é Eficiente **E** Pluviosidade é Leve **Então** a Previsão é de Risco Alto. Também ficaram de fora as regras que não influenciam de forma significativa o risco de escorregamento, por exemplo, a regra **Se** Inclinação é Baixa **E** Espessura de Solo é Espessa **Então** a Previsão é de Risco Baixo.

Durante a modelagem verificou-se que algumas regras quando ativadas deveriam possuir pesos menores que as demais, pois a influência da combinação das variáveis dessas regras era menor, portanto, da regra 25 a regra 60 o peso adotado foi de 0,8 e as demais permaneceram com peso 1,0.

A Tabela 4.14 mostra um exemplo das regras utilizadas na criação do modelo *Fuzzy* e o Anexo 4 reúne as 144 regras utilizadas neste modelo.

Na Tabela 4.14, a Regra 144 pode ser lida da seguinte forma: **Se** Altura é baixa **E** Inclinação é baixa **E** Ângulo de Atrito é Alto **E** Pluviosidade é Leve **E** Drenagem é Eficiente **E** Vegetação é Arbórea **E** Ocupação da Encosta é Ordenada **E** Espessura de Solo é Espessa, **Então** a Previsão é de Risco **Inexistente** de escorregamento.

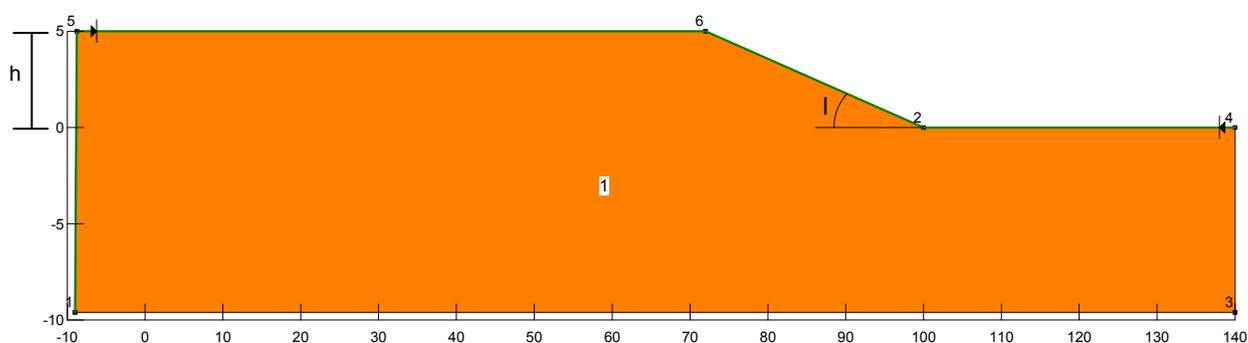
Tabela 4.14. Exemplo das Regras Utilizadas na Lógica Fuzzy

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão
1	Se	Baixa															ENTÃO	Baixo
2	Se	Média															ENTÃO	Médio
3	Se	Alta															ENTÃO	Alto
4	Se			Baixa													ENTÃO	Baixo
5	Se			Média													ENTÃO	Médio
6	Se			Alta													ENTÃO	Alto
7	Se					Baixo											ENTÃO	Alto
8	Se					Médio											ENTÃO	Médio
9	Se					Alto											ENTÃO	Baixo
10	Se							Leve									ENTÃO	Baixo
11	Se							Moderada									ENTÃO	Médio
12	Se							Forte									ENTÃO	Alto
13	Se									Eficiente							ENTÃO	Inexistente
14	Se									Pouco Eficiente							ENTÃO	Médio
15	Se									Ineficiente							ENTÃO	Alto
⋮																		
142	Se	Baixa	E	Baixa	E	Alto	E	Leve	E	Eficiente	E	Arbórea	E	Ordenada	E	Espessa	ENTÃO	Inexistente
143	Se	Alta	E	Alta	E	Baixo	E	Forte	E	Ineficiente	E	Rasteira	E	Desordenada	E	Delgada	ENTÃO	Alto
144	Se	Média	E	Média	E	Médio	E	Moderada	E	Pouco Eficiente	E	Arbustiva	E	Pouco Ordenada	E	Muito Espessa	ENTÃO	Médio

5. Análises Paramétricas

Neste capítulo, serão apresentadas análises paramétricas, considerando-se uma dada geometria padrão, com condições de drenagem, vegetação, pluviosidade, Espessura de solo e ocupação pré-estabelecidas. A partir deste caso padrão, cada uma das variáveis de entrada, envolvidas na previsão de risco, será variada, de forma a verificar a coerência do modelo *Fuzzy* e a influência de cada uma dessas variáveis na previsão do risco de escorregamento.

A Figura 5.1 apresenta a geometria do caso padrão analisado, e a Tabela 5.1 apresenta os valores iniciais das variáveis do modelo *Fuzzy*.



Legenda: h = Altura da Encosta; l = Inclinação da Face do Talude

Figura 5.1. Geometria Inicial Adotada nas Análises Paramétricas

Tabela 5.1. Valores Iniciais das Variáveis

Variáveis	Variável Lingüística	Valor Adotado
Altura (m)	Baixa	5
Inclinação (°)	Baixo	10
Ângulo de Atrito (°)	Baixo	20
Pluviosidade (mm/h)	Leve	5
Drenagem (%)	Ineficiente	3
Vegetação (m)	Rasteira	0,5
Ocupação da Encosta	Desordenada	15
Espessura de Solo (m)	Delgada	1

Após o estabelecimento dos valores iniciais das variáveis, foi utilizado o visualizador de regras do MATLAB para a inserção destes valores na modelagem através da caixa *Input*, mostrada na Figura 5.2.

Como pode ser observado, a inserção dos valores das variáveis na caixa *Input* deve ser realizada seguindo a ordem das variáveis, com um caractere de espaço entre elas,

usando-se colchetes no início e no fim da seqüência de números. No caso padrão analisado, a inserção será dada por: [5 10 20 5 3 0.5 15 1].

Após a inserção dos dados iniciais na caixa *Input*, a lógica *Fuzzy* forneceu uma Previsão do Risco de Escorregamento de 61,7%, correspondendo a uma condição de Risco Baixo de Escorregamento, como apresentado na Figura 4.22.

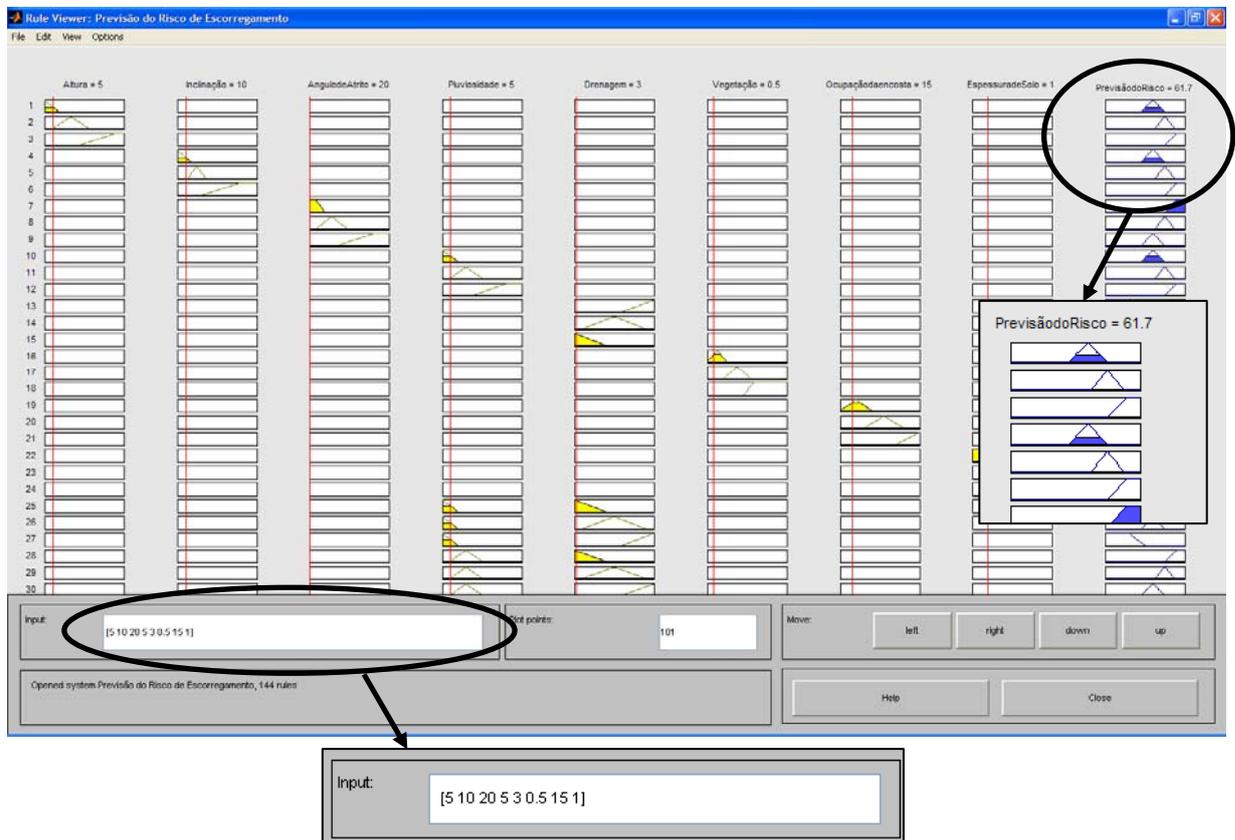


Figura 5.2. Visualizador de Regras do MATLAB

Uma vez determinada a previsão de risco de escorregamento do caso padrão, procedeu-se à variação de cada uma das variáveis de influência do modelo. Os itens subsequentes apresentam os resultados das análises, considerando-se as seguintes variáveis: altura, inclinação, ângulo de atrito, pluviosidade, drenagem, vegetação, ocupação da encosta e Espessura de solo.

5.1. Variável: Altura do Talude

A Tabela 5.2 apresenta as previsões de risco de escorregamento para os diferentes valores de altura adotados. Estes valores variaram de 1 m a 45 m, abrangendo os adjetivos Baixa, Média e Alta da variável Altura.

Observa-se que os PREs obtidos através da variação na Altura são coerentes com o que foi exposto a respeito dessa variável, ou seja, se a altura do talude aumenta, o risco de

escorregamento também aumenta. Taludes de maior altura apresentam maior susceptibilidade a escorregamentos.

O modelo *Fuzzy*, proposto na presente dissertação, forneceu uma previsão de risco baixo (61,5%) para taludes baixos, e uma previsão de risco médio/alto, para taludes altos. Ressalta-se que o risco de escorregamento depende, também, das outras variáveis adotadas.

Tabela 5.2. Valores Adotados para Variável Altura

Variável	Valor Adotado (m)	Caixa Input	PRE (%)
Altura	1	[1 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,5
	3	[3 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,6
	10	[10 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,6
	20	[20 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,7
	22	[22 10 20 5 3 0.5 15 1]	62,8
	23	[23 10 20 5 3 0.5 15 1]	66,9
	24	[24 10 20 5 3 0.5 15 1]	72,0
	25	[25 10 20 5 3 0.5 15 1]	78,3
	50	[50 10 20 5 3 0.5 15 1]	78,3

A Figura 5.3 mostra o comportamento do modelo *Fuzzy* com relação à variável altura. Para taludes baixos, considerando-se as condições de inclinação, resistência, vegetação, drenagem, ocupação e Espessura de solo pré-estabelecidas, observa-se que a previsão de risco de escorregamento é baixa, mantendo-se assim para taludes de média altura. No entanto, na transição entre os adjetivos média e alta, observa-se que o risco de escorregamento cresce significativamente, atingindo a transição entre risco médio/alto, porém com grau de pertinência baixo do risco alto ($\approx 0,2$), mesmo para alturas de 50 m.

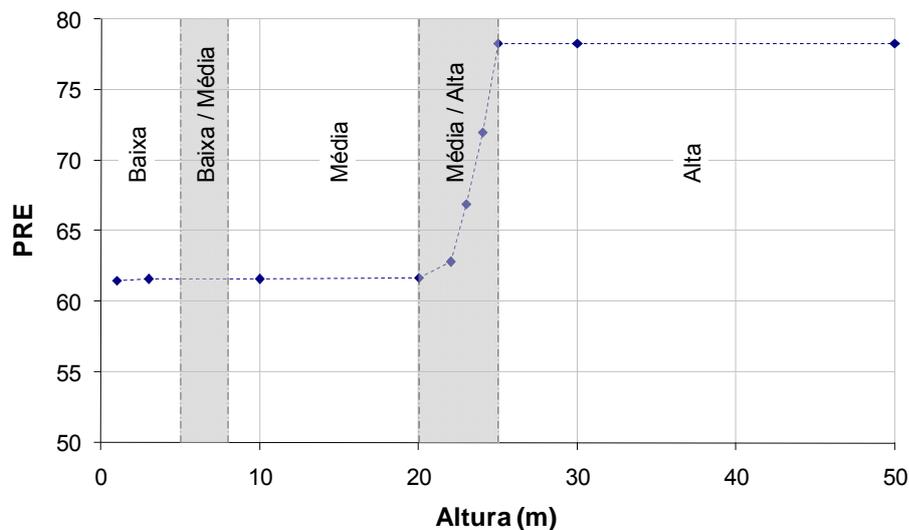


Figura 5.3. Variação de PRE com a Altura do Talude

Os resultados indicam que, dadas as demais condições do caso padrão, no talude analisado ocorreu um aumento significativo de PRE na faixa de transição entre taludes considerados médios e altos.

Cabe ressaltar que o talude analisado apresenta inclinação baixa, fato que justifica a faixa de valores de PRE entre os adjetivos Baixo e Médio.

5.2. Variável: Inclinação do Talude

A Tabela 5.3 apresenta os valores adotados para a variável Inclinação, e a correspondente Previsão do Risco de Escorregamento (PRE). Observa-se que, como esperado, os valores de PRE aumentam com o aumento da Inclinação. De fato, taludes mais inclinados são mais susceptíveis a escorregamentos.

Tabela 5.3. Valores Adotados para Variável Inclinação

Variável	Valor Adotado (°)	Caixa Input	PRE (%)
Inclinação	1	[5 1 20 5 3 0.5 15 1]	60,3
	5	[5 5 20 5 3 0.5 15 1]	60,3
	8	[5 8 20 5 3 0.5 15 1]	60,3
	10	[5 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,7
	11	[5 11 20 5 3 0.5 15 1]	64,1
	12	[5 12 20 5 3 0.5 15 1]	66,9
	13	[5 13 20 5 3 0.5 15 1]	70,2
	14	[5 14 20 5 3 0.5 15 1]	73,9
	15	[5 15 20 5 3 0.5 15 1]	78,3
	18	[5 18 20 5 3 0.5 15 1]	78,3
	25	[5 25 20 5 3 0.5 15 1]	78,3
	30	[5 30 20 5 3 0.5 15 1]	78,3
	50	[5 50 20 5 3 0.5 15 1]	78,3

A influência da inclinação do talude na previsão do risco de ruptura está ilustrada na Figura 5.4. Verifica-se que o PRE é baixo quando a inclinação é baixa e aumenta significativamente quando a inclinação aproxima-se e situa-se na zona de transição Baixa/Média, sendo então constante para inclinações iguais ou superiores à inclinação média. Certamente a constância do valor de PRE em 78,3%, para inclinações médias e altas, está relacionada ao fato das outras variáveis utilizadas no modelo fuzzy se manterem constantes ao longo da análise.

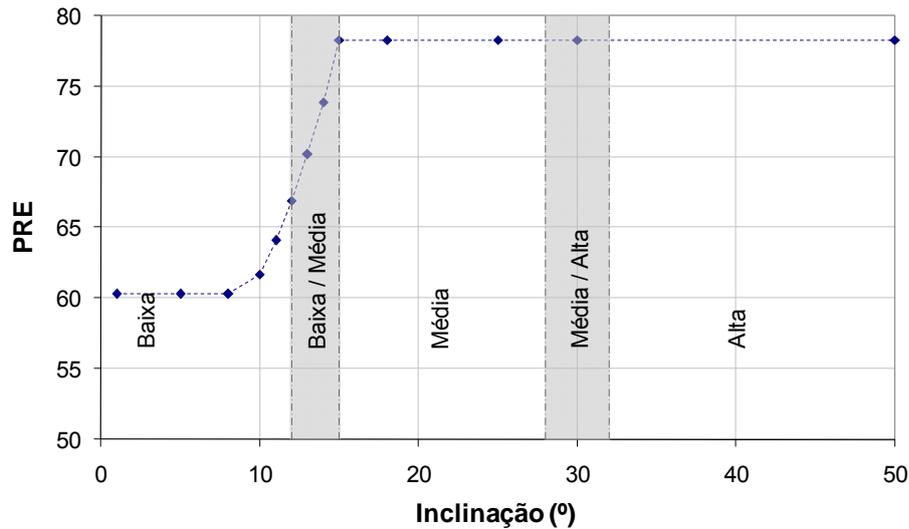


Figura 5.4. Variação de PRE com a Inclinação do Talude

5.3. Variável: Ângulo de Atrito do Solo

A variável “ângulo de atrito” representa a resistência do solo, tendo em vista que no modelo proposto não foi introduzido o parâmetro de coesão do solo. A não introdução deste parâmetro no modelo apresenta as seguintes justificativas:

1. A lógica nebulosa é uma análise qualitativa, na qual é necessária apenas uma sensibilidade em termos da resistência do solo. Modelos determinísticos trabalham com valores de parâmetros, enquanto modelos qualitativos trabalham com experiência e sensibilidade;

2. A coesão é um parâmetro de resistência significativamente influenciado pela pluviosidade. A presença de água no solo pode provocar uma redução significativa de coesão. Esta constatação torna o desenvolvimento do modelo *Fuzzy* bastante complexo, introduzindo um grande número de regras.

Desta forma, tendo em vista o caráter qualitativo da lógica nebulosa, optou-se por introduzir apenas a variável “ângulo de atrito” como parâmetro de resistência do solo, uma vez que o modelo proposto não busca um valor quantitativo de risco e sim, uma previsão de risco, com uma abordagem essencialmente qualitativa.

A Tabela 5.4 apresenta os valores adotados para a variável Ângulo de Atrito e a Previsão do Risco de Escorregamento (PRE) correspondente. Observa-se que, coerentemente, o risco de escorregamento diminui com o aumento do ângulo de atrito, ou seja, com o aumento da resistência do solo.

Tabela 5.4. Valores Adotados para Variável Ângulo de Atrito

Variável	Valor Adotado (°)	Caixa Input	PRE (%)
Ângulo de Atrito	20	[5 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,7
	22	[5 10 22 5 3 0.5 15 1]	61,7
	25	[5 10 25 5 3 0.5 15 1]	61,1
	34	[5 10 34 5 3 0.5 15 1]	61,1
	37	[5 10 35 5 3 0.5 15 1]	61,0
	40	[5 10 40 5 3 0.5 15 1]	61,0
	45	[5 10 45 5 3 0.5 15 1]	61,0

A Figura 5.5 ilustra a variação de PRE com a variável “ângulo de atrito”. Nota-se uma redução suave de PRE com o aumento ângulo de atrito, sem ocorrência de variações abruptas entre as transições Baixo/Médio e Médio/Alto.

