



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL

LÁDDYLA THUANNY VITAL BEZERRA

MAPEAMENTO DE RISCO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE
MOVIMENTOS DE MASSA NA COMUNIDADE SÃO JOSÉ DO JACÓ,
NATAL/RN

Natal

2019

LÁDDYLA THUANNY VITAL BEZERRA

**MAPEAMENTO DE RISCO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MOVIMENTOS
DE MASSA NA COMUNIDADE SÃO JOSÉ DO JACÓ, NATAL/RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

Coorientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Natal, 26 de julho de 2019.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Bezerra, Laddyla Thuanny Vital.

Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN / Laddyla Thuanny Vital Bezerra. - 2019.

337f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Osvaldo de Freitas Neto.

Coorientador: Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior.

1. Perigo - Dissertação. 2. Vulnerabilidade - Dissertação. 3. Movimento de massa - Dissertação. 4. Probabilidade - Dissertação. 5. AHP - Dissertação. I. Freitas Neto, Osvaldo de. II. Santos Júnior, Olavo Francisco dos. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

LÁDDYLA THUANNY VITAL BEZERRA

**MAPEAMENTO DE RISCO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MOVIMENTOS DE
MASSA NA COMUNIDADE SÃO JOSÉ DO JACÓ, NATAL/RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Geotecnia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Orientador, UFRN

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Coorientador, UFRN

Prof. Dr. Carlos Wilmer Costa – Examinador Interno, UFRN

Prof. Dr. Marcos Barreto de Mendonça – Examinador Externo, UFRJ

Natal, 26 de julho de 2019.

MAPEAMENTO DE RISCO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MOVIMENTOS DE MASSA NA COMUNIDADE SÃO JOSÉ DO JACÓ, EM NATAL/RN

LÁDDYLA THUANNY VITAL BEZERRA

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

Coorientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

RESUMO

Os movimentos de massa, embora sejam processos naturais da dinâmica da superfície do planeta, podem ser acelerados ou desencadeados pela interferência antrópica. A ocupação inadequada de áreas altamente suscetíveis aos processos de movimentação de massa é a principal causa de acidentes associados a escorregamentos nas encostas urbanas brasileiras, especialmente aquelas ocupadas por assentamentos e favelas. Em Natal – RN, a existência de áreas de relevo com alta declividade, aliado à ocupação humana inadequada, vêm tornando o município suscetível a problemas de instabilidade de encostas. Uma das áreas que sofre com essa problemática é a Comunidade São José do Jacó, local no qual este trabalho foi desenvolvido. Neste contexto, esta pesquisa objetivou mapear o risco de ocorrência de movimentos de massa, assim como quantificar a estabilidade dos taludes adjacentes à Comunidade São José do Jacó. Para o mapeamento do risco, utilizou-se um modelo qualiquantitativo proposto por Faria (2011), o qual implementa a técnica de avaliação multicritério AHP a um sistema informação geográficas (SIG). Para as análises de estabilidade da encosta foram utilizadas as abordagens determinística e probabilística, com auxílio do programa Slide Versão 7.0, desenvolvido pela Rocscience. Os resultados da análise de risco apontaram para existência de uma situação crítica de risco para a população residente da área, principalmente relacionada à possibilidade de ocorrência do movimento de massa do tipo escorregamento/deslizamento, com possíveis danos econômicos, ambientais, e principalmente, sociais. As análises de estabilidade tanto determinísticas quanto probabilísticas indicaram possibilidade de instabilidade em duas das seções avaliadas sob condição hipotética de completa saturação. Nas demais seções, as simulações indicaram estabilidade.

Palavras-chave: Risco, Perigo, Vulnerabilidade, Estabilidade, Probabilidade, Movimento de massa, AHP.

RISK MAPPING AND STABILITY ANALYSIS OF MASS MOVEMENTS IN THE SÃO JOSÉ DO JACÓ COMMUNITY, IN NATAL/RN

LÁDDYLA THUANNY VITAL BEZERRA

Advisor: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

Co-Advisor: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

ABSTRACT

Despite being natural processes of Earth's surface dynamics, mass movements could be accelerated or unleashed by anthropic interference. Inadequate occupation of areas highly susceptible to mass movement processes, are the principal cause of accidents associated with landslides in Brazilian urban slopes, especially those occupied by settlements and slums. In Natal, RN, the existence of high declivity areas allied to inappropriate human occupation makes the municipality susceptible to slope stability issues. One of the areas dealing with this problem is the São José do Jacó community, where this work has focused. In that context, the present research aimed to map mass movements occurrence risk, as well as quantify the stability of slopes neighboring the São José do Jacó community. A semiquantitative model proposed by Faria (2011), which implement the multi-criteria evaluation technique AHP in a GIS system, was used for risk mapping. For slope stability analysis both deterministic and probabilistic approaches were applied, assisted by the *software* Slide version 7.0, developed by Rocscience. The risk analysis results show a critical hazard situation for the area residents, mostly related to the possibility of slide mass movements, with potential economic, environmental, and social losses. Considering the hypothetical condition of complete saturation, both deterministic and probabilistic stability analyses indicate the possibility of instability in sections 03 and 06. Simulations indicated stability in all other sections.

Key words: risk, hazard, vulnerability, stability, probability, mass movements, AHP Method.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1.	OS MOVIMENTOS DE MASSA E AS SUAS TIPOLOGIAS	24
2.2.	A QUESTÃO DO RISCO: CONCEITOS RELACIONADOS	37
2.3.	ANÁLISE DE RISCO DE MOVIMENTOS DE MASSA	39
2.4.	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	49
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	71
3.1.	HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO.....	71
3.2.	LOCALIZAÇÃO.....	72
3.3.	GEOLOGIA	76
3.4.	GEOMORFOLOGIA	79
3.5.	USO DO SOLO	80
4.	METODOLOGIA.....	82
4.1.	SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	82
4.2.	AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO DO RISCO GEOTÉCNICO.....	82
4.3.	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	99
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	148
5.1.	PESOS ATRIBUÍDOS PELO MÉTODO AHP	148
5.2.	MAPAS ELABORADOS	154
5.2.1.	Mapa de Inventário de Feições de Instabilidade	155
5.2.2.	Mapa de Amplitude	161
5.2.3.	Mapa de Inclinação.....	163
5.2.4.	Mapa de Morfologia em Planta e em Perfil.....	164

5.2.5.	Mapa de Uso/Cobertura do Solo	168
5.2.6.	Mapa de Densidade Demográfica	171
5.2.7.	Presença de água na superfície da encosta	173
5.2.8.	Surgência de água no perfil da encosta	174
5.2.9.	Mapa de Perigo	178
5.2.10.	Mapa de Vulnerabilidade.....	183
5.2.11.	Mapa de Risco	188
5.3.	COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS REALIZADOS NA COMUNIDADE SÃO JOSÉ DO JACÓ	197
5.4.	ANÁLISE DE ESTABILIDADE PROBABILÍSTICA	202
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	271
7.	REFERÊNCIAS	274
	APÊNDICE A - MODELO DE FORMULÁRIO AHP	287
	APÊNDICE B - CHECKLIST APLICADO EM CAMPO	303
	APÊNDICE C - RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS	304
	APÊNDICE D - (MAPAS TEMÁTICOS).....	322

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Aumento relativo do FS da encosta em decorrência da coesão adicional das raízes	34
Figura 2.2 Exemplo da etapa de Modelização ou Estruturação Hierárquica.....	42
Figura 2.3 Etapas principais do método AHP	43
Figura 2.4 Fontes de incertezas	53
Figura 2.5 Representação de um campo aleatório A e suas variáveis aleatórias.....	54
Figura 2.6 Exemplo de um histograma e de uma função de probabilidade acumulada	56
Figura 2.7 Histograma do ângulo de atrito residual	57
Figura 2.8 Função de probabilidade acumulada do ângulo de atrito residual	58
Figura 2.9 Gráfico Q-Q do ângulo de atrito residual.....	58
Figura 2.10 Distribuições estatísticas com diferentes FS e σ	62
Figura 2.11 Curvas F-N, linhas de equirisco e região de risco tolerável.....	63
Figura 2.12 Riscos para projetos de engenharia	64
Figura 2.13 Vários critérios de risco compilados por Whitman (2000)	65
Figura 2.14 Comparação entre diretrizes de aceitação de riscos em diferentes países	66
Figura 2.15 Obtenção da distribuição de probabilidade pelo Método de Monte Carlo.....	70
Figura 3.1 Mapa de localização do Bairro Rocas com destaque para a comunidade São José do Jacó	73
Figura 3.2 Diferença na delimitação da área da comunidade São José do Jacó.....	74
Figura 3.3 Fotografia aérea da Comunidade São José do Jacó, com as principais ruas destacadas	75
Figura 3.4 Localização das bacias Pernambuco, Paraíba e Potiguar.....	76
Figura 3.5 Disposição litológica das camadas de solo na Comunidade São José do Jacó ..	78
Figura 3.6 Mapa Geomorfológico da Comunidade São José do Jacó	79
Figura 4.1 Amplitude e Inclinação de uma encosta.....	83
Figura 4.2 Estrutura hierárquica para a Comunidade São José do Jacó	90
Figura 4.3 Exemplo de comparação paritária entre o indicador declividade em relação ao indicador amplitude da encosta	91
Figura 4.4 Curvatura da encosta em perfil	96
Figura 4.5 Curvatura da encosta em planta	96

Figura 4.6 Procedimento esquemático para implementação espacial do mapa de risco em <i>software</i> comercial.....	98
Figura 4.7 Locação das seções de encosta a serem analisadas	100
Figura 4.8 Seção de análise 01	101
Figura 4.9 Seção de análise 02	102
Figura 4.10 Seção de análise 03	103
Figura 4.11 Seção de análise 04	104
Figura 4.12 Seção de análise 05	105
Figura 4.13 Seção de análise 06	106
Figura 4.14 Análise de sensibilidade para a seção 03 com dados do solo na condição natural e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price)	109
Figura 4.15 Análise de sensibilidade para a seção 03 da encosta ocupada pela Comunidade São José do Jacó com o solo ensaiado na condição saturada	110
Figura 4.16 Análise de sensibilidade da coesão efetiva do solo na condição natural versus FS para a seção 03	112
Figura 4.17 Análise de sensibilidade do ângulo de atrito efetivo natural versus FS para a seção 03	113
Figura 4.18 Análise de sensibilidade do peso específico natural versus FS para a seção 03	114
Figura 4.19 Histograma de Frequência da variável coesão efetiva natural	118
Figura 4.20 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural versus distribuição normal	119
Figura 4.21 Histograma de Frequência do ângulo de atrito efetivo natural	120
Figura 4.22 Teste Q-Q do ângulo de atrito efetivo natural versus distribuição normal	120
Figura 4.23 Histograma de frequência da coesão efetiva do solo ensaiado em condição saturada versus distribuição normal	121
Figura 4.24 Teste Q-Q da coesão efetiva saturada versus distribuição normal.....	121
Figura 4.25 Histograma de Frequência do ângulo de atrito efetivo do solo ensaiado em condição saturada versus distribuição normal	122
Figura 4.26 Teste Q-Q do ângulo de atrito efetivo saturado versus distribuição normal..	122
Figura 4.27 Histograma de Frequência do ângulo de atrito efetivo do solo ensaiado em condição inundada sem a consideração do valor de ângulo de atrito igual a 12,1°.....	123
Figura 4.28 Teste Q-Q do ângulo de atrito efetivo inundado sem a consideração do valor de ângulo de atrito igual a 12,1°	124

Figura 4.29 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).....	132
Figura 4.30 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito saturado da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)	132
Figura 4.31 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).....	133
Figura 4.32 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito saturado da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).....	133
Figura 4.33 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras) ..	134
Figura 4.34 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito saturado da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)	134
Figura 4.35 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras).....	135
Figura 4.36 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito saturado da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras).....	135
Figura 4.37 Histograma de frequência e distribuição probabilística do ângulo de atrito natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras	136
Figura 4.38 Histograma de frequência e distribuição probabilística do ângulo de atrito saturado da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras.....	136
Figura 4.39 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras).....	137
Figura 4.40 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito saturado da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras).....	137
Figura 4.41 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)	138
Figura 4.42 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva saturada da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).....	138
Figura 4.43 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).....	139
Figura 4.44 Teste Q-Q da variável coesão efetiva saturada da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).....	139
Figura 4.45 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)	140

Figura 4.46 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva saturada da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)	140
Figura 4.47 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras).....	141
Figura 4.48 Teste Q-Q da variável coesão efetiva saturada da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras).....	141
Figura 4.49 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras)	142
Figura 4.50 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva saturada da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras).....	142
Figura 4.51 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras).	143
Figura 4.52 Teste Q-Q da variável coesão efetiva saturada da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras).	143
Figura 4.53 Gráfico de convergência para a seção de análise 03, com solo sob condição saturada.....	145
Figura 4.54 Diferença entre mínimo global e local para uma função unidimensional.....	146
Figura 4.55 Pesquisa por superfícies de ruptura ao longo de toda a extensão da encosta pelo Método Cuckoo Search	147
Figura 5.1 Pontos de coleta de informações sobre Feições de Instabilidade na Comunidade São José do Jacó	157
Figura 5.2 Mapa de Feições de Instabilidade da Comunidade São José do Jacó.....	158
Figura 5.3 Tipologia das feições de instabilidade observadas na Comunidade São José do Jacó	159
Figura 5.4 Fissuras verticais, horizontais e diagonais em alvenaria e/ou piso de residências da Comunidade São José do Jacó	159
Figura 5.5 Curvatura de estruturas rígidas, como muros de contenção, árvores de grande porte, cercas e postes na Comunidade São José do Jacó.....	160
Figura 5.6 Constatação de mais de uma tipologia de indícios de movimentação em uma mesma localidade da Comunidade São José do Jacó: a) Subsidência do piso da residência; b) Fissuras na alvenaria	160
Figura 5.7 Árvores com tronco reto e inclinado.....	161
Figura 5.8 Mapa Altimétrico da Comunidade São José do Jacó.....	162
Figura 5.9 Mapa de Inclinação da Comunidade São José do Jacó.....	164

Figura 5.10 Mapa de morfologia em planta da Comunidade São José do Jacó	165
Figura 5.11 Convergência de fluxo superficial e subsuperficial em encostas com concavidade em plano	166
Figura 5.12 Mapa de morfologia em perfil da Comunidade São José do Jacó	167
Figura 5.13 Mapa de Uso/Cobertura do solo da Comunidade São José do Jacó	169
Figura 5.14 Forma de ocupação da Comunidade São José do Jacó	171
Figura 5.15 Mapa de densidade demográfica da Comunidade São José do Jacó.....	172
Figura 5.16 Mapa de presença de água superficial da Comunidade São José do Jacó	173
Figura 5.17 Presença de água na superfície da encosta.....	174
Figura 5.18 Mapa de surgência de água no perfil da encosta na Comunidade São José do Jacó.....	175
Figura 5.19 Presença de tanque séptico na encosta	176
Figura 5.20 Perfil topográfico do talude natural e de corte	177
Figura 5.21 Fotos de antes da execução do corte no talude natural	177
Figura 5.22 Fotos de depois da execução do corte no talude natural	178
Figura 5.23 Mapa de perigo da Comunidade São José do Jacó	179
Figura 5.24 Mapa de suscetibilidade da Comunidade São José do Jacó.....	181
Figura 5.25 Mapa de vulnerabilidade da Comunidade São José do Jacó.....	184
Figura 5.26 Distribuição de renda no Setor Censitário 1, compreendido na Comunidade São José do Jacó.	185
Figura 5.27 Diferença no padrão construtivo das moradias em função dos diferentes níveis de renda; a) Padrão construtivo de um domicílio baixa renda. b) Padrão construtivo de um domicílio que não é baixa renda	186
Figura 5.28 Mapa de Risco da Comunidade São José do Jacó	189
Figura 5.29 Detalhamento das regiões em que foi possível observar Risco Baixo: a) Rua Altamira; b) Destaque das regiões de baixo risco no mapa de risco	190
Figura 5.30 Contribuição desfavorável das intervenções humanas na área próxima à cortina de contenção para obtenção de Risco Médio: a) Trecho da rua Lins Bahia com perigo Alto; b) Casas afetadas pela ruptura da estrutura de contenção	191
Figura 5.31 Influência do parâmetro vulnerabilidade na área próxima à cortina de contenção para espacialização do risco: a) Destaque dos trechos com diferenciação entre risco Médio e Alto no mapa de risco; b) Destaque dos trechos com diferenciação entre vulnerabilidade Baixa e Alta.	192

Figura 5.32 Frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil no período de 1991 a 2012	193
Figura 5.33 Construção de residências em meia encosta	193
Figura 5.34 Construção de residências em meia encosta	194
Figura 5.35 Lançamento de lixo e entulho sobre a encosta.....	195
Figura 5.36 Mapa de risco elaborado pelo Plano Municipal de Redução de Riscos do Município de Natal	197
Figura 5.37 Mapa de Risco da Comunidade São José do Jacó	198
Figura 5.38 Mapa de vulnerabilidade aos movimentos de massa na comunidade do Jacó, elaborado por Silva, Almeida e Macedo (2015).....	199
Figura 5.39 Mapa locação das seções e setores de encosta analisados na Comunidade São José do Jacó, extraído de Bezerra (2016)	200
Figura 5.40 Mapa de risco da Comunidade São José do Jacó extraído de Bezerra (2016).	201
Figura 5.41 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 01 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).....	204
Figura 5.42 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 01 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	205
Figura 5.43 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 1 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	208
Figura 5.44 Curva de distribuição acumulada para a seção 1 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).	209
Figura 5.45 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 1 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price).	210
Figura 5.46 Curva de distribuição acumulada para a seção 1 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price).	211
Figura 5.47 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 2 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).....	215
Figura 5.48 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 2 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	216
Figura 5.49 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 2 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	217
Figura 5.50 Curva de distribuição acumulada para a seção 2 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	218

Figura 5.51 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 2 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	219
Figura 5.52 Curva de distribuição acumulada para a seção 2 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price).	220
Figura 5.53 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).....	222
Figura 5.54 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	223
Figura 5.55 Análise de sensibilidade da variável dependente (fator de segurança) em função das variáveis aleatórias (coesão, ângulo de atrito e peso específico) para a seção 3 com dados do solo na condição saturada e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price).....	224
Figura 5.56 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 3 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	226
Figura 5.57 Curva de distribuição acumulada para a seção 3 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	227
Figura 5.58 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 3 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	228
Figura 5.59 Curva de distribuição acumulada para a seção 3 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	229
Figura 5.60 Histograma de frequência da probabilidade de desempenho insatisfatório para a seção 3 na condição saturada.....	230
Figura 5.61 Histograma de frequência da coesão efetiva do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price)	231
Figura 5.62 Histograma de frequência do ângulo de atrito efetivo do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price).....	232
Figura 5.63 Gráfico de dispersão das variáveis aleatórias coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo da camada de sedimentos Pós-Barreiras.....	232
Figura 5.64 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 04 com dados do solo na condição natural e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price).....	234
Figura 5.65 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 4 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	235

Figura 5.66 Curva de distribuição acumulada para a seção 4 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	236
Figura 5.67 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 04 com dados do solo na condição natural e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price).....	237
Figura 5.68 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 4 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	238
Figura 5.69 Curva de distribuição acumulada para a seção 4 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	239
Figura 5.70 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 5 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).....	242
Figura 5.71 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 5 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	243
Figura 5.72 Curva de distribuição acumulada para a seção 5 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	244
Figura 5.73 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 5 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	246
Figura 5.74 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 5 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	247
Figura 5.75 Curva de distribuição acumulada para a seção 5 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	248
Figura 5.76 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 6 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).....	250
Figura 5.77 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 6 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).	251
Figura 5.78 Curva de distribuição acumulada para a seção 6 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)	252
Figura 5.79 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 6 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	254
Figura 5.80 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 6 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	255
Figura 5.81 Curva de distribuição acumulada para a seção 6 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	256

Figura 5.82 Histograma de frequência da probabilidade de desempenho insatisfatório para a seção 6 saturada após 10 simulações.....	257
Figura 5.83 Histograma de frequência da coesão efetiva do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price).	258
Figura 5.84 Histograma de frequência do ângulo de atrito efetivo do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price).....	258
Figura 5.85 Gráfico de dispersão das variáveis aleatórias coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo da camada de sedimentos heterogêneos do Grupo Barreiras	259
Figura 5.86 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade determinística para todas as seções, com dados do solo na condição natural e saturada e superfícies de ruptura circular e não-circular.....	262
Figura 5.87 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade determinística com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição de umidade natural	264
Figura 5.88 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade determinística com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição saturada.....	265
Figura 5.89 Comparação entre os resultados da probabilidade de desempenho insatisfatório com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição saturada....	266
Figura 5.90 Comparação entre os resultados do índice de confiabilidade com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição saturada	266

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação de movimentos de massa proposta por Varnes (1978).....	26
Tabela 2.2 Escala de velocidade proposta por Cruden e Varnes (1996).....	28
Tabela 2.3 Probabilidade destrutiva do movimento de massa para as diferentes classes de velocidade.....	29
Tabela 2.4 Comparação entre as propostas de classificação de movimentos gravitacionais de massa mais usadas no Brasil.....	30
Tabela 2.5 Sete principais intervenções ou ações antrópicas que provocam mudanças na estabilidade de encostas.....	36
Tabela 2.6 Escala de julgamento de importância no Método AHP.....	44
Tabela 2.7 Representação da matriz de comparação dos julgamentos paritários entre as três frutas: maçã, banana e cereja.....	44
Tabela 2.8 Exemplo de matriz de comparação.....	45
Tabela 2.9 Exemplo de matriz de comparação normalizada.....	45
Tabela 2.10 Autovetor normalizado.....	45
Tabela 2.11 Pesos dos critérios obtidos pelo processo de autovetor.....	46
Tabela 2.12 Pesos dos critérios obtidos pelo método AHP e por pesquisa estatística.....	46
Tabela 2.13 Índices de consistência aleatória.....	48
Tabela 2.14 Covariância padrão para os principais parâmetros geotécnicos.....	59
Tabela 2.15 Recomendações de funções distribuição de probabilidade que melhor se adequam a parâmetros geotécnicos.....	60
Tabela 2.16 Sugestão de risco tolerável para perda de vidas humanas.....	67
Tabela 2.17 Relação entre índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura.....	67
Tabela 3.1 Áreas com suscetibilidade de deslizamento de dunas.....	72
Tabela 3.2 Áreas com risco de erosão / queda de barreiras.....	72
Tabela 3.3 Coluna estratigráfica proposta para a área mapeada.....	77
Tabela 3.4 Percentual dos tipos de uso do solo nas Rocas.....	81
Tabela 4.1 Divisão de classes para o indicador amplitude/altura da encosta.....	83
Tabela 4.2 Divisão de classes para o indicador inclinação/declividade da encosta.....	84
Tabela 4.3 Divisão de classes para os indicadores morfologia em planta e em perfil. Figuras adaptadas de ESRI (2019).	85

Tabela 4.4 Divisão de classes para o indicador uso/cobertura do solo.....	85
Tabela 4.5 Divisão de classes para o indicador presença de água superficial.....	86
Tabela 4.6 Divisão de classes para o indicador surgência de água no perfil da encosta.....	86
Tabela 4.7 Divisão de classes para o indicador feições de instabilidade	87
Tabela 4.8 Divisão de classes para o indicador material do substrato da encosta.....	88
Tabela 4.9 Divisão de classes para o indicador estrutura geológica	88
Tabela 4.10 Divisão de classes para o indicador densidade demográfica.....	89
Tabela 4.11 Comparações paritárias realizadas por um especialista para o nível hierárquico 1	92
Tabela 4.12 Matriz de decisão AHP normalizada e autovetor dos indicadores de risco a movimentos de massa.....	93
Tabela 4.13 Resultado da análise da sensibilidade para a matriz de decisão AHP fornecida na Tabela 4.12.....	94
Tabela 4.14 Critérios adotados para a classificação do Grau de Risco (GR). Modificado de Faria (2011)	99
Tabela 4.15 Parâmetros das amostras de solo ensaiadas na condição natural.....	116
Tabela 4.16 Parâmetros das amostras de solo ensaiadas na condição saturada	117
Tabela 4.17 Parâmetros dos Sedimentos Pós-Barreiras ensaiados na condição natural ...	126
Tabela 4.18 Parâmetros dos Sedimentos Pós-Barreiras ensaiados na condição saturada .	127
Tabela 4.19 Parâmetros de solo homogêneo da Formação Barreiras ensaiado na condição natural	128
Tabela 4.20 Parâmetros de solo homogêneo da Formação Barreiras ensaiado na condição saturada.....	129
Tabela 4.21 Parâmetros de solo heterogêneo ensaiado na condição natural.....	130
Tabela 4.22 Parâmetros de solo heterogêneo ensaiado na condição saturada.....	131
Tabela 4.23 Caracterização estatística dos dados por litologia	144
Tabela 5.1 Pesos obtidos para os indicadores de risco e suas respectivas classes	148
Tabela 5.2 Análise de sensibilidade da matriz recíproca dos indicadores de risco	149
Tabela 5.3 Análise de sensibilidade do indicador Amplitude	150
Tabela 5.4 Análise de sensibilidade do indicador Inclinação.....	150
Tabela 5.5 Análise de sensibilidade do indicador Morfologia em Planta	150
Tabela 5.6 Análise de sensibilidade do indicador Morfologia em Perfil	150
Tabela 5.7 Análise de sensibilidade do indicador Uso e Cobertura do Solo.....	150
Tabela 5.8 Análise de sensibilidade do indicador Presença de Água Superficial	151

Tabela 5.9 Análise de sensibilidade do indicador Material do Substrato.....	151
Tabela 5.10 Análise de sensibilidade do indicador Estrutura Geológica	151
Tabela 5.11 Análise de sensibilidade do indicador Densidade Demográfica.....	151
Tabela 5.12 Feições de Instabilidade observadas na Comunidade São José do Jacó.....	156
Tabela 5.13 Feições de instabilidade observadas em cada classe de amplitude na Comunidade São José do Jacó.....	163
Tabela 5.14 Feições de instabilidade observadas em cada classe de inclinação na Comunidade São José do Jacó.....	163
Tabela 5.15 Feições de instabilidade observadas em cada classe de morfologia em planta na Comunidade São José do Jacó.....	166
Tabela 5.16 Feições de instabilidade observadas em cada classe de morfologia em perfil na Comunidade São José do Jacó.....	168
Tabela 5.17 Feições de instabilidade observadas em cada classe de uso/cobertura do solo na Comunidade São José do Jacó.....	170
Tabela 5.18 Feições de instabilidade observadas em cada classe de densidade demográfica na Comunidade São José do Jacó	171
Tabela 5.19 Critérios adotados para a classificação do Grau de Perigo (GP).....	180
Tabela 5.20 Porcentagem de área coberta por cada classe de perigo	180
Tabela 5.21 Porcentagem de área coberta por cada classe de vulnerabilidade	183
Tabela 5.22 Capacidade de mobilidade dos setores censitários inclusos na área da Comunidade São José do Jacó.....	187
Tabela 5.23 Grau de escolaridade dos setores censitários inclusos na área da Comunidade São José do Jacó	187
Tabela 5.24 Porcentagem de área coberta por cada classe de risco	188
Tabela 5.25 Características utilizadas na classificação do Risco a Movimentos de Massa na Comunidade São José do Jacó.....	196
Tabela 5.26 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 1 com superfície de ruptura não-circular	203
Tabela 5.27 Fator de segurança mínimo para deslizamentos	212
Tabela 5.28 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 2 com dados do solo nos dois cenários de saturação.....	213
Tabela 5.29 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 com dados do solo na condição natural e saturada.....	221

Tabela 5.30 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 da encosta analisadas com dados do solo na condição inundada e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price).	231
Tabela 5.31 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 4 com dados do solo na condição natural e saturada	233
Tabela 5.32 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 5, com dados do solo na condição natural e saturada	240
Tabela 5.33 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 6, com dados do solo na condição natural e saturada	241
Tabela 5.34 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 6 da encosta analisada com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)	257
Tabela 5.35 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para todas as seções analisadas, com dados do solo na condição natural e saturada e superfície de ruptura não-circular	260
Tabela 5.36 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade para a seção 3, com dados do solo na condição natural e saturada e superfícies de ruptura circular e não-circular	264

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas houve um aumento considerável na frequência, intensidade, e nos impactos gerados pelos desastres sócio-ambientais em nível mundial. De acordo com o Relatório Mundial de Desastres (*World Disaster Report*), publicado em 2010, com enfoque sobre a temática de riscos urbanos, 4014 desastres ocorreram ao redor do mundo entre os anos de 2000 e 2009, vitimando mais de um milhão de pessoas (INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES, 2010). Entre as diferentes tipologias existentes, as mais frequentes foram as inundações, responsáveis por 43% do número total de ocorrências, seguido pelos movimentos de massa de origem hidrológica (9%).

Seguindo essa tendência mundial de crescimento no número de desastres, em âmbito nacional, um relatório elaborado pela Universidade Federal de Santa Catarina (2013) aponta que do total de eventos de desastres sócio-ambientais catalogados no país, entre os anos de 1991 e 2012, 22% ocorreram na década de 90, 56% entre 2000 e 2009, e, somente nos anos 2010, 2011 e 2012, este número já totalizava 22%. Além disso, as informações fornecidas pelo documento indicam ainda um aumento considerável no número de desastres associados à ocorrência de movimentos de massa entre as décadas de 1990 e 2000.

De acordo com Tominaga, Santoro e Amaral (2009), esse expressivo aumento do número de movimentos de massa nas encostas urbanas brasileiras tem como principais causas a falta de planejamento e infraestrutura urbana, fator que tem levado a população, especialmente a mais carente, a ocupar áreas naturalmente inadequadas ou que apresentam alta suscetibilidade aos processos de instabilização de encostas, normalmente de baixo interesse imobiliário.

Esse processo de ocupação leva à supressão da vegetação nativa, à movimentação de terra para execução de cortes e aterros visando a construção de vias de acesso e moradias, à alteração do regime de escoamento e infiltração e à deposição irregular de lixo e entulho em áreas de difícil acesso. Ações essas que diminuem as condições de estabilidade dos terrenos, contribuindo assim para o desencadeamento de movimentos de massa no local (NATAL, 2008).

No município de Natal/RN, a ocupação inadequada de algumas áreas susceptíveis a movimentos de massa tem tornado a cidade vulnerável a problemas de instabilização de

encostas. Uma das áreas que vem sofrendo com a ocorrência de movimentos de massa é a Comunidade São José do Jacó.

Diante dessa situação, vislumbra-se a necessidade de trabalhos, inclusive acadêmicos, dedicados ao estudo de áreas de risco, cujos resultados são decisivos para a adoção de políticas e medidas adequadas visando a redução da ocorrência de acidentes geológicos-geotécnicos e a minimização das consequências, sobretudo sociais, associadas a ocorrências desses movimentos.

Neste contexto, o mapeamento e a avaliação de riscos surgem como importantes instrumentos para as políticas de gerenciamento de riscos, permitindo informar e descrever quais são os indicadores que, potencialmente, podem causar danos à população, às edificações ou à infraestrutura; estabelecer uma hierarquização das situações identificadas; estimar o número de edificações e de pessoas potencialmente afetadas na área em estudo, contribuindo também para nortear as ações desenvolvidas pela Defesa Civil.

De acordo com Tominaga (2007), foi na década de 1990, declarada pelas Nações Unidas a Década Internacional para Redução de Desastres Naturais, que se intensificaram as ações de promoção de soluções para redução do risco decorrente de eventos naturais, culminando em um aumento considerável na produção de estudos voltados para análise e previsão de perigos naturais, sobretudo àqueles oriundos de processos de instabilização de vertentes.

Desde então, inúmeros métodos de pesquisa na área de perigo e risco de movimentos de massa têm sido desenvolvidos ao longo dos anos. No Brasil, assim como em muitos outros países, grande parte dos mapeamentos de risco têm sido realizados por metodologias qualitativas. Este tipo de avaliação baseia-se sobretudo no julgamento do profissional por meio de observações obtidas em campo e de informações fornecidas pelos moradores da região analisada, o que, para muitos pesquisadores da temática, gera certa subjetividade sobre o resultado obtido.

Logo, com o objetivo de melhorar as abordagens do mapeamento de risco qualitativo, diminuindo a subjetividade na análise dos indicadores e na hierarquização dos setores de risco de ocorrência de movimentos de massa, essas metodologias de avaliação vêm evoluindo gradativamente para uma abordagem qualiquantitativa, a qual busca incorporar técnicas quantitativas, como o Processo de Análise Hierárquica (AHP) nos métodos qualitativos (FARIA, 2011).

O AHP é uma ferramenta de tomada de decisão de múltiplos critérios amplamente utilizada no mundo. Trata-se de um modelo matemático que tenta representar o processo de

tomada de decisão humano e ajudar a alcançar melhores julgamentos baseados em uma hierarquia, comparações em pares, atribuição de pesos a critérios e seleção de melhores alternativas para um número finito de variáveis.

Diante deste cenário, a presente pesquisa propõe-se a empregar a técnica de tomada de decisão AHP aliada a metodologias qualitativas de avaliação de riscos, com o objetivo de diagnosticar o risco de ocorrência de movimentos de massa nas encostas urbanas da Comunidade São José do Jacó, tendo em vista que é neste cenário que ocorre o maior número de vítimas relacionadas à desastres sócio-ambientais no Brasil.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste trabalho é mapear o risco de ocorrência de movimentos de massa na Comunidade São José do Jacó, no município de Natal-RN, por meio da aplicação da metodologia quali-quantitativa de análise de risco proposta por Faria (2011) e analisar a estabilidade das encostas adjacentes a área por meio da aplicação das abordagens determinísticas e probabilística. Paralelamente a estes dois objetivos, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Obter os pesos de cada um dos indicadores de risco que influenciam na ocorrência dos processos de movimento de massa na Comunidade São José do Jacó, através da aplicação do Método AHP.
- Comparar os resultados obtidos na análise de risco da Comunidade São José do Jacó com estudos prévios já realizados na área, dentre eles Natal (2008), Silva, Almeida e Macedo (2015) e Bezerra (2016).
- Analisar as situações de Suscetibilidade, Perigo, Vulnerabilidade e Risco existentes na área em estudo;
- Avaliar as condições de estabilidade através de análises de estabilidade por métodos determinísticos e probabilísticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seção de revisão da literatura está dividida em 04 partes: a primeira, apresenta os processos de movimentos de massa, abordando o seu conceito, classificação e agentes condicionantes. A segunda discute conceitos relacionados às áreas de risco. A terceira contempla os principais métodos de análise de risco existentes, com foco no Processo de Análise Hierárquico (AHP) incorporado às avaliações e mapeamentos qualitativos de risco, e a última trata dos métodos para análise de estabilidade de taludes, tanto determinísticos quanto probabilísticos.

2.1. OS MOVIMENTOS DE MASSA E AS SUAS TIPOLOGIAS

Esta seção tem por objetivo conceituar os movimentos de massa, destacar as suas principais classificações/tipologias, evidenciando ainda os fatores condicionantes que desencadeiam a ocorrência destes fenômenos.

2.1.1. Conceituação e classificação

Movimentos de massa podem ser definidos como movimentos de descida de material de composição diversa (solo, rocha e/ou vegetação) pelas encostas devido à ação da gravidade. Esses processos naturais podem ocorrer em qualquer área que apresente declividade causada pela atuação do intemperismo e da erosão, tendo como um dos principais agentes deflagradores a água da chuva (CRUDEN, 1991).

Riffel, Guasselli e Bressani (2016) comentam que na bibliografia internacional existem diversas nomenclaturas para designar os movimentos de solo e rocha. Os autores americanos se referem aos movimentos de massa como *landslides*, os ingleses, por exemplo, utilizam o termo *landslips*, alguns engenheiros geotécnicos e geomorfólogos empregam a terminologia *mass movements*.

Em virtude da complexidade dos processos envolvidos e da multiplicidade de ambientes de ocorrência, assim como dos diferentes enfoques dados, existem várias classificações de movimentos de massa gravitacionais. Algumas são baseadas na cinemática do movimento, como considerações sobre a massa em movimento e o terreno estável, velocidade, direção e sequência dos deslocamentos; outras no tipo do material envolvido, levando em conta sua estruturação, textura e conteúdo de água; também pela geometria, definida pela forma e tamanho das massas mobilizadas (LOPES, 2006).

A maior parte dos primeiros sistemas de classificação surgiram nos países Alpinos. Hungr, Leroueil e Picarelli (2013) afirmam que Baltzer (1875), um suíço, é apontado como o

primeiro estudioso a distinguir os vários modos básicos de movimentação, dividindo-os em quedas, escorregamentos e corridas. Essas classes persistem até os dias atuais, sendo frequentemente atualizadas para acréscimo de novos tipos de movimentos, inclusive mais complexos.

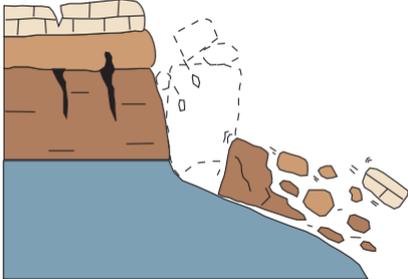
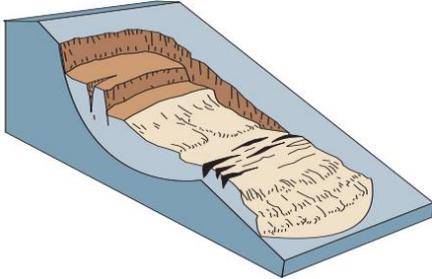
Segundo Tominaga, Santoro e Amaral (2009) entre as classificações mais utilizadas na literatura internacional, figuram as propostas de Varnes (1958, 1978) e Hutchinson (1968,1988). O sistema desenvolvido por Hutchinson (1968, 1988), assim como o de Varnes (1978), utiliza o tipo de movimento para estabelecer as classes ou grupos. Apesar das inúmeras semelhanças, uma importante diferença entre as duas classificações é a discordância com relação ao status do movimento do tipo corrida (*flow*).

O sistema de classificação desenvolvido por Varnes (1978) surgiu em decorrência da constatação de algumas deficiências na classificação para movimentos de massa elaborada pelo mesmo autor e publicada no Relatório Especial 29, no ano de 1958. Uma das mudanças sugeridas foi a modificação da nomenclatura deslizamentos (*landslides*) para movimentos de encosta (*slope movements*) ou movimentos de massa (*mass movements*), com o objetivo de universalizar a terminologia técnica e facilitar a comunicação entre as diversas áreas envolvidas na temática. Além disso, a classificação inicialmente constante no relatório foi ampliada para inclusão das categorias ruptura por tombamento (*toppling failure*) e expansão (*spreading*).

Essa proposta utiliza como critérios para classificar os movimentos de massa, além do tipo de movimento, o tipo de material envolvido em segundo plano. O primeiro critério permitiu a divisão dos movimentos de massa em 5 grupos principais: quedas, tombamentos, escorregamentos, expansão e corridas, e um sexto grupo que contempla movimentos complexos, envolvendo combinações de dois ou mais tipos. O segundo critério foi dividido em duas classes: rocha e solo de engenharia, sendo este último dividido ainda em detritos e solo.

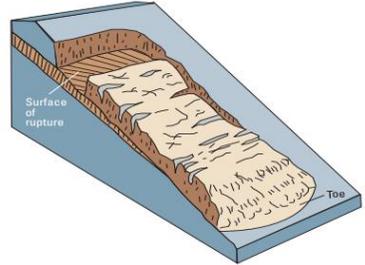
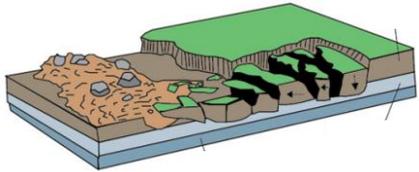
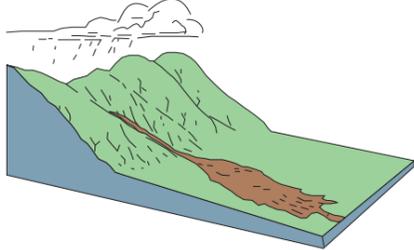
A Tabela 2.1 traz um resumo das classes adotadas por Varnes (1978). Para deixar mais claro o significado de cada termo proposto, será apresentada uma pequena definição e algumas ilustrações que podem auxiliar na caracterização dos tipos de movimentos de encosta.

Tabela 2.1 Classificação de movimentos de massa proposta por Varnes (1978)

Tipo de movimento	Definição geral	Figura
Queda (<i>fall</i>)	Desprendimento de uma massa de qualquer tamanho de uma encosta íngreme, descendo sobretudo através do ar, por queda livre, ou também rolando. Velocidade de queda entre alta e muito alta.	
Tombamento (<i>topple</i>)	Rotação de uma unidade (material) em torno de um ponto, sobre a ação da gravidade e de forças exercidas por unidades adjacentes. Algumas vezes são provocados pelo peso do material acima da encosta sobre a massa deslocada. Outras vezes ocorre devido à presença de água ou gelo em fraturas existentes.	
Escorregamento (<i>slide</i>)	Rotacional São escorregamentos que ocorrem ao longo de uma superfície de ruptura com curvatura côncava (forma de colher) e o movimento é mais ou menos rotacional em torno de um eixo que é paralelo à encosta. Ocorre normalmente em materiais homogêneos.	

(Continua)

Tabela 2.1 Classificação de movimentos de massa proposta por Varnes (1978) (continuação)

Tipo de movimento		Definição geral	Figura
Escorregamento <i>(slide)</i>	Translacional	No escorregamento translacional, a massa movimenta-se para fora ou para fora e para baixo da encosta ao longo de uma superfície mais ou menos planar ou com poucas ondulações. Esse tipo de movimento pode progredir até distâncias consideráveis se a superfície de ruptura for suficientemente inclinada, em contraste com os escorregamentos rotacionais, nos quais há tendência de restauração do equilíbrio do movimento. Ocorrem comumente ao longo de descontinuidades geológicas ou no contato entre o solo e a rocha.	
Expansão lateral <i>(lateral spread)</i>		Expansão lateral ocorre em encostas muito suaves ou planas, sobretudo em locais onde uma camada resistente de solo ou rocha movimenta-se sobre uma camada pouco resistente. Essas rupturas normalmente são acompanhadas de subsidência das unidades compostas por material mais fraco. Taxa de movimentação extremamente baixa.	
Fluxo/ Corrida <i>(Flow)</i>		Consiste em um movimento espacialmente contínuo, no qual as superfícies de cisalhamento são usualmente não visíveis/preservadas, ou possuem curta duração. A distribuição de velocidade na massa deslocada parece com a de um líquido viscoso.	
Complexo		Combinação de um ou mais dos tipos principais de movimento acima descritos.	

Fonte: Varnes (1978)

A literatura técnica para descrição de “*mass movements*” cresceu consideravelmente desde 1978. Durante a Década Internacional de Redução de Desastres Naturais, inúmeras propostas interessadas na descrição desses fenômenos foram elaboradas ao redor de mundo. Ainda nesse período foi publicado o Glossário Multilinguístico de Movimentos de Massa, que serviu de base para as modificações e adições feitas por Cruden e Varnes (1996) à classificação de Varnes (1978), sobretudo no que se refere ao vocabulário utilizado.

Na versão atualizada da proposta de Varnes (1978), qualquer movimento pode ser classificado e descrito por dois nomes: o primeiro refere-se ao material e segundo descreve o tipo de movimento, por exemplo, *rock fall* (queda de rocha). Os nomes para descrever os tipos de materiais permanecem iguais (rocha, solo e detritos). No entanto, os tipos de movimentos, que antes eram 06 classes, agora são apenas 05. O sexto tipo, grupo dos movimentos complexos, foi retirado da nova classificação.

Caso deseje-se um nome com mais informações sobre o movimento, Cruden e Varnes (1996), propõem a adição de termos “descritores” antes dos dois nomes iniciais para descrever a escala de velocidade em que o movimento de massa aconteceu e a quantidade ou conteúdo de água existente na massa ou unidade movimentada. Cruden e Varnes (1996) comentam que a velocidade é um parâmetro que possui uma correlação com a probabilidade destrutiva do movimento, dessa forma, podendo ser utilizada para estimar a vulnerabilidade da área.

A Tabela 2.2 apresenta a escala de velocidade proposta pelos autores, e a Tabela 2.3, a definição da probabilidade destrutiva do movimento de massa para as diferentes classes de velocidade.

Tabela 2.2 Escala de velocidade proposta por Cruden e Varnes (1996)

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade típica
7	Extremamente rápido	$v \geq 5 \text{ m/s}$
6	Muito rápido	$5 \text{ m/s} > v \geq 3 \text{ m/min}$
5	Rápido	$3 \text{ m/min} > v \geq 1,8 \text{ m/h}$
4	Moderado	$1,8 \text{ m/h} > v \geq 13 \text{ m/mês}$
3	Lento	$13 \text{ m/mês} > v \geq 1,6 \text{ m/ano}$
2	Muito lento	$1,6 \text{ m/ano} > v \geq 16 \text{ mm/ano}$
1	Extremamente lento	$v < 16 \text{ mm/ano}$

Fonte: Cruden e Varnes (1996)

Tabela 2.3 Probabilidade destrutiva do movimento de massa para as diferentes classes de velocidade.

Classe de velocidade	Probabilidade destrutiva
7	Catástrofe de maior violência; destruição de construções pelo impacto do material movimentado; inúmeras mortes; fuga ou escape improvável
6	Algumas vidas perdidas; velocidade alta demais para permitir que todas as pessoas escapem
5	Evacuação possível, mas estruturas e equipamentos destruídos
4	Algumas estruturas temporárias podem ser mantidas
3	Medidas corretivas devem ser tomadas após ou durante o movimento
2	Algumas estruturas permanentes não danificadas pelo movimento
1	Imperceptível sem instrumentos; construção possível com precauções

Fonte: Cruden e Varnes (1996)

Nos últimos anos, algumas propostas de atualização das classificações de Varnes (1978, 1996) vêm sendo desenvolvidas. A proposta de Hungr, Leroueil e Picarelli (2013) tem sido altamente aceita pelos profissionais da área geotécnica. Nela, são sugeridas 6 classes de movimentos de massa (queda “*fall*”, tombamento “*topple*”, escorregamento “*slide*”, expansão “*spread*”, fluxo “*flow*” e deformação de encosta “*slope deformation*”, subdivididas em um total de 32 movimentos, de acordo com o tipo de material mobilizado (rocha ou solo). Além destas classes, o artigo faz uma abordagem acerca de deslizamentos complexos, que são classificados em uma categoria separada.

Em âmbito nacional, Tominaga, Santoro e Amaral (2009) apontam entre as principais classificações as de Freire (1965), Vargas (1966) e Costa Nunes (1969), que possuem conotação regional e são voltadas para movimentos de massa em ambientes tropical e subtropical úmido; e as propostas de Guidicini e Nieble (1984) e Augusto Filho (1992).

Por ser uma classificação simples e de fácil compreensão, adotou-se, neste trabalho, a proposta de Augusto Filho (1992) que leva em consideração, principalmente, a composição do material e a velocidade de deslocamento. A Tabela 2.4 traz uma síntese comparativa entre as principais propostas brasileiras para classificação dos movimentos de massa.

Tabela 2.4 Comparação entre as propostas de classificação de movimentos gravitacionais de massa mais usadas no Brasil

Classificação	Classes	Descrição
Freire (1965)	Escoamentos (rastejos/reptação e corridas)	Movimento contínuo, com ou sem superfície definida de movimentação
	Escorregamentos (rotacionais e translacionais)	Deslocamento finito ao longo de uma superfície de deslizamento definida
	Subsidências (subsidência propriamente dita, recalques e desabamentos)	Deformação contínua, de direção essencialmente vertical
Guidicini e Nieble (1984)	Escoamentos (rastejos/reptação e corridas)	Definição semelhante à de Freire (1965)
	Escorregamentos (rotacionais, translacionais, queda de blocos e de detritos)	Movimentos rápidos, de duração relativamente curta, de massas de terreno geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora do talude.
	Subsidências (subsidência propriamente dita, recalques e desabamentos)	Definição semelhante à de Freire (1965)
	Forma de transição (movimentos complexos)	Resultam de uma combinação entre os demais movimentos de massa e se caracterizam por movimentos múltiplos e pela ação de vários agentes simultâneos ou sucessivos
Augusto Filho (1992)	Rastejos	Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes que possuem vários planos de deslocamento (internos), velocidades muito baixas e decrescentes com a profundidade
	Corridas de massa	Movimento semelhante à de um líquido viscoso, com muitas superfícies de deslocamento e velocidades médias a altas. Ocorre com mobilização de grandes volumes de material
	Escorregamentos	Movimento com poucos planos de deslocamento (externos) e velocidades médias a altas
	Quedas/tombamentos	Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado que ocorre sob velocidades muito altas em material rochoso

Fonte: Tominaga (2007)

2.1.2. Agentes condicionantes dos movimentos de massa

Os movimentos de massa se desenvolvem a partir do rompimento das condições de estabilidade e de equilíbrio dos materiais presentes na encosta. Esta instabilidade pode ser condicionada por uma série de fatores ou agentes, de origem natural ou antrópica, que interagem de forma complexa e muitas vezes sutil. Varnes (1984) propõe a divisão desses agentes em dois grupos: as condições básicas ou inerentes que afetam a estabilidade da encosta, também denominados **agentes predisponentes** por Brasil (2007), e os processos ou fatores que produzem mudanças desfavoráveis as quais podem levar a encosta à ruptura, conhecidos como **agentes efetivos**.

Dentre os principais agentes predisponentes, pode-se citar: condições geológicas, litológicas, estrutura, geomorfologia, hidrologia, clima e vegetação. Com relação aos agentes efetivos, Varnes (1984) menciona como fatores que produzem mudanças desfavoráveis, aqueles que ocasionam alterações nas condições de tensão e os que afetam a resistência dos materiais. A seguir, apresenta-se uma breve explicação das formas de atuação de alguns desses elementos na ocorrência dos movimentos de massa, visto que esta discussão é etapa fundamental para a compreensão da temática relacionada à risco.

a) Litologia

A litologia refere-se às características dos materiais, dentre elas, estrutura, composição e textura, que atuam de forma a influenciar no comportamento físico e químico das rochas e do solo. Este parâmetro é muito importante na determinação das propriedades do material no que diz respeito à sua resistência ao cisalhamento, à permeabilidade e à suscetibilidade ao intemperismo físico e químico (VARNES, 1984).

Como forma de exemplificar a importância das características físicas e químicas dos materiais na estabilidade da encosta, Varnes (1984) comenta que em depósitos sedimentares finamente granulados a quantidade de minerais argilosos, as ligações entre as partículas desses minerais e as ligações químicas da água com esses minerais são fatores triviais.

Embora se tenha conhecimento que o aumento do conteúdo de água em materiais argilosos ocasiona perda de resistência, a magnitude com que essa resistência decresce, assim como, o teor de água sob o qual o material permanece plástico ou migra para o estado líquido depende fortemente do tipo de mineral argiloso e das características das ligações entre partículas.

b) Estrutura

A estrutura, considerado agente de igual importância à litologia por Varnes (1984), refere-se às feições de heterogeneidade e descontinuidade em solos e rochas, incluindo fatores

como sequência estratigráfica (existência de camadas massivas de material sobre unidades plásticas ou fracas ou alternância entre camadas permeáveis e impermeáveis); atitude das camadas com relação ao talude; mudanças drásticas na litologia; grau de intemperismo e existência de juntas, falhas e dobras.

Para exemplificar a importância da sequência estratigráfica, Varnes (1984) relata que em camadas pouco espessas, nas quais ocorre alternância entre materiais permeáveis, como areias ou arenitos, e unidades fracas impermeáveis (solo argiloso), a suscetibilidade à ruptura é maior que nos casos de existência de uma única camada argilosa ou arenosa. Isso ocorre porque as unidades de maior granulometria podem conduzir água para as unidades finamente granuladas, nas quais o conteúdo de água pode ocasionar perda de resistência, conforme exposto no item litologia.

Com relação à influência da atitude das camadas frente à encosta, Varnes (1984) aponta que movimentos de massa gravitacionais, sobretudo escorregamentos planares, normalmente se utilizam de planos de fraqueza que podem estar orientados de forma desfavorável à estabilidade. Por outro lado, Brasil (2007) ressalta que esse mesmo fator pode condicionar a existência de taludes muito inclinados e mesmo assim estáveis. Diante do exposto, esse parâmetro deve ser sujeito de análises mais detalhadas em locais onde serão realizadas construções.

c) Geomorfologia

Segundo Varnes (1984), uma das mais importantes características geomorfológicas a ser considerada em trabalhos de avaliação e mapeamento de movimentos de massa é a presença ou ausência de movimentações anteriores ou de feições de instabilidade. Essas evidências de instabilidade que ocorreram no passado são guias importantes de movimentações que possam vir a ocorrer no futuro na localidade.

Um outro fator importante e frequentemente considerado nos mapeamentos é a inclinação da encosta. No entanto, é interessante ressaltar que não existe uma relação direta entre a inclinação e a estabilidade, e que encostas mais íngremes não necessariamente serão as mais suscetíveis à ruptura. Varnes (1984) exemplifica que muitas encostas bastante íngremes formadas por rochas competentes são mais estáveis que encostas de inclinação mais suave compostas por materiais pouco resistentes.

d) Condições hidrológicas e climáticas

Os tipos e severidades de rupturas em encostas variam de região para região e dependem dos padrões ou elementos climáticos locais, como precipitação, temperatura e umidade. A temperatura e a umidade atuam sobretudo nos processos de intemperismo e

erosão das rochas e dos materiais do solo. A precipitação, por sua vez, considerada elemento climático de maior importância no movimento de massa em encostas, é responsável pelo maior fluxo de água a atuar na desestabilização das encostas.

No Brasil, em períodos de índice pluviométrico elevado, a grande pluviosidade provoca o umedecimento do solo. Este processo atua diretamente na deflagração dos movimentos de massa por meio da alteração da resistência do solo devido à diminuição da sucção, dissolução da cimentação, diminuição da resistência ao cisalhamento dos materiais devido ao aumento da poropressão; e aumento das solicitações externas oriundas do aumento do peso específico sobre uma determinada área de encosta; dentre outros fatores.

Dessa forma, faz-se necessário em avaliações e mapeamentos de risco, a observação da influência dos eventos climáticos na ocorrência dos movimentos de massa. Para tanto, deve-se proceder a avaliação de registros de precipitação ou de registros em jornais de chuvas fortes correlacionadas com a ocorrência de movimentações. Quando esses registros são confiáveis e acessíveis, um zoneamento microclimático pode ser utilizado com registros de rupturas anteriores para determinar o efeito direto da chuva e fazer previsões estatísticas sobre o futuro (VARNES, 1984).

Estudos desse tipo, correlacionando chuva e movimentos de massa, foram elaborados por Gusmão Filho (1997) citado por Alheiros *et al.* (2003) para morros da Formação Barreiras, em Olinda, entre 1985 e 1986. Como resultado, Gusmão Filho (1997) desenvolveu uma relação entre precipitação e instabilidade de encostas, encontrando um valor limite para ocorrência de escorregamentos de 60000 mm^2 , ou seja, quando as chuvas acumuladas atingem 600mm, basta uma chuva de 100mm para que ocorram escorregamentos em grande escala.

e) Vegetação

O efeito da vegetação na estabilidade da encosta é um fator complexo, e, dependendo das condições locais do solo, como profundidade, inclinação, ou o tipo de vegetação, a cobertura vegetal pode atuar positiva ou negativamente na estabilidade das vertentes.