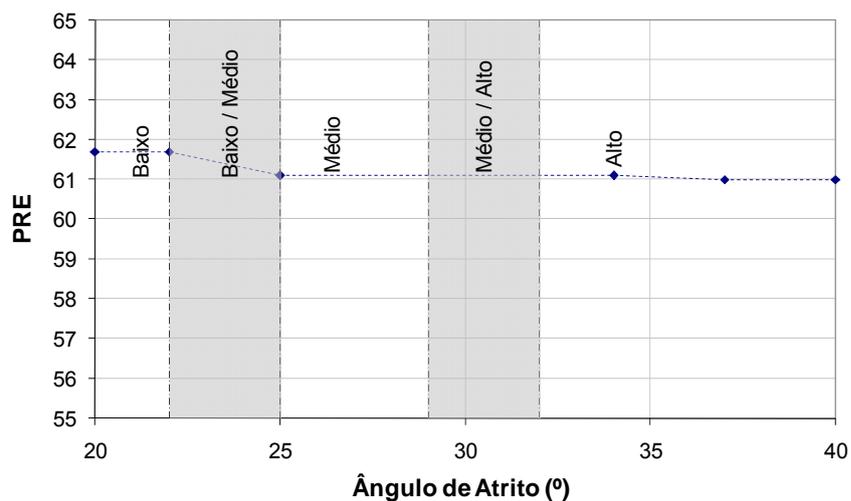


Figura 5.5. Variação de PRE com o Ângulo de Atrito do Solo

5.4. Variável: Pluviosidade

A Tabela 5.5 apresenta os valores adotados para a variável Pluviosidade, e os respectivos valores de Previsão do Risco de Escorregamento (PRE). Como comentado anteriormente, a pluviosidade é um fator importante e, muitas vezes determinante, no desencadeamento de escorregamentos de solos.

Esta variável, no entanto, está relacionada à condição de drenagem, que permite a saturação da massa de solo, à vegetação, que condiciona as taxas de infiltração e escoamento, e à Espessura de solo, que satura mais rapidamente quanto mais delgada.

Portanto, a análise individual de cada uma destas variáveis deve levar em conta quais as condições das variáveis que se inter-relacionam. Por exemplo, no caso padrão, variações em uma variável (pluviosidade) podem não surtir tanto efeito, se os valores das outras variáveis (Espessura de solo, vegetação, drenagem e geometria) permanecem constantes.

Os resultados da Tabela 5.5 indicam que, para valores de pluviosidade leve, a previsão de risco de escorregamento é de 61,6%, ou seja, risco baixo. À medida que a pluviosidade torna-se mais intensa, maiores são os riscos de escorregamentos, o que é coerente e mostra a boa funcionalidade do modelo.

Tabela 5.5. Valores Adotados para Variável Pluviosidade

Variável	Valor Adotado (mm/h)	Caixa Input	PRE (%)
Pluviosidade	1	[5 10 20 1 3 0.5 15 1]	61,5
	2	[5 10 20 2 3 0.5 15 1]	61,6
	3	[5 10 20 3 3 0.5 15 1]	61,6
	4	[5 10 20 4 3 0.5 15 1]	61,6
	5	[5 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,7
	6	[5 10 20 6 3 0.5 15 1]	61,7
	7	[5 10 20 7 3 0.5 15 1]	63,0
	8	[5 10 20 8 3 0.5 15 1]	67,2
	9	[5 10 20 9 3 0.5 15 1]	72,6
	10	[5 10 20 10 3 0.5 15 1]	79,4
	13	[5 10 20 13 3 0.5 15 1]	79,4
	15	[5 10 20 15 3 0.5 15 1]	79,4
	23	[5 10 20 23 3 0.5 15 1]	79,4
30	[5 10 20 30 3 0.5 15 1]	79,4	

Analisando estes resultados a partir da Figura 5.6, observa-se que o risco aumenta significativamente na transição entre pluviosidade leve e moderada, mantendo-se constante quando ocorre a transição entre pluviosidade moderada e forte. Certamente, a constância do valor de PRE em 79,4%, para pluviosidades moderadas e fortes, está relacionada ao fato dos fatores Espessura de solo, drenagem, vegetação e geometria manterem-se constantes. De fato, o talude padrão apresenta altura e inclinação baixas, o que justifica o fato de que este talude mantenha-se estável, mesmo em épocas de pluviosidade alta.

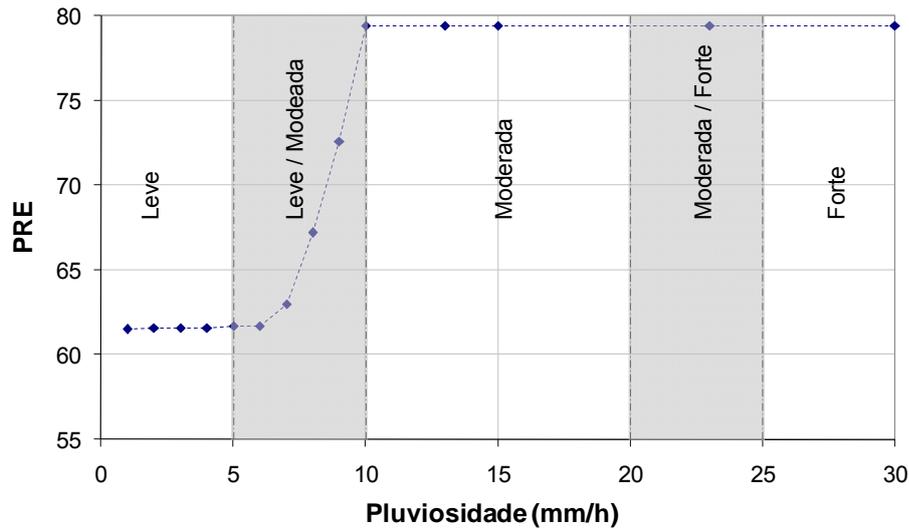


Figura 5.6. Variação de PRE com a Pluviosidade

5.5. Variável: Sistema de Drenagem

A Tabela 5.6 apresenta os valores adotados para a variável Drenagem e os respectivos valores de Previsão do Risco de Escorregamento (PRE). Nota-se que o risco de escorregamento em taludes com um sistema de drenagem ineficiente é superior ao risco envolvido em taludes com drenagem eficiente, seja ela natural ou construída, como comentado anteriormente. De fato, a ausência de um sistema de drenagem permite o acúmulo de água, provocando a saturação do solo, com conseqüente perda de resistência.

Tabela 5.6. Valores Adotados para Variável Drenagem

Variável	Valor Adotado (%)	Caixa Input	PRE (%)
Drenagem	5	[5 10 20 5 5 0.5 15 1]	61,7
	20	[5 10 20 5 20 0.5 15 1]	61,7
	40	[5 10 20 5 40 0.5 15 1]	61,7
	60	[5 10 20 5 60 0.5 15 1]	61,7
	80	[5 10 20 5 80 0.5 15 1]	56,7
	90	[5 10 20 5 90 0.5 15 1]	51,4
	95	[5 10 20 5 95 0.5 15 1]	49,3
	100	[5 10 20 5 100 0.5 15 1]	47,6

A variação de PRE com a eficiência do sistema de drenagem, apresentada na Figura 5.7, mostra que para o caso padrão analisado, a redução do risco de escorregamento ocorre na transição entre os sistemas de drenagem pouco eficiente e eficiente. No intervalo de eficiência de 0 a 60% (ineficiente a pouco eficiente), o valor de PRE manteve-se constante e igual a 61,7%, uma vez que existem outras variáveis intervenientes no modelo que

permanecem constantes. Este valor representa um baixo risco de escorregamento. Para um sistema de drenagem eficiente, o valor de PRE de 47,6% indica um risco na faixa de transição entre baixo e inexistente.

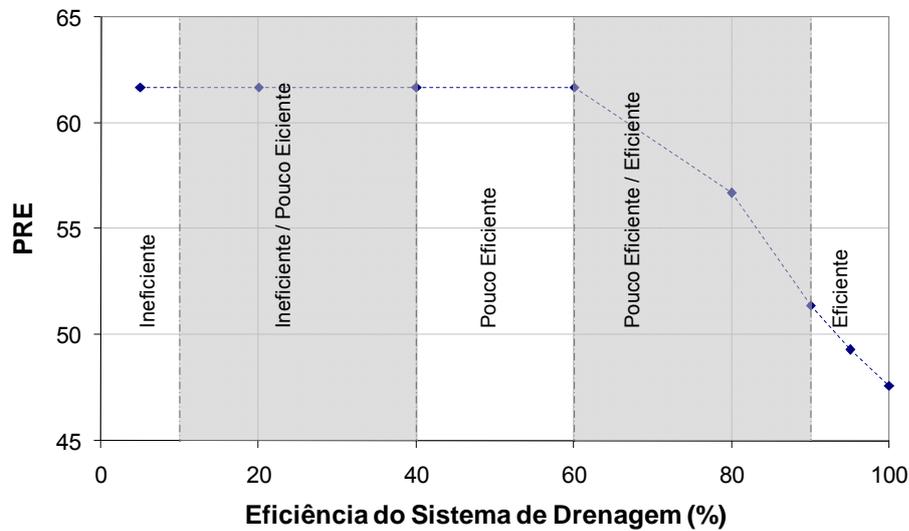


Figura 5.7. Variação de PRE com a Eficiência do Sistema de Drenagem

5.6. Variável: Vegetação

Os valores adotados para a variável Vegetação, a forma de inserção na caixa input do visualizador de regras do MATLAB e a Previsão do Risco de Escorregamento (PRE) para cada um dos valores, estão apresentados na Tabela 5.7. Observa-se que o Risco de escorregamento diminui com o aumento da altura da vegetação, coerentemente com o que foi exposto a respeito desta variável.

Tabela 5.7. Valores Adotados para Variável Vegetação

Variável	Valor Adotado (m)	Caixa Input	PRE (%)
Vegetação	0	[5 10 20 5 3 0 15 1]	61,7
	1,0	[5 10 20 5 3 1.0 15 1]	61,7
	1,5	[5 10 20 5 3 1.5 15 1]	61,7
	2,0	[5 10 20 5 3 2.0 15 1]	59,5
	2,4	[5 10 20 5 3 2.4 15 1]	59,5
	2,75	[5 10 20 5 3 2.75 15 1]	59,5
	3,1	[5 10 20 5 3 3.1 15 1]	57,6
	3,25	[5 10 20 5 3 3.25 15 1]	53
	3,3	[5 10 20 5 3 3.3 15 1]	51,7
	3,4	[5 10 20 5 3 3.4 15 1]	49,4
	3,5	[5 10 20 5 3 3.5 15 1]	47,6
	4,0	[5 10 20 5 3 4.0 15 1]	47,6
	6,0	[5 10 20 5 3 6 15 1]	47,6

Analisando a variação de PRE com a altura da vegetação (Figura 5.7), verifica-se que para o caso padrão analisado, a redução do risco de escorregamento inicia na vegetação arbustiva, ocorrendo um decréscimo abrupto na transição entre as vegetações Arbustiva/Arbórea. Para a vegetação Arbórea, a previsão de risco de escorregamento permanece constante e igual a 47,6%, indicando um risco na faixa de transição entre baixo e inexistente. No intervalo de vegetação com altura entre 0 a 1,5 m, o valor de PRE manteve-se constante e igual a 61,7%, uma vez que existem outras variáveis intervenientes no modelo que permanecem constantes.

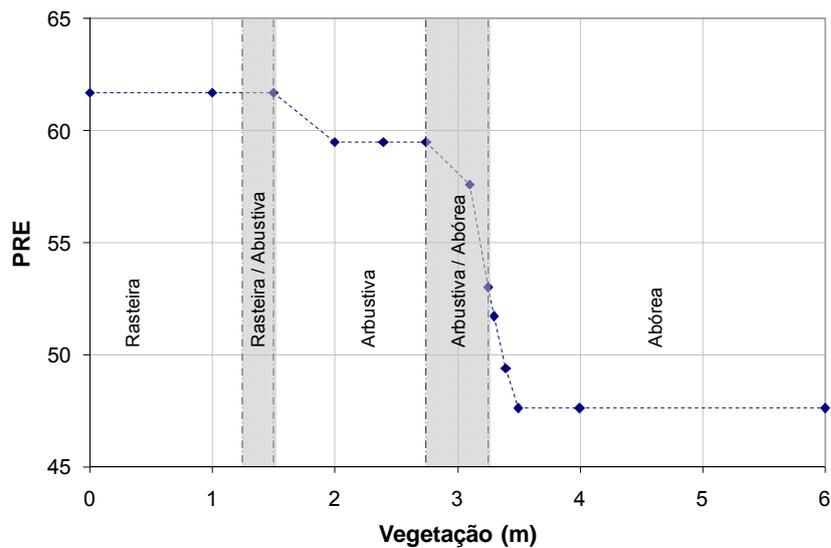


Figura 5.8. Variação de PRE com a Vegetação

5.7. Variável: Ocupação da Encosta

Na Tabela 5.8, estão apresentados os valores adotados para a variável Ocupação da Encosta, e os valores de Previsão do Risco de Escorregamento (PRE) obtidos para cada um deles. Observa-se uma redução do risco de escorregamento na medida em que a ocupação da encosta torna-se mais ordenada.

Como comentado anteriormente, na ocupação desordenada das encostas é comum a execução de cortes e aterros para a construção de moradias, sem nenhum tipo de acompanhamento técnico. Adicionalmente, observa-se a deposição de lixo em locais inapropriados, o que aumenta a susceptibilidade a escorregamentos de massa.

A Figura 5.9 ilustra o impacto da variável Ocupação na previsão do risco de escorregamento. Observa-se uma redução suave de PRE entre os limites desordenada (61,7%) e pouco ordenada (60,9%), tornando-se mais acentuada quando a ocupação é ordenada (47,6%).

Ressalta-se que o caso padrão analisado, com as condições de geometria, Espessura de solo, vegetação, pluviosidade, resistência e drenagem pré-estabelecidas, apresenta baixo risco de escorregamento, mesmo em condições de ocupação desordenada.

Tabela 5.8. Valores Adotados para Variável Ocupação da Encosta

Variável	Valor Adotado	Caixa Input	PRE (%)
Ocupação da Encosta	20	[5 10 20 5 3 0.5 10 1]	61,7
	40	[5 10 20 5 3 0.5 40 1]	61,7
	60	[5 10 20 5 3 0.5 60 1]	61,6
	80	[5 10 20 5 3 0.5 80 1]	60,9
	90	[5 10 20 5 3 0.5 90 1]	52,0
	100	[5 10 20 5 3 0.5 100 1]	47,6

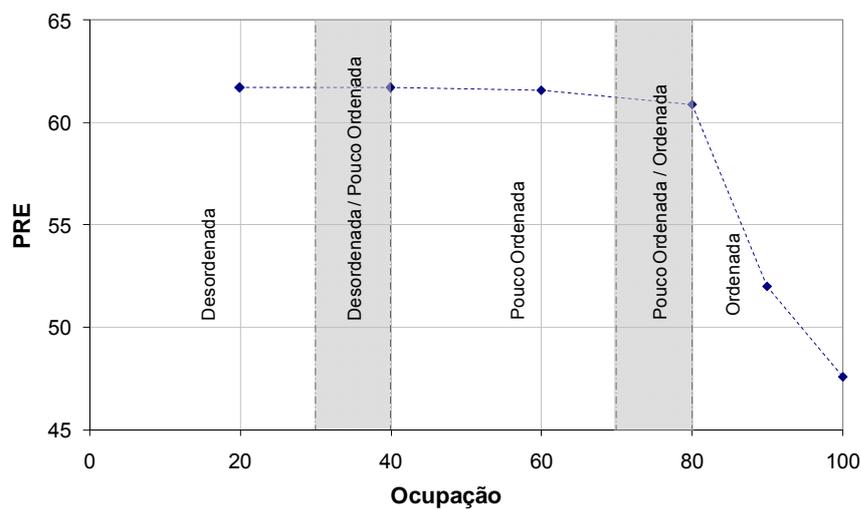


Figura 5.9. Variação de PRE com o Tipo de Ocupação da Encosta

5.8. Variável: Espessura de Solo

A espessura de solo influencia de 2 maneiras distintas o risco de escorregamento:

1. Camadas delgadas de solo saturam rapidamente, o que é desfavorável à estabilidade, tendo em vista a perda de resistência do solo;
2. Camadas muito espessas de solo apresentam grande volume de material para escorregar, sendo também desfavoráveis à estabilidade.

Os valores adotados para a variável Espessura de Solo, e os respectivos valores de Previsão do Risco de Escorregamento (PRE) estão apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Valores Adotados para Variável Espessura de Solo

Variável	Valor Adotado (m)	Caixa Input	PRE (%)
Espessura de Solo	1	[5 10 20 5 3 0.5 15 1]	61,7
	2	[5 10 20 5 3 0.5 15 2]	56,3
	2.5	[5 10 20 5 3 0.5 15 2.5]	47,0
	3.5	[5 10 20 5 3 0.5 15 3.5]	47,0
	4	[5 10 20 5 3 0.5 15 4]	56,3
	5	[5 10 20 5 3 0.5 15 5]	61,7

Verifica-se que os PREs obtidos através da variação na espessura da camada de solo são coerentes com o que foi exposto a respeito dessa variável, ou seja, conforme a espessura de Solo aumenta, o risco de escorregamento diminui enquanto a espessura da camada encontra-se na faixa “Espessa” e quando a espessura passa para a faixa “muito espessa”, o risco aumenta com a espessura da camada.

A Figura 5.10 apresenta a variação de PRE com a espessura da camada, que se mostrou coerente, tendo em vista a consideração de que camadas espessas (1,5 m a 4,5 m) são mais favoráveis à estabilidade do que camadas delgadas ou muito espessas.

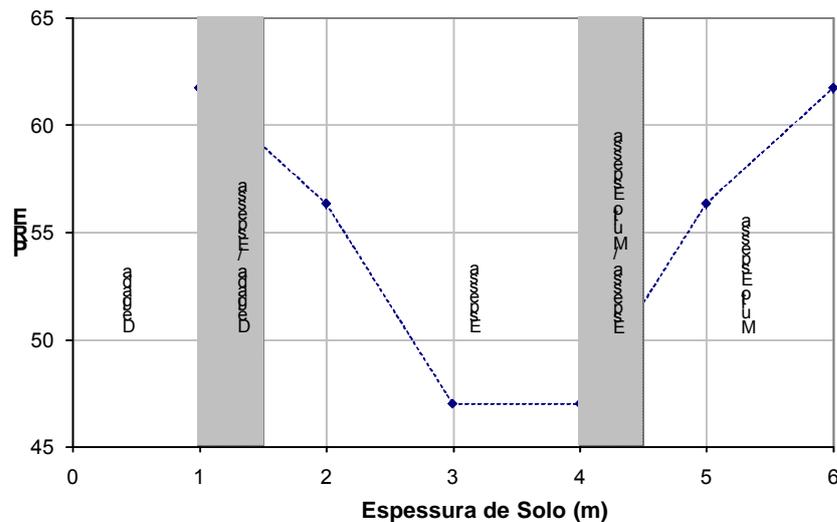


Figura 5.10. Variação de PRE com a Espessura da Camada de Solo

5.9. Considerações Finais

As análises paramétricas, apresentadas no presente Capítulo, mostraram a coerência da resposta do modelo *Fuzzy* a variações nos valores das variáveis: geometria, ocupação da encosta, espessura de solo, vegetação, ângulo de atrito, pluviosidade e eficiência do sistema de drenagem.

Em todos os casos apresentados, o modelo forneceu valores de PRE consistentes, mostrando-se capaz de avaliar com eficiência a influência de cada uma das variáveis adotadas na concepção do modelo.

Diante do exposto, procede-se à utilização do modelo *Fuzzy* na previsão do risco de escorregamento de um caso bem documentado, apresentado na literatura (Ramos, 1991). Este caso será descrito detalhadamente no Capítulo 6, juntamente com a resposta do modelo concebido na presente dissertação.

6. Estudo de um Caso Histórico

Neste Capítulo, será apresentado o estudo de um caso histórico de escorregamento ocorrido no ano de 1988, no local conhecido como Parque do Licurgo no bairro de Madureira, no Rio de Janeiro. Ramos (1991) descreve o escorregamento ocorrido e apresenta análises de estabilidade por equilíbrio limite para as condições anterior e posterior à ruptura.

Inicialmente, será feita uma breve descrição do caso, apresentando a área e as características do escorregamento, descritas por Ramos (1991). Posteriormente, serão apresentados os dados de investigações e instrumentação de campo, os eventos pluviométricos, e os resultados das análises de estabilidade. Finalmente, serão definidos os fatores que condicionaram o escorregamento, determinando-se a Previsão de Risco de Escorregamento a partir do modelo proposto na presente.

A comparação entre os resultados das análises de estabilidade por equilíbrio limite (Ramos, 1991) e a variável de saída do modelo (PRE) tem como objetivo a validação do modelo Fuzzy na previsão do risco de escorregamentos de massa de solo residual.

6.1. Descrição do Caso Histórico

O local conhecido como Parque do Licurgo situa-se no bairro de Madureira, com acesso pelas ruas Dr. Joviano e Licurgo, em vale que separa os morros do Dendê e Juramento, na porção oeste da Serra da Misericórdia, no Rio de Janeiro.

No local, existe uma favela com habitações de nível variado, possuindo rede de esgotos e de água, apenas no trecho da rua Licurgo (Ramos, 1991). A Figura 6.1 mostra a localização da área estudada.

No talvegue esquerdo deste vale ocorreu, em fevereiro de 1988, um escorregamento de grandes proporções na parte superior da encosta. Este escorregamento atingiu cerca de 30 barracos, destruindo-os totalmente. Não houve prejuízo de vidas graças ao tipo de movimento que permitiu que a área fosse desocupada.

Segundo o laudo de vistoria elaborado pela extinta Diretoria de Geotécnica, hoje Fundação GEO-RIO, a massa de solo com espessura de 4 a 6 m começou a se movimentar lentamente, com formação de trincas nas casas e tubulações, ganhando uma velocidade maior, posteriormente, quando muitas casas e muros ruíram e postes foram derrubados. À medida que a água existente era drenada naturalmente, a velocidade do movimento foi diminuindo lentamente.

Todo o processo de escorregamento ocorreu em um intervalo de 40 dias. Durante este período verdadeiras fendas se abriram no solo e blocos rochosos soergueram-se, com surgência de água em vários pontos.

Neste laudo, os técnicos já ressaltavam a importância de execução de investigações geotécnicas e instrumentação de campo, com posterior realização de análises de estabilidade, uma vez que a tipologia do local se repete em vários pontos da cidade do Rio de Janeiro.

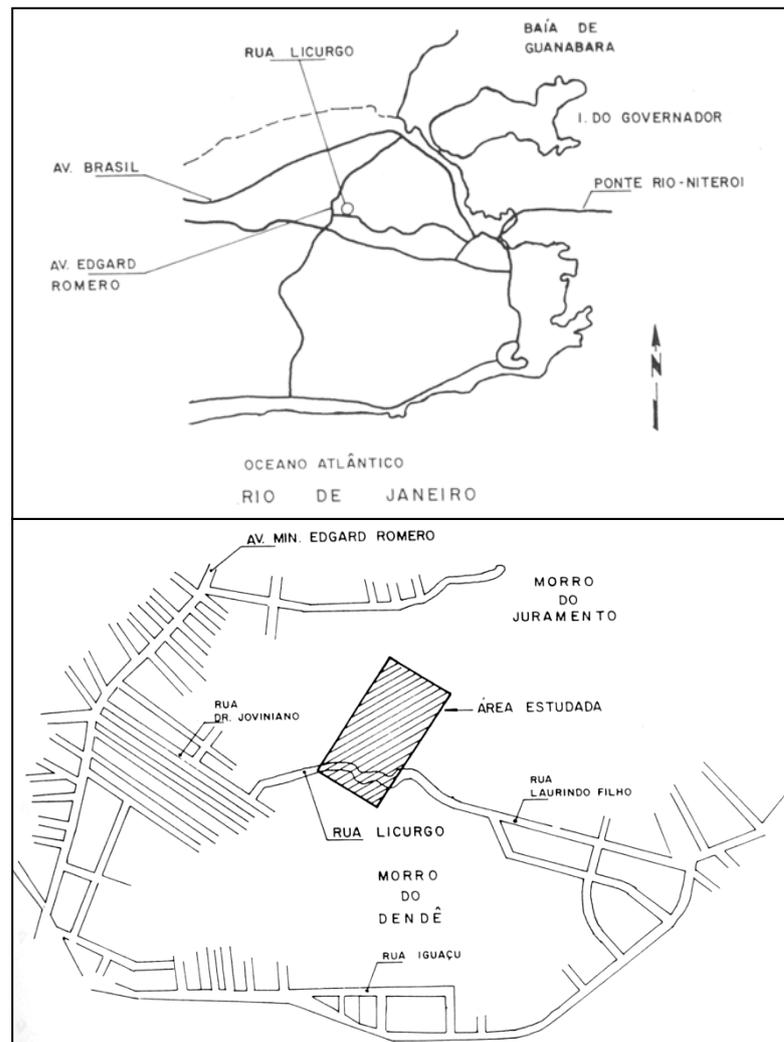


Figura 6.1. Localização do Acidente (Ramos, 1991)

6.2. Investigações Geotécnicas de Campo e Instrumentação

Segundo Ramos (1991), a campanha de investigações geotécnicas de campo e a instrumentação instalada no local procuraram definir os seguintes aspectos da encosta:

(1) Perfil geológico-geotécnico do subsolo, identificando as camadas de colúvio, solo residual e rocha alterada, com dados de SPT, nível d'água, etc;

- (2) Permeabilidade dos diferentes horizontes de solo e rocha;
- (3) Conhecimento do volume e da intensidade das precipitações pluviométricas ocorridas na área;
- (4) Obtenção de dados sobre a carga piezométrica atuante nas diferentes camadas de solo e no contato solo/rocha, correlação com as precipitações pluviométricas, variação do nível d'água freático, etc;
- (5) Registro de movimentos na encosta e sua correlação com a variação dos níveis piezométricos e com as chuvas.

Para atingir estes objetivos, o programa de investigações geotécnicas de campo constou de (Ramos, 1991):

- levantamento topográfico com curvas de nível a cada metro;
- sondagens mistas em diversos pontos do maciço;
- ensaios de permeabilidade "*in situ*";
- ensaios de perda d'água;
- coleta de amostras indeformadas.

A instrumentação de campo consistiu na instalação de pluviógrafo, piezômetros, inclinômetros e medidores de N.A (Ramos, 1991).

6.2.1. Resultados das Investigações de Campo

Ramos (1991) descreve o perfil geológico-geotécnico da área como uma região constituída por gnaisse semi-facoidal (microclina-gnaisse) cortado por granitos, que afloram na porção central e partes altas dos morros do Dendê e Juramento. Estes granitos, pelo intemperismo físico e químico, formam blocos rochosos arredondados "*in situ*" e escarpas rochosas íngremes.

O subsolo no local do escorregamento é constituído por uma camada de colúvio (silte arenoso e areia fina e média), com espessura máxima de 8 metros, com origem diferenciada, inclinação de 15° e nível d'água alto. Subjacente ao colúvio, ocorre uma camada de solo residual jovem, micáceo, caracterizado por resistência à penetração alta e crescente com a profundidade. O manto de solo residual é bastante espesso nas cotas mais baixas e de menor declividade, onde apresenta cerca de 12 metros de espessura, mas vai diminuindo nas cotas mais altas, onde a encosta é mais íngreme, até desaparecer.

O manto rochoso é constituído por gnaisse, granito e pegmatito. O granito predomina nas cotas mais altas, enquanto o gnaisse é encontrado nas cotas mais baixas e em maior profundidade. O pegmatito constitui uma intrusão no gnaisse no pé do escorregamento e aparece também em cota mais baixa, juntamente com o granito.

A Figura 6.2 ilustra o perfil geotécnico da área em estudo.

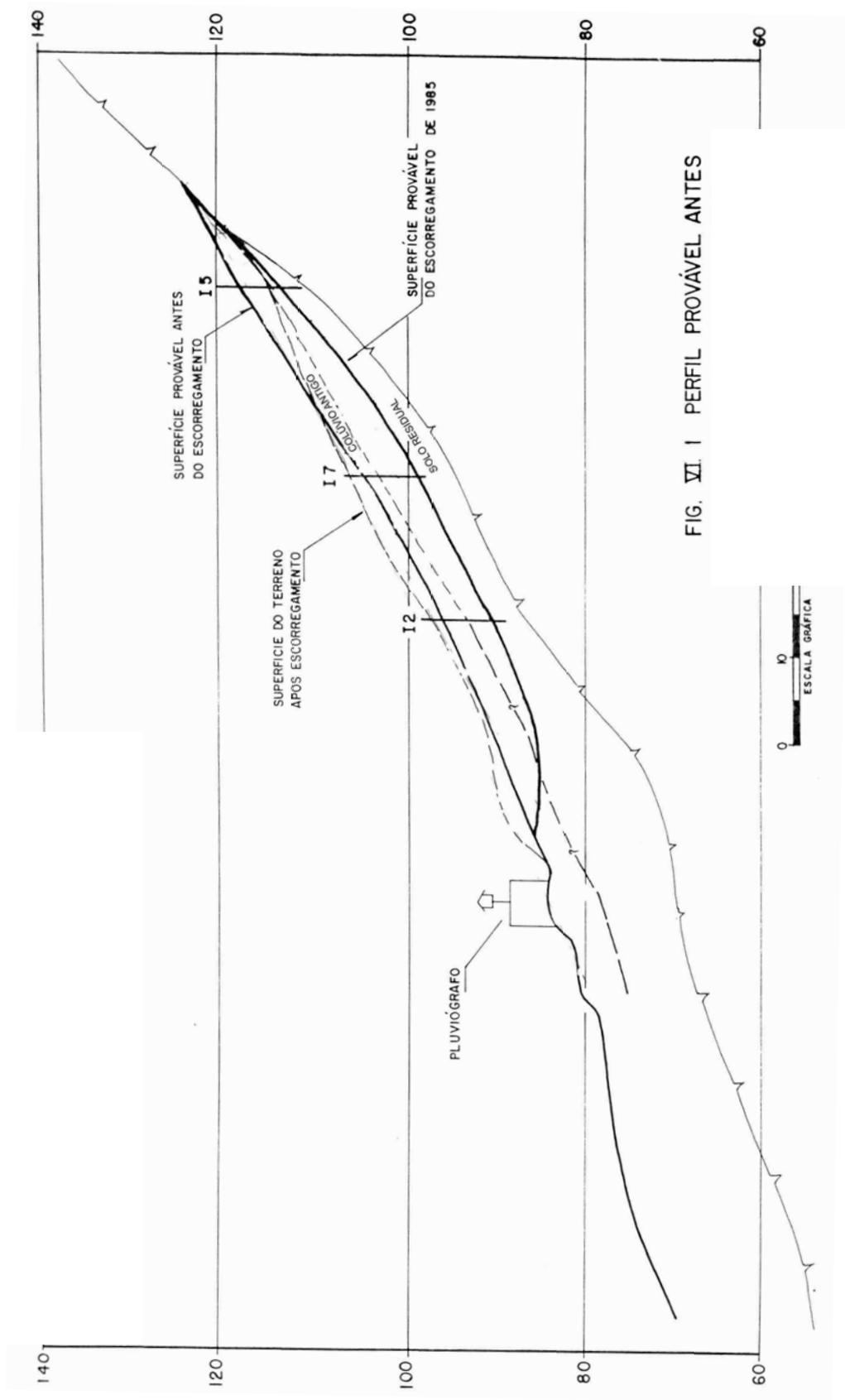


Figura 6.2. Perfil Simplificado da Encosta (Adaptado de Ramos, 1991)

Legenda: I2, I5 e I7 - Inclínômetros

6.2.2. Resultados da Instrumentação

Durante o período de 2 a 22 de fevereiro de 1988 ocorreram no Rio de Janeiro chuvas intensas e contínuas, com registros de inúmeros casos de deslizamentos de taludes. Na ocasião, a Diretoria de Geotécnica do município realizou cerca de 1700 vistorias.

No posto pluviométrico da SERLA em Realengo, o mais próximo da área em estudo, registrou-se em fevereiro/1988 um índice de 550 mm para uma média anual de 1161 mm. O caráter excepcional desse período chuvoso consistiu não só na grande intensidade das precipitações, como também na longa duração das mesmas. Este último fator foi responsável pelo grande número de casos catastróficos registrados, já que, o comportamento das encostas foi normal até o 9º dia de chuva.

Após a instalação do pluviógrafo na encosta do Licurgo, foram realizados registros no período de 12/03/1990 a 21/01/1991, gerando pluviogramas que estão apresentados em forma de gráfico, mostrado pela Figura 6.3 (Ramos, 1991).

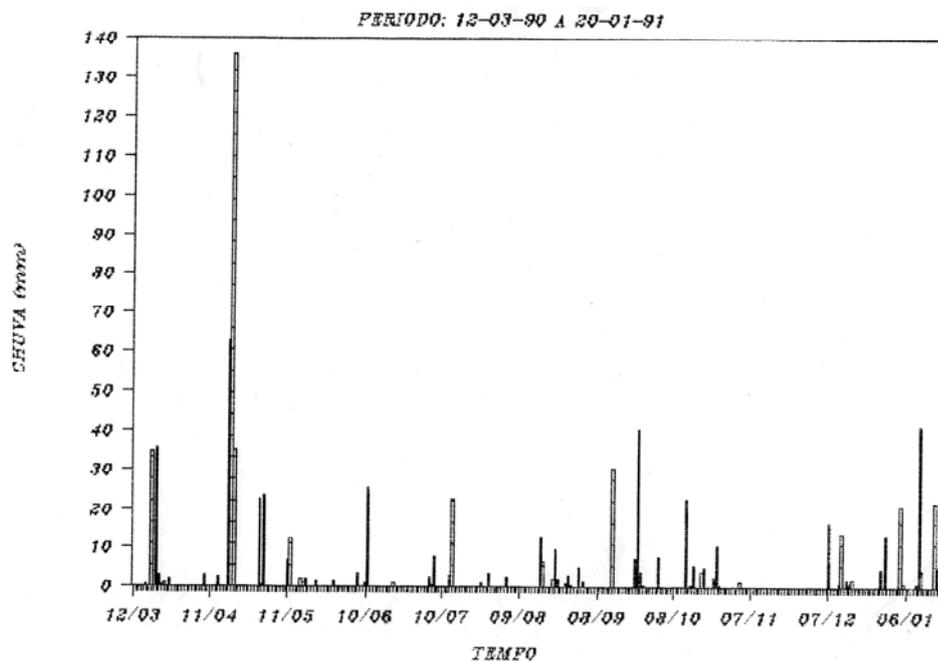


Figura 6.3. Pluviometria – Licurgo (Ramos, 1991)

O único período de chuvas intensas, mas de curta duração, ocorreu entre os dias 18/04/90 e 02/05/90, tendo-se neste período um volume acumulado de 280mm com intensidade máxima registrada de 20mm/h durante duas horas. Na chuva de 11/01/01 chegou-se a registrar intensidade de 30mm/h durante 1 hora. Nos demais períodos ocorreram apenas chuvas esparsas e de pequena intensidade. No período de 10 meses e 7 dias o volume total de chuva acumulada foi de 809mm para uma média anual de 1161mm nesta área.

Ramos (1991) salienta que a partir das leituras dos piezômetros instalados, pode-se verificar que a água penetra na parte alta da encosta mais rapidamente do que consegue drenar nas cotas mais baixas. Uma consequência deste fenômeno é o efeito cumulativo que pode ocorrer sobre as poropressões geradas nas cotas mais baixas do maciço por uma chuva intensa e prolongada.

6.2.3. Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Resultados de ensaio de cisalhamento direto, executados por Clementino (1993), forneceram valores de ângulo de atrito da camada de solo residual igual à $\phi=28^\circ$. Estes ensaios foram realizados em amostras indeformadas, para tensões normais entre 25 a 200kPa.

6.3. Análises de Estabilidade por Equilíbrio Limite

Ramos (1991) executou análises de estabilidade pelo método de Janbu, com o uso do software Stabl-5, desenvolvido pela Universidade de Purdue. As análises foram executadas para três tempos distintos: antes do escorregamento, após o escorregamento e após projeto/obra de estabilização. A Figura 6.2 apresenta os perfis típicos da encosta para as condições anterior e posterior ao escorregamento.

A análise da condição anterior ao escorregamento não foi realizada no presente trabalho, uma vez que todos os dados relativos ao solo e à geometria do escorregamento foram obtidos por retroanálise.

Pelos motivos apresentados, serão executadas apenas comparações entre a lógica *fuzzy* e as análises realizadas por Ramos (1991) para as condições pós escorregamento e pós projeto de estabilização. Cabe ressaltar que a análise após escorregamento foi crucial para que fossem elaborados projetos de estabilização para o talude remanescente.

6.3.1. Análise do Talude Após o Escorregamento

Para o talude após o escorregamento foram estudadas duas situações do ponto de vista de fluxo d'água. A primeira situação é baseada nos níveis piezométricos registrados durante as chuvas de Abril de 1990. Durante estas chuvas, observou-se movimentação na parte superior do talude, com aparecimento de trincas. A segunda situação corresponde ao caso de chuva intensa e prolongada.

A análise foi procedida por Ramos (1991) admitindo-se superfícies de ruptura quaisquer. O autor variou o intercepto coesivo do solo entre 0 e 8kPa, e obteve um fator de segurança mínimo de 1,08 ($c=0$) e máximo de 1,36 ($c=8kPa$).

Desta forma, Ramos (1991) concluiu que o talude após o escorregamento é instável para as situações formuladas, sendo necessária a execução de obras de estabilização.

Com base nos fatores de segurança obtidos por Ramos (1991), procedeu-se à previsão do risco de escorregamento, para a condição pós escorregamento, utilizando o modelo Fuzzy.

Os dados de pluviometria são apresentados por Ramos (1991) em mm diários, porém o modelo Fuzzy prevê a entrada desta variável em mm/h. Para a entrada da variável Pluviosidade no modelo, foi realizada a conversão do pico pluviométrico de 136mm, apresentado na Figura 6.3, ocorrido no dia 19/04/1990 para a unidade prevista pelo modelo. Esta conversão foi realizada a partir da relação entre a provável precipitação em 1h (P_{1h}) e a precipitação em 24h (P_{24h}), em mm, descrita no Capítulo 2: $P_{1h} = 10 + 0,237.P_{24h}$

Desta forma, foi obtido um valor de precipitação de aproximadamente 42,3 mm/h, correspondendo a uma pluviosidade forte.

A Tabela 6.1 indica os valores adotados no modelo proposto, inseridos na caixa input do Visualizador de Regras do MATLAB.

Tabela 6.1. Valores Iniciais das Variáveis

Variáveis	Variável Lingüística	Valor Adotado	Caixa Input
Altura (m)	Alta	40	[40 28 28 42.3 0 0.5 5 12]
Inclinação (°)	Média	28	
Ângulo de Atrito (°)	Médio	28	
Pluviosidade (mm/h)	Forte	42,3	
Drenagem (%)	Ineficiente	0	
Vegetação (m)	Rasteira	0,5	
Ocupação da Encosta	Desordenada	5	
Espessura de Solo (m)	Espessa	12	

Ressalta-se que Ramos (1991) não comenta sobre o tipo de vegetação existente no local. No entanto, como em áreas desordenadas são comuns desmatamentos para construção de moradias, foi adotado o tipo de vegetação rasteira devido à grande ocorrência desta tipologia em áreas de crescimento desordenado (comunidade).

Após a inserção dos dados no modelo fuzzy foi previsto um valor de PRE para a situação após o escorregamento de 84,7% (Figura 6.4), correspondendo a um risco alto de escorregamento. Este resultado concorda com as análises por equilíbrio limite executadas por Ramos (1991).

Em uma análise posterior, variou-se a pluviosidade de alta para baixa, adotando-se um valor de 5 mm/h para esta variável. Neste caso, a lógica fuzzy apresentou um resultado de PRE de 78,3%, prevendo um risco na zona de transição entre médio e alto.

Os resultados indicam que o talude após o escorregamento é instável, tanto pela lógica fuzzy (análise qualitativa), quanto pela análise quantitativa executada por Ramos (1991).