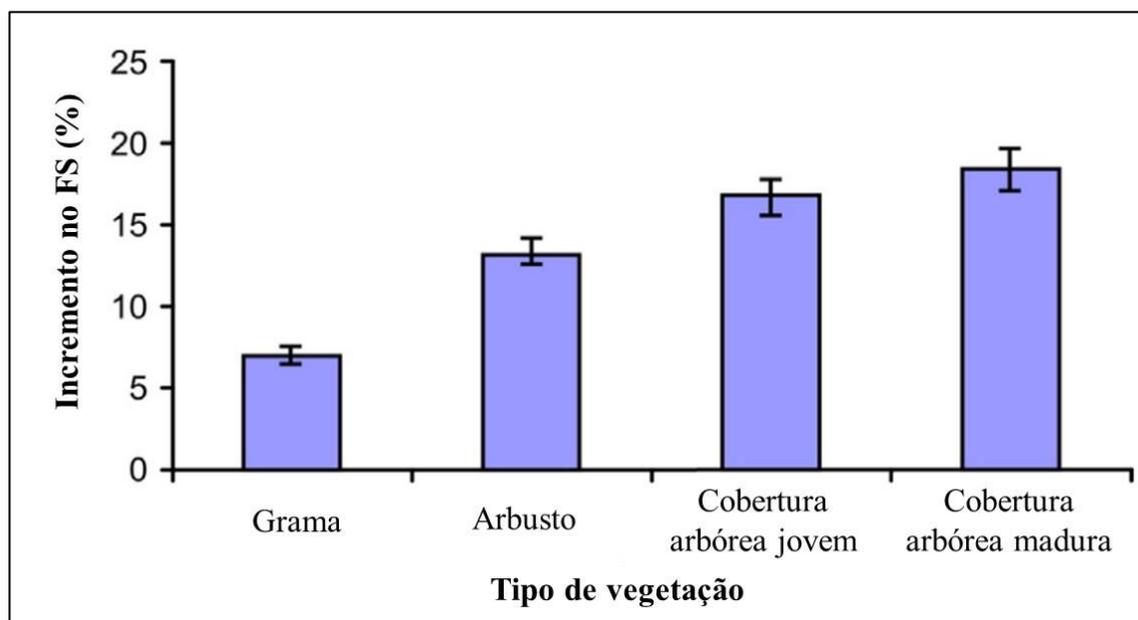
Quanto ao desempenho positivo, observa-se que a vegetação protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, dispersando-as e/ou interceptando-as, através das folhas, além de permitir a evaporação de parte dessas gotas, antes que elas atinjam o solo. Os troncos e as raízes das plantas orientam a infiltração da água de maneira lenta e seguram as partículas de solo dificultando o seu arraste. Nesse contexto, quando se tem um terreno descoberto, sem cobertura vegetal, o impacto das gotas faz com que as partículas dos solos se desprendam e sejam facilmente transportadas pelo escoamento superficial, agravando a erosão.

Por outro lado, reconhece-se também o efeito desfavorável da atuação da cobertura vegetal sobre a estabilidade da vertente. Observa-se que, principalmente em áreas urbanas, em períodos de fortes chuvas em que ocorre a intensificação dos processos erosivos, as árvores de grande porte produzem o chamado efeito alavanca, ocasionando aumento de peso sobre a encosta e a conseqüente sobrecarga no talude. Aliado a isso, deve-se considerar ainda a ação dos ventos sobre as copas, que contribui para a desestabilização e para o tombamento das árvores, podendo favorecer a ocorrência de movimentos de massa posteriores.

Em um estudo recente, desenvolvido por Kokutse, Temgoua e Kavazović (2016), foram realizadas análises numéricas da influência da vegetação na estabilidade da encosta utilizando cálculo do fator de segurança (FS). Examinou-se o efeito de reforço das raízes de 04 tipos idealizados de vegetação (grama, arbustos, cobertura arbórea jovem e cobertura arbórea madura/antiga). Para tanto, esse efeito foi modelado por meio do aumento da coesão do solo e pela adição de sobrecargas devido à presença de árvores.

Os resultados do trabalho com relação à influência da coesão adicional das raízes das plantas no fator de segurança em função dos diferentes tipos de vegetação exibiram um significativo aumento do FS do talude na situação de encosta com cobertura arbórea quando comparado ao cenário de talude com grama (Figura 2.1).

Figura 2.1 Aumento relativo do FS da encosta em decorrência da coesão adicional das raízes



Fonte: Modificado de Kokutse, Temgoua e Kavazović (2016)

Além disso, foi possível constatar, como já era esperado, que a estabilidade da encosta não reforçada (não vegetada) cresceu expressivamente quando considerado o aumento da coesão do solo em função da presença de raízes de plantas.

No que se refere ao efeito das sobrecargas em decorrência da presença de árvores na encosta, os resultados foram mais surpreendentes. Tem-se que sobrecargas oriundas de árvores podem ser benéficas para a estabilidade da encosta quando o ângulo de inclinação do talude é menor que um valor limite (α_{lim}), que é função do tipo de solo. Caso contrário, essas sobrecargas passam a exercer um papel prejudicial à estabilidade. Dessa forma, os autores sugerem a utilização de vegetação de grande porte sobre encostas apenas quando o ângulo de inclinação do talude for menor que 40° para solos arenosos e 30° para solos argilosos ou silto-arenosos.

f) Agentes efetivos

Dentre os fatores que provocam aumento das tensões cisalhantes, cita-se os processos que levam à **remoção do suporte**, por erosão na base da encosta ou pela remoção das margens laterais de uma massa previamente deslocada; à **imposição de sobrecargas**, através do aumento da altura da encosta, pela ação do peso da água oriunda de chuvas e do lençol freático ou pelo crescimento de vegetação sobre a encosta; à **tensões transitórias** resultantes de explosões e terremotos, ou resultantes da passagem de equipamentos pesados.

Quanto aos fatores que diminuem a resistência dos materiais, Cruden e Varnes (1996) apontam características naturais ou processos naturais aos quais estão submetidos os solos e rochas, como a estrutura do material; a presença de discontinuidades (falhas, foliações, clivagem, juntas e fissuras); o processo de saturação dos solos que diminui a sucção e as tensões capilares; o processo de dissolução da cimentação natural; ou ainda a exposição a temperaturas extremas, a qual pode ocasionar desintegração de rochas por exposição a ciclos de expansão e retração térmica.

g) Cobertura e uso do solo

A cobertura e uso do solo é o principal fator que condiciona diretamente a ocorrência dos movimentos de massa, principalmente em áreas urbanas. Inúmeras pesquisas descrevem o papel da ação antrópica nos processos de movimento de massa. Jaboyedoff *et al.* (2016) propõem uma classificação composta por sete principais intervenções ou ações antrópicas que provocam mudanças na estabilidade de encostas (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 Sete principais intervenções ou ações antrópicas que provocam mudanças na estabilidade de encostas.

1. Alteração da geometria da encosta a) Aterros; b) Cortes; c) Trabalhos de construção; d) Trabalhos de escavação;
2. Alterações no fluxo de águas subterrâneas e mudanças rápidas na poropressão no solo a) Vazamentos em tubulações e redes antigas de abastecimento ou esgotamento;
3. Alterações no fluxo de águas superficiais a) Deficiências no sistema de drenagem;
4. Alterações na cobertura e uso do solo e degradação do solo a) Desmatamento; b) Queimadas; c) Urbanização
5. Estruturas artificiais inapropriadas a) Estruturas de contenção inapropriadas;
6. Vibrações e explosões a) Tráfego pesado;
7. Envelhecimento e degradação da infraestrutura

Fonte: Modificado de Jaboyedoff *et al.* (2016).

A alteração na geometria da encosta para a construção de vias de acesso, infraestruturas e moradias está diretamente relacionada, em primeiro momento, com a modificação do fator de segurança da encosta. Isso deriva de mudanças no peso de cada fatia do talude em análise, em decorrência da execução de cortes e aterros.

Escavações e construções também podem desencadear movimentos de massa. Nesse sentido, Jaboyedoff *et al.* (2016), citam o caso histórico de instabilização ocorrido no Canal do Panamá, resultado da diminuição do fator de segurança da estrutura devido a execução de uma escavação de maneira inadequada.

Outro mecanismo relacionado a rupturas em escavações e cortes é a existência de planos de fraqueza inclinados desfavoravelmente à estabilidade. Uma vez que o plano de fraqueza aflora na superfície da encosta, resultado da realização de um corte, o movimento de massa pode ser gerado. Para evitar esse tipo de situação, recomenda-se uma rotina de investigação detalhada de campo prévia aliado ao monitoramento in-situ durante a execução do corte na encosta.

Alterações na poropressão é mais um importante fator que impacta a estabilidade de uma encosta. Mudanças nesse parâmetro induzidas pela atividade antrópica podem ter origem em vazamentos em tubulações ou redes de abastecimento e esgotamento sanitário; utilização de tanques sépticos e sumidouros como sistema de esgotamento sanitário; assim como

aumento da poropressão resultado de sobrecargas rápidas sobre a encosta composta por material não-drenado.

Alterações no fluxo de águas superficiais, ocasionadas sobretudo pela impermeabilização da superfície, resultado do processo de uso não planejado do solo, podem induzir a concentração do fluxo de água superficial e de detritos em determinado trecho da encosta, desencadeando deslizamentos de terra (JABOYEDOFF *et al.*, 2016).

Outra problemática ligada à interferência antrópica sobre a estabilidade de encostas reside em erros na concepção e execução de estruturas de contenção, relacionados a estimativas equivocadas dos parâmetros geotécnicos, dimensionamento inapropriado das estruturas, ou ainda ausência de um sistema de drenagem.

Wiggers (2013) aponta ainda, dentre as atividades humanas responsáveis por auxiliar na desestabilização das vertentes, a deposição de materiais que apresentam comportamento heterogêneo e de baixa compactação, como lixo e rejeitos de construção.

2.2. A QUESTÃO DO RISCO: CONCEITOS RELACIONADOS

As pesquisas sobre perigos naturais (*natural hazard*) no mundo foram iniciadas nos anos 60 por Gilbert White e seus colaboradores, cujos trabalhos envolveram a avaliação de risco de um evento natural, pela identificação dos processos socioeconômicos e físicos envolvidos. No entanto, os conceitos relacionados a temática de gestão de risco só começaram a ser consolidados na década de 80. As definições mais utilizadas nos estudos de perigos e riscos a movimentos de massa são de Varnes (1984).

De acordo com Varnes (1984), ainda na década de 80, um grande número de publicações abordava a temática dos eventos naturais e seus impactos sobre as atividades humanas. Porém, observava-se que nesses trabalhos, os termos perigo, risco e vulnerabilidade, eram empregados por diversos autores com significados diferentes. Desta forma, visando unificar a linguagem técnica em torno da temática de gestão e mitigação de riscos geológico-geotécnicos, Varnes, juntamente com a ONU e a UNESCO, elaborou um documento no qual propôs um padrão para essa terminologia, incluindo conceitos como perigo (*natural hazard*), vulnerabilidade (*vulnerability*), risco (*specific risk*), elemento em risco (*elements at risk*) e risco total (*total risk*). As definições propostas por Varnes (1984) são apresentadas a seguir:

Perigo (*natural hazard*) – H: probabilidade de ocorrência de um evento potencialmente danoso, em um período de tempo especificado e em uma área delimitada.

Vulnerabilidade – V: grau de perda de um dado elemento ou conjunto de elementos em risco, resultado da ocorrência de um fenômeno natural de uma dada magnitude. É expresso em uma escala de 0 (sem danos) a 1 (perda total).

Risco específico (*specific risk*) – Rs: significa um grau esperado de perdas em decorrência de um fenômeno natural. Pode ser expresso pelo produto de H versus V.

Elementos em risco – E: população, propriedades, atividades econômicas, incluindo serviço público, em risco, em uma área determinada.

Risco total – Rt: esperado número de perda de vidas, pessoas feridas, danos a propriedades, interrupção de atividades econômicas devido à ocorrência de um fenômeno natural. Pode ser expresso pelo produto do risco específico pelos elementos em risco, de acordo a expressão a seguir:

$$R_t = R_s \times E \quad \text{(Equação 1)}$$

$$R_t = (H \times V) \times E \quad \text{(Equação 2)}$$

Outra referência de terminologia internacional associada à temática de riscos sócio-ambientais é a proposta do Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNISDR). As definições apresentadas a seguir, propostas por UNISDR (2009), serão adotadas neste trabalho.

a) Vulnerabilidade

Características e circunstâncias de uma comunidade, sistema ou meio que os tornam suscetível aos efeitos negativos/prejudiciais do perigo. A vulnerabilidade varia significativamente dentro de uma mesma comunidade ao longo do tempo.

De modo geral, ela pode ser dividida em 04 diferentes tipologias: física, social, econômica e ambiental. Dentre esses quatro tipos, optou-se, neste trabalho, por considerar apenas o indicador densidade demográfica para compor o grau final de vulnerabilidade social.

b) Perigo (*hazard*)

Probabilidade de ocorrência de um processo ou fenômeno natural que possa ocasionar perda de vidas, ferimentos ou outros impactos à saúde; danos à propriedade; e danos sociais, econômicos ou ambientais. Em situações nas quais as atividades humanas aumentam a probabilidade de ocorrência do perigo, recomenda-se o emprego da terminologia perigo sócio-natural.

c) Risco

O conceito de risco é definido como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento potencialmente danoso e suas consequências negativas.

Para Veyret (2007) citada por Wiggers (2013), o risco é um objeto social, uma vez que ele só se configura na presença de um indivíduo, grupo ou população que o perceba e possa sofrer seus efeitos. Na visão da autora, as sociedades modernas estão mais vulneráveis às situações de risco devido à forma de interação com o meio, através da prática de atividades desencadeadoras ou aceleradoras de eventos adversos.

2.3. ANÁLISE DE RISCO DE MOVIMENTOS DE MASSA

De acordo com Abella e Van Westen (2007), a classificação das metodologias de análise de risco publicadas ainda permanece indefinida. Diante disto, nos últimos anos, a classificação proposta pelo Subcomitê de Gerenciamento de Risco da Sociedade Geomecânica Australiana vem sendo adotada. Esta classificação divide os métodos de análise de risco de movimentos de massa em qualitativos, qualiquantitativos e quantitativos (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2000).

Os métodos qualitativos, também denominados heurísticos ou de avaliação de especialistas, são baseados no julgamento do profissional que está realizando a avaliação. Os dados considerados são usualmente derivados de observações de campo e de interpretação de fotos aéreas.

Apesar das desvantagens em relação à subjetividade apontada por vários autores, esse método tem sido muito utilizado, sendo aplicado principalmente em áreas que não dispõem de dados suficientes para outros tipos de análises (TOMINAGA, 2007). Nesse tipo de análise, o grau de risco é estabelecido por níveis literais, ou seja, por termos linguísticos (baixo, médio, alto, muito alto).

Os métodos quantitativos, por sua vez, originam, como resultados, uma estimativa numérica, isto é, a probabilidade de ocorrência de movimentos de massa e a distribuição probabilística das consequências em uma determinada área. Nos trabalhos de Soeters e Van Westen, (1996); Van Western *et al.* (1997); Guzzetti *et al.*, (1999), a análise de risco quantitativa pode ser realizada por três diferentes métodos: heurístico, estatístico e determinístico.

Os métodos determinísticos baseiam-se, principalmente, em modelos geotécnicos, utilizando princípios da mecânica dos solos normalmente acoplados com modelos hidrológicos. Uma outra abordagem de análise determinística adota modelos de estabilidade de taludes para determinar o perigo de escorregamento, por meio de cálculo do fator de segurança (FS), assim, eliminando a subjetividade e quantificando os graus de risco em valores absolutos (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

Este método necessita de uma grande quantidade de dados detalhados das encostas, obtidos em ensaios de laboratório e medições em campo, tais como: atributos topográficos, condições hidrológicas e parâmetros geotécnicos do solo (coesão, ângulo de atrito, poropressão). Contudo, o alto custo de obtenção dos dados limita sua aplicação apenas para estudos localizados e em áreas menores (FARIA, 2011).

Os métodos de análise estatística têm como princípio básico a existência de inter-relações entre os fatores condicionantes da instabilização e a distribuição espacial dos escorregamentos. Estes métodos procuram contornar a subjetividade na análise dos fatores associados com a estabilidade de vertentes das abordagens qualitativas, apresentando ainda como vantagem a sua replicabilidade para outras áreas e a possibilidade de validar a importância de cada fator.

De acordo com Abella e Van Westen (2007), para análises de risco quantitativas, métodos estatísticos baseados em um inventário de deslizamentos são geralmente as melhores alternativas. Estes métodos assumem que a ocorrência de deslizamentos no passado são uma boa indicação da probabilidade de o fenômeno ocorrer no futuro.

No entanto, é importante observar que esse tipo de análise requer registros históricos de deslizamento bastante completos e podem ser menos usuais para as análises de risco em áreas que passaram ou vem passando por muitas mudanças ambientais, ou ainda, em locais onde, como consequência das mudanças climáticas, a frequência de ocorrência de deslizamentos deverá mudar significativamente.

O último grupo no qual as metodologias de análise de risco podem ser classificadas é o quali-quantitativo. Avaliações desse tipo consideram que um número de fatores influencia na estabilidade, e, para cada um desses fatores, atribui pontuações que são usadas para avaliar o quanto o fator é favorável ou desfavorável à ocorrência da instabilização e à ocorrência de perdas ou prejuízos (ABELLA; VAN WESTEN, 2007).

As metodologias baseadas neste método são: a combinação linear ponderada, a abordagem de Decisão *Fuzzy* (FDA – *Fuzzy Decision Approach*), a metodologia de Processo de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process*), proposta pelo Wind e Saaty (1980), entre outras aplicáveis ao mapeamento de riscos.

O uso da metodologia AHP faz com que os estudos de risco focados ao mapeamento de encostas se tornem menos subjetivos e mais sistemáticos. Esse método, quali-quantitativo, é caracterizado pela flexibilidade dada pelo enfoque qualitativo, e a consistência dada pelo enfoque quantitativo. A análise de sensibilidade usada no método AHP permite uma maior

percepção da eficácia dos julgamentos qualitativos e por tanto um maior nível de confiança na tomada de decisão (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013).

Em relação aos diferentes tipos de métodos apresentados, a presente pesquisa foi direcionada para uma abordagem qualiquantitativa baseada na opinião de especialistas. A incorporação do processo AHP objetivou reduzir os níveis de subjetividade envolvidos na análise dos indicadores e na hierarquização dos setores de risco de movimentos de massa.

2.3.1. Metodologia de Processo de Análise Hierárquica

O Processo de Análise Hierárquica (AHP) é uma das ferramentas de tomada de decisão de múltiplos critérios mais amplamente utilizada ao redor do mundo, no entanto, apenas recentemente pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de aplicar o AHP no gerenciamento de riscos geológicos-geotécnicos.

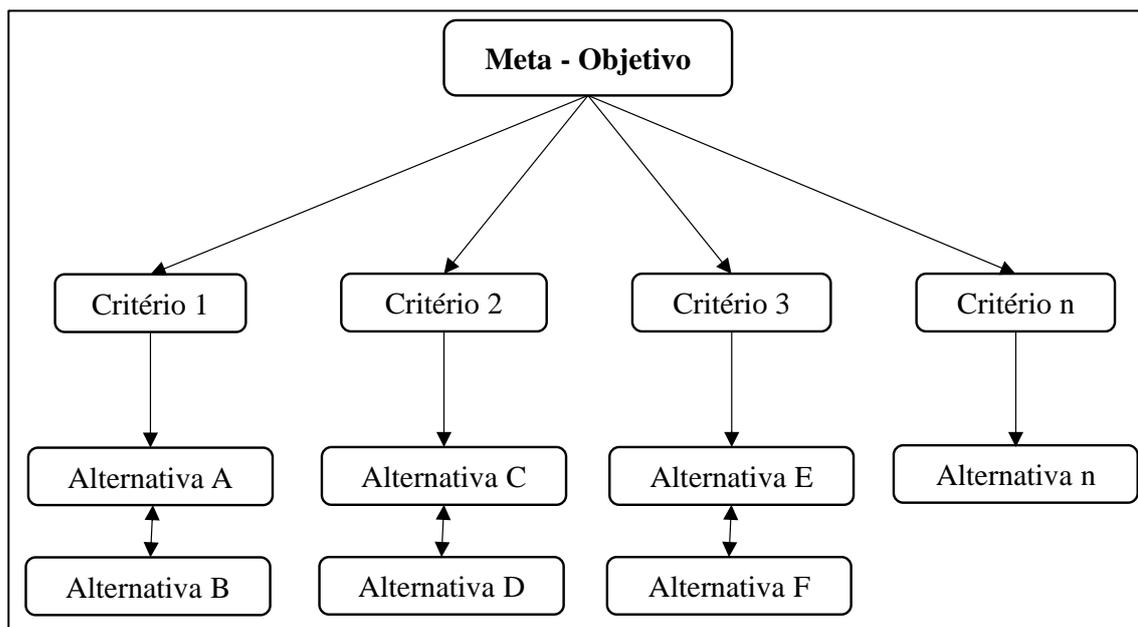
O AHP foi desenvolvido por Saaty, na década de 70, que propôs um método que pudesse representar o processo de tomada de decisão humano e ajudar a alcançar melhores julgamentos baseados em uma hierarquia, comparações em pares, escalas de julgamento, atribuição de pesos a critérios e seleção de melhores alternativas para um número finito de variáveis (FRANEK; KRESTA, 2017).

O princípio do método baseia-se na resolução de problemas complexos, levando em consideração a existência de múltiplos critérios simultâneos conflitantes e subjetivos. O método apresenta um caráter simples e intuitivo, facilmente compreensível e racional, para modelar um problema de decisão.

O AHP inclui três etapas principais: a) **estruturação**, b) **valoração**, c) **priorização e síntese**. A **primeira etapa** do processo envolve a decomposição do problema em uma estrutura hierárquica na qual são representados os critérios a serem avaliados e suas alternativas consideradas relevantes no processo de decisão, tais como atores, cenários, fatores climáticos e outros elementos que podem ser dados pela experiência e a intuição.

Como é possível observar na Figura 2.2, a estrutura é organizada por níveis, formando uma árvore invertida, onde no topo, encontra-se a meta (objetivo) da resolução do problema, em seguida, no nível imediatamente inferior, os critérios dos quais os elementos subsequentes dependem, e por último, nos níveis mais baixos, os subcritérios e alternativas a serem avaliados para cada critério (SAATY, 1990).

Figura 2.2 Exemplo da etapa de Modelização ou Estruturação Hierárquica

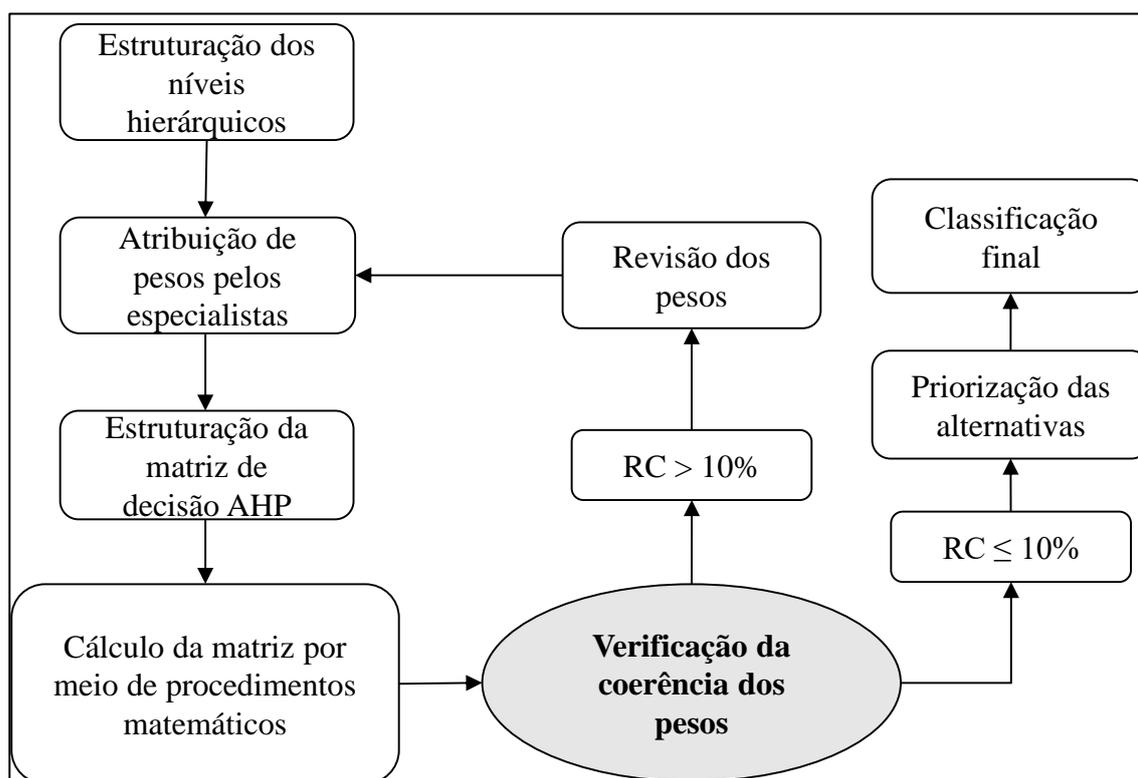


Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

Na segunda etapa, aqui nomeada de valoração, são apresentados desejos, preferências, critérios tanto objetivos quanto subjetivos e geralmente dados pela experiência. Nesta fase, especialistas na temática de riscos realizam comparações paritárias (par a par) entre os critérios e alternativas. Por meio desta comparação são determinadas as importâncias relativas (pesos) de cada critério.

Na última etapa, denominada priorização e síntese, o AHP calcula todos os pesos dos diferentes níveis hierárquicos (critérios e alternativas) dentro da matriz criada. As principais etapas do método AHP são apresentadas por Faria e Augusto Filho (2013) e está descrito na Figura 2.3.

Figura 2.3 Etapas principais do método AHP



Fonte: Adaptado de Faria e Augusto Filho (2013)

2.3.1.1. Julgamentos paritários

Comparações em pares são fundamentais na utilização do AHP. Para fazer comparações, precisa-se de uma escala de números que indiquem quantas vezes mais importante ou dominante um elemento é sobre outro, com relação ao critério ou propriedade com o qual eles foram comparados (SAATY, 2008).

A escala recomendada por Saaty (1990), denominada de Escala Fundamental de Saaty, mostrada na Tabela 2.6, vai de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre esses níveis 1 e 9.

A próxima etapa do processo consiste em derivar a escala de prioridades ou pesos. Para isso, a matriz de comparação paritária obtida é submetida a uma técnica matemática denominada autovetor. A forma recomendada por Saaty (1990), para realizar o cálculo do autovetor consiste em elevar a matriz a potências altas, dividindo-se a soma de cada linha pela soma dos elementos da matriz, ou seja, normalizando os resultados. O processo é interrompido quando a diferença entre os componentes do vetor de prioridades obtidos para a potência k e para a potência $k+1$ é menor do que um valor pequeno pré-determinado.

Tabela 2.6 Escala de julgamento de importância no Método AHP

Valores	Termos verbais	Explicação
1	Igual importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação a outra
5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação a outra
7	Muito fortemente mais importante	Alternativa fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extremamente mais importante	A evidência favorece uma alternativa em relação a outra, com grau de certeza mais elevado
2,4,6,8	Valores importantes intermediários	Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

Uma maneira fácil de obter uma aproximação para as prioridades é normalizando os elementos nas linhas. Este resultado normalmente coincide com o autovetor de prioridades, para uma matriz de ordem $n < 3$. Uma segunda maneira de obter essa aproximação é normalizando os elementos em cada coluna da matriz de comparação e então realizando a média aritmética para cada linha (SAATY, 1987).

Para exemplificar de forma didática e simples esse processo de obtenção do autovetor aproximado por meio da 2ª forma proposta no parágrafo anterior, será apresentada aqui a matriz de comparação em pares obtida por Teknomo (2006) ao realizar o julgamento paritário entre três tipos de frutas: banana, maçã e cereja, e em seguida, para esta matriz, procederemos o cálculo do autovetor aproximado.

Tabela 2.7 Representação da matriz de comparação dos julgamentos paritários entre as três frutas: maçã, banana e cereja

	Maça	Banana	Cereja
Maça	1	1/3	5
Banana	3	1	7
Cereja	1/5	1/7	1

Fonte: Adaptado de Teknomo (2006)

Considerando-se o exemplo de Teknomo (2006), o cálculo do autovetor ocorre conforme as três etapas a seguir:

a) Soma total dos elementos de cada coluna da matriz de comparação paritária conforme apresentado no Tabela 2.8;

Tabela 2.8 Exemplo de matriz de comparação

	Maça	Banana	Cereja
Maça	1	1/3	5
Banana	3	1	7
Cereja	1/5	1/7	1
Soma	21/5	31/21	13

Fonte: Adaptado de Teknomo (2006)

b) A normalização relativa dos pesos ocorre por meio da divisão de cada elemento da matriz pela soma total da respectiva coluna, resultando na soma igual a unidade, conforme mostra a Tabela 2.9;

Tabela 2.9 Exemplo de matriz de comparação normalizada

	Maça	Banana	Cereja
Maça	5/21	7/31	5/13
Banana	15/21	21/31	7/13
Cereja	1/21	3/31	1/13
Soma	1	1	1

Fonte: Adaptado de Teknomo (2006)

c) Cálculo da média aritmética de cada linha da matriz, gerando o “autovetor” ou “vetor de prioridades”, conforme a Tabela 2.10.