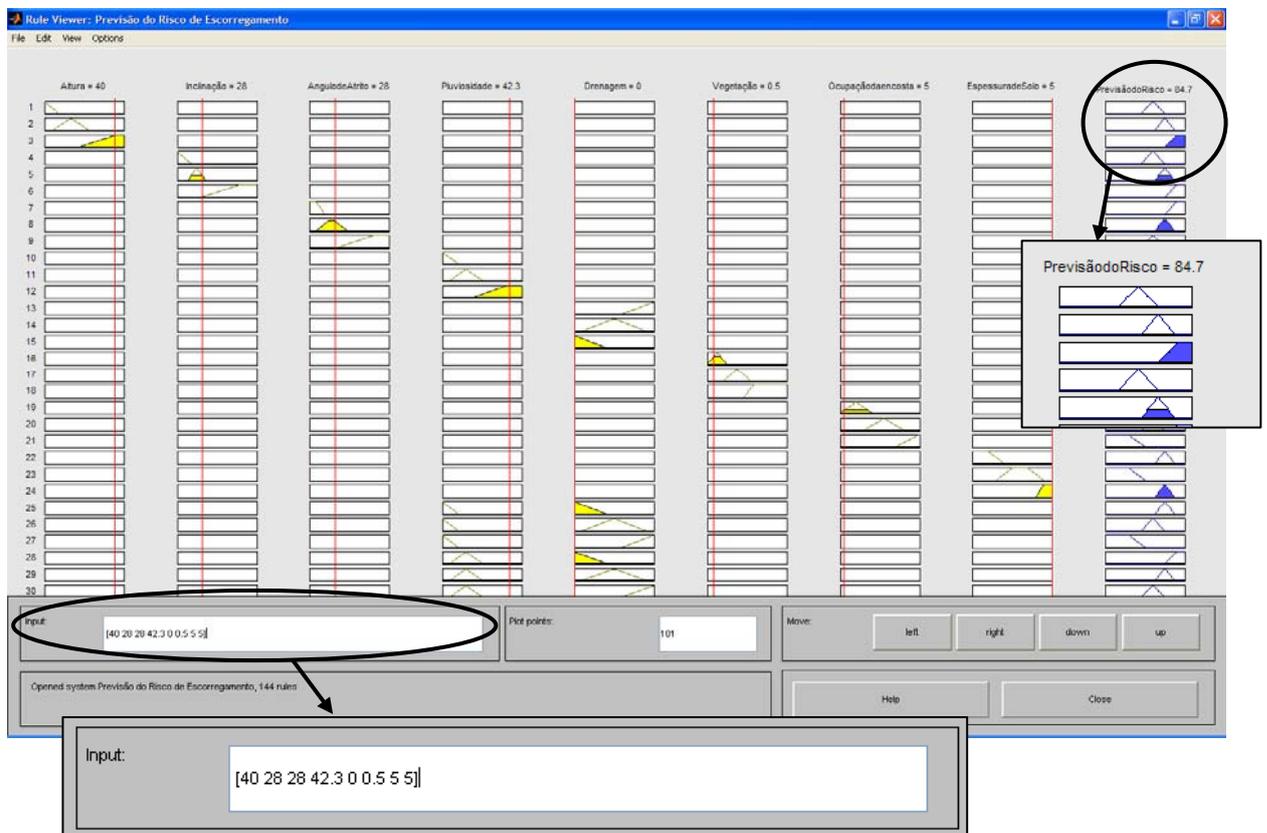


Figura 6.4. Análise Fuzzy para a Situação Após o Escorregamento

6.3.2. Análise do Talude Após Projeto/Obras de Estabilização

Ramos (1991) concluiu que o principal agente instabilizante é a água, devido às poropressões geradas no maciço pela percolação. Para a estabilização global do maciço a solução estudada foi a utilização de drenos profundos que garantissem a manutenção de poropressões baixas no interior do maciço e no contato solo-rocha. Foram então projetadas duas linhas de drenos profundos entrando 2 metros em rocha, buscando interceptar os veios de pegmatito e de granito alterado. (Ramos, 1991)

Segundo Ramos (1991) tornava-se necessário, ainda, regularizar o talude, projetar contenções localizadas para resolver problemas de instabilidades superficiais, efetuar o desmonte de blocos de rocha em posições instáveis, e executar obras de drenagem superficial principalmente ao pé da escarpa rochosa. A solução projetada pode ser visualizada na Figura 6.5.

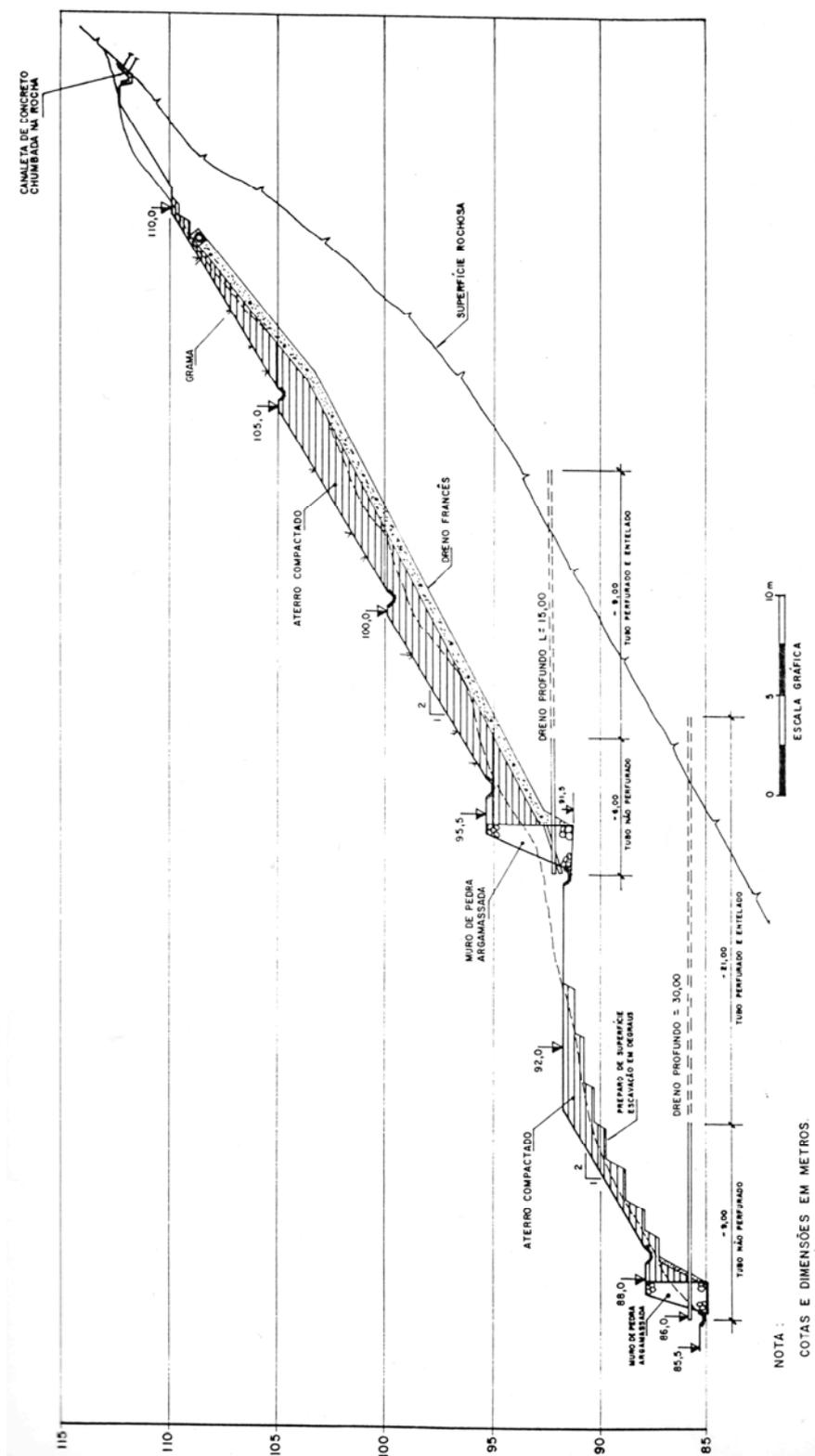


Figura 6.5. Solução Projetada (Ramos, 1991)

Nas análises de estabilidade, executadas por Ramos (1991), foram utilizados os parâmetros de resistência comentados anteriormente. Adicionalmente, considerou-se uma sobrecarga na área plana, entre os muros, de 20 kPa, correspondente à ocupação da área com uma construção de dois pavimentos. Após a análise por equilíbrio limite, Ramos (1991)

obteve um fator de segurança após o projeto/obra de 1,5, que representa um aumento de 60% em relação ao fator de segurança para a mesma superfície analisada na situação após o escorregamento.

Para a avaliação da funcionalidade do modelo proposto, foi realizada uma análise, variando-se a eficiência do sistema de drenagem, tendo em vista que após a obra de estabilização as demais variáveis não sofreram variação significativa.

A Tabela 6.2 apresenta os valores adotados para a variável drenagem, suas inserções na caixa input e os resultados de PREs computados pela lógica.

Observa-se que a variável drenagem influenciou, para este caso, todo o processo de estabilização da encosta. Considerando-se um sistema de drenagem ineficiente (5%), a previsão de risco de escorregamento foi de 84,7% (risco alto). No entanto, o valor de PRE reduz-se para 46,4% (risco baixo a inexistente), quando o sistema de drenagem é considerado eficiente.

Tabela 6.2. Valores Adotados para Variável Drenagem

Variável	Valor Adotado (%)	Caixa Input	PRE (%)
Drenagem	5	[40 28 28 50 5 0.5 5 5]	84,7
	20	[40 28 28 50 20 0.5 5 5]	84,7
	40	[40 28 28 50 40 0.5 5 5]	84,7
	60	[40 28 28 50 60 0.5 5 5]	84,7
	62	[40 28 28 50 62 0.5 5 5]	82,1
	66	[40 28 28 50 66 0.5 5 5]	72,0
	70	[40 28 28 50 70 0.5 5 5]	66,2
	75	[40 28 28 50 75 0.5 5 5]	60,8
	80	[40 28 28 50 80 0.5 5 5]	56,6
	90	[40 28 28 50 90 0.5 5 5]	50,6
	95	[40 28 28 50 95 0.5 5 5]	48,3
100	[40 28 28 50 100 0.5 5 5]	46,4	

A Figura 6.6 apresenta a variação de PRE com a eficiência do sistema de drenagem. Nota-se que até o limite do sistema de drenagem pouco eficiente, a lógica retornou um PRE constante de 84,7% (risco alto). À medida que a eficiência do sistema de drenagem aumenta (transição entre pouco eficiente e eficiente), há uma queda abrupta no valor do PRE, que chega a 50,6%, o que equivale a um decréscimo de 59,7% em relação ao PRE no limite do sistema de drenagem pouco eficiente. Este valor de PRE igual a 50,6% representa um risco baixo de escorregamento. Quando a drenagem apresenta uma eficiência de 100%, o valor de PRE é 46,4%, situando-se na faixa de risco inexistente.

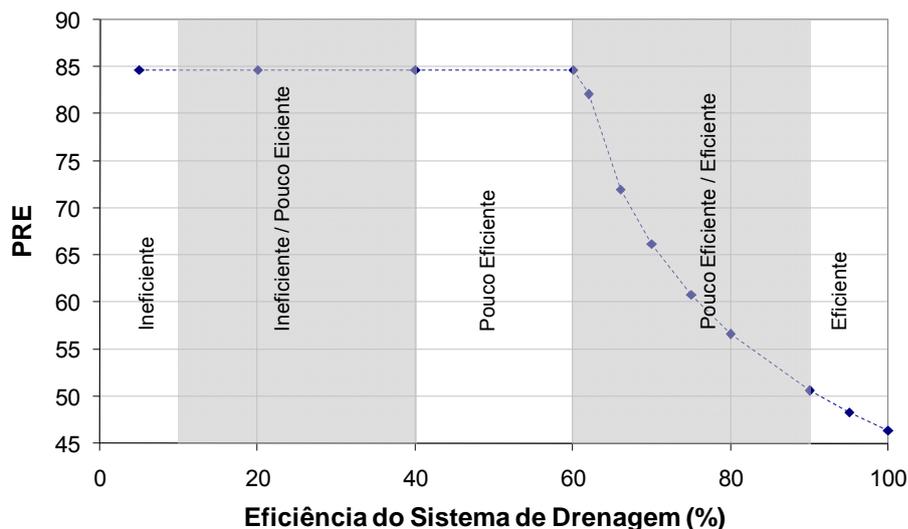


Figura 6.6. Variação do PRE com a Eficiência do Sistema de Drenagem

6.4. Considerações Finais

As análises realizadas utilizando o modelo Fuzzy mostraram que a resposta do modelo foi coerente com os resultados apresentados por Ramos (1991) para o talude do Licurgo. Para todas as condições analisadas, o modelo forneceu valores de PRE consistentes, mostrando-se capaz de prever com eficiência o risco de escorregamento.

O caso analisado apresenta uma condição pós-obras de recuperação, com melhoria do sistema de drenagem. Neste caso, o modelo permitiu a previsão adequada do risco de escorregamento com a eficiência do sistema de drenagem.

Cabe ressaltar que não se procurou comparar diretamente os resultados das análises por equilíbrio limite (fatores de segurança) com os valores de PRE obtidos pela lógica nebulosa. Análises por equilíbrio limite não incorporam variáveis subjetivas como vegetação, ocupação, eficiência da drenagem, etc. O objetivo foi validar o modelo *Fuzzy*, comparando-se um valor numérico de fator de segurança, que representa a estabilidade do talude, com uma porcentagem de risco, que fornece uma previsão da estabilidade.

Diante do exposto, destaca-se, aqui, a potencialidade da lógica nebulosa na previsão do risco de ruptura de taludes em solo residual.

7. Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras

7.1. Conclusões

A presente dissertação apresentou a aplicação da lógica nebulosa na avaliação do risco de escorregamentos de taludes em solo residual. Como experiência para a introdução das variáveis de influência no modelo, buscou-se analisar uma quantidade significativa de laudos de vistoria da GEO-RIO. Os laudos concentraram-se na cidade do Rio de Janeiro, tão susceptível a escorregamentos de massa de solo residual.

Na idealização do modelo, foram adotadas as seguintes variáveis como condicionantes geológico-geotécnicas envolvidas em escorregamentos em solo residual: altura e inclinação da encosta, espessura da camada de solo, ocupação da encosta, tipo de vegetação, ângulo de atrito do solo, eficiência do sistema de drenagem e pluviosidade. A estas variáveis foram atribuídos adjetivos e pesos, com base na experiência da GEO-RIO. Como resposta, obteve-se a previsão do risco de escorregamento (PRE).

A partir da elaboração do modelo, foram realizadas análises paramétricas, visando avaliar o impacto de cada uma das variáveis adotadas no valor de PRE. Adicionalmente, um caso histórico de escorregamento bem documentado foi apresentado, com o objetivo de comparar os resultados fornecidos pela lógica nebulosa (análise qualitativa) com os resultados de análises por equilíbrio limite (análises quantitativas).

As análises paramétricas verificaram que o modelo *Fuzzy* mostrou-se capaz de avaliar com eficiência a influência de cada uma das variáveis adotadas na concepção do modelo.

O estudo do caso histórico mostrou que as análises realizadas utilizando o modelo *Fuzzy* refletiram de forma eficiente os resultados apresentados por Ramos (1991) em análises por equilíbrio limite. Para a condição pós escorregamento, o modelo *Fuzzy* forneceu uma previsão de risco alto, enquanto as análises de estabilidade realizadas por Ramos (1991) indicaram $FS=0,89$, ou seja, talude instável. Para a condição após as obras de estabilização, Ramos (1991) obteve um valor de fator de segurança igual a 1,5, que indica que o talude encontra-se estável. O modelo *Fuzzy*, para esta mesma condição, forneceu coerentemente uma previsão de risco baixo de escorregamento.

É interessante comentar que análises por equilíbrio limite fornecem um valor numérico para o fator de segurança, ou seja, é um método essencialmente quantitativo. Neste método, variáveis como ocupação da encosta, eficiência do sistema de drenagem, e vegetação não são avaliadas. Além disso, análises de estabilidade são altamente

dependentes dos parâmetros de resistência dos solos, nem sempre disponíveis na prática da Engenharia Geotécnica.

No presente trabalho, não se procurou comparar os dois métodos, pois a lógica nebulosa é uma análise qualitativa e subjetiva, baseada em experiência, não em valores exatos. A idéia de confrontar os dois métodos teve como objetivo mostrar que a resposta do modelo *Fuzzy*, dentro de uma faixa de valores de risco, encontra-se em concordância com o método determinístico usualmente adotado na avaliação da estabilidade de taludes.

Cabe comentar que para a aplicação do modelo basta um laudo de vistoria bem elaborado, pois o modelo baseia-se em observações de campo, não necessitando dos parâmetros geotécnicos dos materiais envolvidos. Desta forma, esta ferramenta aparece como uma alternativa que associa eficiência, baixo custo e facilidade de execução, sendo atraente para uma análise preliminar de risco de escorregamento.

Face ao exposto, conclui-se que a aplicabilidade do Modelo *Fuzzy* na Previsão do Risco de Escorregamento de Taludes em Solo Residual é eficiente, fácil e de baixo custo, mostrando-se uma ferramenta válida para ser utilizada no monitoramento das encostas do Município do Rio de Janeiro.

7.2. Sugestões

O presente trabalho apresentou um modelo de previsão de risco de ruptura de taludes, com enfoque em escorregamentos de solo residual. O modelo proposto procurou contemplar os principais condicionantes envolvidos no desencadeamento deste tipo de mecanismo de ruptura. Todavia, este modelo pode ser refinado, com a introdução de outros condicionantes, e outros modelos podem ser desenvolvidos, utilizando os conceitos aqui apresentados. Como sugestão para pesquisas futuras pode-se citar:

- Criação de modelos *fuzzy* para previsão de outros tipos de movimentos de massa, como escoamentos, subsidências, queda de blocos, etc., bastando averiguar os fatores envolvidos em cada tipo de movimento.
- Consideração da presença de colúvios sobrejacentes à camada de solo residual, situação bastante comum quando ocorre a repetição de um episódio de deslizamento.
- Introdução de outras variáveis de influência, como permeabilidade e intercepto coesivo do solo, buscando-se um refinamento do modelo.
- Aplicação híbrida utilizando Redes Neurais e Lógica Nebulosa para a previsão do risco de escorregamento de taludes. Os resultados obtidos poderiam ser comparados aos resultados apresentados no presente trabalho.

Referências Bibliográficas

1. Alves, A.S. **Avaliação do Potencial à Erosão dos Solos: Uma Análise por Lógica Fuzzy e Sistemas de Informação Geográfica**. 2004. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Cartográfica, UERJ, Rio de Janeiro, 2004.
2. Alves, A., Marques, M. e Souza, F.J. **Análise do potencial erosivo dos solos em bacias hidrográficas: Aplicação da Lógica Nebulosa (Fuzzy) no diagnóstico ambiental**. 2002. Pesquisa Agropecuária e Desenvolvimento Sustentável, PESAGRO-RIO, v. 1, n. 1, p.1-13, 2002.
3. Amaral, C.P. **Escorregamentos no Rio de Janeiro. Inventário, Condicionantes Geológicas e Redução do Risco**. 1997. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/RJ. 1997.
4. Antunes, F.S. e Barroso, J.A. **A Importância da Utilização das Informações Geológicas-geotécnicas no Planejamento da Ocupação Territorial**. 1988. In: Anais do Ciclo de Mesas Redondas: Improriedades no uso do solo. Deptº de Geologia/UFRJ, Rio de Janeiro, p. 111-117. 1988.
5. Augusto Filho, O. e Virgili, J.C. **Estabilidade de Taludes**. 1998. In: Oliveira, A.M.S. e De Brito, S.N.A., Geologia de Engenharia. 1a ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 582 páginas. 1998.
6. Barreto, J.M. **Inteligência Artificial No Limiar do Século XXI**. 2001. Florianópolis: ppp Edições, 2001.
7. Boole, G. **The Calculus of Logic**. 1848. Cambridge and Dublin Mathematical Journal, Vol. III, p. 183-98, 1848.
8. Brabb, E.E. **World Landslide Problem**. 1991. CR3.1 - CRID - Centro Regional de Información sobre Desastres para América Latina y el Caribe. Episodes;14(1):52-61, 1991.
9. Calijuri, M.L., Melo, A.L.O. e Lorentz, J.F. **Identificação de Áreas para Uso em Aterros Sanitários com o Uso de Análise Estratégica de Decisão**. 2002. Informática Pública. Vol. 4 (2): 231-250, 2002.
10. Camargos, F.L. **Lógica Nebulosa: uma abordagem filosófica e aplicada**. 2002. Disponível em <[http:// www.inf.ufsc.br/~barreto/trabaluno/IAfernandoLC.pdf](http://www.inf.ufsc.br/~barreto/trabaluno/IAfernandoLC.pdf)>. Acesso em: Dez. 2007.
11. Campos, L.E.P., Menezes, M.S.S., Presa, E.P. e Fonseca, E.C. **Considerações Sobre a Análise de Estabilidade de Taludes em Solos Não Saturados**. 1994. In: 2º Simpósio brasileiro sobre solos não saturados, pp 45-51, Recife - PE. 1994.

12. Carregã, D.L. e Balzan, G. **Aspectos do Comportamento de Encostas Argilosas no Creep**. 1997. II PSL / II COBRAE, Rio de Janeiro, Vol. 1, p. 233-241. 1997.
13. Chameau, J.L., Altschaeffi, A., Michael, H. e Yao, J.T.P. **Potential Applications of Fuzzy Sets in Civil Engineering**. 1983. Int. Journal of man-Machine Studies, 19, 9-18. 1983.
14. Champratheep, K. e Ganer, B.Z.Q. **Preliminary Landfill Site Screening Using Fuzzy Geographical Information Systems**. 1996. Waste Management & Research. V. 15, p. 197-215, 1996.
15. Chorley, R.J., Schumm, S.A. e Sugden, D.E. **Geomorphology**. 1984. Cambridge: Methuen, 1984.
16. Clementino, R.V. **Características dos Solos Coluvionares e Residuais de Granito do Escorregamento da Rua Licurgo – RJ**. 1993. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, 1993.
17. Fernandes, N.F. e Amaral, C.P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica**. 1996. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S. ed. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
18. Fontenelle, A.S. e Vieira, V.P.P.B. **Análise de Risco Aplicada à Estabilidade de Talude de Barragem de Terra no Estado do Ceará**. 2002. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH, Ceará, 2002.
19. Frascá, M.H.B.O e Sartori, P.L.P. **Minerais e Rochas**. 1998. In: Oliveira, A.M.S, Brito, S.N.A. (org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia, p.15-38. 1998.
20. Frege, F.L.G. **Die Grundlagen der Arithmetik**. 1884. Eine logisch-mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl, Breslau, 1884.
21. Freire, E.S.M. **Movimentos Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática. Construção**. 1965. Rio de Janeiro, 8(95), 10-18. 1965.
22. Guerra, A.J.T. e Cunha, S. **Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases**. 1994. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.
23. Guidicini, G. e Nieble, C.M. **Estabilidade de taludes naturais de escavação**. 1993. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 196 p. 1993.
24. Gusmão Filho, J.A. **Encostas Urbanas: Aspectos Ambientais, Sociais e Políticos**. 1997. II PSL / II COBRAE, Rio de Janeiro, Vol. 3, p. 315-331. 1997.
25. Infanti Jr., N. e Fornasari Filho, N. **Processos da Dinâmica Superficial**. 1998. In: Oliveira, A. M.S. e Brito, S.N.A. (eds) Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, P. 131-152. 1998.
26. Juang, C.H., Lee, D.H. e Sheu, C. **Mapping Slope Failure Potential Using Fuzzy Sets**. **Journal of Geotechnical Engineering**. 1992. ASCE, Vol. 118, No. 3, p. 475-494. 1992.

27. Juang, C.H., Huang, X.H., Holtz, R.D. e Chen, J.W. **Determining Relative Density of Sands From CPT Using Fuzzy Sets**. 1996. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 1, p.1-6. 1996.
28. Kanji, M.A. **Estabilização e Remediação de Taludes – Relato Geral**. 1997. II PSL / II COBRAE, Rio de Janeiro, Vol. 3, p. 251-259, 1997.
29. Kanji, M.A., Gramani, M.F., Massad, F., Cruz, P.T. e de Araújo Filho, H.A. **Main Factors Intervening in the Risk Assessment on Debris Flows**. 2000. International Workshop on the Debris Flow Disaster of December 1999 in Venezuela, Caracas, 2000.
30. Kochel, R.C. **Holocene Debris Flows in Central Virginia**. 1987. In Costa, J.E. e Wieczorek, G.F. (eds.) Debris Flows/ Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Geological Society of America, Boulder: 139-155. 1987.
31. Kosko, B. **Neural Networks and Fuzzy Systems, A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence**. 1992. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.
32. Lee, D.H. e Juang, C.H. **Evaluation of failure potential in mudstone slopes using fuzzy sets**. 1992. ASCE Geotechnical Special Publication No 31, Stability and Performance of Slopes and Embankments – II, Vol. 2, p. 1137-1151, 1992.
33. Lima, G.S. **Seleção de Áreas para Implantação de Aterros Sanitários: Uma Proposta Baseada na Análise do Valor e Lógica Fuzzy**. 1995. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. COPPE/UFRJ, 153p, 1995.
34. Macbean, E.A., Rovers, F.A. e Farqhar, G.J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. 1995. PrenticeHall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, USA, 521p, 1995.
35. Mamdani, E.H e Assilian, S. **An experiment in Linguistic synthesis with a Fuzzy Logic Controller**. 1975. IEE trans. Internat. J. Man-Machine Studies, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.
36. Maranhão, M.R.A. **Modelo de Seleção de Áreas para Atualização do Mapeamento Sistemático Baseado em Lógica Nebulosa**. 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia de computação - Área de concentração Geomática. Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 54p, 2005.
37. Massad, F. **Obras De Terra - Curso Básico De Geotecnia**. 2003. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
38. Mendel, J.M. **Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions**. 2001. Londres: Prentice Hall P. T. R, 2001.
39. Menezes, D.B. **Diagnóstico dos Impactos do Depósito de Resíduos Sólidos de São Carlos no Meio Físico**. 1995. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Carlos, 102p, 1995.

40. Mitra, B., Scott, D., Dixon, C. e McKimmey, J. **Application of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed**. 1998. Geoderma, v. 86, n. 4, p.183-209, 1998.
41. Montgomery, D.R., Fernandes, N.F., Guimarães, R.F., Gomes, R.A.T, Vieira, B.C. e Greenberg, H. **Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis**. 2001. Revista Brasileira de Geomorfologia, Volume 2, N°1 51-71, 2001.
42. Moreira, C.V.R. e Neto, A.G.P. **Clima e Relevô**. 1998. In: Oliveira, A.M.S. e De Brito, S.N.A., Geologia de Engenharia. 1a ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 582 páginas. 1998.
43. Neto, L.B. **Sistemas Fuzzy**. 2005. Apostila do Curso de Inteligência Computacional, UERJ, Rio de Janeiro, 2005.
44. Netto, A.L.C. **Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia**. 1994. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S. ed. Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.
45. Oliveira Jr., H.A. **Lógica Difusa: Aspectos práticos e aplicações**. 1999. Rio de Janeiro: Interciência.189 páginas, 1999.
46. Oliveira, O.O., Junior, F.S.A., Alves, M.G. e Vieira, E.M. **Uso De Técnicas de Geoprocessamento para Identificar Áreas Susceptíveis ao Escorregamento na Região de Campos dos Goytacazes – RJ**. 2005. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3191-3198, 2005.
47. Patton, P.C. **Drainage basin morphometry and floods**. 1988. In: Baker, V. R., Kochel, R.C. e Patton, P.C. ed. Flood geomorphometry. New York: Wiley, 1988.
48. Pinto, W.D. **Avaliação da Susceptibilidade a Escorregamentos em Solo: Uma Abordagem Fuzzy**. 2002. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Norte Fluminense, UENF, Rio de Janeiro, 2002.
49. Pereira da Silva, S.D. e Vargas Jr, E.A. **Um Estudo Experimental sobre a Resistência ao Cisalhamento de juntas Intemperizadas**. 1986. In: II Simposio Sul Americano de Mecânica de Rochas, Porto Alegre. Anais do II Simposio Sul Americano de Mecânica de Rochas, p. 27-37. 1986.
50. Ponce, V.M. **Engineering Hydrology: Principles and Practices**. 1989. New Jersey: Prentice-Hall, 640p. 1989.
51. Rabaco, L.M.L. **Avaliação de Modelos de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa numa Faixa de Dutos**. 2005. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Computação - Área de Concentração Geomática, UERJ, Rio de Janeiro, 2005.

52. Ramos, M.O. **Instrumentação e Análise de Escorregamento em Solo Residual Ocorrido na Rua Licurgo, Serra da Misericórdia - Rio de Janeiro**. 1991. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, 1991.
53. Ramos, R.A.R. e Mendes, J.F.G. **Avaliação da Aptidão do Solo para Localização Industrial: O Caso de Valença**. 2001. Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, n.10, p. 7-29, 2001.
54. Riedel, P.S., Lopes, E.S., Naletto, J.L., Ferreira, M.V., Braz, P.S., Passarela, S.M. e Ambrust, D. **Avaliação dos Produtos de Sensoriamento Remoto e Técnicas de Processamento Digital com Contribuição ao Monitoramento de Movimentos de Massa na Região de Cubatão, SP**. 2005. Relatório Parcial de Projeto, Fundação de Apoio a Pesquisa e Ensino e Extensão, UNESP, Jabotical, SP, 50 pp. Agosto, 2005.
55. Russel, B. e Whitehead, A.N.. **Principia Mathematica**. 1910 - 1913. 3 vols, Cambridge: At the University Press, 1962.
56. Salamuni, E. **Geologia Estrutural - CG017**. 2006. Apostila do Curso de Graduação em Geologia, UFPR. Disponível em: <<http://www.geologia.ufpr.br/graduacao/estrutural2006/indicegeoestrutural.html>>. Acesso em: Abr. 2008.
57. Sandri, S. e Correa, C. **Lógica Nebulosa**. 1999. Anais da V Escola de Redes Neurais. São José dos Campos, pp 073-090, 1999.
58. Sandroni, S.S., **Sampling and Testing of Residual Soils in Brasil**. In : BRAND, E.W., PHILLIPSON, H.B. (eds), Sampling and Testing of Residual Soils - A Review of International Practice. Hong Kong. Scorpion Press. 1985.
59. Santos, M.R.G. **Aplicação de Métodos de Geoprocessamento para o Estudo da Instabilidade de Encostas no Município de Teresópolis - RJ**. 2000. Tese de Mestrado, Depto.de Geologia, UFRJ. 2000.
60. Shaw, I.S. e Simões, M.G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 1999. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1999.
61. Sieira, A.C.F. **Condicionantes Geológicos e Geotécnicos na Estabilidade de Taludes**. 2007. Notas de Aula da disciplina de Estudo Dirigido. PGECIV. UERJ, 2007.
62. Suarez, J.D. **La Vegetación en la Estabilización de Deslizamientos**. 1997. II PSL / II COBRAE, Rio de Janeiro, Vol. 2, p. 739-746. 1997.
63. Tanscheit, R. **Sistemas Fuzzy**. 2007. Disponível em: <<http://www.ica.ele.pucRio.br/cursos/download/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>. Acesso em: Jan. 2007.
64. Thomas, M.F. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates**. 1979. 2 ed. London: MacMillan, 1979.
65. Tozzato, J.H.F. **Estruturas de Contenção de Baixa Altura em Solo Residual**. 2000. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2000.

66. Vargas Jr, E.A ., Costa Filho, L.M., Campos, L.E.P. e Oliveira, A.R.B. **A Study of the Relationship Between the Stability of Slopes in Residual Soils and Rain Intensity.** 1986. In: Proceedings International Symposium on Enviromental Geotechnology, Envo Publishing, pp 491-500, Leigh. 1986.
67. Vargas, M., **Introdução à Mecânica dos Solos.** 1977. Capítulo V. 1977.
68. Varnes, D.J. **Slope Movements Types and Processes.** 1978. In Schuster, R.L. e Krizek, R.J. (eds.) Landslides Analysis and Control. National Academy of Science, Washington: 11-33. 1978.
69. Wolle, C.M. **Análise de escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas.** 1988. São Paulo, 800 p. Tese - Doutorado em Engenharia - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1988.
70. Zadeh, L.A. **Fuzzy Sets. On formation and Control.** 1965. V.8, p.338-353, 1965.
71. Zadeh, L.A. **The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Aproximate Reasoning.** 1975. Information Science, Vol. 8, p. 199-249, 1975
72. Zimback, C.R.L. **Formação dos Solos.** 2003. Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Disponível em: <<http://www.fca.unesp.br/intranet/arquivos/Apost.Forma%C3%A7%C3%A3osolo.pdf>>. Acesso em: Jan/2008.

Anexo 1. Laudos de Vistoria da GEO-RIO

A tabela abaixo apresenta os laudos consultados e utilizados na elaboração deste trabalho. Cinco destes laudos foram selecionados (vide marcação em azul na tabela) e serão apresentados nas páginas a seguir e os demais podem consultados na Fundação Geo-Rio.

Ano	Laudo	Ano	Laudo	Ano	Laudo	Ano	Laudo
1998	478	1999	574	2001	644	2004	822
1998	676	1999	616	2001	673	2004	828
1998	715	2000	9	2002	22	2005	520
1998	718	2000	74	2002	26	2005	522
1998	863	2000	168	2002	37	2005	536
1998	920	2000	174	2002	44	2005	609
1998	938	2000	175	2002	49	2005	610
1998	971	2000	188	2002	107	2005	613
1998	972	2000	190	2002	313	2005	715
1998	1016	2000	225	2002	540	2005	740
1998	1022	2000	439	2002	587	2005	824
1998	1028	2000	498	2003	497	2006	48
1998	1097	2000	549	2003	556	2006	50
1998	1101	2000	577	2003	742	2006	51
1998	1159	2000	606	2003	912	2006	173
1999	24	2000	625	2004	199	2006	224
1999	47	2000	635	2004	503	2006	305
1999	55	2001	77	2004	563	2006	313
1999	123	2001	81	2004	601	2006	476
1999	139	2001	109	2004	682	2006	763
1999	235	2001	556	2004	708	2007	182
1999	245	2001	564	2004	717	2007	304
1999	287	2001	588	2004	745	2007	317
1999	330	2001	628	2004	808	2007	321
1999	429	2001	638	2004	815	2007	388

LAUDO DE VISTORIA GEORIO No.: 478/98

1 -LOCALIZAÇÃO

Logradouro: do Ascurra

Categoria: Ladeira

Complemento:

Bairro: Cosme Velho

Número: 188

R.A.: IV

2 -DATA DO PEDIDO 19/02/98

3 -DATA DA VISTORIA 19/02/98

4 -ORIGEM DO PEDIDO G/COSIDEC

5 -SOLICITANTE

Nome: Luís Cláudio

Telefone: 556-2186

6 -ASPECTOS REGIONAIS

6.1 - Tipo de Ocupação
Área Urbana Estruturada

Densidade: Baixa

6.2 - Tipo de Vegetação

Arbórea

Rasteira

Arbustiva

Densidade: Alta

6.3 - Tipo de Relevo: Escarpado

7 -CARACTERÍSTICAS LOCAIS

7.1 - Tipo de Talude

Encosta Natural

Natureza do Material

Solo

Rocha

Matações 'in situ'

7.2 - Espessura média aproximada do perfil do solo (m): Variável

7.3 - Tipo de Drenagem: Natural

7.3.1 - Condição do Sistema de Drenagem: Obstruída

7.4 - Condições de Água Subterrânea

7.5 - Risco

Tipo: Potencial *

Grau: Alto

* - Possibilidade de ocorrência de movimento de massa sem atingimento de moradias ou bens públicos.

8 -CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA

8.1 - Situação: Ocorrido

8.2 - Data: 11/02/98

Hora Aproximada: :

8.3 - Volume aproximado do material mobilizado (m3): 3,0

8.4 - Tipo(s) de Movimento(s)

8.4.1 - Superfície de Deslizamento

Sobre Solo

8.4.2 - Classificação

Deslocamentos de Blocos/Lascas

8.5 - Conseqüências

Número de Vítimas Fatais:

8.6 - Descrição da Ocorrência (explicitar causas prováveis e conseqüências)

Obs.: Em caso de elaboração de croquis ou descrições ver figura na última página.**

O acesso de pedestres para as duas casas do nº 188 possui a montante um talude terroso com blocos de rocha de tamanhos variados. Durante as chuvas ocorridas no dia 11/2 um bloco de 3,0 metros cúbicos de movimentou e apresenta situação instável, podendo vir a fechar o acesso em caso de nova ocorrência. A montante deste ponto, ainda na ladeira do Ascurra, a 30 metros de distância do nº 188, houve um deslocamento de solo residual que já compromete a caixa da rua. O referido talude possui altura de 5,0 metros, inclinação de 60° e largura de 5,0 metros. Tal deslocamento se encontra na lateral de um muro de pedras arrumadas que possui altura máxima de 5,0 metros.

9 - PROVIDÊNCIAS

À GEO-RIO/DOC para avaliar a possibilidade de incluir esta obra na programação normal.

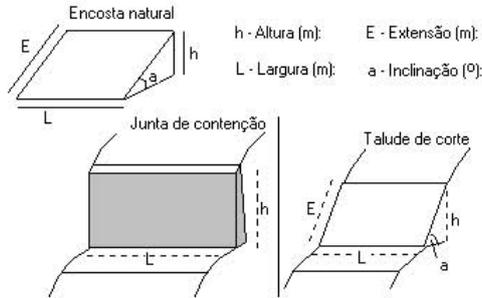
10 - OBSERVAÇÕES GERAIS

11 - RESPONSÁVEL PELA VISTORIA: SIDNEY/srgs

13 - ANEXOS

CD Associado:

Obs: Em caso de elaboração de croquis ou descrições, utilizar os parâmetros abaixo ilustrados para delimitar a geometria do talude ou obra de contenção existente.



LAUDO DE VISTORIA GEORIO No.: 971/98

1 -LOCALIZAÇÃO

Logradouro: do Açude

Categoria: Estrada

Complemento:

Bairro: Alto da Boa Vista

Número: 1768

R.A.: VIII

2 -DATA DO PEDIDO 31/08/98

3 -DATA DA VISTORIA 01/09/98

4 -ORIGEM DO PEDIDO VIII - R. A

5 -SOLICITANTE

Nome: Antônio Ricardo Barcelos

Telefone: 503-2988 (trab.)

6 -ASPECTOS REGIONAIS

6.1 - Tipo de Ocupação

Área Urbana Estruturada

Densidade: Baixa

6.2 - Tipo de Vegetação

Arbórea

Rasteira

Arbustiva

Densidade: Alta

6.3 - Tipo de Relevo: Montanhoso

7 -CARACTERÍSTICAS LOCAIS

7.1 - Tipo de Talude

Encosta Natural

Talude de Corte

Natureza do Material

Solo

7.2 - Espessura média aproximada do perfil do solo (m):

7.3 - Tipo de Drenagem: Construída

7.3.1 - Condição do Sistema de Drenagem: Danificada

7.4 - Condições de Água Subterrânea

7.5 - Risco

Tipo: Inexistente

Grau:

8 -CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA

8.1 - Situação: Sem Possibilidade de Ocorrência

8.2 - Data: / /

Hora Aproximada: :

8.3 - Volume aproximado do material mobilizado (m3):

8.4 - Tipo(s) de Movimento(s)

8.4.1 - Superfície de Deslizamento

8.4.2 - Classificação

8.5 - Conseqüências

Número de Vítimas Fatais:

8.6 - Descrição da Ocorrência (explicitar causas prováveis e conseqüências)

Obs.: Em caso de elaboração de croquis ou descrições ver figura na última página.**

As casas n°s 4, 5 e 6 são contíguas fazendo parte de uma vila residencial e foram construídas num platô da encosta natural do Morro do Almeida - Floresta da Tijuca, na cota superior ao logradouro e próximas do talude remanescente da abertura desta via. O acesso se dá através de rampa suave, a partir do portão de entrada do Agude da Solidão, tomando-se plano no trecho correspondente às referidas casas e são identificadas pelo n° 1768 da Estrada do Agude. O trecho do talude vistoriado tem $L \sim 15m$, $h \sim 5m$ e $i \sim 70^\circ$, sendo constituído de camada de solo residual/colúvio, recoberto por vegetação rasteira sobrejacente à rocha fraturada.