Tabela 2.10 Autovetor normalizado

	Maça	Banana	Cereja	Soma	Autovetor (%)
Maça	5/21	7/31	5/13	0,8485	28,28
Banana	15/21	21/31	7/13	1,9302	64,34
Cereja	1/21	3/31	1/13	0,2213	7,38
Soma	1	1	1	3,0000	100

Fonte: Adaptado de Teknomo (2006)

Realizando-se o procedimento de obtenção do autovetor para o exemplo desenvolvido por Saaty (2008) acerca da consumação de bebidas nos EUA, alcança-se os seguintes valores (pesos):

Tabela 2.11 Pesos dos critérios obtidos pelo processo de autovetor

Bebida	Peso
Café	0,177
Vinho	0,019
Chá	0,042
Cerveja	0,116
Refrigerante	0,190
Leite	0,129
Água	0,327

Fonte: Modificado de Saaty (2008)

No exemplo de Saaty (2008), o autovetor mostra os pesos relativos de importância na comparação entre as bebidas, indicando que a água tem importância de 32,7%, o refrigerante 19,00%, o café 17,70%, o leite 12,90%, cerveja 11,60%, chá 4,2% e vinho 1,9%.

Para atestar a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo seu método, Saaty (2008) comparou os valores obtidos pela metodologia AHP, com valores estatísticos de consumação de bebidas nos EUA, oriundos do *US Statistical Abstracts* (Tabela 2.12). Da comparação é possível observar que as respostas são bem próximas e que os julgamentos em pares feitos por um especialista podem levar a resultados muito precisos.

Tabela 2.12 Pesos dos critérios obtidos pelo método AHP e por pesquisa estatística

Bebida	Valor obtido pelo AHP	Valor estatístico (<i>US Statistical Abstracts</i>)
Café	0,177	0,18
Vinho	0,019	0,010
Chá	0,042	0,040
Cerveja	0,116	0,120
Refrigerante	0,190	0,180
Leite	0,129	0,140
Água	0,327	0,330

Fonte: Modificado de Saaty (2008)

2.3.1.2. Análise de consistência dos julgamentos

O próximo passo é determinar a consistência ou coerência dos julgamentos. Para proceder essa avaliação é preciso fazer a análise de sensibilidade dentro do processo AHP, a qual indica se os julgamentos estão logicamente relacionados. Esta análise é considerada um dos passos chaves para continuar usando a metodologia.

Para a realização da análise de sensibilidade, Saaty (1990) propôs o seguinte procedimento:

a) **Estima-se inicialmente o autovalor máximo (λ máx)** por meio da Equação (4). Para que a matriz de comparação seja considerada consistente faz-se necessário que o λ máx seja igual ao número de linhas (ou colunas) da matriz de comparações paritárias n . Quanto mais próximo λ máx for de n , mais consistente será o resultado.

$$\lambda_{max} = \sum T \times w \quad (\text{Equação 4})$$

Onde T é o autovetor normalizado, e w corresponde a soma das colunas da matriz de comparações para cada critério.

Voltando novamente ao exemplo de Teknomo (2006), observando-se os valores das somas das colunas para cada critério mostrados na Tabela 2.8 e o resultado do autovetor na Tabela 2.10 obtém-se o autovalor indicado a seguir, de acordo com a Equação (5):

$$\lambda_{max} = w \times T = \frac{21}{5} \times (0,2828) + \frac{31}{21} \times (0,6434) + \frac{13}{1} \times (0,0738) = 3,0967$$

Observa-se que o valor de $\lambda_{máx} = 3,0967$, está próximo da ordem da matriz de comparações paritárias ($n = 3$) no exemplo das frutas.

b) **Deve ser determinado o Índice de Consistência (IC)**, por meio da Equação 6:

$$IC = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (\text{Equação 6})$$

$$IC = \frac{3,0967 - 3}{3 - 1} = 0,04835$$

O índice de consistência indica quanto o autovalor calculado difere do valor teórico esperado.

c) **Calcular a Razão de Consistência (RC)**. Neste passo de cálculo, o índice de consistência (IC) é comparado com o índice de consistência aleatória (CA), com a finalidade de analisar se a razão de consistência é aceitável.

$$RC = \frac{IC}{CA} \quad (\text{Equação 7})$$

$$RC = \frac{0,04835}{0,58} = 0,083$$

O valor do índice de consistência aleatória (CA) representa aquele que seria obtido em uma matriz de comparações paritárias de ordem n, na qual não fossem realizados julgamentos lógicos, preenchendo-se os elementos com valores aleatórios (FARIA, 2011).

Saaty (1987) calculou o índice de consistência aleatória para uma amostra de 500 matrizes recíprocas positivas, de ordem de até 10 por 10, geradas aleatoriamente, encontrando os valores apresentados na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 Índices de consistência aleatória

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Modificado de Saaty (2008)

De acordo com Saaty (1987), RC é aceitável para valores menores ou iguais a 0,10 (10%). Para valores maiores que 0,10, recomenda-se que o problema seja estudado e os julgamentos revisados.

2.3.1.3. Síntese de prioridades

Após a etapa de análise de consistência dos julgamentos, na qual calculou-se a Razão de Consistência e verificou-se a aceitabilidade das comparações par a par realizadas, parte-se agora para a fase de síntese de prioridades.

De acordo com Saaty (2008), as prioridades globais para cada matriz são obtidas multiplicando as prioridades locais pelas prioridades do critério correspondente no nível superior, o que indica a posição relativa de cada critério numa classificação final. Esse processo, conhecido como método de soma ponderada, é expresso pela Equação 8.

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j \times v_j(a), \text{ com } \sum_{j=1}^n p_j = 1 \text{ e } 0 < p_j < 1 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

V (a) corresponde ao valor global da alternativa analisada;

p_j corresponde à importância relativa do critério j e;

v_j ao nível de preferência da alternativa analisada no critério j.

2.4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de taludes tem sido um campo de estudo bastante investigado nos últimos anos. Ao longo desse período diversos trabalhos foram realizados por pesquisadores de diferentes áreas. Inicialmente as investigações visavam, sobretudo, resolver problemas de instabilidade em casos particulares e, por este motivo, as pesquisas enfatizavam técnicas de investigação de campo e o desenvolvimento de modelos analíticos.

No entanto, a heterogeneidade do ambiente natural e a grande variabilidade das propriedades geotécnicas vão de encontro à homogeneidade exigida por esses métodos (AHRENDT, 2005). Na tentativa de resolver esta problemática, vários outros tipos de métodos de análise de estabilidade têm sido desenvolvidos. Atualmente, eles podem ser divididos em duas grandes abordagens: métodos determinísticos e probabilísticos.

2.4.1. Métodos determinísticos

A abordagem determinística envolve várias técnicas, dentre elas pode-se citar: métodos do equilíbrio limite, métodos de análise limite, métodos de análise com elementos finitos e método da diferença finita (KAUR; SHARMA, 2016). A maior parte dos engenheiros ainda utiliza o método do equilíbrio limite.

A grande utilização dos métodos baseados na Teoria do Equilíbrio Limite se dá em virtude, sobretudo, de três motivos: da simplicidade dos modelos, do nível satisfatório de acurácia dos seus resultados e da relativa facilidade para se estimar os parâmetros de resistência do solo.

De uma maneira geral, os métodos do equilíbrio limite assumem as hipóteses de que o solo se comporta como material rígido-plástico, isto é, rompe-se bruscamente, sem se deformar; que as equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico; e que a mobilização da resistência se dará de maneira uniforme ao longo da superfície de ruptura, ou seja, o FS é constante ao longo da linha de ruptura.

A determinação desse FS permite identificar o quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra para um determinado conjunto de condicionantes atuantes como, saturação por precipitações, pressões neutras, sobrecargas, geometria, etc. Este índice expressa uma relação entre a resistência ao cisalhamento da massa de solo (s) e a tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada (τ), sendo essa última obtida através das equações de equilíbrio estático.

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad (\text{Equação 9})$$

s, em termos de tensões efetivas, é dado por:

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

c' : Coesão efetiva

ϕ' : Ângulo de atrito efetivo

σ' : Tensão normal efetiva no plano de ruptura

Se o FS for igual à unidade, tem-se um estado de Equilíbrio Limite, onde o talude encontra-se na eminência do colapso. Fatores de segurança maiores que um indicam um talude estável.

Para que o método de análise seja aplicável a casos reais, um dos fatores importantes a considerar é a variação das propriedades do material ao longo do maciço. Para isto, geralmente, os métodos baseados na Teoria do Equilíbrio Limite subdividem a região de solo delimitada pela superfície potencial de ruptura em um número “n” qualquer de fatias menores, usualmente verticais, passando o método a ser denominado Método das Fatias. Logo, a tensão normal e cisalhante na base de cada lamela é determinada através da análise das condições de equilíbrio das forças e/ou momentos atuantes em cada fatia isoladamente (KAUR; SHARMA, 2016).

Vários pesquisadores utilizaram diferentes premissas para resolução dos problemas de estabilidade. Dentre elas, as equações estáticas que são consideradas e satisfeitas no cálculo, as forças entre fatias que são incluídas e a relação considerada entre as forças normal e cisalhante em cada fatia. Em função dessas considerações, o Método do Equilíbrio Limite desmembrou-se nas seguintes vertentes: Método de Fellenius (1927), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1973) e Bishop Simplificado (1995).

2.4.2. Métodos Probabilísticos

A questão da segurança envolvendo taludes, sejam eles naturais ou construídos, é um problema recorrente na Engenharia Civil e Geotécnica. Em muitas situações, nos mais diversos tipos de obras, a avaliação da segurança de taludes é o fator controlador de projetos, normalmente expresso sob a forma de um fator de segurança mínimo a ser estabelecido como critério de projeto/implantação (GERSCOVICH, 2012).

No entanto, nos últimos anos, esse tipo de abordagem para avaliação da estabilidade de encostas, intitulada de determinística, tem sido bastante criticada em virtude das inúmeras incertezas oriundas principalmente da variação nos parâmetros de entradas das análises.

Diante disto, diversos estudos na literatura geotécnica têm sugerido que as análises de estabilidade passem a ser realizadas por métodos probabilísticos, visto que essa é uma vertente da engenharia que é altamente passível de ser submetida a tratamentos estatísticos, tendo em vista que é, possivelmente, uma das áreas mais dominada por incertezas.

Anomalias geológicas, variabilidade espacial das propriedades do solo, escassez de dados representativos, mudanças nas condições ambientais, simplificações e aproximações adotadas nos modelos geotécnicos e erros humanos nos projetos e construções são todos fatores que contribuem significativamente para essas incertezas.

Os primeiros artigos a discutirem essa abordagem surgiram ainda na década de 1970, com os trabalhos de Matsuo e Kuroda (1974) e Tang, Yucemen e Ang (1976). Mais recentemente, El-Ramly, Morgenstern e Cruden (2002) promoveram uma revisão da literatura que versa sobre as análises de estabilidade probabilísticas, na qual aponta que nas últimas quatro décadas, os conceitos e princípios da abordagem probabilística incorporada às análises de estabilidade de encostas se desenvolveram e agora se encontram bem estabelecidos na literatura.

No entanto, a profissão tem demorado para adotar essas técnicas de análise probabilísticas. Na prática, conforme El-Ramly, Morgenstern e Cruden (2005), a aversão por parte dos profissionais de engenharia em relação à aplicação de métodos estatísticos na estabilidade de taludes deve-se, entre outros aspectos, a pouca quantidade de trabalhos publicados demonstrando a implementação e os benefícios das análises probabilísticas, à inexistência de um critério probabilístico de projeto consistente, bem como à percepção errônea da quantidade de dados necessários para a aplicação de métodos probabilísticos.

De acordo com Montoya e Pacheco de Assis (2011a), os métodos probabilísticos são aqueles que permitem a avaliação da distribuição de probabilidade de uma variável dependente em função do conhecimento das distribuições estatísticas das variáveis independentes que a geram. Estes métodos variam com relação às suposições adotadas, às limitações, à capacidade de resolver problemas complexos e à complexidade matemática.

A maior parte deles encontra-se em uma das duas categorias: Métodos Aproximados (FOSM e Método das Estimativas Pontuais) e a Simulação de Monte Carlo, também conhecida como Método Direto (EL-RAMLY; MORGENSTERN; CRUDEN, 2002). Cada um destes métodos possui suas vantagens e desvantagens, e deve ser escolhido de acordo com o tipo de problema que está sendo analisado.

2.4.2.1. Conceitos relacionados às análises probabilísticas

Inúmeros autores, dentre eles Whitman (1984), Duncan (2000) e El-Ramly, Morgenstern e Cruden (2002) citam como uma das razões para a pouca utilização da probabilidade em rotinas práticas de análises geotécnicas a pouca familiaridade por parte dos engenheiros com a linguagem utilizada para explicar os conceitos da teoria da probabilidade. Neste contexto, este item apresenta alguns dos conceitos relacionados com as principais fontes e tipos de incerteza na engenharia geotécnica, variabilidade espacial do solo, principais métodos probabilísticos, além de uma breve descrição da análise de sensibilidade.

2.4.2.1.1. Incertezas na engenharia geotécnica

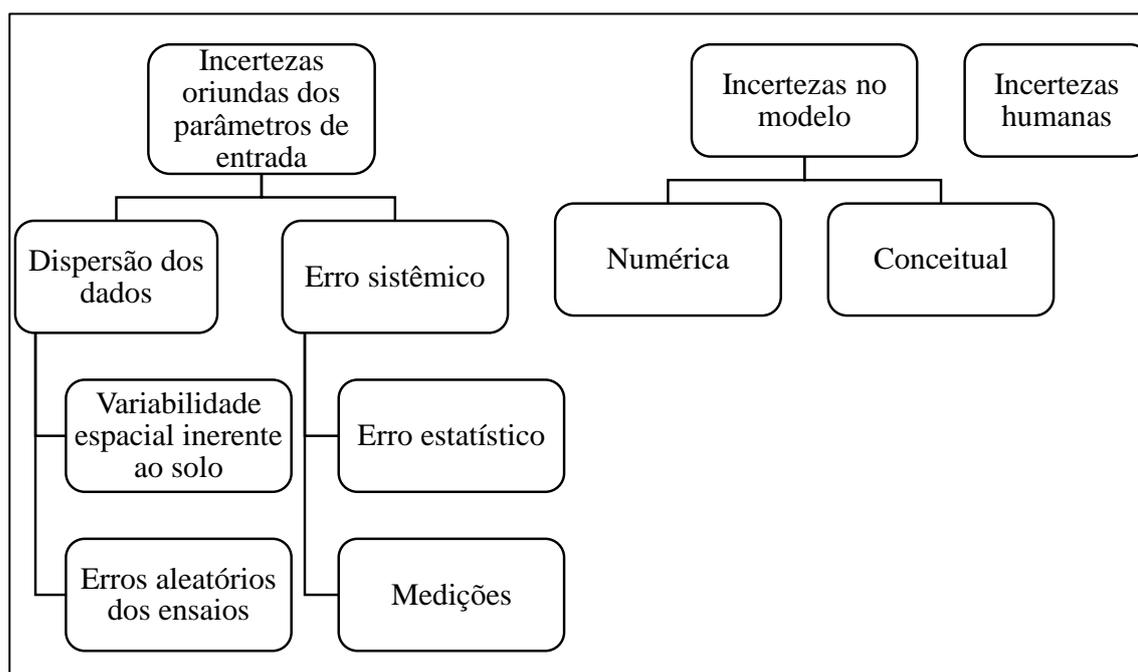
O conceito de incertezas e seus efeitos nos diversos sistemas da engenharia foram formalmente introduzidos, segundo El-Ramly (2001), no início da década de 70 por Tang, Yucemen e Ang (1976). El-Ramly (2001) afirma que as decisões necessárias nos processos de engenharia estão sempre cercadas de incertezas, isso porque muitos dos problemas relacionados a essa profissão envolvem previsões acerca de processos naturais e fenômenos que são naturalmente aleatórios.

Logo, em decorrência dessa inevitável presença de incertezas nos problemas de engenharia, os resultados de diversas análises realizadas, como os fatores de segurança obtidos ou a capacidade de carga de um pilar, por exemplo, estão também imbuídos de incertezas, resultando, esporadicamente, em rupturas de estruturas ou obras projetadas para serem seguras (EL-RAMLY, 2001).

El-Ramly (2001) propôs a divisão das incertezas geotécnicas em três categorias: incertezas oriundas dos parâmetros, incertezas nos modelos e incertezas humanas, conforme Figura 2.4.

O primeiro grupo, ao qual será dado maior enfoque, contempla as incertezas nos parâmetros de entrada das análises, as quais são atribuídas a duas fontes principais, dispersão dos dados e erro sistemático. As incertezas nos modelos derivam das teorias e dos modelos utilizados para realizar as predições, e as incertezas humanas estão relacionadas com erros humanos.

Figura 2.4 Fontes de incertezas



Fonte: El Ramly (2001)

2.4.2.1.1.1. Incertezas oriundas dos parâmetros de entrada

As incertezas nos parâmetros são atribuídas a duas fontes principais: dispersão dos dados e erro sistemático. Dispersão dos dados é a dispersão da medida em torno da média. Pode ser dividida ainda em variabilidade espacial inerente ao solo e erros aleatórios dos ensaios. O erro sistemático, por sua vez, refere-se ao desvio da tendência de média observada do valor verdadeiro. O erro sistemático subdivide-se em erro estatístico e de medições.

a) Variabilidade espacial inerente ao solo

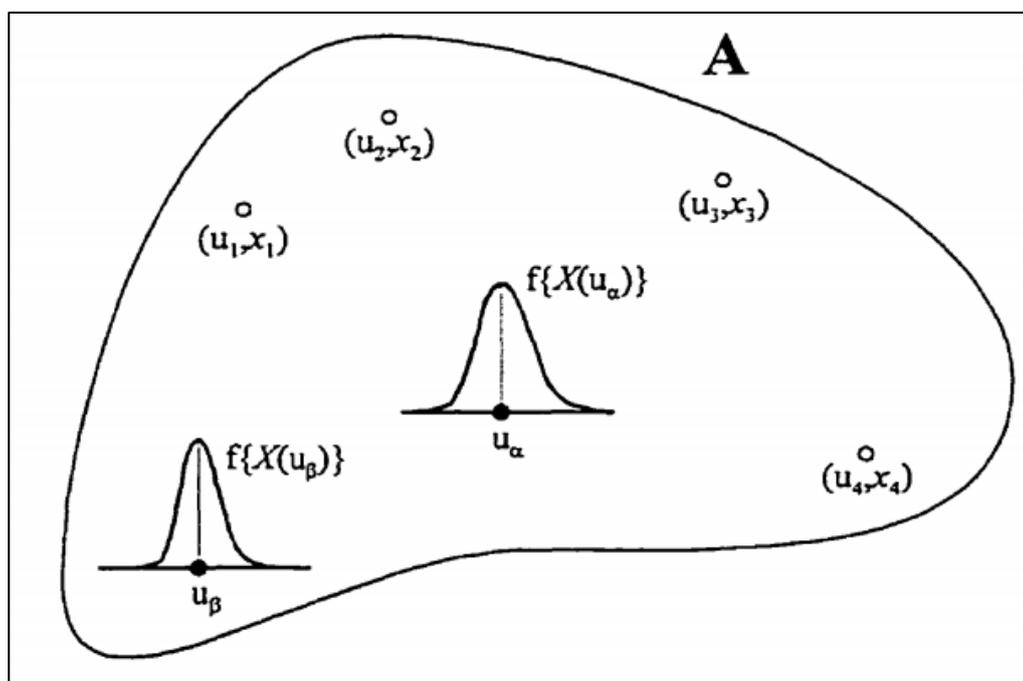
El Ramly (2001) define a variabilidade espacial como a verdadeira variação das propriedades do solo de um ponto para outro, dentro de uma mesma camada de solo considerada homogênea. Segundo ele, essa variabilidade, que é inerente ao solo, é atribuída à composição mineralógica, à natureza complexa do processo de deposição mecânica dos solos e também ao histórico de tensões.

No entanto, apesar da existência dessa variabilidade ponto a ponto, admite-se a existência de uma correlação espacial entre os parâmetros geotécnicos de dois locais adjacentes; assim como a adoção da hipótese de que essa interdependência é controlada pela localização no espaço, de modo que quanto maior a distância entre os pontos, a correlação diminui até desaparecer.

Estudos que se propõem a analisar a variabilidade espacial de dados geotécnicos baseiam-se, em sua grande maioria, na teoria do campo aleatório, “uma abordagem matemática para modelar padrões de variação e interdependência de um atributo no espaço e/ou tempo (EL-RAMLY, 2001)”.

Conforme essa teoria, em qualquer local dentro de uma camada de solo (Figura 2.5), um parâmetro do solo X , que pode ser, por exemplo, a coesão, o ângulo de atrito ou o peso específico do material, é definido por um vetor de localização e magnitude do parâmetro $(u, x(u))$. Para uma dada localização u_α , o parâmetro $X(u_\alpha)$ possui uma magnitude incerta a ser observada, e pode ser chamado de variável aleatória. Cada variável aleatória é caracterizada por uma função distribuição de probabilidade (EL-RAMLY, 2001).

Figura 2.5 Representação de um campo aleatório A e suas variáveis aleatórias



Fonte: El Ramly (2001)

O conjunto de variáveis aleatórias para todas as localizações dentro do espaço A da figura é conhecido, então, como campo aleatório. Logo, a variável aleatória $X(u)$ é o valor do campo aleatório para a localização u . Quando o valor do parâmetro para determinada localização é medido, sua magnitude não é mais incerta e se torna determinística. O problema reside no fato de que é usualmente impraticável amostrar todas as localizações do espaço amostral A , fazendo com que seja necessário realizar previsões, análises e tomadas de decisão baseadas em um número limitado de observações (EL-RAMLY, 2001).

Para superar as dificuldades relacionadas à inferência das características dos campos aleatórios na situação de limitação de dados, algumas suposições sobre suas propriedades são feitas. Comumente, assume-se que os campos aleatórios são homogêneos e isotrópicos, ou seja, as leis de probabilidade que governam o campo são invariantes no espaço, resultando na função de distribuição de probabilidade acumulada (CDF), a média e a variância, constantes para qualquer localização dentro do domínio A (EL-RAMLY, 2001).

Em decorrência da dificuldade de obtenção, na prática, da variação ponto a ponto do campo aleatório, frequentemente toma-se mão das médias locais sobre um domínio local espacial para representar a variabilidade espacial daquele domínio. Por exemplo, em análises de estabilidade de encostas, trabalhar com a média da resistência ao cisalhamento na superfície de ruptura é mais interessante para a engenharia geotécnica que a variação da resistência ponto a ponto, na camada.

Dependendo da quantidade de dados disponíveis, diferentes abordagens podem ser utilizadas para inferir a distribuição de probabilidade de cada variável, $f(x)$, que pode ter formas variadas. Na literatura estatística encontram-se muitas distribuições teóricas. Essas são modelos que procuram representar o comportamento de determinado evento em função da frequência de sua ocorrência.

Pimentel *et al.* (2017) aponta que, caso se disponha de uma quantidade de dados suficiente originados de ensaios geotécnicos, recomenda-se a realização de testes de hipótese, a exemplo dos testes não-paramétricos de aderência, como o Chi-Quadrado (Chi-Square), o Teste de Qualidade de Ajuste (Godness-of-fit test) ou o Teste de desvio máximo Kolmogorov-Smirnov, para a definição da função que apresenta o melhor ajuste aos dados.

Na prática da engenharia, frequentemente o primeiro passo para verificação do formato da distribuição de uma variável contínua é a análise visual gráfica através da construção do histograma de frequência, o qual representa graficamente, na forma de uma barra vertical, a frequência de valores assumidos pela variável aleatória dentro de um intervalo específico de valores.

Para definição desse intervalo, que é fixo, ou seja, de igual largura, Sturges (1926) propôs uma regra simples, utilizada quando há disponível uma pequena quantidade de dados, visualizada na Equação 11, onde k representa o número de intervalos e n a quantidade de dados.

De acordo com Baecher e Christian (2003), como a escolha do número de intervalos pode afetar a interpretação visual da dispersão de dados, às vezes é útil construir mais de um histograma, usando um número diferente de intervalos para cada um.

$$k = 1 + 3,3 \log_{10} n \quad (\text{Equação 11})$$

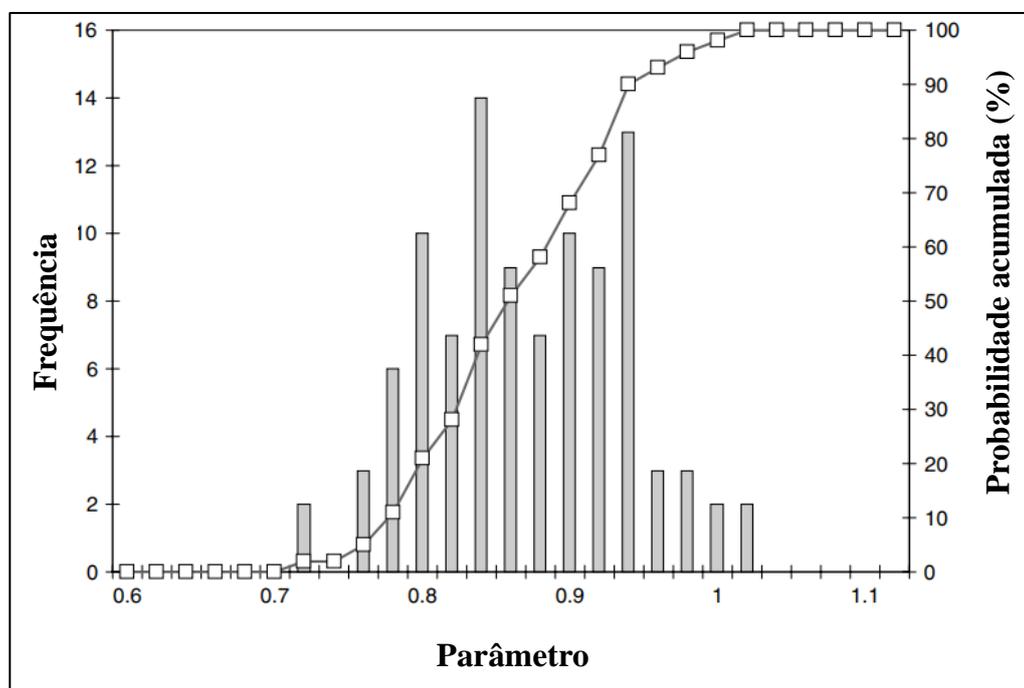
A avaliação do histograma fornece informações acerca da variação dos dados. A forma sugere se os dados possuem uma tendência central e, caso possuam, onde, ao longo do eixo x do gráfico, esses dados se concentram, e a largura do histograma sugere a dispersão dos dados.

A partir do histograma, é possível então construir a distribuição de frequência da variável aleatória, dividindo cada barra vertical pelo total de medidas realizadas. Isso fornecerá a frequência relativa dos valores observados em cada intervalo como uma fração decimal (BAECHER; CHRISTIAN, 2003).

Uma forma alternativa de poder visualizar os dados, análogo ao histograma, é mediante a obtenção da função de probabilidade acumulada para um parâmetro (CDF), a qual indica a probabilidade de uma variável ter um valor menor ou igual a um valor selecionado. Essa função é construída somando as frequências relativas, iniciando da extremidade inferior dos dados até à superior.

A Figura 2.6 traz um exemplo de um histograma e de uma função de probabilidade acumulada para um parâmetro fictício.

Figura 2.6 Exemplo de um histograma e de uma função de probabilidade acumulada



Fonte: Adaptado de Baecher e Christian (2003)

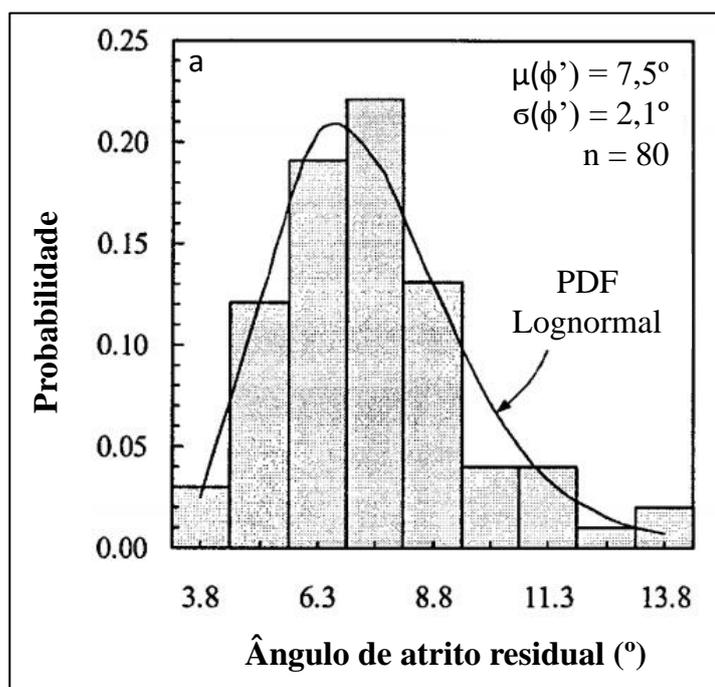
Outro método gráfico que pode ser utilizado juntamente com as técnicas anteriores, para avaliar a qualidade do ajuste entre a distribuição dos dados experimentais com relação à teórica é o Quantil-Quantil ou Q-Q plot.

A ideia da metodologia consiste em comparar os quantis de determinada distribuição de probabilidade assumida com os quantis dos dados experimentais, de modo que, se houver uma boa aderência dos dados à distribuição assumida, os pontos se concentrarão em torno de uma linha reta, dando indícios de que a distribuição adotada é adequada. No caso de obtenção de um gráfico não linear, indica-se a existência de duas distribuições de probabilidade diferentes.

Muitos autores apontam que o gráfico Q-Q é melhor que o histograma e o gráfico de distribuição acumulada empírica, porque ao realizarmos a avaliação visual temos mais habilidade para verificar se os pontos se ajustam à uma reta teórica do que se uma curva de densidade se ajusta a um histograma ou uma curva de probabilidade acumulada se ajusta à acumulada empírica.

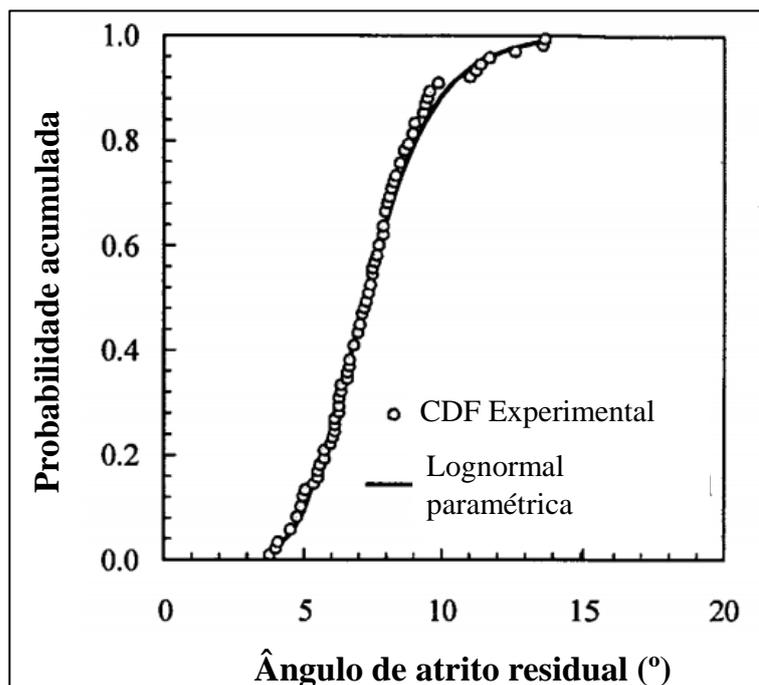
El Ramly (2001) apresenta um exemplo de boa adequação entre a distribuição de probabilidade assumida para os dados experimentais do parâmetro ângulo de atrito residual e a distribuição lognormal, com média de $7,5^\circ$ e desvio padrão de $2,1^\circ$, como pode ser observado nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9.

Figura 2.7 Histograma do ângulo de atrito residual



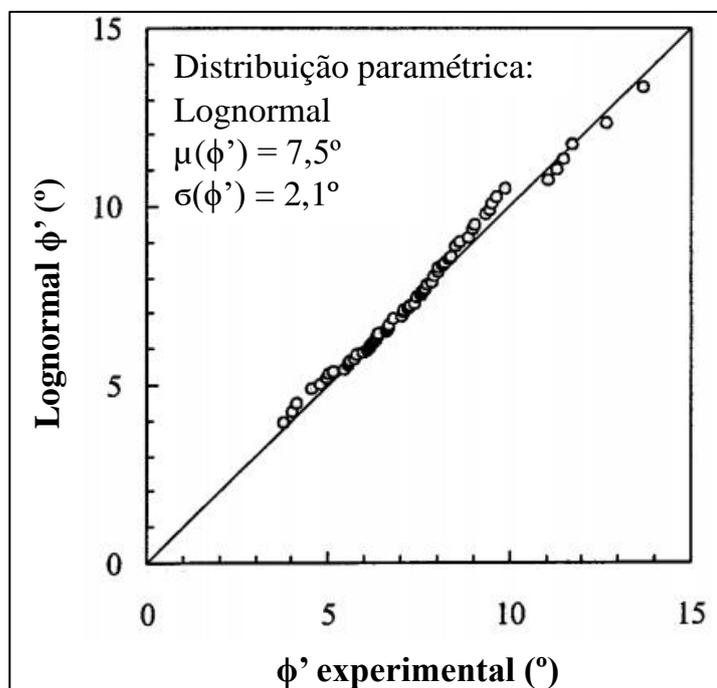
Fonte: Adaptado de El Ramly (2001)

Figura 2.8 Função de probabilidade acumulada do ângulo de atrito residual



Fonte: Adaptado de El Ramly (2001)

Figura 2.9 Gráfico Q-Q do ângulo de atrito residual



Fonte: Adaptado de El Ramly (2001)

No entanto, na maioria dos casos práticos, informações limitadas do solo “*in-situ*” são obstáculo para a incorporação da variabilidade espacial das propriedades do solo na concepção e análise geotécnica. Nesse sentido, inúmeros estudos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos com o objetivo de estimar a variação e as funções densidade de probabilidade das propriedades do solo.

Nessa situação de ausência de dados adequados, Silva (2015) propõe estimar os parâmetros estatísticos dos dados de solo a partir dos valores publicados na literatura, assumindo-os como a média, e a partir deles, fazer o uso da covariância padrão universal para estimar os valores do desvio padrão dos parâmetros geotécnicos em questão.

O índice de Covariância Padrão Universal vem sendo observado por diversos pesquisadores desde a década de 1970, a partir de um banco de dados de diversos locais do mundo, representando a variabilidade dos mesmos, e definindo dessa forma o coeficiente de variação padrão para estas variáveis, bem como a faixa de variação das mesmas (Tabela 2.14).

Tabela 2.14 Covariância padrão para os principais parâmetros geotécnicos

Parâmetro	Faixa da Covariância Padrão (%)
Ângulo de atrito efetivo	02 a 13
Coesão	20 a 80
Peso específico	03 a 07

Fonte: Modificado de Duncan (2000)

O desvio padrão poderá ser calculado por meio da fórmula do coeficiente de variação (Equação 12), onde CV é o coeficiente de variação em percentual, σ é o desvio padrão amostral e μ é a média aritmética.

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \times 100 (\%) \quad (\text{Equação 12})$$

Outra forma de se obter o desvio padrão, de acordo com Duncan (2000), seria por intermédio da Regra dos Três Desvios-Padrão (“*Three-Sigma Rule*”). Essa proposta desenvolvida por Dai e Wang (1992) baseia-se no fato de que 99,73% de todos os valores de um parâmetro que possui distribuição normal caem dentro do intervalo de três desvios-padrão em torno do valor médio desse parâmetro.

De posse dessas informações (média e desvio padrão), será possível, então, definir a distribuição de probabilidade das variáveis em estudo, obtida na literatura técnica, que será utilizada para estimar a distribuição de probabilidade do fator de segurança.

A Tabela 2.15, traz indicações de funções de densidade de probabilidade que melhor se adequam a alguns parâmetros geotécnicos.

Tabela 2.15 Recomendações de funções distribuição de probabilidade que melhor se adequam a parâmetros geotécnicos

Parâmetro	Função densidade de probabilidade	Referência
Variáveis que não podem possuir valor negativo	Distribuição Lognormal	Lacasse e Nadim (1996)
Peso específico	Distribuição normal	
Ângulo de atrito em areias	Distribuição normal	

Fonte: Modificado de *U.S. Army Corps of Engineers* (2006)

b) Erros aleatórios

Os erros aleatórios dos ensaios são oriundos de fatores relacionados ao processo de medição, tais como erro do operador ou a existência de um dispositivo defeituoso, por exemplo. Ao contrário das incertezas originadas da variabilidade espacial, esse tipo de erro não possui correlação alguma com a localização da amostra e pode ser diretamente estimado repetindo-se experimentos na mesma amostra através de diferentes operadores e/ou equipamentos (EL RAMLY, 2001).

Apesar de sua medição ser mais simples quando comparado às incertezas oriundas da variabilidade espacial, não é uma opção viável na prática para a geotecnia, devido à natureza destrutiva da maior parte dos ensaios laboratoriais de solos, impossibilitando, assim, o conhecimento dos erros aleatórios dos ensaios (EL-RAMLY; MORGENSTERN; CRUDEN, 2002).

2.4.2.1.1.2. Incertezas nos modelos

As incertezas nos modelos são provavelmente a maior fonte de incertezas na Engenharia Geotécnica e uma das mais difíceis a ser quantificada com segurança (EL-RAMLY, 2001). Esse tipo de incerteza está relacionado com a diferença entre a teoria adotada pelos modelos de predição e a realidade. Podem ser categorizadas em incertezas conceituais e numéricas.

Uma forma de conseguir quantificar mais facilmente a incerteza associada ao modelo, de acordo com El Ramly (2001), é comparar as predições do modelo com a performance real observada, solução essa que esbarra na dificuldade de obtenção de dados, raramente disponíveis na prática. Ouvir a opinião de especialistas seria uma outra alternativa para

considerar esse tipo de incerteza em projetos de engenharia, alternativa que apresenta como desvantagem a questão da subjetividade.

2.4.2.1.1.3. Incertezas humanas

As incertezas humanas são resultado de erros humanos, o que inclui falta de cuidado ou ignorância, informação mal repassada, falta de comunicação entre as partes envolvidas em um projeto, dentre outros. El Ramly (2001) aponta a contribuição significativa dos erros humanos no deslizamento de Kwun Lung Lau, que ocasionou 5 mortes em Hong Kong.

2.4.2.1.2. Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura

O Índice de Confiabilidade (β) é definido pela relação entre a média e o desvio padrão do fator de segurança.

$$\beta = \frac{\mu_{FS}}{\sigma_{FS}} \quad (\text{Equação 13})$$

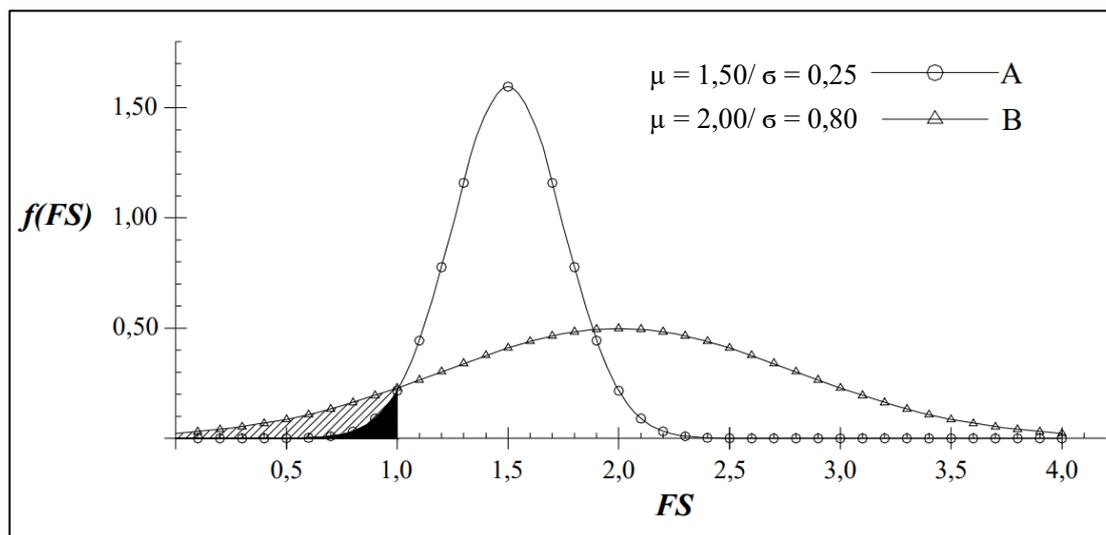
No contexto das análises probabilísticas de estabilidade, esse índice descreve a estabilidade de um talude pelo número de desvios padrão entre o fator de segurança médio e o valor do fator de segurança crítico, definido para a ruptura. Considerando a hipótese de que a ruptura ocorre quando o FS é inferior a 1,0, pode-se reescrever a Equação 13, conforme expressão abaixo:

$$\beta = \frac{\mu_{FS}-1}{\sigma_{FS}} \quad (\text{Equação 14})$$

Em que β é o índice de confiabilidade; μ_{FS} a média da distribuição dos FS e σ_{FS} o desvio padrão da distribuição dos FS.

A Probabilidade de Desempenho Insatisfatório, por sua vez, corresponde, no contexto da engenharia, à probabilidade de FS ser inferior a 1,0, ou seja, ($P [FS < 1]$). Esse índice também pode ser obtido calculando-se a área sob a curva de distribuição de probabilidades contida a esquerda do $FS = 1$.

A Figura 2.10 apresenta um exemplo da definição de Probabilidade de Desempenho Insatisfatório. Nela existem dois projetos hipotéticos A e B. O projeto A, apesar de apresentar menor FS que o projeto B, exibe menor probabilidade de falha (menor área hachurada para FS menores que um) tendo em vista que possui um desvio padrão menor. Com isso, a Probabilidade de Desempenho Insatisfatório (P_f) é superior no projeto B que no A, devido à maior incerteza dos parâmetros.

Figura 2.10 Distribuições estatísticas com diferentes FS e σ 

Fonte: Maia e Assis (2004)

Por fim, Silva (2015) ressalta que a probabilidade de ruptura obtida por meio da avaliação de FS não indicará o risco real de ruptura, visto que muitos outros fatores de risco influenciam no cálculo dessa probabilidade. Diante do exposto, é necessário estabelecer o valor aceitável do Índice de Confiabilidade (β) ou da Probabilidade de Falha (PF).

2.4.2.1.3. Riscos aceitáveis

Uma tarefa difícil no gerenciamento de riscos é estabelecer critérios de aceitação dos riscos. Na engenharia, assim como em outras áreas, baixo risco representa alto custo. Logo, nos deparamos com o questionamento, “quão seguro é seguro o suficiente?” ou ainda “qual é o nível de risco aceitável?”. A resposta para essas indagações, implícita no termo aceitável, é “para quem é aceitável?”.

Dados apresentados por Baecher e Christian (2003), apontam para algumas importantes constatações sobre os níveis de risco aceitos pela população. De acordo com os autores, a população aceita níveis de risco voluntário, oriundo de suas próprias ações, como dirigir um veículo, mais altos (cerca de 1000 vezes maior) que os riscos involuntários impostos, como a ruptura de uma barragem ou de um talude.

Além disso, segundo os autores, existem evidências que indicam que a população é mais disposta a aceitar um maior número de desastres ou eventos com poucas mortes do que poucos eventos que causariam muitas mortes (como um deslizamento), indicando que a escala do risco influencia na sua aceitabilidade.

Diante dessas constatações, sugere-se a existência de uma dependência, de forma inversamente proporcional, entre o nível de risco aceitável e o número de vidas perdidas em um evento. Assim, conclui-se que se a possibilidade de perda de um grande número de vidas devido a ocorrência de um movimento de massa é alta, a probabilidade de que um evento dessa proporção venha a ocorrer deve ser baixa.

Partindo desse pressuposto, alguns autores e instituições têm proposto gráficos (“F-N Charts”), em função da probabilidade de ruptura (F) anual (ou em qualquer período de tempo desejado) e das consequências associadas (N), principalmente perda de vidas humanas. O termo “N” pode ser substituído por outra medida das consequências, tal como os custos envolvidos na ocorrência de um desastre.

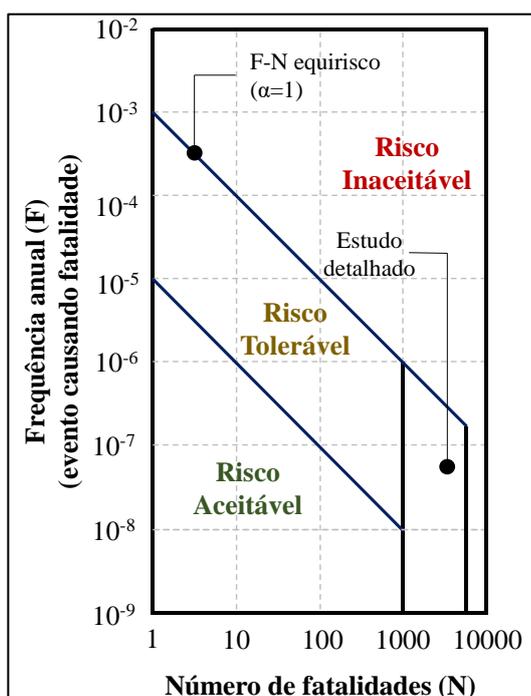
As curvas F-N podem ser expressas pela seguinte equação:

$$k = F \times N^\alpha \quad (\text{Equação 15})$$

Onde k é o risco, F a probabilidade de ruptura, N às consequências associadas as rupturas e α a inclinação da linha.

Quando essa inclinação é de 45° ($\alpha=1$), tem-se curvas de equirisco, ou seja, curvas onde o risco é igual para todos os pontos ao longo da linha. Para $\alpha>1$, o risco é inaceitável e para $\alpha<1$ recai-se em uma conjuntura de risco aceitável, conforme ilustrado no exemplo da Figura 2.11.

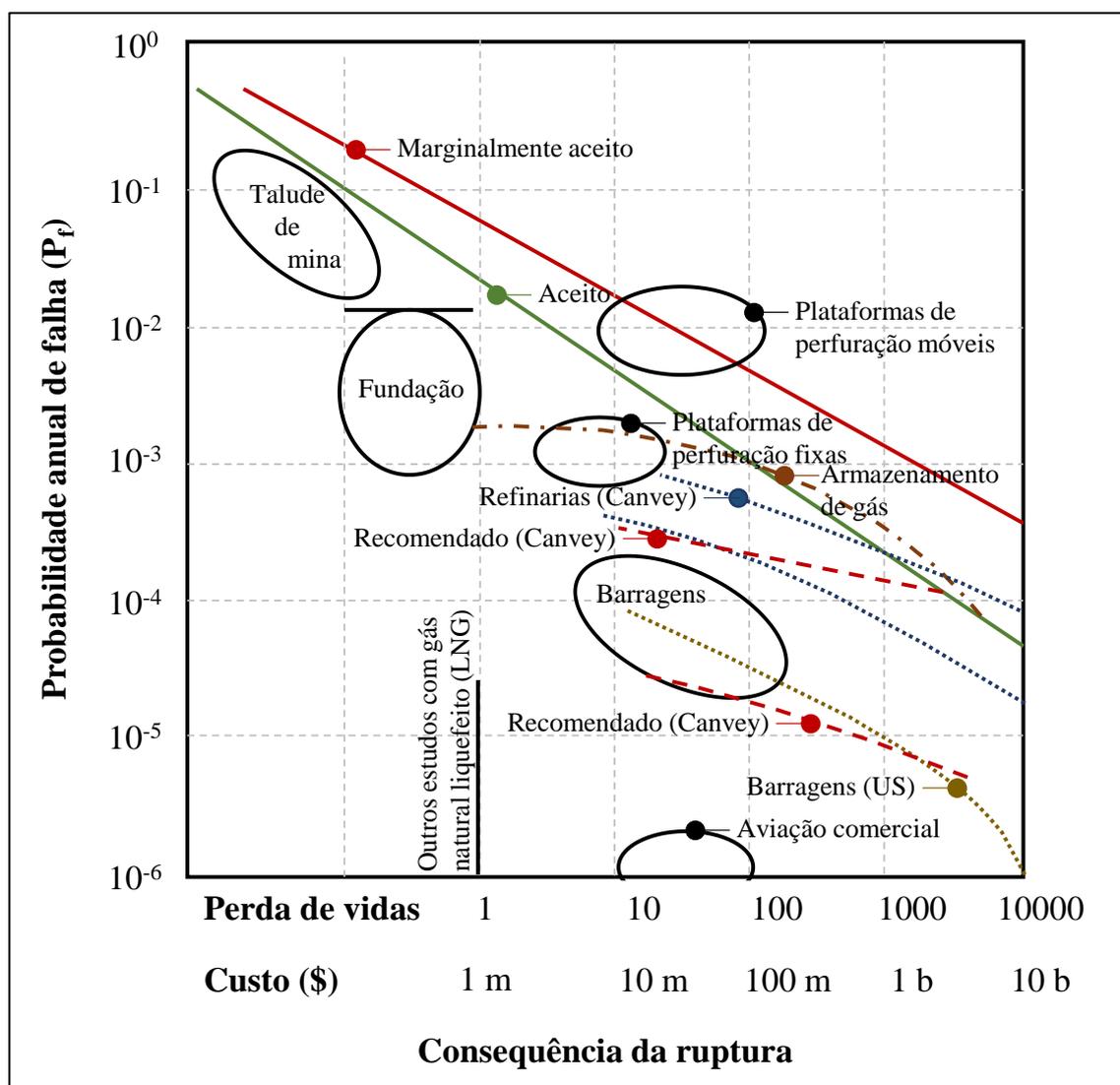
Figura 2.11 Curvas F-N, linhas de equirisco e região de risco tolerável



Fonte: Lacasse (2016)

Em ordem cronológica, uma das primeiras propostas documentada é o gráfico publicado por Whitman (1984), mas, de acordo com Whitman (2000), elaborado por Greg Baecher, apresentado na Figura 2.12. Essa carta envolve a avaliação do risco para estruturas e outros projetos de engenharia civil e fornece uma indicação do risco aceitável.

Figura 2.12 Riscos para projetos de engenharia



Fonte: Whitman (1984)

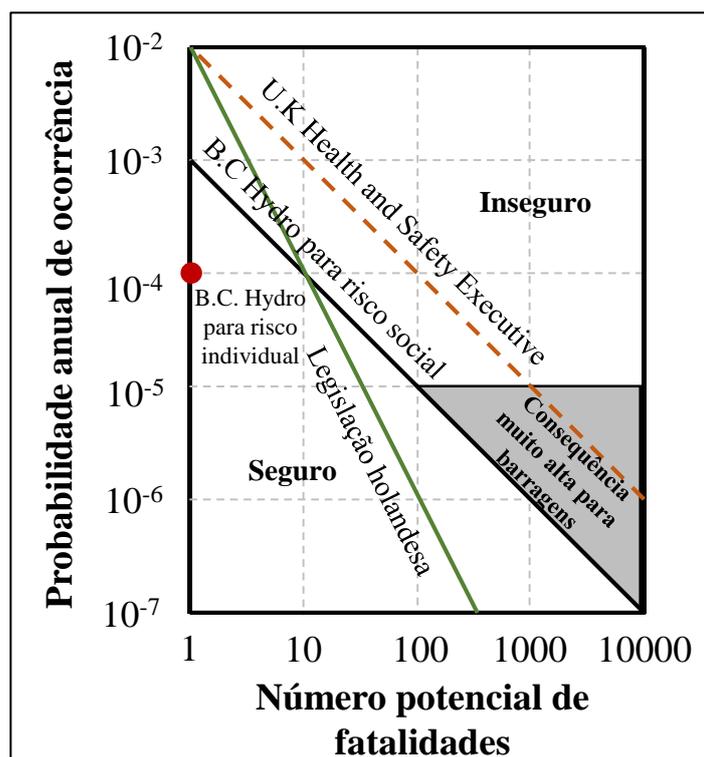
A análise da Figura 2.12 nos permite observar um valor de referência para ruptura de taludes de mina sem perdas de vidas humanas na ordem de 10^{-2} . No entanto, destaca-se que os taludes da mina estudada por Whitman (1984), são taludes de cava simples, sem infraestrutura a seu redor, por isso uma probabilidade anual de ruptura de 1:50 é aceitável,

tendo em vista que as consequências da ruptura são pequenas, somente no interior da cava (SILVA, 2015).

Dessa forma, considerando que o talude em análise neste estudo trata-se de uma encosta urbana densamente ocupada e que as consequências serão enormes caso um desempenho insatisfatório venha a ocorrer, constata-se, como mencionado anteriormente, que a probabilidade de falha para esta situação deve ser menor que este valor de referência fornecido por Whitman (1984).

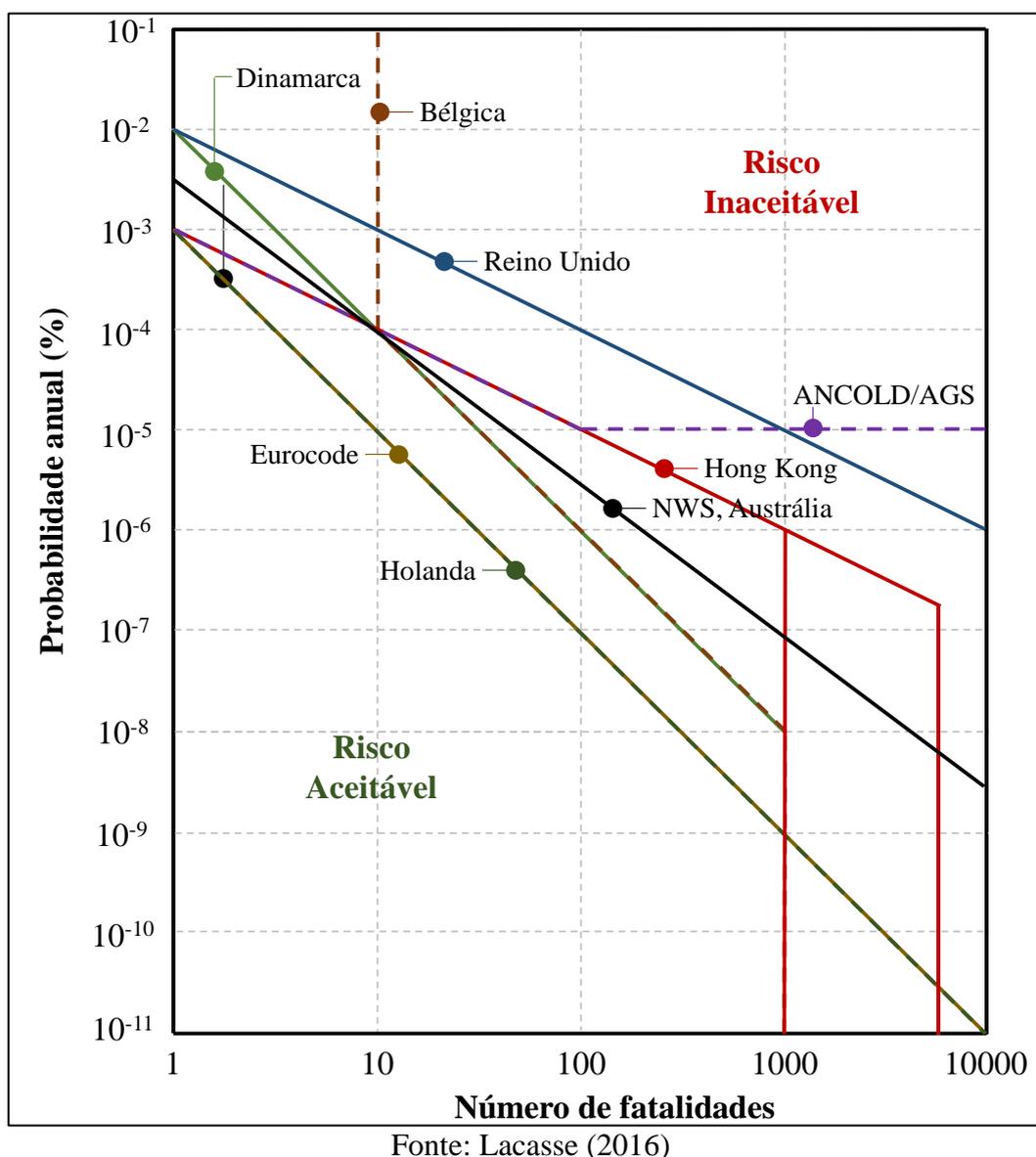
O trabalho de Whitman (2000) traz um compilado de critérios (Figura 2.13), organizado pela *British Columbia Hydro*, para apreciação dos níveis de risco em função da probabilidade de ruptura e das consequências associadas (perda de vidas humanas, construções afetadas, prejuízos, etc). Uma proposta de atualização desse gráfico foi apresentada por Lacasse (2016) e pode ser visualizada na Figura 2.14.