Defronte das casas observamos cicatrizes de pequenos deslizamentos e erosão de pontos da crista e da face do talude, causados pelo escoamento direcionado de águas pluviais provenientes das casas, bem como da encosta situada a montante da casa 6, sem entretanto, no momento acarretarem riscos para as citadas moradias, especificamente a de n° 6, do solicitante.

O local foi objeto de vistorias em duas oportunidades, sendo a mais recente com a presença do solicitante, Sr. Antônio Ricardo Barcelos, o qual foi orientado a respeito das obras de drenagem necessárias a serem executadas no seu imóvel e nos imóveis vizinhos.

9 - PROVIDÊNCIAS

À GEO-RIO/DFL para notificar os moradores abaixo a providenciar obras de impermeabilização do acesso frontal às casas, bem como drenagem, de modo que o escoamento das águas sejam através do pé do talude:

- casa 04 - Dorval Guerra Mendonça;
- casa 05 - Maria Dulce Esteves;
- casa 06 - Antônio Ricardo Barcelos.

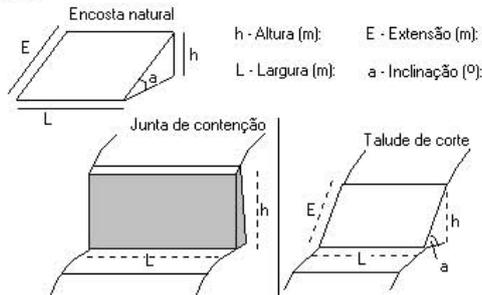
10 - OBSERVAÇÕES GERAIS

11 - RESPONSÁVEL PELA VISTORIA: Eng° RONALDO BEIRIZ SAAD

13 - ANEXOS

CD Associado:

Obs: Em caso de elaboração de croquis ou descrições, utilizar os parâmetros abaixo ilustrados para definir a geometria do talude ou obra de contenção existente.



LAUDO DE VISTORIA GEORIO No.: 139/99

1 -LOCALIZAÇÃO

Logradouro: Dr. Xavier Sigaud

Categoria: Rua

Complemento: Vila Benjamin Constant

Bairro: Urca

Número: 215

R.A.: IV

2 -DATA DO PEDIDO 29/12/98

3 -DATA DA VISTORIA 15/01/99

4 -ORIGEM DO PEDIDO Ofício no 831/SMAC

5 -SOLICITANTE

Nome: Sr. Mauricio Lobo - Secretário Municipal de Meio ambiente

Telefone:

6 -ASPECTOS REGIONAIS

6.1 - Tipo de Ocupação

Área Urbana Estruturada

Densidade: Alta

6.2 - Tipo de Vegetação

Rasteira

Densidade: Esparsa

6.3 - Tipo de Relevo: Montanhoso

7 -CARACTERÍSTICAS LOCAIS

7.1 - Tipo de Talude

Encosta Natural

Talude de Corte

Com obra de contenção : Muro de concreto Ciclóptico.

Natureza do Material

Solo

Matações 'in situ'

7.2 - Espessura média aproximada do perfil do solo (m):

7.3 - Tipo de Drenagem: Construída

7.3.1 - Condição do Sistema de Drenagem: Satisfatória

7.4 - Condições de Água Subterrânea

7.5 - Risco

Tipo: Instalado *

Grau: Baixo

* - Possibilidade de ocorrência de movimento de massa com atingimento de moradias ou bens públicos.

8 -CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA

8.1 - Situação: Com Possibilidade de Ocorrência

8.2 - Data: / /

Hora Aproximada: :

8.3 - Volume aproximado do material mobilizado (m3):

8.4 - Tipo(s) de Movimento(s)

8.4.1 - Superfície de Deslizamento

8.4.2 - Classificação

8.5 - Conseqüências

Número de Vítimas Fatais:

8.6 - Descrição da Ocorrência (explicitar causas prováveis e conseqüências)

Obs.: Em caso de elaboração de croquis ou descrições ver figura na última página.**

Aspectos Geológico-Geotécnicos

A Vila Benjamin Constant foi implantada no terço inferior de um setor de encosta situado na vertente norte do Morro da Babilônia, a montante da Av. Pasteur. A encosta exhibe no seu terço superior uma escarpa rochosa de alta declividade, havendo a partir daí uma quebra no relevo onde desenvolveu-se um patamar a meia encosta. A partir deste patamar segue-se o trecho onde começa a ocupação, caracterizado por afloramentos rochosos esparsos de gnaiss facoidal, blocos isolados e um perfil de alteração pouco desenvolvido. Ao longo do trecho fortemente escarpado, condicionado por planos estruturais do maciço, sobressaem as principais linhas de drenagem, representando uma extensa área de contribuição pluvial.

Os eventos chuvosos ocorridos em 1966/67, ocasionaram na área adjacente à Vila, escorregamentos e corridas de massa (foto 01) de razoáveis proporções. A partir daí, iniciou-se através da antiga Diretoria de Geotécnica uma série de intervenções no local visando à prevenção e redução do risco, foram então realizadas uma série de obras (muretas de concreto e canaletas) a montante do contato solo/rocha, que tem mostrado ao longo do tempo, eficácia na redução do risco.

Pontos Visitados

Os locais avaliados, correspondem a pontos de instabilidade associados à erosão em taludes de corte. Estes pontos refletem situações localizadas de baixo risco, que podem ser eliminadas através de soluções simples como pequenas obras ou reflorestamento. Dentre as 5 situações avaliadas, 3 são particulares, pois tratam-se de taludes de corte executado nos fundos das residências, e 2 estão situadas em área comum ao condomínio.

Ponto 1 - casa no 88

Talude com 60° de inclinação, com até 3 m de altura e constituído por solo e alteração de rocha, vem sofrendo erosão acentuada na região da crista. Junto a casa, a uma altura de 2m, existe um bloco de alteração de rocha, que se encontra parcialmente apoiado, havendo contudo a necessidade de efetuar a fixação do mesmo por medida preventiva.

Ponto 2 - casa no 71 A

Talude de corte com mais de 70° de inclinação, com cerca de 4m de altura, constituído por solo residual. O material apresenta boas características de resistência, contudo a ausência de cobertura vegetal próximo a crista, favorece o desenvolvimento de pequenos escorregamentos que poderão comprometer sua estabilidade e colocar em risco os fundos da casa.

Ponto 3 - casa no 61

Talude de corte vertical com até 4 m de altura, em solo residual, que vem sofrendo deslocamentos na base, tomando-se negativo em alguns pontos (foto 02). Este ponto não representa situação de risco iminente, contudo há necessidade de proteção superficial por medida preventiva.

Ponto 4 - a montante da caixa d'água

O terreno onde foi implantado a caixa d'água, foi cortado em sua base, formando um talude de forte inclinação (entre 65o e 70o) com cerca de 6 metros de altura, que nos seus primeiros 2 metros encontra-se arrimado por um muro de concreto (croquis abaixo). Contudo a inexistência de cobertura vegetal no talude a montante do muro, favorece o desenvolvimento de sulcos erosivos e pequenos deslizamentos superficiais.

Ponto 5 - Talude de corte em frente a casa no 80

Talude em solo residual, com mais de 70° de inclinação, 4 m de altura e 9 m de extensão; erosão acentuada com escorregamentos superficiais na crista, causando constantemente o assoreamento da canaleta a jusante. Não há risco para as casas, contudo recomenda-se obra de contenção, em função do local se constituir no acesso principal as residências do condomínio.

9 -PROVIDÊNCIAS

Pelo apresentado, recomenda-se encaminhar o presente:

1. à SMAC, para ciência;
2. à GEORIO/PRE, para oficiar a Fundação Instituto Benjamin Constant sobre a necessidade de realização de obras de estabilização nos locais indicados.

10 -OBSERVAÇÕES GERAIS

11 -RESPONSÁVEL PELA VISTORIA: Geól. José Antônio Furtado de Mendonça

13 -ANEXOS

Fotos

Outros

CD Associado:

LAUDO DE VISTORIA GEORIO No.: 199/2004

1 - LOCALIZAÇÃO

Logradouro: Itapirú
Categoria: Rua
Complemento:
Bairro: Rio Comprido
Estado: Rio de Janeiro

Número: 959

Riade: Rio de Janeiro

2 - DATA DO PEDIDO 15/10/03

3 - DATA DA VISTORIA 15/10/03

4 - ORIGEM DO PEDIDO G/COSIDEC - BO. 7169/03

5 - SOLICITANTE

Nome: Elza de Almeida
Telefone: 2558.3840 / 9357.8991

6 - ASPECTOS REGIONAIS

6.1 - Tipo de Ocupação
Área Urbana Estruturada

Densidade: Média

6.2 - Tipo de Vegetação
Rasteira

Densidade: Esparsa

6.3 - Tipo de Relevo: Ondulado

7 - CARACTERÍSTICAS LOCAIS

7.1 - Tipo de Talude
Encosta Natural
Talude de Corte

Natureza do Material
Solo

7.2 - Espessura média aproximada do perfil do solo (m):

7.3 - Tipo de Drenagem: Natural

7.3.1 - Condição do Sistema de Drenagem: Insuficiente

7.4 - Condições de Água Subterrânea

7.5 - Risco
Tipo: Instalado *
Grau: Médio

* - Possibilidade de ocorrência de movimento de massa com atingimento de moradias ou bens públicos.

8 - CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA

8.1 - Situação: Com Possibilidade de Ocorrência

8.2 - Data: / /
Hora Aproximada: :

8.3 - Volume aproximado do material mobilizado (m3):

8.4 - Tipo(s) de Movimento(s)

8.4.1 - Superfície de Deslizamento

8.4.2 - Classificação

8.5 - Conseqüências

Número de Vítimas Fatais:

8.6 - Descrição da Ocorrência (explicitar causas prováveis e conseqüências)

Obs.: Em caso de elaboração de croquis ou descrições ver figura na última página.**

No imóvel da Rua Itapirú nº 959 funciona um asilo, construído no sopé de uma encosta terrosa com inclinação em torno de 30°, o qual foi edificado em área plana obtida através de cortes no terreno, cujas contenções foram incorporadas a estrutura edificante.

Na divisa dos fundos o talude remanescente, composto por solo residual maduro e colúvio, tem cerca de 6,0 m de altura por 12,0 m de largura, arrimado através de muro em pedra de mão arrumada, nas dimensões acima citadas.

Aproximadamente 2/3 deste ruído há algum tempo, deixando o talude exposto a erosão, e as pedras depositadas em um patamar no sopé.

A montante deste, existe o terreno de nº 52, onde reside a Sra. Regina, que faz testada com a Rua Eliseu Visconti, a qual está sofrendo intervenções de obras pela SMH.

Foram observados três problemas geotécnicos:

- 1- Parte do volume de águas pluviais que escoam pela Rua Eliseu Visconti deságua sobre o terreno de nº 52, causando forte erosão na face do talude e carreando material terroso para dentro da casa principal do asilo. Em contato com técnico da SMH, fomos informados que o problema será resolvido;
- 2-A erosão provocada no talude, deixou as fundações dos fundos da casa da Sra. Regina em balanço;
- 3-A ruína parcial do muro instabilizou o terreno e colocou em risco parte da casa principal do asilo.

9 -PROVIDÊNCIAS

9.1 - À G/COSIDEC para:

a) Ratificar as interdições dos imóveis abaixo relacionados, e já interditados conforme Memº nº 968/GEO-RIO/DFL, já encaminhado a essa Coordenação:

- Rua Eliseu Visconti casa 52 - Srª Rejane;
- Fundos do imóvel nº 959 da Rua Itapirú (patamar junto ao muro ruído);

b) À SMH para ciência e providências cabíveis;

9.2 - A GEORIO/DFL para intimar o Asilo Santa Isabel Rainha de Portugal - Antiga Casa da Sopa, localizada na Rua Itapirú nº 959, a apresentar projeto de contenção para o talude localizado nos fundos do terreno, no prazo de 30 (trinta) dias, para sua aprovação nesta Fundação.

10 -OBSERVAÇÕES GERAIS

11 -**RESPONSÁVEL PELA VISTORIA:** Geólogo Wilmar T. Barros

13 -ANEXOS

CD Associado:

LAUDO DE VISTORIA GEORIO No.: 715/2005

1 -LOCALIZAÇÃO

Logradouro: do Catonho

Categoria: Estrada

Complemento:

Bairro: Sulacap

Estado: Rio de Janeiro

Número: 1560

País: Brasil

Cidade: Rio de Janeiro

2 -DATA DO PEDIDO 03/11/05

3 -DATA DA VISTORIA 03/11/05

4 -ORIGEM DO PEDIDO G/COSIDEC

5 -SOLICITANTE

Nome: Pedro Paulo

Telefone: 2435.1437

6 -ASPECTOS REGIONAIS

6.1 - Tipo de Ocupação

Área Urbana Estruturada

Densidade: Média

6.2 - Tipo de Vegetação

Arbórea

Arbustiva

Densidade: Média

6.3 - Tipo de Relevo: Montanhoso

7 -CARACTERÍSTICAS LOCAIS

7.1 - Tipo de Talude

Encosta Natural

Com obra de contenção :privada

Natureza do Material

Solo

7.2 - Espessura média aproximada do perfil do solo (m):

7.3 - Tipo de Drenagem: Construída

7.3.1 - Condição do Sistema de Drenagem: Insuficiente

7.4 - Condições de Água Subterrânea

7.5 - Risco

Tipo: Instalado *

Grau: Baixo

* - Possibilidade de ocorrência de movimento de massa com atingimento de moradias ou bens públicos.

8 -CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA

8.1 - Situação: Com Possibilidade de Ocorrência

8.2 - Data: / /

Hora Aproximada: :

8.3 - Volume aproximado do material mobilizado (m3):

8.4 - Tipo(s) de Movimento(s)

8.4.1 - Superfície de Deslizamento

8.4.2 - Classificação

8.5 - Conseqüências

Número de Vítimas Fatais:

8.6 - Descrição da Ocorrência (explicitar causas prováveis e conseqüências)

Obs.: Em caso de elaboração de croquis ou descrições ver figura na última página.**

Trata-se de um condomínio residencial que tem na divisa dos fundos um muro divisório com h \pm 3m, constituído por blocos de concreto, preenchidos com concreto.

O trecho inicial do muro, com aprox. 1,5m de altura está servindo como arrimo.

O muro localiza-se à \pm 1,5m de um anexo do condomínio onde situam-se os banheiros de serviço, o salão de festas e o apartamento do zelador (vide foto 1).

Durante o período de chuvas moderadas na madrugada do dia 03/11/2005, ocorreu transvasamento de águas pluviais e material terroso pelos drenos do muro, provocando alagamento na área de circulação interna.

Observamos ainda que, a montante existe uma área de encosta em forte adive, composta por solo residual maduro e argiloso, com inclinação variando entre 60 e 70°, com \pm 15,0m de altura, não apresentando, no momento, cobertura vegetal, facilitando desta forma a ação do intemperismo, que provoca o carreamento de material terroso na encosta e o seu depósito junto ao tardoz do referido muro. Como não há sistema drenagem e filtros nos drenos do mesmo, toda água e material terroso carreados com as chuvas transvasam por eles, causando este tipo de problema (vide fotos 2 e 3).

9 -PROVIDÊNCIAS

À GEO-RIO/DFL para notificar o Condomínio Moradas do Vale, sito na Estrada do Catonho nº. 1560, a executar no prazo de 60 (sessenta) dias obras de drenagem, visando a solução do problema.

10 -OBSERVAÇÕES GERAIS

Para o local já existe processo nº06/100724/2004 devendo que este laudo ser apensado ao mesmo.

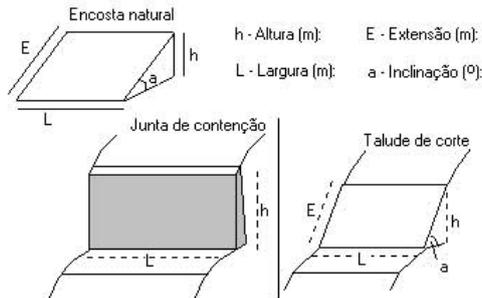
11 -RESPONSÁVEL PELA VISTORIA: Eng.º João Bernardo Fonseca de Almeida

13 -ANEXOS

Fotos

CD Associado:

Obs: Em caso de elaboração de croquis ou descrições, utilizar os parâmetros abaixo ilustrados para definir a geometria do talude ou obra de contenção existente.



Anexo 2. Fatores de Segurança Obtidos na Modelagem no GEO-SLOPE

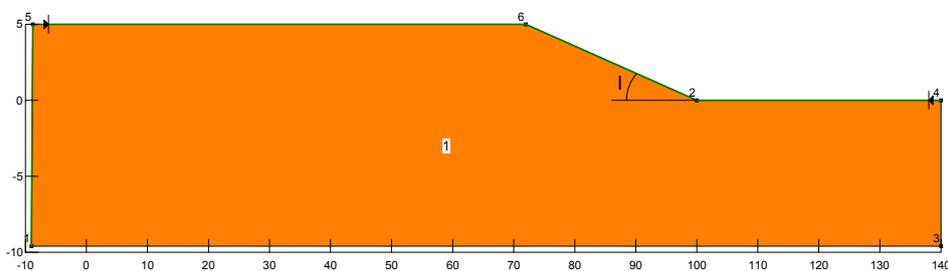


Fig. 1 - Geometria 1

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
1	19	05	10	20	S/NA	2,058
					0,0	1,830
					1,6	1,377
					3,2	1,166
					5,0	1,088
				25	S/NA	2,657
					0,0	2,289
					1,6	1,765
					3,2	1,458
					5,0	1,394
				29	S/NA	3,109
					0,0	2,705
					1,6	2,098
					3,2	1,735
					5,0	1,459
				33	S/NA	3,765
					0,0	3,154
					1,6	2,457
					3,2	2,033
					5,0	1,777
36	0,0	4,213				
	5,0	1,988				

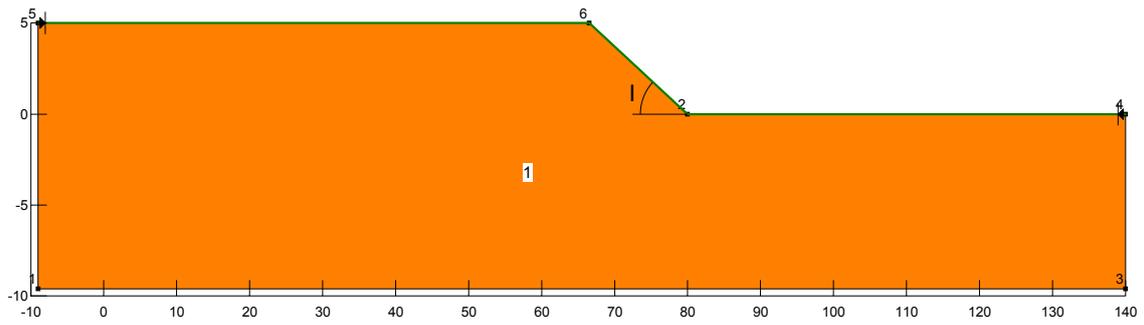


Fig. 2 - Geometria 2

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
2	19	05	20	20	S/NA	1,297
					0,0	1,154
					1,6	1,020
					3,2	0,561
				25	S/NA	1,662
					0,0	1,363
					1,6	1,248
					3,2	0,866
				29	S/NA	1,969
					0,0	1,678
					1,6	1,543
					3,2	0,922
				33	S/NA	2,264
					0,0	1,905
					1,6	1,832
					3,2	1,084
					5,0	0,988
				36	S/NA	2,581
					0,0	2,131
					1,6	1,982
3,2	1,264					
5,0	1,106					

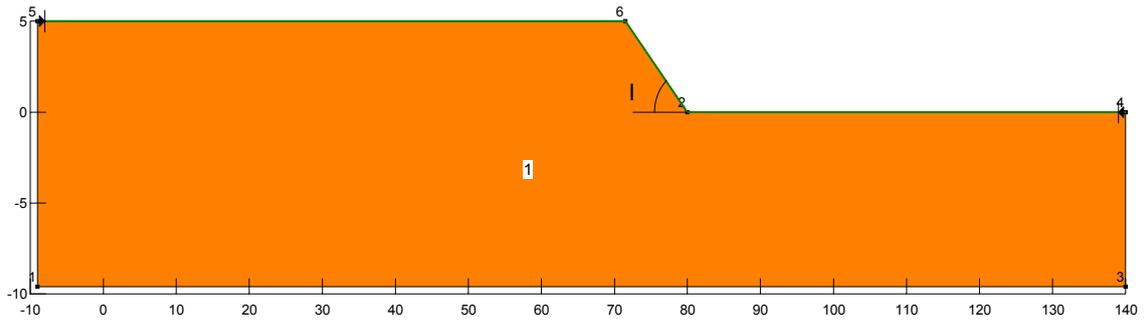


Fig. 3 - Geometria 3

Geometria	γ	h (m)	$l(^{\circ})$	$\Phi(^{\circ})$	hw(m)	F.S.
3	19	05	30	20	S/NA	1,219
					0,0	0,869
				25	S/NA	1,561
					0,0	0,986
				29	S/NA	1,850
					0,0	1,133
					1,6	1,070
				33	3,2	0,927
					S/NA	2,167
					0,0	1,592
					1,6	1,190
				36	3,2	1,103
					5,0	0,963
					S/NA	2,470
					0,0	1,969
					1,6	1,872
	3,2	1,290				
	5,0	0,897				

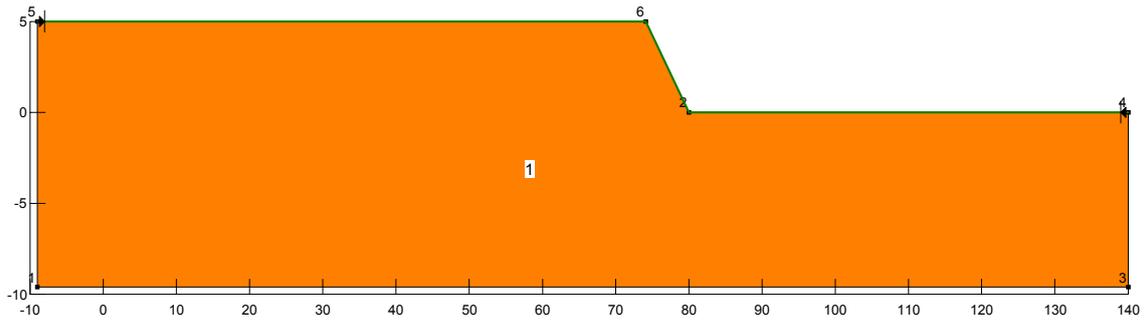


Fig. 4 - Geometria 4

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
4	19	05	40	20	S/NA	1,116
					0,0	0,912
				25	S/NA	1,459
					0,0	0,955
				29	S/NA	1,561
					0,0	1,050
				33	S/NA	1,812
					0,0	1,365
					2,0	1,256
				36	3,2	0,719
					S/NA	2,058
					0,0	1,371
2,0	1,434					
				3,2	0,898	

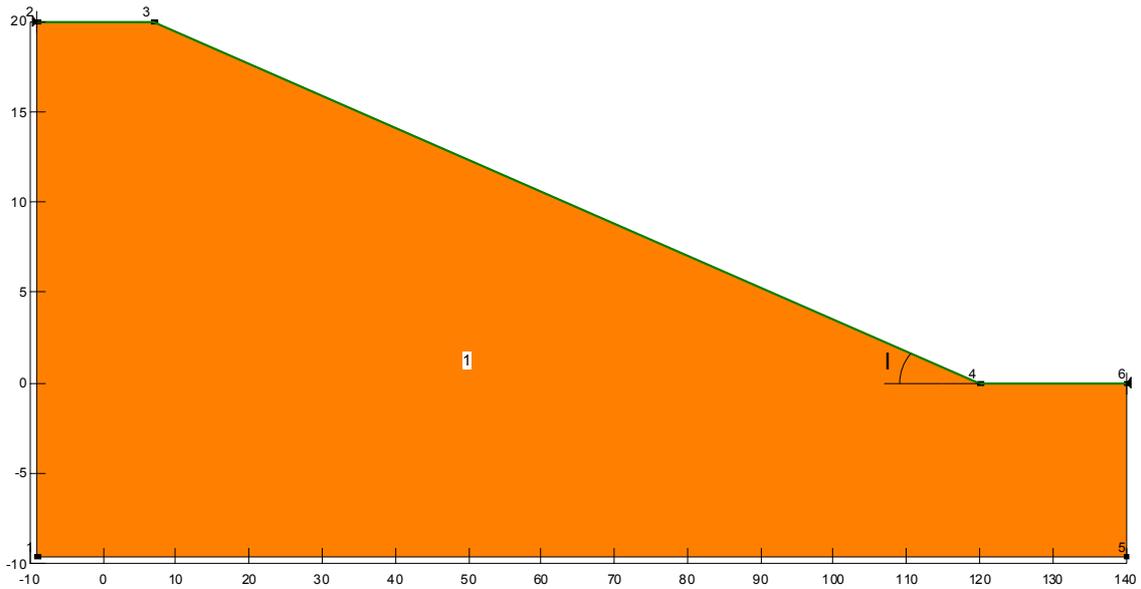


Fig. 5 - Geometria 5

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
5	19	20	10	20	S/NA	2,057
					0,0	1,821
					1,6	1,606
					3,2	1,398
					4,8	1,195
					6,4	1,037
					8,0	0,992
				25	S/NA	2,635
					0,0	2,328
					1,6	1,995
					3,2	1,784
					4,8	1,543
					6,4	1,405
					8,0	1,309
				29	11,6	1,279
					15,0	1,270
					20,0	1,232
					S/NA	3,132
					0,0	2,759
				33	5,0	1,778
					10,0	1,527
					15,0	1,508
					20,0	1,465
				36	S/NA	3,670
					0,0	3,241
					5,0	2,151
					10,0	1,788
					15,0	1,717
	0,0	4,105				
	20,0	1,920				

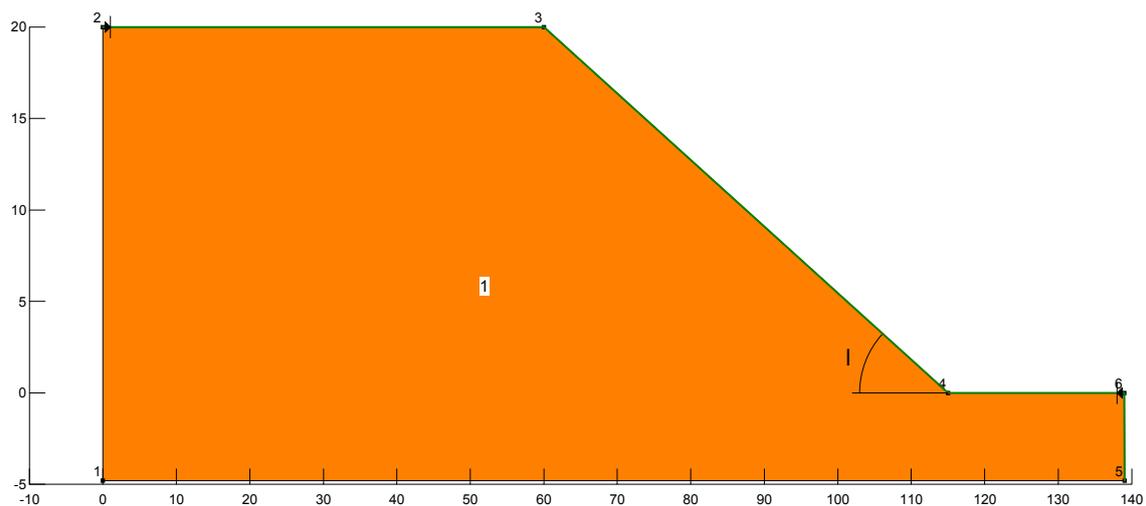


Fig. 6 - Geometria 6

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
6	19	20	20	20	0,0	1,002
					1,6	0,908
				25	0,0	1,283
					1,6	1,149
					3,2	1,059
				29	4,8	0,978
					0,0	1,525
					1,6	1,368
					3,2	1,279
					4,8	1,182
				33	6,4	1,014
					8,0	0,812
					0,0	1,787
					1,6	1,585
					3,2	1,444
					4,8	1,379
				36	6,4	1,177
					8,0	1,058
					10,0	0,978
					0,0	1,998
4,8	1,550					
6,4	1,322					
	8,0	1,181				
	10,0	1,110				
	11,6	0,971				

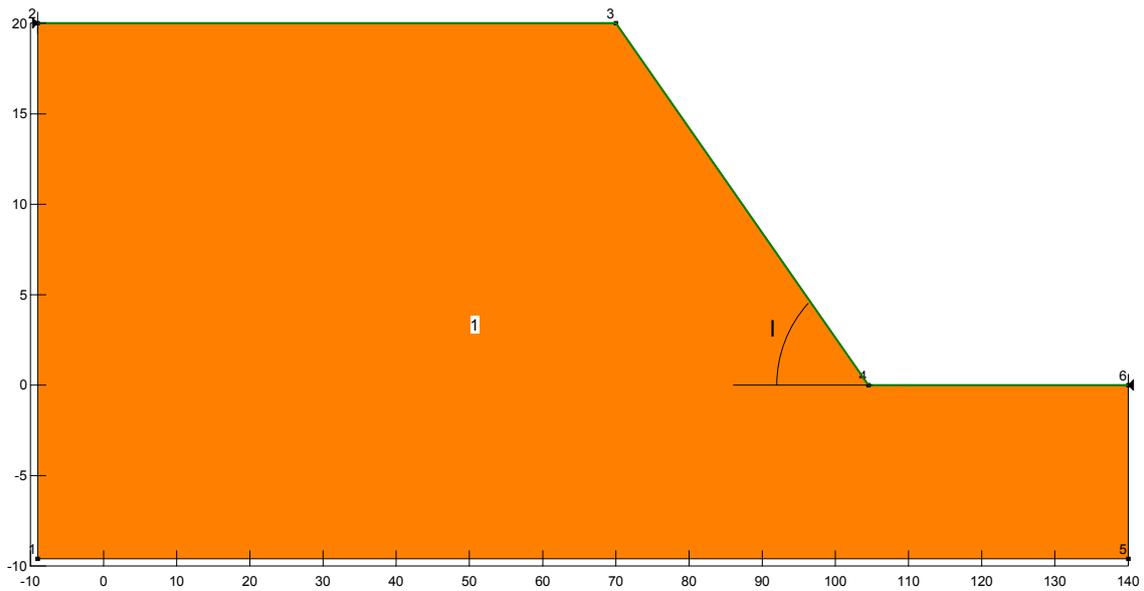


Fig. 7 - Geometria 7

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
7	19	20	30	20	S/NA	0,637
				25	S/NA	0,826
				29	S/NA	0,967
				33	S/NA	1,126
					0,0	1,118
					1,6	1,101
				36	3,2	0,998
					S/NA	1,278
					0,0	1,273
					1,6	1,251
					3,2	1,116
				4,8	0,903	

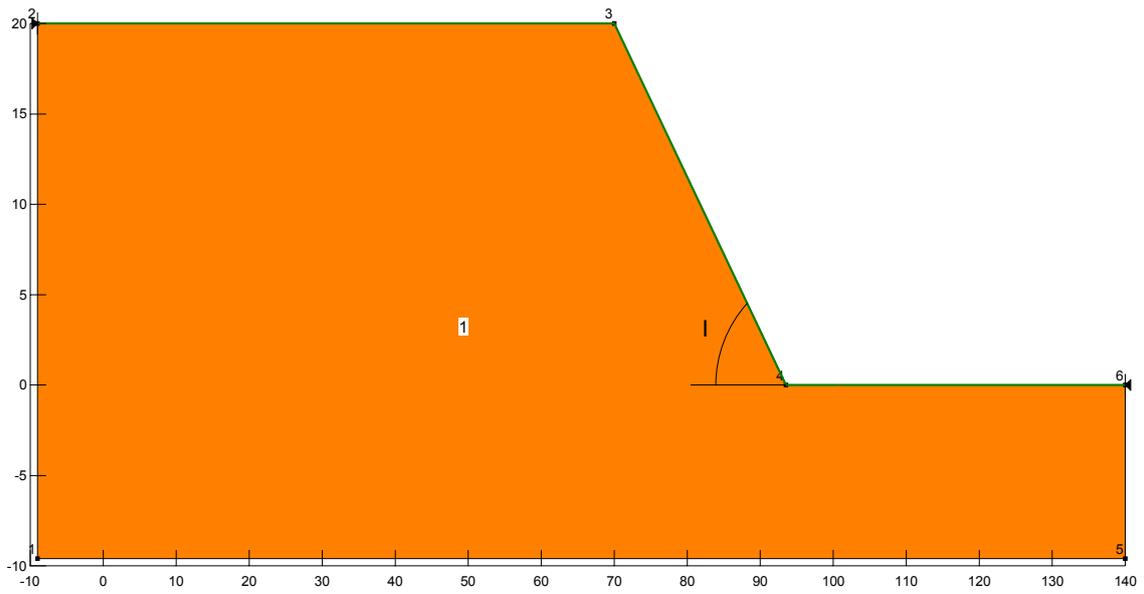


Fig. 8 - Geometria 8

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
8	19	20	40	20	S/NA	0,527
				25	S/NA	0,650
				29	S/NA	0,676
				33	S/NA	0,822
				36	S/NA	0,926

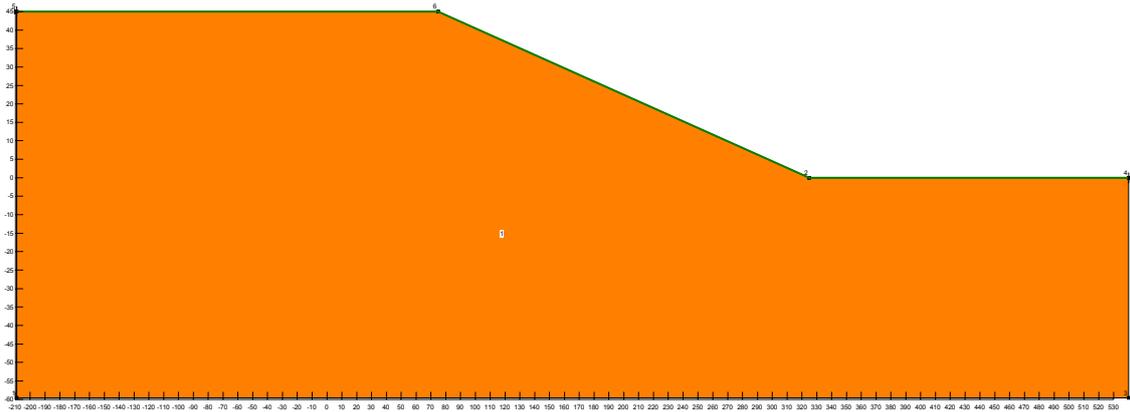


Fig. 9 - Geometria 9

Geometria	γ	h (m)	$l(^{\circ})$	$\Phi(^{\circ})$	hw(m)	F.S.
9	19	45	10	20	S/NA	2,022
					0,0	1,784
					1,6	1,706
					3,2	1,637
					4,8	1,610
					6,4	1,371
					8,0	1,273
					11,6	1,095
					26,0	0,971
				25	S/NA	2,591
					0,0	2,287
					4,8	2,097
					8,0	1,665
					26,0	1,305
				29	45,0	1,210
					S/NA	3,080
					0,0	2,717
					4,8	2,309
					8,0	2,214
				33	26,0	1,548
					45,0	1,439
					S/NA	3,608
				36	0,0	3,184
					45,0	1,685
S/NA	4,036					
					0,0	3,561
					45,0	1,886

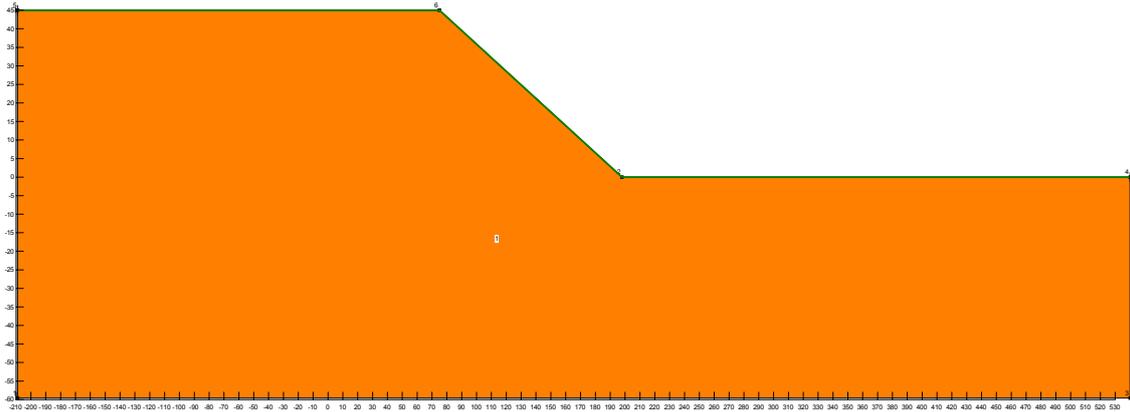


Fig. 10 - Geometria 10

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
10	19	45	20	20	S/NA	0,995
				25	S/NA	1,275
					0,0	1,275
					4,8	1,057
					8,0	0,843
				29	S/NA	1,516
					0,0	1,516
					4,8	1,242
					8,0	1,019
				33	11,6	0,898
					S/NA	1,776
					0,0	1,776
					4,8	1,478
					8,0	1,191
				36	11,6	1,045
					15,0	0,864
					S/NA	1,987
					0,0	1,987
					4,8	1,627
					8,0	1,359
11,6	1,170					
15,0	0,967					

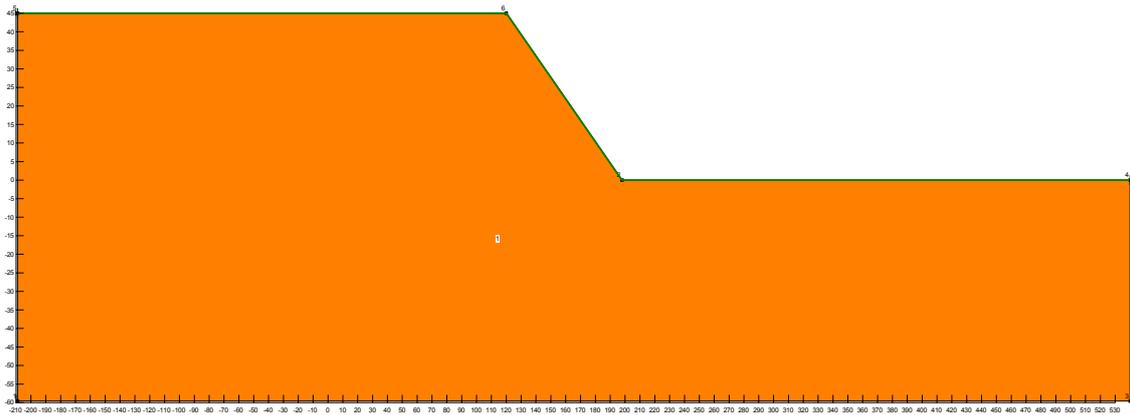


Fig. 11 - Geometria 11

Geometria	γ	h (m)	l(°)	Φ (°)	hw(m)	F.S.
11	19	45	30	20	S/NA	0,632
				25	S/NA	0,810
				29	S/NA	0,963
				33	S/NA	1,128
					0,0	1,128
					4,8	1,034
				36	8,0	0,980
					S/NA	1,262
					0,0	1,262
					4,8	1,157
				8,0	1,005	
				11,6	0,806	