Figura 2.13 Vários critérios de risco compilados por Whitman (2000)



Fonte: Whitman (2000)

Figura 2.14 Comparação entre diretrizes de aceitação de riscos em diferentes países



Da análise de ambas Figuras 2.13 e 2.14, nota-se de maneira geral nessas metodologias uma probabilidade de ruptura para um nível de risco aceitável em torno de 10^{-3} a 10^{-5} /ano para até 10 (dez) fatalidades. Apesar desses critérios de aceitação de risco social ou individual acima apresentados não terem sido estabelecidos para perda de vidas devido a rupturas de taludes e movimentos de massa em encostas urbanas, como ressalta Lacasse (2016), existe razoabilidade em sua aplicação para encostas construídas.

Nesse sentido, Australian Geomechanics Society (2000) aponta algumas sugestões de risco tolerável para perda de vidas para encostas já construídas e para aquelas que estão sendo projetadas (Tabela 2.16), baseadas no critério adotado pelo Comitê Nacional de Grandes Barragens (ANCOLD).

Tabela 2.16 Sugestão de risco tolerável para perda de vidas humanas

Situação	Sugestão de risco tolerável para perda de vidas
Encostas existentes	10^{-4} para risco individual
	10^{-5} para risco social
Novas encostas	10^{-5} para risco individual
	10^{-6} para risco social
<p>Risco individual: risco de fatalidade ou dano a qualquer indivíduo identificável que vive dentro de uma zona impactada por um movimento de massa, ou que segue um padrão particular de vida que pode sujeitá-lo as consequências de um movimento de massa.</p> <p>Risco social: risco de múltiplas fatalidades ou danos na sociedade como um todo, envolvendo mortes, ferimentos, perdas financeiras, ambientais e outras.</p>	

Fonte: *Australian Geomechanics Society* (2000)

Para definição desses valores, Australian Geomechanics Society (2000) partiu de alguns princípios aplicáveis apenas para riscos à movimentos de massa em encostas. O principal refere-se à aceitação de que maiores riscos são admissíveis para ocorrência de deslizamentos em encostas existentes e ocupadas do que para novos taludes projetados. Dessa hipótese, deriva a observação de valores mais elevados de probabilidade de ruptura aceitáveis para encostas já existentes na Tabela 2.16.

Outra referência para valores típicos de índices de confiabilidade e probabilidades de performance insatisfatória aceitáveis é a proposta de U. S. Army Corps of Engineers (1995), a qual classifica os índices de confiabilidade e probabilidade de ruptura em 7 níveis de desempenho (alto, bom, acima da média, abaixo da média, pobre, não satisfatório e perigoso).

Na Tabela 2.17 verifica-se que um nível bom de desempenho corresponde a uma probabilidade de ruína da ordem de 10^{-5} , corroborando com a proposta de Australian Geomechanics Society (2000).

Tabela 2.17 Relação entre índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura

Nível	Índice de Confiabilidade	Probabilidade de Ruptura
Alto	5,0	3×10^{-7}
Bom	4,0	3×10^{-5}
Acima da média	3,0	0,001
Abaixo da média	2,5	0,006
Pobre	2,0	0,023
Não satisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

Fonte: U. S. Army Corps of Engineers (1995)

Avaliando todas as informações acima apresentadas acerca de níveis aceitáveis de risco à ocorrência de movimentos de massa para encostas urbanas ocupadas, verifica-se, em resumo, que a adoção de um valor de risco aceitável não está bem estabelecida na literatura técnica, sobretudo para essa área da engenharia, mas envolve valores de probabilidade de ruptura da ordem de **10^{-4} a 10^{-5} para até 10 mortes.**

Além disso, é válido comentar que esses valores de aceitabilidade dependem muito do tipo de projeto a ser executado e da quantidade de informação disponível para a análise, de modo que em um projeto ou uma obra que disponha de muita informação de boa qualidade e cujo risco não seja muito grande (perda de vidas), podem ser adotados maiores valores de probabilidade de ruptura como aceitáveis.

2.4.2.1.4. Métodos aproximados

De forma geral, os métodos aproximados são baseados em versões modificadas do Método de Primeira Ordem Segundo Momento (FOSM) e do Método das Estimativas Pontuais (EP).

Nessas duas técnicas exige-se apenas o conhecimento do valor médio e do desvio padrão de todas as variáveis de entrada, que, no presente estudo consiste nas propriedades geotécnicas do solo, ou seja, coesão, ângulo de atrito e peso específico. Além desses parâmetros, necessita-se também da função de desempenho $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (Ex: equação de Bishop), a qual define o Fator de Segurança (FLORES, 2008).

Nessas análises, são feitas algumas suposições simplificadoras que frequentemente limitam sua aplicação a uma classe específica de problemas. Como exemplo, segundo El-Ramly, Morgenstern e Cruden (2002), alguns trabalhos usaram modelos de encosta muito simples, como o Método de Fellenius, outros trataram apenas de solos sem atrito. Uma restrição para uma superfície circular de ruptura é comum em muitos estudos. A maior desvantagem desses métodos consiste na desconsideração da variabilidade espacial das propriedades do solo e da poropressão (FLORES, 2008).

Além disso, El Ramly (2001) comenta que embora os Métodos Aproximados não exijam o conhecimento da distribuição de probabilidade das variáveis de entrada, o que inicialmente seria visto como uma vantagem, alguns deles (Ex: métodos baseados no FOSM), assumem coeficiente de assimetria igual a zero para essas funções, o que implica em uma curva simétrica. No entanto, El Ramly (2001) afirma que vários estudos desenvolvidos mostram que as propriedades do solo, ao contrário do que é assumido, podem ter distribuição assimétrica.

Outra deficiência apontada por El Ramly (2001), a qual, segundo ele, seria a mais importante, é que os Métodos Aproximados não fornecem qualquer informação acerca da forma da função de desempenho do fator de segurança, fornecendo apenas estimativas da média e da variância desse parâmetro. Portanto, uma estimativa da probabilidade de ruptura só poderá ser obtida assumindo uma forma paramétrica para a função desempenho do fator de segurança (tipicamente normal ou lognormal).

2.4.2.1.5. Método de Monte Carlo

De acordo com Hidalgo Montoya e Pacheco de Assis (2011), o método de Monte Carlo é definido como uma metodologia que possibilita determinar a função de distribuição de frequência da variável considerada como dependente, mediante a geração de números aleatórios uniformes que expressam as variáveis independentes envolvidas.

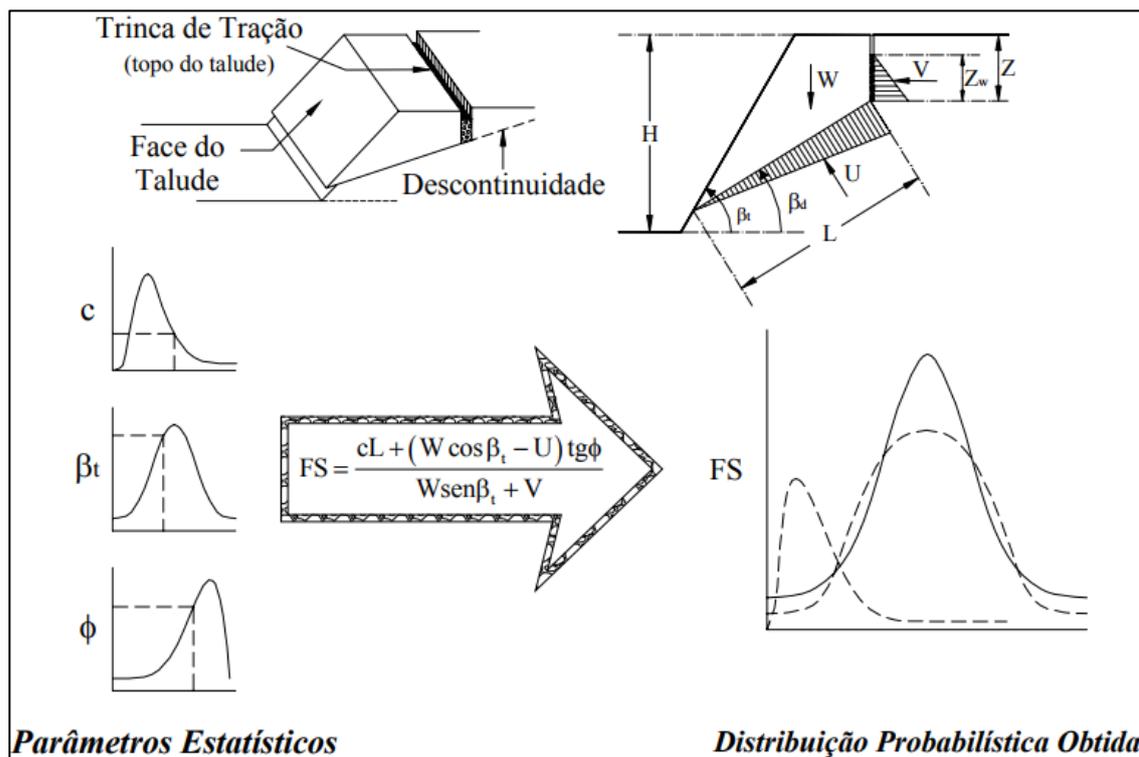
Antes de iniciar-se o processo de simulação, El Ramly (2001) aponta que uma função de desempenho determinística apropriada (Ex: Equação de Bishop) deve ser selecionada e as distribuições de probabilidade de cada variável de entrada deve ser previamente definida. Em seguida, utiliza-se um gerador de números aleatórios para selecionar um valor aleatório para cada variável de entrada com base na distribuição de probabilidade correspondente.

Esses valores selecionados, por fim, são utilizados na função de desempenho determinística para calcular o fator de segurança. O processo deve ser repetido uma grande quantidade de vezes a fim de permitir a construção da distribuição de probabilidade da variável dependente (fator de segurança), cuja forma é desconhecida. Logo, a média do fator de segurança e a probabilidade de ruptura podem ser obtidos da distribuição de probabilidade construída.

Mendes (2017) afirma que a probabilidade de ruína ou de falha pode ser obtida da seguinte forma: sendo F uma função que define o fator de segurança FS , basta determinar o número de vezes em que o FS foi inferior a 1 e dividir esse valor pelo número total de iterações realizadas.

A Figura 2.15 ilustra o processo de obtenção da distribuição de probabilidade pelo método de Monte Carlo.

Figura 2.15 Obtenção da distribuição de probabilidade pelo Método de Monte Carlo



Fonte: Maia e Assis (2004)

Segundo El Ramly (2001), a Simulação de Monte Carlo tem uma série de vantagens em relação aos Métodos Analíticos e aos Métodos Aproximados. A primeira delas é o fator de não requerer um amplo conhecimento em estatística e matemática, como é exigido pelos outros métodos.

Além disso, ele fornece a forma da distribuição de probabilidade do fator de segurança, e, conseqüentemente, a probabilidade de ruptura, eliminando assim a necessidade de assumir uma forma para essa distribuição (Ex: distribuição normal, lognormal). Por último, El Ramly (2001) aponta que, ao contrário dos outros métodos probabilísticos, na Simulação de Monte Carlo a complexidade das análises não cresce com o aumento do número de variáveis de entrada.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO

Na cidade de Natal, a ocupação de áreas impróprias para a habitação começou a se consolidar a partir da década de 70, quando o município passou por um processo de desenvolvimento acelerado. Nesse período, registros oficiais apontavam a existência de aproximadamente 30 aglomerados de vivendas subnormais, números que evoluíram rapidamente ao longo do tempo (NATAL, 2008).

Já no ano de 2001, a Secretaria Municipal de Trabalho e Assistência Social (SEMTAS) identificou a existência de 70 assentamentos, abrigando um total de 65.122 pessoas. Em julho de 2005, com apoio da Fundação Apolônio Salles (FADURPE), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), a SEMTAS realizou novo levantamento e encontrou 66 assentamentos com diferentes graus e tipos de precariedade, constituídos por 18.632 domicílios e 74.528 pessoas residentes (NATAL, 2008).

Em janeiro de 2007, a SEMURB através do Programa de Trabalho Técnico Social (PTTS), realizou visitas em 74 áreas/comunidades, contemplando 66 áreas já mapeadas e identificando 08 novas áreas (NATAL, 2008).

A constatação da gravidade da situação da população residente nessas áreas mapeadas desencadeou a elaboração do termo de referência para dar início aos estudos necessários à consolidação do Plano Municipal de Redução de Riscos, que foi elaborado e publicado no ano de 2008.

O Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR), apresentado em Natal (2008), identificou 74 assentamentos no município e os caracterizou segundo o tipo de processo (susceptibilidade a deslizamentos, quedas de barreiras, processos erosivos, inundações, alagamentos pluviais, carreamentos de lixo, proximidade de áreas não adensáveis ou especialmente protegidas, etc.) que poderia colocar ou que já colocava em perigo a vida dos moradores ou o equilíbrio do sistema considerado.

Durante a leitura do PMRR não ficou claramente especificado a que tipo de processo se referia cada denominação de evento adotada. No entanto, a interpretação do texto conduz a conclusão de que ambos os termos deslizamento e queda de barreiras referem-se na realidade a possibilidade de ocorrência de qualquer tipologia de movimentos de massa.

A Tabela 3.1, modificada do PMRR, traz as 12 áreas que apresentam maior suscetibilidade a ocorrência de movimentos de massa em áreas de dunas. A Tabela 3.2

apresenta as 8 áreas onde o problema de erosão ou de “queda de barreiras” atinge grau de risco médio, alto ou muito alto

Tabela 3.1 Áreas com suscetibilidade de deslizamento de dunas

NOME DO ASSENTAMENTO	ZONAS ADMINISTRATIVAS	GRAU DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA EM DUNAS
APARECIDA	Leste	4
ALTO DA COLINA		3
SOPAPO		3
ÁFRICA	Norte	4
EL DOURADO		3
CIDADE NOVA (BAIXA DO CÃO)	Oeste	5
PLANALTO		4
ALTO DO GUARAPES		3
BARREIROS		3
CAMBUIM		3
TORRE OU ALTA TENSÃO		3
PIÃO	Sul	5

Fonte: Natal (2008)

Tabela 3.2 Áreas com risco de erosão / queda de barreiras

NOME DO ASSENTAMENTO	ZONAS	GRAU DE SUSCETIBILIDADE À “QUEDA DE BARREIRAS”	GRAU DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO
OCIDENTAL DE CIMA	Leste	4	3
SÃO JOSÉ DO JACÓ		4	2
HOSPÍCIO		0	3
JAPÃO (NOVO HORIZONTE)	Oeste	4	3
ÁGUA DOCE		4	0
SÍTIO GUARAPES		4	0
DAS ALMAS	Sul	0	3
POTYGUARANIA		0	3

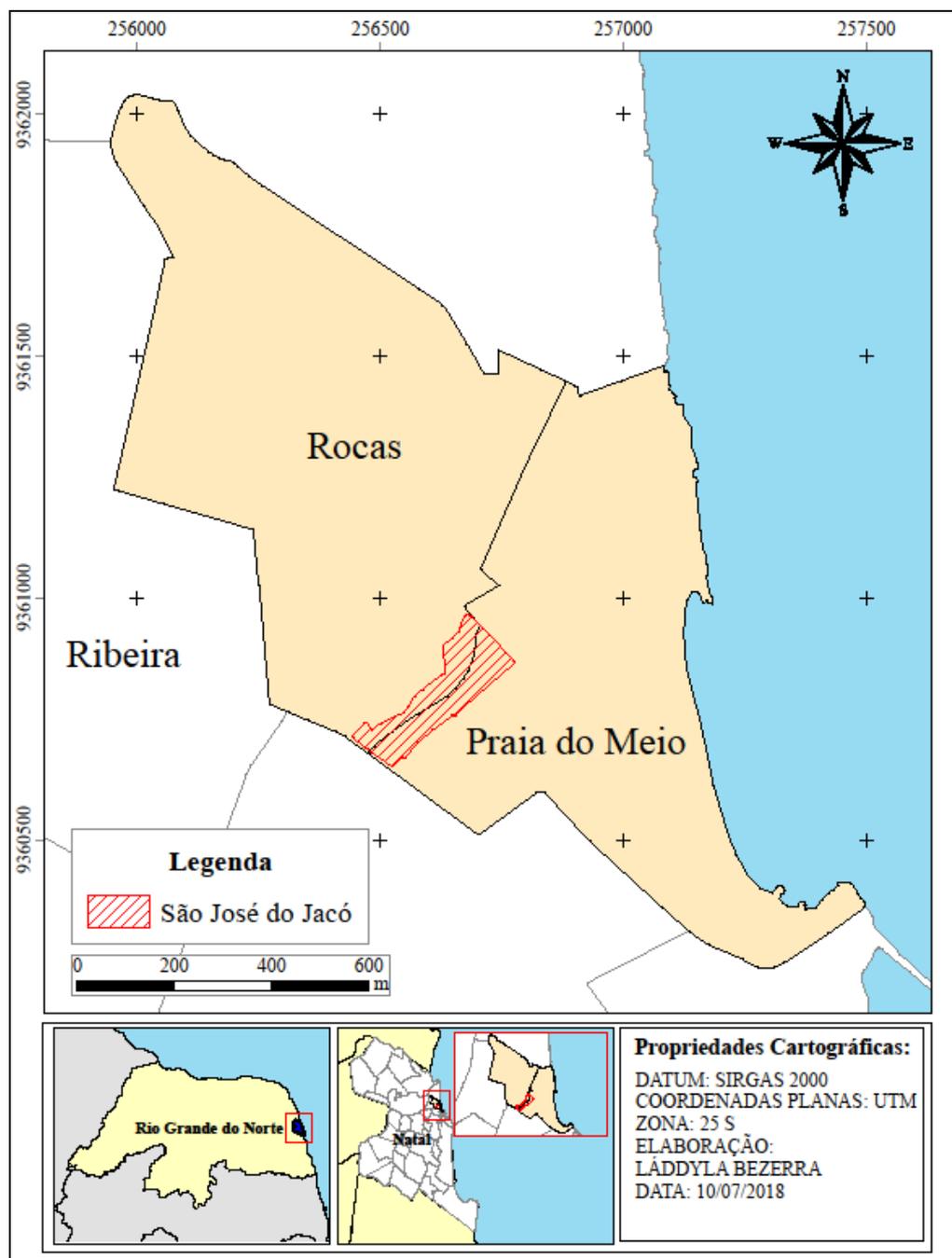
Fonte: Natal (2008)

3.2. LOCALIZAÇÃO

A área objeto de estudo deste trabalho é uma ocupação urbana localizada no limite entre os bairros Rocas e Praia do Meio, zona leste de Natal (Figura 3.1). No macrozoneamento

municipal encontra-se localizada em uma Zona Adensável e é considerada Área Especial de Interesse Social.

Figura 3.1 Mapa de localização do Bairro Rocas com destaque para a comunidade São José do Jacó



Segundo IBGE (2011), Rocas abrange uma área de 66,01 ha e possui 3.067 domicílios particulares permanentes, com uma população residente que totaliza 10.452 pessoas. Desse total de domicílios, 97 (noventa e sete) é parte integrante da comunidade São José do Jacó.

Um aspecto relevante a ser apontado é que para o IBGE (2011) o assentamento São José do Jacó limita-se apenas ao espaço compreendido entre a Rua Desembargador Lins Bahia, na parte superior da encosta, e a Rua CGU, na parte inferior, abrangendo uma área de 1,08 ha.

Na análise aqui apresentada, a delimitação da área do Jacó foi modificada, passando agora a limitar-se pela Travessa Altamira, na divisa com o muro do Centro de Turismo, pela Rua C.G.U, na parte inferior da encosta, pela Rua do Motor e pela Rua General Gustavo Cordeiro de Faria, envolvendo uma região de 3,18 ha, na qual estão localizadas aproximadamente 240 residências.

A Figura 3.2 evidencia essa diferença no tocante à delimitação da área compreendida pela Comunidade São José do Jacó. Na Figura 3.3 visualiza-se uma fotografia aérea da Comunidade São José do Jacó, com as principais ruas destacadas.

Figura 3.2 Diferença na delimitação da área da comunidade São José do Jacó

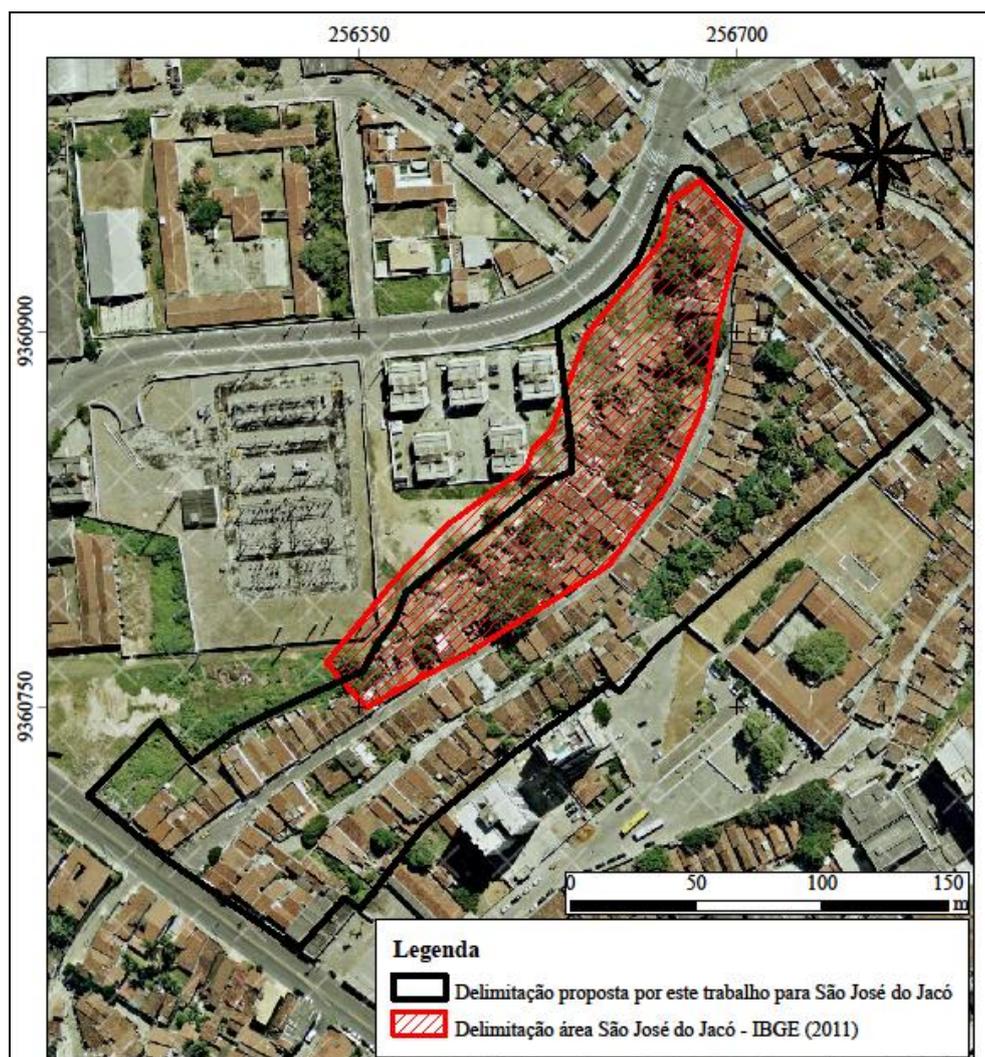
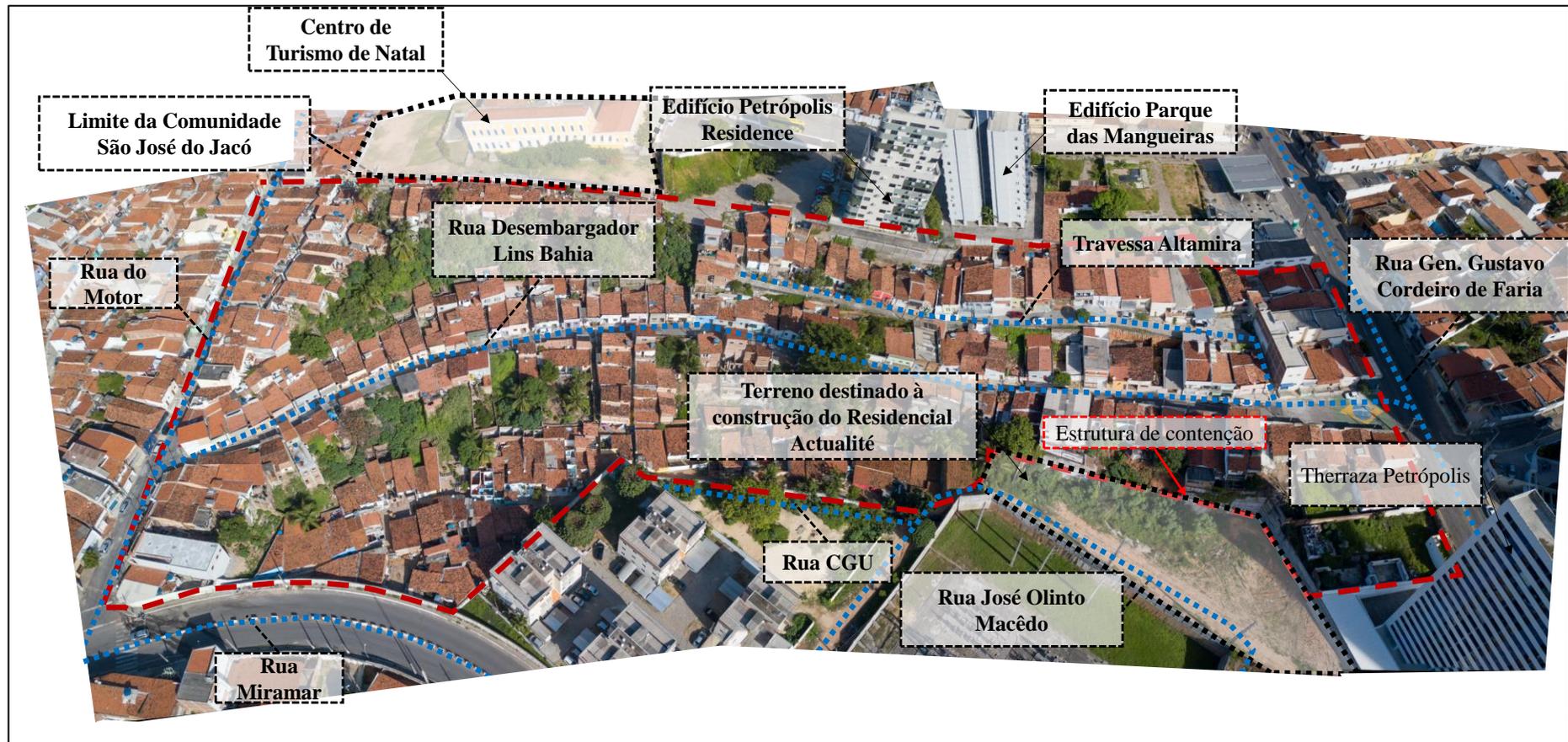


Figura 3.3 Fotografia aérea da Comunidade São José do Jacó, com as principais ruas destacadas



3.3. GEOLOGIA

A região costeira do Brasil é constituída por bacias sedimentares formadas antes da separação dos continentes da América do Sul e da África. Essas coberturas sedimentares que recobrem boa parte do território brasileiro originaram-se a partir da deposição de detritos em pequenas e grandes depressões formadas por consequência de grandes falhas geológicas (SILVA *et al.*, 2008).

A área de estudo desta pesquisa está inserida na faixa sedimentar costeira oriental do Estado do Rio Grande do Norte, no contexto da Bacia Pernambuco-Paraíba-Potiguar, a qual encontra-se subdividida, atualmente, em oito sub-bacias limitadas por falhas, são elas: Lajes, Touros, **Natal**, Canguaretama, Miriri, Alhandra, Olinda e Cabo, conforme Figura 3.4.

Por serem bacias sedimentares formadas por falhas geológicas, a espessura do pacote sedimentar pode variar de poucas centenas de metros – como se observa por exemplo na Formação Barreiras – a milhares de metros nas grandes bacias – por exemplo, Solimões e Urucuia (SILVA, 2008).