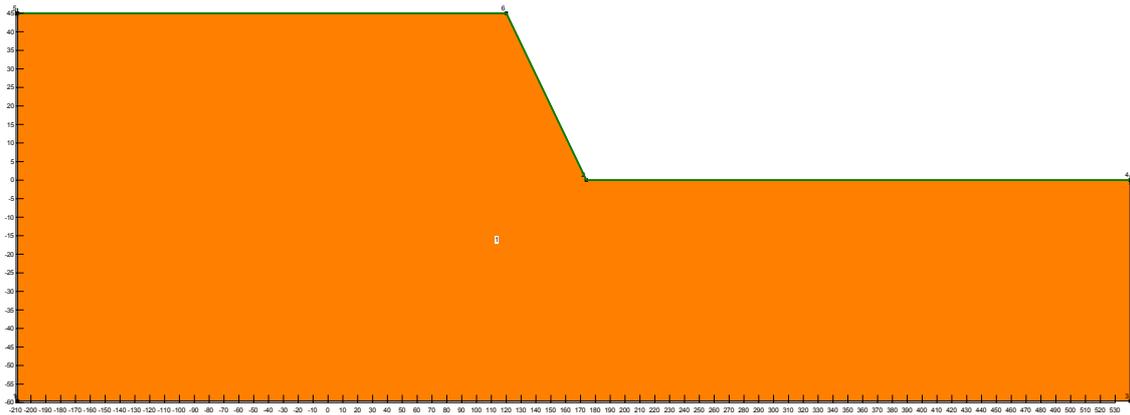


Fig. 12 - Geometria 12

Geometria	γ	h (m)	$l(^{\circ})$	$\Phi(^{\circ})$	hw(m)	F.S.
11	19	45	40	20	S/NA	0,441
				25	S/NA	0,565
				29	S/NA	0,671
				33	S/NA	0,782
				36	S/NA	0,875

Anexo 3. Detalhamento do Arquivo do MATLAB Criado na Modelagem da Lógica Fuzzy

[System]

Name='Previsão do Risco de Escorregamento'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=8

NumOutputs=1

NumRules=144

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='Altura'

Range=[0 45]

NumMFs=3

MF1='Baixa': 'trimf', [-10 0 8]

MF2='Média': 'trimf', [5 15 25]

MF3='Alta': 'trapmf', [20 40 45 60]

[Input2]

Name='Inclinação'

Range=[0 90]

NumMFs=3

MF1='Baixa': 'trimf', [0 0 15]

MF2='Média': 'trimf', [12 22 32]

MF3='Alta': 'trapmf', [28 70 90 121]

[Input3]

Name='AngulodeAtrito'

Range=[20 45]

NumMFs=3

MF1='Baixo': 'trapmf', [-7.941 16.53 22 25]

MF2='Médio': 'trimf', [22 27 32]

MF3='Alto': 'trapmf', [29 40.0066137566138 45 54]

[Input4]

Name='Pluviosidade'

Range=[0 50]

NumMFs=3

MF1='Leve': 'trimf', [0 0 10]

MF2='Moderada': 'trimf', [5 15 25]

MF3='Forte': 'trapmf', [20 40.1455026455026 61.6 67.1]

[Input5]

Name='Drenagem'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='Ineficiente': 'trimf', [-40 0 40]

MF2='PoucoEficiente': 'trimf', [10 50 90]

MF3='Eficiente': 'trimf', [60 100 140]

[Input6]

Name='Vegetação'

Range=[0 6]

NumMFs=3

MF1='Rasteira': 'trimf', [0 0.75 1.5]

MF2='Arbustiva': 'trimf', [1.25 2.25 3.25]

MF3='Arbórea': 'trapmf', [2.75 3.5 6 6]

[Input7]

Name='Ocupaçãodaencosta'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='Desordenada': 'trimf', [0 20 40]

MF2='PoucoOrdenada': 'trimf', [30 55 80]

MF3='Ordenada': 'trapmf', [70 98 101 105.9]

[Input8]

Name='EspessuradeSolo'

Range=[0 5]

NumMFs=3

MF1='Delgada': 'trapmf', [-2.35 -0.452 1 2]

MF2='Espessa': 'trapmf', [1.5 2.5 3.5 4.5]

MF3='MuitoEspessa': 'trapmf', [4 4.5 5.689 7.289]

[Output1]

Name='PrevisãodoRisco'

Range=[0 100]

NumMFs=4

MF1='Inexistente': 'trapmf', [-35.7 -3.74 30 50]

MF2='Médio': 'trimf', [62.5 75 87.5]

MF3='Alto': 'trapmf', [75 90 140 155]

MF4='Baixo': 'trimf', [45 60 75]

[Rules]

1 0 0 0 0 0 0, 4 (1) : 1

2 0 0 0 0 0 0, 2 (1) : 1

3 0 0 0 0 0 0, 3 (1) : 1

0 1 0 0 0 0 0, 4 (1) : 1

0 2 0 0 0 0 0, 2 (1) : 1

0 3 0 0 0 0 0, 3 (1) : 1

0 0 1 0 0 0 0, 3 (1) : 1

0 0 2 0 0 0 0, 2 (1) : 1

0 0 3 0 0 0 0, 4 (1) : 1

0 0 0 1 0 0 0, 4 (1) : 1

0 0 0 2 0 0 0, 2 (1) : 1

0 0 0 3 0 0 0, 3 (1) : 1

0 0 0 0 3 0 0, 1 (1) : 1

0 0 0 0 2 0 0, 2 (1) : 1

0 0 0 0 1 0 0, 3 (1) : 1

0 0 0 0 0 1 0, 2 (1) : 1

0 0 0 0 0 2 0, 4 (1) : 1

0 0 0 0 0 3 0, 1 (1) : 1

0 0 0 0 0 0 1, 3 (1) : 1

00000020,4 (1): 1
00000030,1 (1): 1
00000001,2 (1): 1
00000002,1 (1): 1
00000003,2 (1): 1
00011000,2 (0.8): 1
00012000,4 (0.8): 1
00013000,1 (0.8): 1
00021000,3 (0.8): 1
00022000,2 (0.8): 1
00023000,4 (0.8): 1
00031000,3 (0.8): 1
00032000,3 (0.8): 1
00033000,2 (0.8): 1
00010100,4 (0.8): 1
00010200,1 (0.8): 1
00010300,1 (0.8): 1
00020100,3 (0.8): 1
00020200,2 (0.8): 1
00020300,4 (0.8): 1
00030100,3 (0.8): 1
00030200,3 (0.8): 1
00030300,2 (0.8): 1
00010010,2 (0.8): 1
00010020,4 (0.8): 1
00010030,1 (0.8): 1
00020010,3 (0.8): 1
00020020,2 (0.8): 1
00020030,4 (0.8): 1
00030010,3 (0.8): 1
00030020,3 (0.8): 1
00030030,2 (0.8): 1
00010001,4 (0.8): 1
00010002,1 (0.8): 1
00010003,4 (0.8): 1
00020001,2 (0.8): 1
00020002,4 (0.8): 1

00020003, 2 (0.8) : 1
00030001, 3 (0.8) : 1
00030002, 2 (0.8) : 1
00030003, 3 (0.8) : 1
11110000, 1 (1) : 1
11120000, 4 (1) : 1
11130000, 3 (1) : 1
11210000, 1 (1) : 1
11220000, 1 (1) : 1
11230000, 2 (1) : 1
11310000, 1 (1) : 1
11320000, 1 (1) : 1
11330000, 4 (1) : 1
12110000, 4 (1) : 1
12120000, 3 (1) : 1
12130000, 3 (1) : 1
12210000, 4 (1) : 1
12220000, 2 (1) : 1
12230000, 3 (1) : 1
12310000, 1 (1) : 1
12320000, 4 (1) : 1
12330000, 2 (1) : 1
13110000, 3 (1) : 1
13120000, 3 (1) : 1
13130000, 3 (1) : 1
13210000, 2 (1) : 1
13220000, 3 (1) : 1
13230000, 3 (1) : 1
13310000, 4 (1) : 1
13320000, 2 (1) : 1
13330000, 3 (1) : 1
21110000, 1 (1) : 1
21120000, 2 (1) : 1
21130000, 3 (1) : 1
21210000, 1 (1) : 1
21220000, 4 (1) : 1
21230000, 2 (1) : 1

2 1 3 1 0 0 0 0, 1 (1) : 1
2 1 3 2 0 0 0 0, 1 (1) : 1
2 1 3 3 0 0 0 0, 4 (1) : 1
2 2 1 1 0 0 0 0, 2 (1) : 1
2 2 1 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 2 1 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 2 2 1 0 0 0 0, 2 (1) : 1
2 2 2 2 0 0 0 0, 2 (1) : 1
2 2 2 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 2 3 1 0 0 0 0, 4 (1) : 1
2 2 3 2 0 0 0 0, 2 (1) : 1
2 2 3 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 1 1 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 1 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 1 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 2 1 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 2 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 2 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 3 1 0 0 0 0, 2 (1) : 1
2 3 3 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
2 3 3 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 1 1 1 0 0 0 0, 4 (1) : 1
3 1 1 2 0 0 0 0, 2 (1) : 1
3 1 1 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 1 2 1 0 0 0 0, 1 (1) : 1
3 1 2 2 0 0 0 0, 4 (1) : 1
3 1 2 3 0 0 0 0, 2 (1) : 1
3 1 3 1 0 0 0 0, 1 (1) : 1
3 1 3 2 0 0 0 0, 1 (1) : 1
3 1 3 3 0 0 0 0, 4 (1) : 1
3 2 1 1 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 2 1 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 2 1 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 2 2 1 0 0 0 0, 2 (1) : 1
3 2 2 2 0 0 0 0, 2 (1) : 1
3 2 2 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 2 3 1 0 0 0 0, 4 (1) : 1

3 2 3 2 0 0 0 0, 2 (1) : 1
3 2 3 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 1 1 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 1 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 1 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 2 1 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 2 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 2 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 3 1 0 0 0 0, 2 (1) : 1
3 3 3 2 0 0 0 0, 3 (1) : 1
3 3 3 3 0 0 0 0, 3 (1) : 1
1 1 3 1 3 3 3 2, 1 (1) : 1
3 3 1 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 2 2 2 2 2 3, 2 (1) : 1

Anexo 4. Tabela Completa com as Regras Utilizadas na Modelagem da Lógica Fuzzy

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
1	Se	Baixa															ENTÃO	Baixo
2	Se	Média															ENTÃO	Médio
3	Se	Alta															ENTÃO	Alto
4	Se			Baixa													ENTÃO	Baixo
5	Se			Média													ENTÃO	Médio
6	Se			Alta													ENTÃO	Alto
7	Se					Baixo											ENTÃO	Alto
8	Se					Médio											ENTÃO	Médio
9	Se					Alto											ENTÃO	Baixo
10	Se							Leve									ENTÃO	Baixo
11	Se							Moderada									ENTÃO	Médio
12	Se							Forte									ENTÃO	Alto

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
13	Se									Eficiente							ENTÃO	Inexistente
14	Se									Pouco Eficiente							ENTÃO	Médio
15	Se									Ineficiente							ENTÃO	Alto
16	Se											Rasteira					ENTÃO	Médio
17	Se											Arbustiva					ENTÃO	Baixo
18	Se											Arbórea					ENTÃO	Inexistente
19	Se													Desordenada			ENTÃO	Alto
20	Se													Pouco Ordenada			ENTÃO	Baixo
21	Se													Ordenada			ENTÃO	Inexistente
22	Se														Delgada		ENTÃO	Médio
23	Se														Espessa		ENTÃO	Inexistente
24	Se														Muito Espessa		ENTÃO	Médio
25	Se							Leve	E	Ineficiente							ENTÃO	Médio
26	Se							Leve	E	Pouco Eficiente							ENTÃO	Baixo
27	Se							Leve	E	Eficiente							ENTÃO	Inexistente

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco	
28	Se							Moderada	E	Ineficiente								ENTÃO	Alto
29	Se							Moderada	E	Pouco Eficiente								ENTÃO	Médio
30	Se							Moderada	E	Eficiente								ENTÃO	Baixo
31	Se							Forte	E	Ineficiente								ENTÃO	Alto
32	Se							Forte	E	Pouco Eficiente								ENTÃO	Alto
33	Se							Forte	E	Eficiente								ENTÃO	Médio
34	Se							Leve			E	Rasteira						ENTÃO	Baixo
35	Se							Leve			E	Arbustiva						ENTÃO	Inexistente
36	Se							Leve			E	Arbórea						ENTÃO	Inexistente
37	Se							Moderada			E	Rasteira						ENTÃO	Alto
38	Se							Moderada			E	Arbustiva						ENTÃO	Médio
39	Se							Moderada			E	Arbórea						ENTÃO	Baixo
40	Se							Forte			E	Rasteira						ENTÃO	Alto
41	Se							Forte			E	Arbustiva						ENTÃO	Alto
42	Se							Forte			E	Arbórea						ENTÃO	Médio

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
43	Se							Leve					E	Desordenada			ENTÃO	Médio
44	Se							Leve					E	Pouco Ordenada			ENTÃO	Baixo
45	Se							Leve					E	Ordenada			ENTÃO	Inexistente
46	Se							Moderada					E	Desordenada			ENTÃO	Alto
47	Se							Moderada					E	Pouco Ordenada			ENTÃO	Médio
48	Se							Moderada					E	Ordenada			ENTÃO	Baixo
49	Se							Forte					E	Desordenada			ENTÃO	Alto
50	Se							Forte					E	Pouco Ordenada			ENTÃO	Alto
51	Se							Forte					E	Ordenada			ENTÃO	Médio
52	Se							Leve							E	Delgada	ENTÃO	Baixo
53	Se							Leve							E	Espessa	ENTÃO	Inexistente
54	Se							Leve							E	Muito Espessa	ENTÃO	Baixo
55	Se							Moderada							E	Delgada	ENTÃO	Médio
56	Se							Moderada							E	Espessa	ENTÃO	Baixo
57	Se							Moderada							E	Muito Espessa	ENTÃO	Médio

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
58	Se							Forte							E	Delgada	ENTÃO	Alto
59	Se							Forte							E	Espessa	ENTÃO	Médio
60	Se							Forte							E	Muito Espessa	ENTÃO	Alto
61	Se	Baixa	E	Baixa	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
62	Se	Baixa	E	Baixa	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Baixo
63	Se	Baixa	E	Baixa	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto
64	Se	Baixa	E	Baixa	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
65	Se	Baixa	E	Baixa	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Inexistente
66	Se	Baixa	E	Baixa	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Médio
67	Se	Baixa	E	Baixa	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
68	Se	Baixa	E	Baixa	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Inexistente
69	Se	Baixa	E	Baixa	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Baixo
70	Se	Baixa	E	Média	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Baixo
71	Se	Baixa	E	Média	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Alto
72	Se	Baixa	E	Média	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
73	Se	Baixa	E	Média	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Baixo
74	Se	Baixa	E	Média	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Médio
75	Se	Baixa	E	Média	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Alto
76	Se	Baixa	E	Média	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
77	Se	Baixa	E	Média	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Baixo
78	Se	Baixa	E	Média	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Médio
79	Se	Baixa	E	Alta	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Alto
80	Se	Baixa	E	Alta	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Alto
81	Se	Baixa	E	Alta	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto
82	Se	Baixa	E	Alta	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Médio
83	Se	Baixa	E	Alta	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Alto
84	Se	Baixa	E	Alta	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Alto
85	Se	Baixa	E	Alta	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Baixo
86	Se	Baixa	E	Alta	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Médio
87	Se	Baixa	E	Alta	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Alto

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
88	Se	Média	E	Baixa	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
89	Se	Média	E	Baixa	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Médio
90	Se	Média	E	Baixa	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto
91	Se	Média	E	Baixa	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
92	Se	Média	E	Baixa	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Baixo
93	Se	Média	E	Baixa	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Médio
94	Se	Média	E	Baixa	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
95	Se	Média	E	Baixa	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Inexistente
96	Se	Média	E	Baixa	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Baixo
97	Se	Média	E	Média	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Médio
98	Se	Média	E	Média	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Alto
99	Se	Média	E	Média	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto
100	Se	Média	E	Média	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Médio
101	Se	Média	E	Média	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Médio
102	Se	Média	E	Média	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Alto

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
103	Se	Média	E	Média	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Baixo
104	Se	Média	E	Média	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Médio
105	Se	Média	E	Média	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Alto
106	Se	Média	E	Alta	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Alto
107	Se	Média	E	Alta	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Alto
108	Se	Média	E	Alta	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto
109	Se	Média	E	Alta	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Alto
110	Se	Média	E	Alta	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Alto
111	Se	Média	E	Alta	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Alto
112	Se	Média	E	Alta	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Médio
113	Se	Média	E	Alta	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Alto
114	Se	Média	E	Alta	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Alto
115	Se	Alta	E	Baixa	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Baixo
116	Se	Alta	E	Baixa	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Médio
117	Se	Alta	E	Baixa	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
118	Se	Alta	E	Baixa	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
119	Se	Alta	E	Baixa	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Baixo
120	Se	Alta	E	Baixa	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Médio
121	Se	Alta	E	Baixa	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Inexistente
122	Se	Alta	E	Baixa	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Inexistente
123	Se	Alta	E	Baixa	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Baixo
124	Se	Alta	E	Média	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Alto
125	Se	Alta	E	Média	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Alto
126	Se	Alta	E	Média	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto
127	Se	Alta	E	Média	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Médio
128	Se	Alta	E	Média	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Médio
129	Se	Alta	E	Média	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Alto
130	Se	Alta	E	Média	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Baixo
131	Se	Alta	E	Média	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Médio
132	Se	Alta	E	Média	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Alto

Regra	1	Altura	2	Inclinação	3	Ângulo de Atrito	4	Pluviosidade	5	Drenagem	6	Vegetação	7	Ocupação da Encosta	8	Espessura de Solo	9	Previsão do Risco
133	Se	Alta	E	Alta	E	Baixo	E	Leve									ENTÃO	Alto
134	Se	Alta	E	Alta	E	Baixo	E	Moderada									ENTÃO	Alto
135	Se	Alta	E	Alta	E	Baixo	E	Forte									ENTÃO	Alto
136	Se	Alta	E	Alta	E	Médio	E	Leve									ENTÃO	Alto
137	Se	Alta	E	Alta	E	Médio	E	Moderada									ENTÃO	Alto
138	Se	Alta	E	Alta	E	Médio	E	Forte									ENTÃO	Alto
139	Se	Alta	E	Alta	E	Alto	E	Leve									ENTÃO	Médio
140	Se	Alta	E	Alta	E	Alto	E	Moderada									ENTÃO	Alto
141	Se	Alta	E	Alta	E	Alto	E	Forte									ENTÃO	Alto
142	Se	Baixa	E	Baixa	E	Alto	E	Leve	E	Eficiente	E	Arbórea	E	Ordenada	E	Espessa	ENTÃO	Inexistente
143	Se	Alta	E	Alta	E	Baixo	E	Forte	E	Ineficiente	E	Rasteira	E	Desordenada	E	Delgada	ENTÃO	Alto
144	Se	Média	E	Média	E	Médio	E	Moderada	E	Pouco Eficiente	E	Arbustiva	E	Pouco Ordenada	E	Muito Espessa	ENTÃO	Médio