Figura 3.4 Localização das bacias Pernambuco, Paraíba e Potiguar



Fonte: Barbosa e Lima Filho (2006)

A base geológica regional compreende basicamente oito unidades geológicas aflorantes do período cenozoico (teve início a cerca de 60 milhões de anos atrás), sendo a mais antiga delas composta por sedimentos do terciário da Formação Barreiras, seguido dos sedimentos quaternários da Formação Potengi. Completando a estratigrafia da área (Tabela 3.3), têm-se os sedimentos de mangues e aluvionares, as areias de dunas descaracterizadas, dunas fixas e móveis, e os sedimentos praias (MOREIRA *et al.*, 2018).

Tabela 3.3 Coluna estratigráfica proposta para a área mapeada

Era	Período	Unidades litoestratigráficas
Cenozoica	Quaternário	Sedimentos de mangue – Sedimentos praias – Dunas móveis
		Arenitos praias (“ <i>Beach rocks</i> ”) – Dunas fixas – Dunas descaracterizadas
		Formação Potengi
	Terciário	Formação Barreiras
Mesozoica	Cretáceo	Formação Guamaré

Fonte: Modificado por Moreira *et al.* (2018)

Analisando o mapa geológico da área do Jacó (Apêndice D), extraído do Mapa Geológico do Município de Natal, percebe-se que a região da encosta se encontra sobre depósitos eólicos litorâneos vegetados, os quais, segundo a estratigrafia apresentada por Moreira *et al.* (2018), referem-se a camada de dunas descaracterizadas.

Considerando que os sedimentos de mangues são encontrados apenas ao longo da planície de inundação do rio Potengi, distante da área de estudo, e que as dunas fixas, móveis e os “*beach rocks*” distribuem-se numa faixa paralela ao litoral, e, além disso, partindo da premissa de que as dunas descaracterizadas são testemunhos de antigas dunas parcialmente ou totalmente destruídas por atividades de terraplenagem com fins de ocupação urbana, tem-se, então, que o solo superficial observado na área de estudo trata-se de residuais da Formação Potengi.

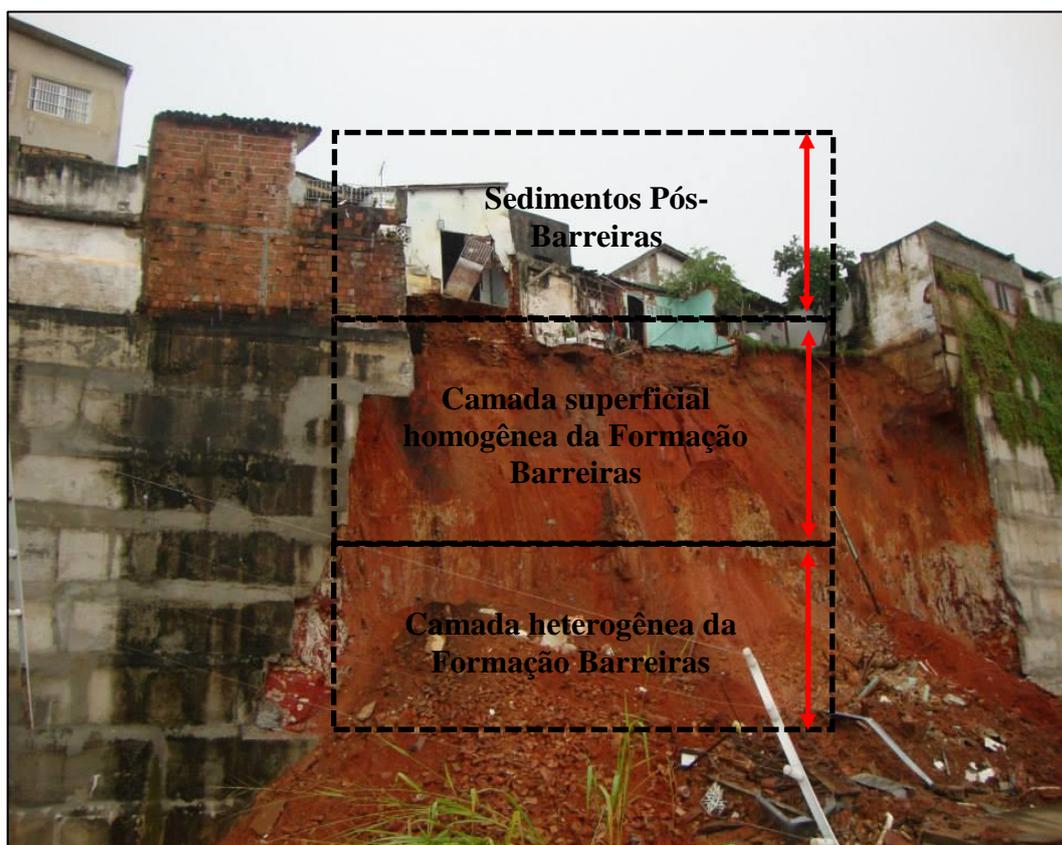
Esse material, na região de Natal, caracteriza-se por uma fácies arenítica, de granulometria mal selecionada, de cor avermelhada, com presença de materiais residuais com pouca argila devido à lixiviação intensa (MOREIRA *et al.*, 1996). Como esses sedimentos se depositaram após aqueles pertencentes ao Grupo Barreiras, foram denominados, neste trabalho, Sedimentos Pós-Barreiras.

Abaixo da Formação Potengi, encontram-se os depósitos constituintes da Formação Barreiras, unidade geológica que compreende sedimentos de areia, silte, argila, conglomerados e seixos arredondados de quartzo e limonita com certo grau de oxidação que dão origem a formação de blocos de lateritas ferruginosas.

Na área de estudo observou-se a presença de duas camadas diferentes de solo pertencentes ao Grupo Barreiras, uma visualmente mais homogênea, de coloração avermelhada ou marrom-avermelhada, com teor de areia variando entre 65% e 70% e outra, visualmente heterogênea, de coloração variegada, apresentando em sua constituição um maior teor de argila e, conseqüentemente, menor conteúdo de areia.

A Figura 3.5 traz uma fotografia de um trecho da encosta ocupada pelo Jacó, no qual é possível observar a disposição litológica das camadas de solo. Nessa imagem, apenas as camadas homogênea e heterogênea da Formação Barreiras podem ser visualizadas. A litologia superior, composta por Sedimentos Pós-Barreiras, não está evidente.

Figura 3.5 Disposição litológica das camadas de solo na Comunidade São José do Jacó



Fonte: Bezerra (2016)

3.4. GEOMORFOLOGIA

A Figura 3.6 apresenta o mapa geomorfológico da área de estudo, no qual é possível constatar que o espaço onde o município foi edificado é caracterizado por campos de dunas formados por sedimentos eólicos, próximo à linha de praia; e tabuleiros costeiros, adentrando ao continente. Em alguns trechos do litoral os tabuleiros entram em contato com o mar formando as falésias, as quais se constituem nas bordas dos tabuleiros (Figura 3.7).

Figura 3.6 Mapa Geomorfológico da Comunidade São José do Jacó

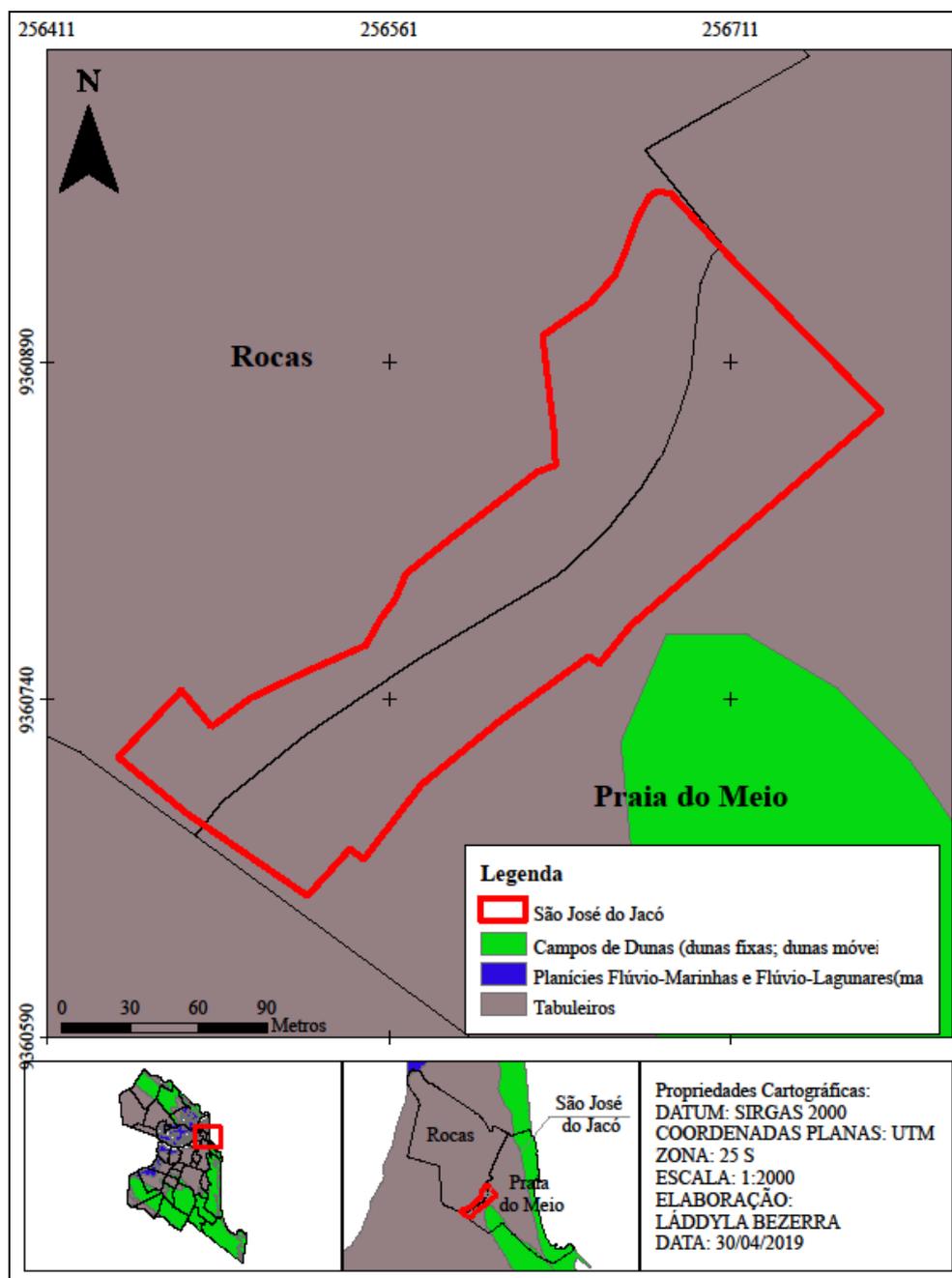
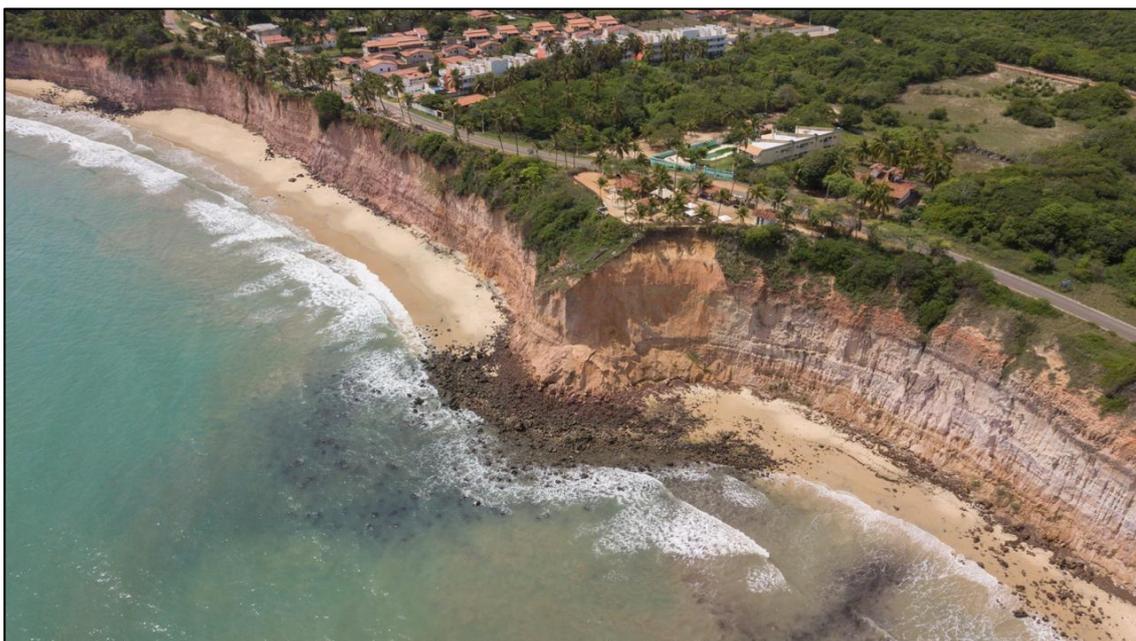


Figura 3.7 Falésias de Tabatinga, litoral sul do Rio Grande do Norte.



Fonte: Silva (2019)

A área do tecido urbano de Natal encontra-se, em quase sua totalidade, sobre os tabuleiros, os quais, em termos geológicos, correspondem à Formação Barreiras e aos Sedimentos Pós-Barreiras, unidades litológicas formadas por sedimentos de idade terciária e quaternária como mencionado no Item 3.3.

Os tabuleiros costeiros caracterizam-se por uma superfície praticamente plana ou suavemente ondulada, com amplitude topográfica entre 20 e 50 metros de altitude, solos espessos, pobres e bem drenados (Latosolos Amarelos). Em Natal, possuem situação elevada em relação ao nível do mar e do Rio Potengi e são drenados pela própria inclinação na direção do oceano (NUNES, 2011).

Em torno da metade da área do Bairro Rocas predomina um terreno plano, com cota de 5 metros, existindo poucos pontos onde a altura ultrapassa os 15 metros. As cotas mais altas, na região limite entre Rocas e Praia do Meio, são ocupadas pela Comunidade São José do Jacó, onde as altitudes variam entre 7 e 37 m.

3.5. COBERTURA E USO DO SOLO

Segundo levantamento *in loco* realizado por Pantoja (2006) verificou-se que a maior parte das edificações presentes no bairro caracteriza-se como residências. No entanto, é possível encontrar alguns equipamentos urbanos e imóveis para uso comercial e misto.

Outra característica relevante observada foi a incidência maior de edificações térreas em relação as com mais de um pavimento. Na Tabela 3.4, Pantoja (2006) apresenta o percentual dos tipos de uso do solo para o ano de 2005 no bairro Rocas.

Tabela 3.4 Percentual dos tipos de uso do solo nas Rocas

COBERTURA E USO DO SOLO	
TIPO DE USO	(%)
RESIDENCIAL	93,66
COMERCIAL	4,33
INDUSTRIAL	1,04
PÚBLICO	0,97
TOTAL	100,00

Fonte: Pantoja (2006)

Vale salientar que as seguintes categorias foram definidas para levantamento em campo:

Uso residencial: destinado unicamente para habitação, podendo ser unifamiliar ou multifamiliar e horizontal (no caso de moradias) ou vertical (no caso de prédios);

Uso misto: locais em que além de apresentarem o uso para moradia também se desenvolvem atividades comerciais ou de prestação de serviços;

Uso comercial: estabelecimento onde ocorre venda direta de produtos ao consumidor;

Prestação de serviços: estabelecimentos destinados à prestação de serviços à população;

Uso institucional: trata-se de lugares onde esta função institucional ocorre, como escolas, igrejas, etc.;

4. METODOLOGIA

4.1. SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi selecionada com base no mapeamento de áreas de risco, elaborado no ano de 2008, como parte integrante do Plano Municipal de Redução de Riscos do Município de Natal, disponível em Natal (2008).

Dentre as áreas mapeadas pelo PMRR, destacam-se oito áreas de risco críticas associadas a processos erosivos e de movimentos de massa. São elas: Ocidental de Cima, **São José do Jacó**, Hospício, Japão (Novo Horizonte), Água Doce, Sítio Guarapes, Das Almas e Potyguarana.

Considerando as condições e a demanda por estudos dessa natureza em cada área e também o conhecimento prévio acerca dos movimentos de massa que já foram desencadeados em cada local, adotou-se a Comunidade São José do Jacó como objeto de estudo deste trabalho.

4.2. AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO DO RISCO GEOTÉCNICO

A avaliação e o mapeamento do risco geotécnico tiveram o objetivo principal de identificar as áreas existentes na Comunidade São José do Jacó com maior risco ao desencadeamento de movimentos de massa, para que, posteriormente, essas áreas fossem analisadas quanto à estabilidade mediante métodos determinísticos e probabilísticos.

A Avaliação e Mapeamento do Risco baseou-se na metodologia semiquantitativa de Faria (2011), a qual incorpora o Processo de Análise Hierárquico no mapeamento de riscos de movimento de massas.

Na estruturação da matriz de decisão AHP e obtenção dos pesos através de consulta aos especialistas, optou-se pela utilização do programa Excel, da *Microsoft*, devido à facilidade de utilização e possibilidade de incorporação deste programa em dispositivos portáteis, como celular ou tablet, facilitando o acesso à matriz de decisão durante os trabalhos de campo. Nos demais procedimentos necessários para desenvolvimento do mapa de risco foi utilizado o *software* ARCGIS 10.3.

A seleção dos tipos de indicadores de risco analisados, assim como suas classes, teve como base os trabalhos de mapeamento de áreas de perigo e risco em encostas urbanas e em falésias, descritos em Gusmão Filho *et al.* (1992), Brasil (2007), Faria (2011) e Taquez (2017).

Além disso, realizou-se consulta aos trabalhos de Passos e Caneparo (2013) e Pinto (2015), os quais investigaram 36 pesquisas, tanto nacionais como internacionais, entre os anos de 1996 e 2012, envolvendo movimentos de massa, para analisar quais condicionantes eram mais empregados quando era abordada a temática de avaliação e mapeamento de suscetibilidade, perigo ou risco de desencadeamento de processos de movimentos de massa.

4.2.1. Seleção dos indicadores de risco

Os seguintes indicadores de risco foram preliminarmente definidos para realização da análise de risco por meio da aplicação da metodologia AHP.

a) Altura/amplitude da encosta: Este trabalho seguiu a recomendação de Faria (2011) a qual adota, para as encostas naturais, três classes de amplitude divididas a cada 10 metros.

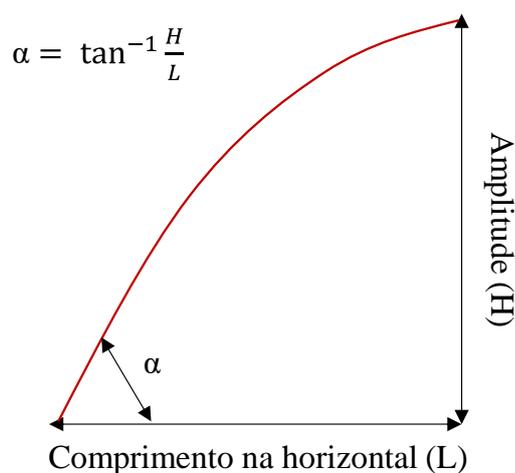
Tabela 4.1 Divisão de classes para o indicador amplitude/altura da encosta

ENCOSTA/TALUDE	AMPLITUDE/ALTURA
NATURAL	(A1) $\leq 10\text{m}$
	$10\text{ m} < (A2) \leq 20\text{m}$
	(A3) $> 20\text{m}$

b) Inclinação: De acordo com Brasil (2007), a inclinação traduz o ângulo médio da encosta com relação ao eixo horizontal medido, geralmente, a partir de sua base (Figura 4.1).

$$I = \tan^{-1} (H/L)$$

Figura 4.1 Amplitude e Inclinação de uma encosta



Existem valores de referência para este parâmetro acima dos quais a deflagração do processo de movimento de massa é iminente. Segundo Fernandez e Amaral (2003), pesquisas

anteriores apontam que a maior frequência de movimentos de massa ocorre nas vertentes com declividade entre 21° e 25°, isto porque se admite que nas encostas mais íngremes o solo já haveria sido removido por movimentos anteriores. Essa mesma faixa de valor para declividade tem ocasionado os deslizamentos na Serra do Mar no litoral paulista (Carvalho; Macedo; Ogura, 2007).

Diante do exposto, a inclinação máxima adotada foi de 20°.

Tabela 4.2 Divisão de classes para o indicador inclinação/declividade da encosta

ENCOSTA/TALUDE	INCLINAÇÃO
NATURAL	(I1) $\leq 10^\circ$ $10^\circ < (I2) \leq 20^\circ$ (I3) $> 20^\circ$

c) Morfologia da encosta:

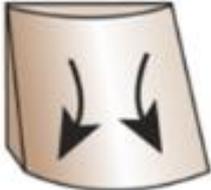
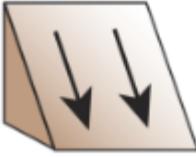
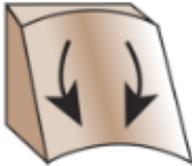
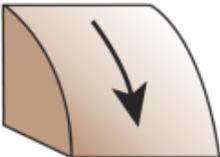
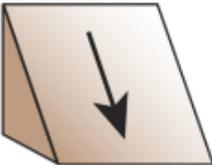
A morfologia da encosta será considerada neste trabalho tanto em planta quanto em perfil. A morfologia em planta se refere à convergência e divergência do fluxo sobre a encosta, e foi dividida em três classes principais: convexa, retilínea e côncava.

Fernandez e Amaral (2003) apontam que as encostas que apresentam forma côncava em planta favorecem o aumento do fluxo hídrico para determinada direção, provocando o surgimento de uma zona de convergência do fluxo d'água e de sedimentos, o que resulta no desgaste excessivo do solo com escoamento superficial concentrado, contrário ao que acontece nas encostas convexas, onde ocorre dispersão do fluxo d'água ao longo da encosta.

Já a morfologia em planta retilínea apresenta pouca expressividade com relação ao fluxo hídrico, onde o escoamento superficial é bem dispersado sem causar danos à encosta.

A morfologia em perfil é importante de ser analisada por indicar a direção da máxima inclinação da encosta, o que afeta a aceleração ou desaceleração do fluxo sobre a superfície. Esse indicador, assim como no caso anterior, foi dividido nas classes côncava, retilínea e convexa.

Tabela 4.3 Divisão de classes para os indicadores morfologia em planta e em perfil. Figuras adaptadas de ESRI (2019).

MORFOLOGIA	MORFOLOGIA EM PLANTA		
PLANTA	Convexa (M1) 	Retilínea (M2) 	Côncava (M3) 
	PERFIL	Convexa (MP1) 	Retilínea (MP2) 

d) Uso/Cobertura do solo: Para este indicador propõe-se a adoção de quatro classes, conforme Faria (2011), são elas: arbórea (mata pouco degradada com vegetação arbórea de médio a alto porte); campo/cultura (abrange setores com vegetação rasteira (gramíneas) e/ou áreas de plantio, principalmente bananeiras); cobertura urbana (corresponde a áreas impermeabilizadas por meio de ocupação urbana densa, podendo contribuir de forma desfavorável à estabilidade da encosta devido à imposição de sobrecarga nos taludes/encosta) e solo exposto.

Tabela 4.4 Divisão de classes para o indicador uso/cobertura do solo

ENCOSTA/TALUDE	USO/COBERTURA DO SOLO
NATURAL	(U1) – ARBÓREA (U2) – CAMPO/CULTURA (U3) – COBERTURA URBANA (U4) – SOLO EXPOSTO

e) Presença de água superficial: Neste indicador de risco são levados em consideração os fatores antrópicos que poderiam ser responsáveis pelo surgimento de água superficial sobre a encosta, tais como a presença de vazamentos por tubulações ou imperfeições em sistemas de drenagem e abastecimento. Esse critério foi dividido em três classes, adaptando a proposta de Faria (2011):

- Concentração baixa: presença de vazamentos pouco significantes; presença de sistema de drenagem superficial;
- Concentração média: presença de vazamentos significativos em tubulações de abastecimento ou mesmo em tubulações de esgotamento sanitário;
- Concentração alta/Linha de drenagem: existência de muitos pontos de vazamentos em tubulações de abastecimento ou esgotamento ou ausência de sistemas de drenagem, com tubulações lançando águas pluviais e servidas diretamente no talude; presença de fossas sépticas e sumidouros;

Tabela 4.5 Divisão de classes para o indicador presença de água superficial

ENCOSTA/TALUDE	PRESENÇA DE ÁGUA SUPERFICIAL
NATURAL	(NA1) – CONCENTRAÇÃO BAIXA (NA2) – CONCENTRAÇÃO MÉDIA (NA3) – CONCENTRAÇÃO ALTA / LINHA DE DRENAGEM

f) Surgência de água no perfil da encosta: Este indicador refere-se à possibilidade de surgência de água proveniente do lençol freático, de vazamento de tubulações danificadas, assim como em decorrência da existência de fossa séptica e sumidouro na encosta. As classes para surgência de água no perfil da encosta assumem comportamento booleano, conforme propõe Taquez (2017), sendo elas: Não Observado ou Surgência, dependendo se existe ou não afloramento de água no corpo do talude.

Tabela 4.6 Divisão de classes para o indicador surgência de água no perfil da encosta

ENCOSTA/TALUDE	SURGÊNCIA DE ÁGUA
NATURAL	(N1) – NÃO OBSERVADO (N2) – SURGÊNCIA

g) Feições de instabilidade: Presença de feições de instabilidade é considerado um indicador chave para a classificação de riscos, dado que além de fornecer indícios da ocorrência ou da iminência de movimentos de massa na encosta, podem atuar como condicionantes nesses processos de instabilização, acelerando o desenvolvimento de movimentos futuros. As

principais feições de instabilidade apontadas são fendas de tração na superfície dos terrenos ou aumento de fendas preexistentes; curvamento de estruturas de contenção; inclinação de estruturas rígidas, como postes e árvores; surgimento de degraus de abatimento; trincas no terreno e nas moradias; ou ainda feições na superfície da encosta, dentre elas ravinamento, voçoroca, erosão, fendas e cicatrizes. As classes para este indicador de risco assumem, assim como no caso anterior, comportamento booleano, sendo elas: Não Observado ou Observado.

Tabela 4.7 Divisão de classes para o indicador feições de instabilidade

ENCOSTA/TALUDE	FEIÇÕES DE INSTABILIDADE
NATURAL	(F1) – NÃO OBSERVADO (F2) – OBSERVADO

h) Tipo de material que compõe o substrato das encostas/taludes: Neste indicador serão avaliadas cinco classes de unidades geológicas que são encontradas na área do município de Natal. Isso foi feito com o intuito de poder expandir a aplicabilidade da metodologia AHP a toda encosta urbana da região de Natal, não restringindo à área da Comunidade São José do Jacó. As classes consideradas são descritas a seguir e foram retiradas da Carte Geológica do Rio Grande do Norte na escala 1:1.000.000, realizada pelo CPRM – Serviço Geológico Brasileiro, no ano de 2012.

- Depósitos eólicos litorâneos vegetados: composto por areias quartzosas bem selecionadas de coloração avermelhada a amarronzadas com formas de dunas residuais ou lençóis arenosos.
- Depósitos eólicos litorâneos não vegetados: formados por areias quartzosas finas a médias de coloração esbranquiçada, com formas de dunas diversas, podendo ser transicionar a dunas vegetadas.
- Depósitos arenosos e areno-argilosos: coberturas arenosas a areno-argilosas inconsolidadas de granulometria média a grossa.
- Depósitos flúvio-marinhos: areias finas, siltes e argilas finamente laminadas ricos em carbonatos e matéria orgânica.
- Grupo Barreiras: Conglomerados a arenitos conglomeráticos. Possuem coloração avermelhada. Podem apresentar horizontes e/ou colunas em que assumem cores variegadas (branca, vermelha e roxa).

Tabela 4.8 Divisão de classes para o indicador material do substrato da encosta

ENCOSTA/ TALUDE	MATERIAL DO SUBSTRATO
NATURAL	(MS1) – DEPÓSITOS EÓLICOS LITORÂNEOS VEGETADOS (MS2) – DEPÓSITOS EÓLICOS LITORÂNEOS NÃO VEGETADOS (MS3) – DEPÓSITOS ARENOSOS E ARENO-ARGILOSOS (MS4) – DEPÓSITOS FLÚVIO-MARINHOS (MS5) – GRUPO BARREIRAS

i) Estrutura geológica: A Tabela 4.9 mostra as classes do indicador de risco estrutura geológica para as encostas naturais. São três classes para este indicador: favorável à estabilidade, desfavorável à estabilidade e não observado. A classe da estrutura geológica definida como “não observada” representa casos em que não é possível observar a presença de fraturas ou outras características em função, por exemplo, do solo não se encontrar exposto visualmente.

Tabela 4.9 Divisão de classes para o indicador estrutura geológica

ENCOSTA/TALUDE	ESTRUTURA GEOLÓGICA
NATURAL	(E1) – FAVORÁVEL À ESTABILIDADE (E2) – DESFAVORÁVEL À ESTABILIDADE (E3) – NÃO OBSERVADO

j) Densidade demográfica: A presença de uma população cujas características demográficas ou socioeconômicas possam colocar seus membros em maior risco de danos antes, durante e após um desastre é uma informação necessária no cálculo do risco, por ser um critério de avaliação da exposição da área. Além disso, é importante ferramenta no processo de planejamento urbano. Para este indicador propõe-se a divisão em quatro classes que estão apresentadas na Tabela 4.10. Essas classes foram definidas em função da densidade demográfica encontrada na área de estudo.

Tabela 4.10 Divisão de classes para o indicador densidade demográfica

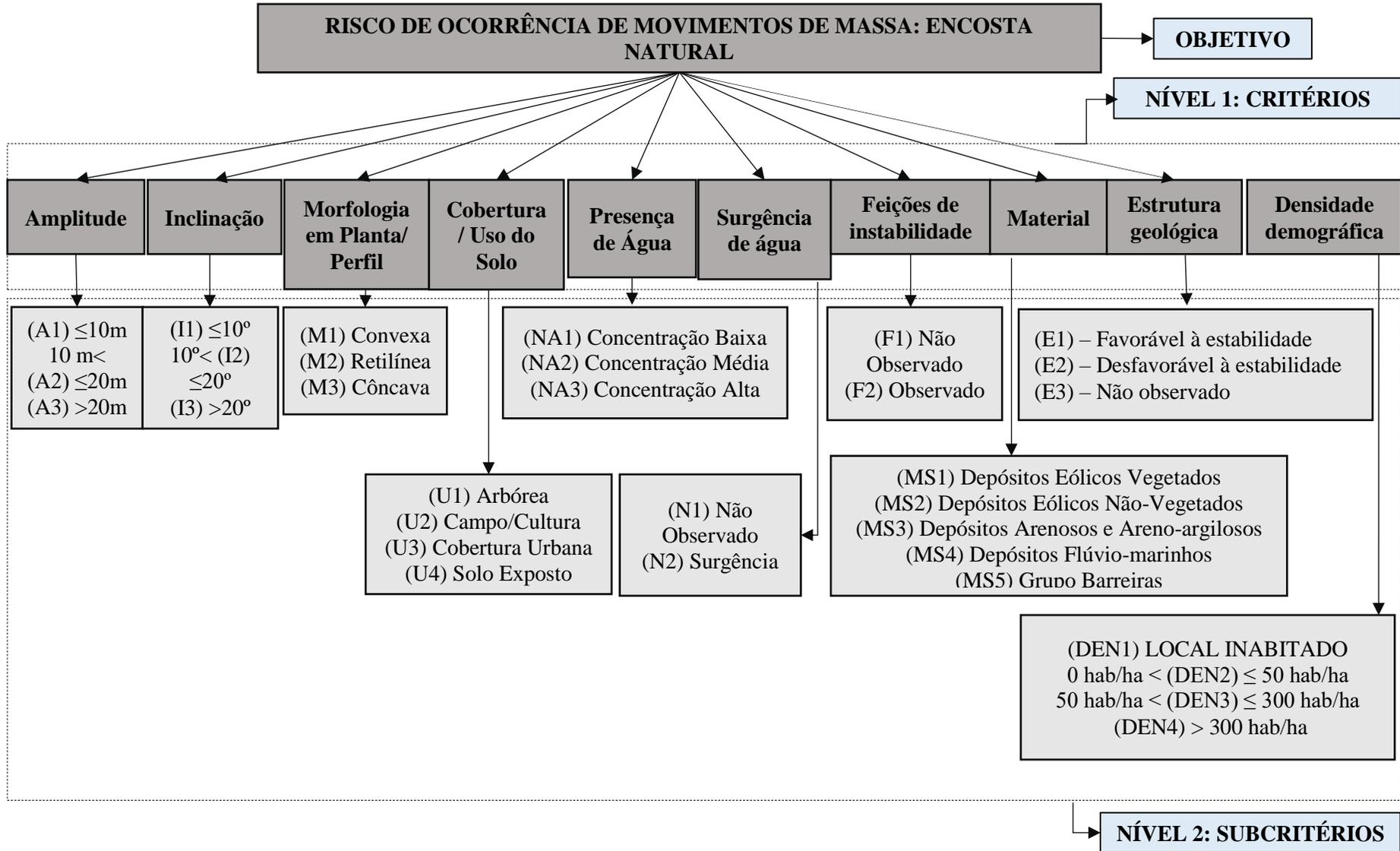
ENCOSTA/TALUDE	DENSIDADE DEMOGRÁFICA
NATURAL	(DEN1) LOCAL INABITADO (NÃO EXISTE RISCO) $0 \text{ hab/ha} < (\text{DEN2}) \leq 50 \text{ hab/ha}$ $50 \text{ hab/ha} < (\text{DEN3}) \leq 300 \text{ hab/ha}$ $(\text{DEN4}) > 300 \text{ hab/ha}$

4.2.2. Estruturação dos níveis hierárquicos

Definidos os indicadores de risco a serem analisados pelos especialistas, a próxima etapa consiste na estruturação dos níveis hierárquicos. Para este fim, foi elaborada uma matriz de hierarquização, constituída por 3 níveis hierárquicos, na qual, no nível superior (nível 0), encontra-se o objetivo do problema, que para esta pesquisa será a avaliação do risco de ocorrência de movimentos de massa, no nível imediatamente abaixo (nível 1) são apresentados os tipos de indicadores de risco definidos no Item 4.2.1, e, por último, no nível inferior (nível 2) são apresentadas as classes definidas para cada indicador de risco.

A Figura 4.2 ilustra a estrutura hierárquica que será adotada para análise e mapeamento do risco na Comunidade São José do Jacó.

Figura 4.2 Estrutura hierárquica para a Comunidade São José do Jacó



4.2.3. Atribuição dos pesos para os indicadores de risco e suas respectivas classes

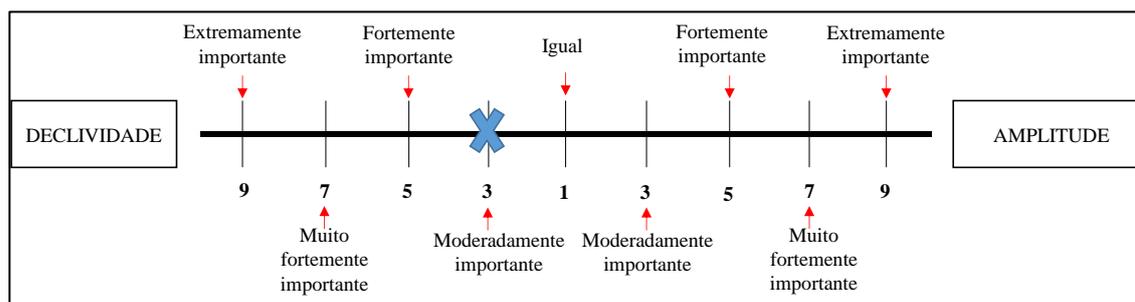
A atribuição dos pesos tanto para os indicadores, quanto para as classes, foi realizada pela autora em colaboração com alguns especialistas na temática de riscos. Para este fim, foram convidados 10 profissionais com experiência em mapeamento de riscos geotécnicos, sendo 07 deles engenheiros civis, 02 geólogos e 01 geógrafo.

Para facilitar a obtenção dos pesos através da consulta aos especialistas, foi produzido um documento base, enviado aos avaliadores, composto por um arquivo de texto e uma planilha eletrônica (Apêndice A). No documento escrito, foi elaborada uma breve apresentação da técnica AHP por meio de um texto explicativo, foram apresentados os indicadores de risco selecionados para análise, e em seguida, produziu-se um guia de como o a planilha eletrônica deveria ser preenchida.

Aliado a isso, com o objetivo de tornar mais simples o preenchimento do formulário pelos especialistas, foram produzidos ainda dois vídeos os quais explicavam, de forma prática e didática, o método AHP e a forma de preenchimento do formulário, respectivamente.

O procedimento de atribuição de pesos com a aplicação do método AHP foi realizado pelos especialistas para os dois níveis hierárquicos. A Figura 4.3 ilustra um exemplo deste procedimento para o nível hierárquico 1 dos indicadores de risco declividade *versus* amplitude.

Figura 4.3 Exemplo de comparação paritária entre o indicador declividade em relação ao indicador amplitude da encosta



A Tabela 4.11 apresenta um exemplo de resultado das comparações paritárias realizadas por um dos especialistas consultados para os 11 indicadores de risco previamente propostos. A comparação par a par apresentada na Figura 4.3 está destacada na matriz de decisão AHP indicada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Comparações paritárias realizadas por um especialista para o nível hierárquico 1

Indicadores	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	1	1/3	3	1/5	1/9	1/7	1/9	1/7	1/7	1/7	1
B	3	1	5	1	1/9	1/7	1/9	1/7	1/7	1	1
C	1/3	1/5	1	1/5	1/7	1/7	1/9	1/7	1/7	1/5	1/5
D	5	1	5	1	1/7	1/3	1/9	1/3	3	3	1
E	9	9	7	7	1	7	1/9	3	5	5	5
F	7	7	7	3	1/7	1	1/9	1/5	1/5	1/5	1/3
G	9	9	9	9	9	9	1	9	9	9	9
H	7	7	7	3	1/3	5	1/9	1	5	1/3	3
I	7	7	7	1/3	1/5	5	1/9	1/5	1	1	5
J	7	1	5	1/3	1/5	5	1/9	1/3	1	1	3
K	1	1	5	1	1/5	3	1/9	1/3	1/5	1/3	1

A – Amplitude; B – Inclinação; C – Morfologia em Planta; D – Morfologia em Perfil; E – Uso/Cobertura do Solo; F – Presença de água superficial; G – Surgência de água no perfil da encosta; H – Feições de instabilidade; I – Material do substrato; J – Estrutura geológica; K – Densidade demográfica.

4.2.4. Cálculo da matriz recíproca para os indicadores de risco (Nível 1)

A etapa seguinte na sequência de aplicação do método AHP consistiu na obtenção do vetor de prioridades, também chamado de autovetor, conforme procedimento apresentado no Item 2.3.1.1, o qual forneceu o peso relativo de cada indicador de risco, expresso em porcentagens.

A Tabela 4.12 apresenta um exemplo de autovetor obtido para a matriz de decisão AHP fornecida na Tabela 4.11.

Tabela 4.12 Matriz de decisão AHP normalizada e autovetor dos indicadores de risco a movimentos de massa

Critério	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Soma	Autovetor (%)
A	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,00	0,05	0,01	0,01	0,01	0,03	0,20	1,86%
B	0,05	0,02	0,08	0,04	0,01	0,00	0,05	0,01	0,01	0,05	0,03	0,36	3,27%
C	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,14	1,23%
D	0,09	0,02	0,08	0,04	0,01	0,01	0,05	0,02	0,12	0,14	0,03	0,62	5,68%
E	0,16	0,21	0,11	0,27	0,09	0,20	0,05	0,20	0,20	0,24	0,17	1,89	17,21%
F	0,12	0,16	0,11	0,12	0,01	0,03	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,65	5,91%
G	0,16	0,21	0,15	0,35	0,78	0,25	0,47	0,61	0,36	0,42	0,30	4,06	36,91%
H	0,12	0,16	0,11	0,12	0,03	0,14	0,05	0,07	0,20	0,02	0,10	1,12	10,20%
I	0,12	0,16	0,11	0,01	0,02	0,14	0,05	0,01	0,04	0,05	0,17	0,89	8,11%
J	0,12	0,02	0,08	0,01	0,02	0,14	0,05	0,02	0,04	0,05	0,10	0,66	6,03%
K	0,02	0,02	0,08	0,04	0,02	0,08	0,05	0,02	0,01	0,02	0,03	0,39	3,59%
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		100%

A – Amplitude; B – Inclinação; C – Morfologia em Planta; D – Morfologia em Perfil; E – Uso/Cobertura do Solo; F – Presença de água superficial; G – Surgência de água no perfil da encosta; H – Feições de instabilidade; I – Material do substrato; J – Estrutura geológica; K – Densidade demográfica.

4.2.5. Análise de sensibilidade/consistência

Por fim, o último procedimento realizado foi a análise de consistência desses pesos obtidos, através do cálculo da Razão de Consistência (RC). Conforme apresentado anteriormente no item 2.3.1.2 (Análise de consistência dos julgamentos), os julgamentos realizados pelos especialistas foram considerados aceitáveis quando a Razão de Consistência (RC) foi igual ou inferior a 10%. No caso da obtenção de um valor de RC maior do que 10%, o processo de atribuição dos pesos deve ser refeito.

A Tabela 4.13 apresenta um exemplo da análise de sensibilidade realizada para a matriz de decisão AHP fornecida na Tabela 4.12. Ou seja, como a razão de consistência deu maior que 10% o procedimento de atribuição dos pesos foi refeito.

Tabela 4.13 Resultado da análise da sensibilidade para a matriz de decisão AHP fornecida na Tabela 4.12

Autovalor máximo (λ máx.)	15,45
Índice de Consistência	0,44
Razão de Consistência	0,29
Razão de Consistência (%)	29 %

4.2.6. Trabalhos de campo aplicando a planilha de análise de risco

Os trabalhos de campo na Comunidade São José do Jacó foram realizados no mês de setembro de 2018, nos dias 14 e 21, com o objetivo de identificar feições de instabilidade nas moradias e no talude, presença de água na superfície, surgência de água no perfil da encosta e a estrutura geológica da região, avaliando-a favorável, desfavorável ou não-observada.

Para coleta dessas informações foi elaborado um check-list (Apêndice B) aplicado em campo pelos alunos da turma de Patologia de Fundações do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, juntamente com os professores do programa, Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior e Dr. Osvaldo de Freitas Neto, e a autora deste trabalho. Nessa etapa contou-se com a parceria com a Defesa Civil Municipal, supervisionando a aplicação do questionário, viabilizando a entrada em locais de difícil acesso e a coleta das informações.

Durante a visita foi possível delimitar zonas com existência de feições de instabilização similares nas moradias e sobre a encosta, permitindo, assim, durante a elaboração do mapa de feições de instabilidade (Item 4.2.7), a homogeneização e a expansão das observações feitas para todo o setor.

4.2.7. Elaboração de mapas temáticos e combinação AHP-SIG

Com o objetivo de realizar a álgebra de mapas em ambiente SIG para obtenção do mapa de risco da área de estudo, fez-se necessário elaborar alguns mapas temáticos para cada indicador de risco selecionado e suas respectivas classes.

Para tanto, foram elaborados os seguintes mapas em formato *raster*:

a) Mapas de amplitude e de inclinação da encosta

Estes mapas foram produzidos a partir de isolinhas com equidistância intervalar de 1,0 m e pontos cotados fornecidos pela Secretaria Municipal de Obras Públicas e Infraestrutura (SEMOV). Tais dados foram obtidos por meio de levantamento topográfico do tipo Estação Total, no ano de 2007, como forma de subsidiar a elaboração do Plano Diretor de Drenagem do Município de Natal.

As curvas de nível fornecidas permitiram a elaboração de uma superfície tipo TIN (Rede Triangular Irregular) dentro do *software* ARCGIS, através da ferramenta *Create TIN*, pertencente à extensão *3D Analyst*. O TIN consiste em um modelo digital, criado a partir de curvas de nível ou pontos cotados, com o objetivo de representar o espaço a partir de um conjunto de triângulos com tamanhos variados.

Após a criação do TIN, efetuou-se a conversão desse arquivo para um *raster*, através da ferramenta *Conversion*, também existente na extensão *3D Analyst*, dando origem, assim, a um Modelo Digital de Elevação (MDE).

Para elaboração do Mapa de Amplitude da encosta efetuou-se a classificação do Modelo Digital de Elevação nas três classes pré-definidas para esse indicador. Já para obtenção do Mapa de Inclinação, utilizou-se o comando *Slope*, contido no *Arctoolbox*, opção *Raster Surface* do *3D Analyst*, para extração da inclinação da encosta em graus. Ao fim deste processo, o mapa foi então reclassificado em 3 categorias, conforme definido anteriormente durante a escolha dos indicadores de risco e suas classes.

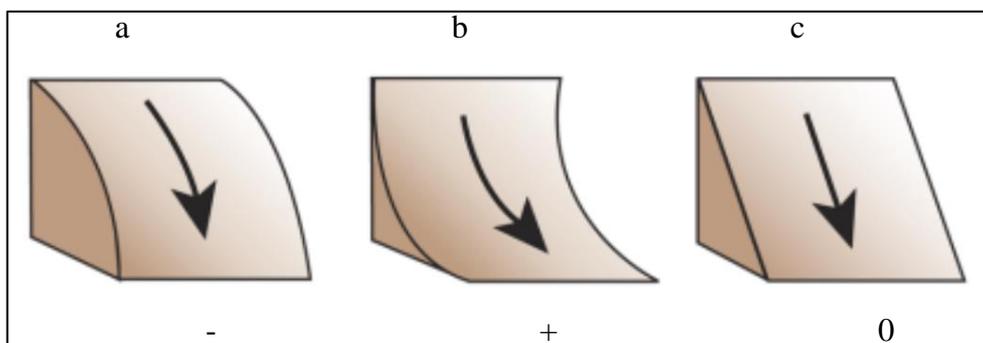
b) Mapas de Morfologia da encosta em planta e em perfil

Assim como os mapas de amplitude e declividade, os de morfologia da encosta, tanto em planta quanto em perfil, também foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação produzido. Para isso, foi utilizada a função *Curvature* disponível na aba Superfície da extensão *Spatial Analyst*, a qual obtém a morfologia/curvatura da vertente calculando a segunda derivada da superfície.

Para identificar se a encosta era convexa, côncava ou retilínea, em planta e em perfil, observou-se o sinal atribuído ao valor de curvatura calculado. Para o caso de morfologia em perfil, um valor negativo, como representado na Figura 4.4.a, indicava que a superfície era

convexa, um valor positivo informava que a superfície era côncava (Figura 4.4.b), e, por fim, um valor de curvatura igual à zero apontava para a existência de uma encosta retilínea (Figura 4.4.c).

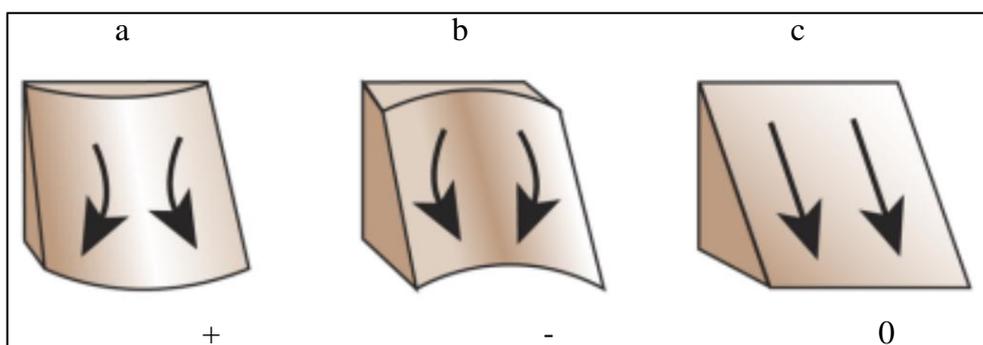
Figura 4.4 Curvatura da encosta em perfil



Fonte: ESRI (2019)

Na análise da morfologia em planta, um valor positivo de curvatura indicava que a superfície era, em projeção horizontal, convexa (Figura 4.5.a), levando à divergência do fluxo. Um valor negativo informava que a encosta era côncava (Figura 4.5.b), convergindo o fluxo. Quando a curvatura era igual à zero, a encosta era considerada horizontalmente linear (Figura 4.5.c).

Figura 4.5 Curvatura da encosta em planta



Fonte: ESRI (2019)

c) Mapa de uso/cobertura do solo

Para produção do mapa de uso/cobertura do solo foi realizada uma classificação supervisionada sobre uma ortofoto da área de estudo com o objetivo de determinar as 4 classes para este indicador. Na classificação supervisionada, a imagem é classificada usando

assinaturas espectrais obtidas a partir de amostras de treinamento coletadas pelo analista. Esse processo é realizado através das ferramentas *Create Signature e Maximum Likelihood Classification*, disponíveis na extensão *Spatial Analyst*.

d) Presença de água superficial, Surgência de água, Feições de instabilidade e Estrutura:

Os mapas de presença de água superficial, surgência de água na encosta, feições de instabilidade e estrutura geológica foram produzidos a partir de observações realizadas durante visita de campo à Comunidade São José do Jacó, com GPS. Uma vez obtidas às coordenadas dos locais onde existia presença de água superficial, surgência de água na encosta ou existência de feições de instabilidade, esses parâmetros foram plotados sobre a ortofoto da área na forma de *shapefile*.

Para produção dos mapas de presença de água superficial, surgência de água na encosta e feições de instabilidade, tomou-se mão de uma técnica de análise espacial, conhecida como Estimção de Densidade Kernel, utilizada para analisar o comportamento de padrões de pontos, estimando, através de interpolação, a distribuição de determinado evento em toda área de estudo. Para isso, foi utilizado a ferramenta *Spatial Analyst Tools* do ArcMap 10.3 (*Arctoolbox* → *Spatial Analyst Tools* → *Density* → *Kernel Density*).

e) Mapa Geológico

Para definição das classes deste indicador de risco foi utilizada a Carta Geológica do Rio Grande do Norte, na escala 1:1.000.000, realizada pelo CPRM – Serviço Geológico Brasileiro, no ano de 2012. Dessa forma, para elaboração desse mapa, foi necessário realizar reclassificação, visto que as classes foram às mesmas já existentes na carta geológica.

f) Mapa de densidade demográfica

Para a elaboração do mapa de densidade populacional foi necessário sobrepor um arquivo vetorial de delimitação da área da comunidade São José do Jacó sobre uma malha dos setores censitários fornecido pelo IBGE. Além disso, fez-se necessário também relacionar os dados de população em domicílios particulares de cada setor censitário, disponível no Censo Demográfico 2010, com a área em hectare de cada setor em análise para a obtenção do valor de densidade demográfica. Ao fim deste processo, o mapa foi então convertido de arquivo vetorial para *raster*, através da ferramenta *To Raster*, disponível na extensão *Conversion Tools*.

4.2.7.1. Reclassificação dos *rasters*

Todos os mapas temáticos produzidos passaram pelo processo de reclassificação de *raster*. Essa operação teve como objetivo alterar os valores das células do *raster* de entrada

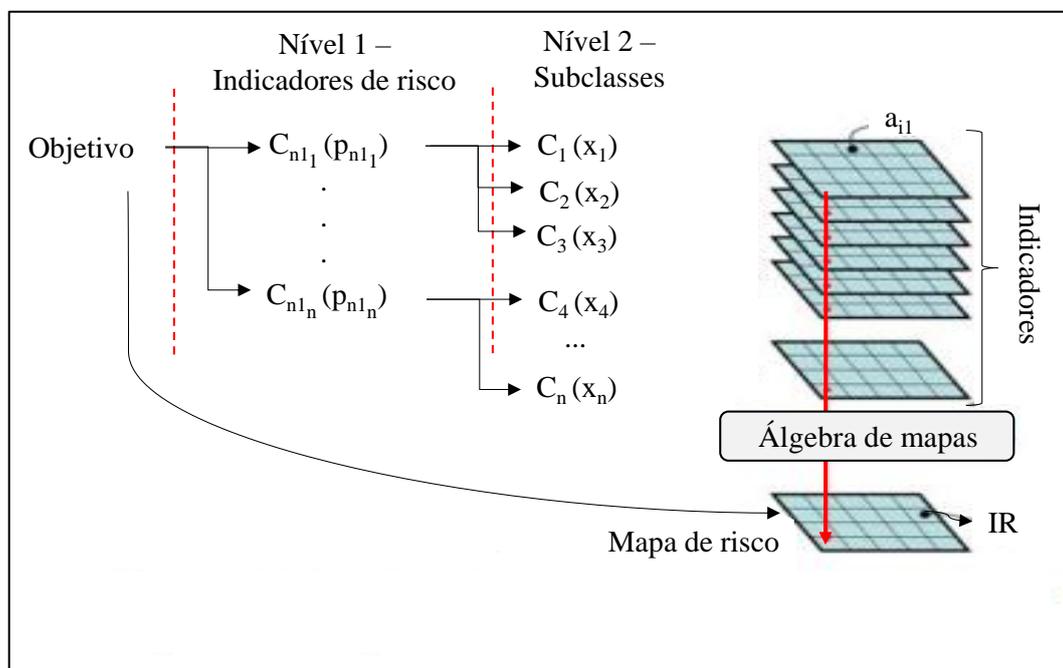
para valores de saída desejados, possibilitando efetuar a padronização linear dos atributos que possuíam valorações diferentes.

A partir dessa reclassificação, foi possível comparar, por exemplo, o critério Inclinação, quantificado em grau, com o critério Cobertura e Uso do Solo, categorizado pelo tipo de uso/cobertura do solo existente. Para tanto, durante a reclassificação do *raster* correspondente ao Uso e Cobertura do Solo na Comunidade São José do Jacó, foram atribuídos aos subcritérios Solo Exposto, Cobertura Urbana e Campo/Cultura, os novos valores numéricos, 1, 2 e 3, respectivamente. O mesmo procedimento foi realizado para o atributo Inclinação.

4.2.7.2. Álgebra de mapas:

Para obtenção do mapa de risco da Comunidade São José do Jacó foi necessário combinar os mapas temáticos produzidos através dos princípios da álgebra de mapas, a qual combina os dados *raster*, *pixel a pixel*, permitindo a criação de uma nova variável dependente ou ainda uma nova camada (*layer*) de mapa, conforme procedimento ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 Procedimento esquemático para implementação espacial do mapa de risco em *software* comercial



Da Figura 4.6 observa-se que os critérios que influenciam na obtenção do objetivo (mapa de risco de movimentos de massa) foram decompostos em dois níveis hierárquicos. Os critérios do nível 1 (C_{n1}) são os indicadores de risco (amplitude, inclinação...) e

os do nível 2 (C_{n2}) suas respectivas subclasses. A cada critério de cada nível foi atribuído um peso oriundo do AHP, p_n e x_n para os níveis 1 e 2, respectivamente.

O desempenho espacial de cada célula da área mapeada foi calculado multiplicando-se os pesos dos indicadores pelos pesos da classe do respectivo indicador. Dessa forma foi obtido o Índice de Risco, como demonstra a Equação 23, em que p é o peso do indicador de risco e x o peso da classe do respectivo indicador de risco (subcritério).

$$IR = \sum_{i=1}^n p_i x_i / 100 \quad (\text{Equação 23})$$

4.2.7.3. Classificação Final do Risco:

A hierarquização final do risco foi obtida seguindo recomendações retiradas do trabalho de Faria (2011). A autora adota o método estatístico de fatiamento para obtenção da classificação final do risco, aqui denominado Grau de Risco (GR). De acordo com esse método, o Índice de Risco de cada *pixel* deverá ser comparado com a média aritmética (μ_{IR}) do Índice de Risco de todos os *pixels*, somada ou diminuída da metade do desvio padrão (σ), conforme Tabela 4.14.

Tabela 4.14 Critérios adotados para a classificação do Grau de Risco (GR). Modificado de Faria (2011)

Índice de Risco (IR)	Grau de Risco (GR)
$IR < \mu_{IR} - \frac{1}{2}\sigma$	Baixo
$\mu_{IR} - \frac{1}{2}\sigma \leq IR \leq \mu_{IR} + \frac{1}{2}\sigma$	Médio
$IR > \mu_{IR} + \frac{1}{2}\sigma$	Alto

Procedimento semelhante ao descrito acima foi aplicado também para obtenção dos mapas intermediários de suscetibilidade, perigo e vulnerabilidade, os quais foram agrupados em três classes: Baixo, Médio e Alto.

4.3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

4.3.1. Seções de análise

As análises determinísticas e probabilísticas foram realizadas em 06 seções distribuídas sobre a área da Comunidade São José do Jacó conforme Figura 4.7.

As Figuras 4.8 a 4.13 apresentam as 06 seções em estudo.

Figura 4.7 Locação das seções de encosta a serem analisadas



Figura 4.8 Seção de análise 01

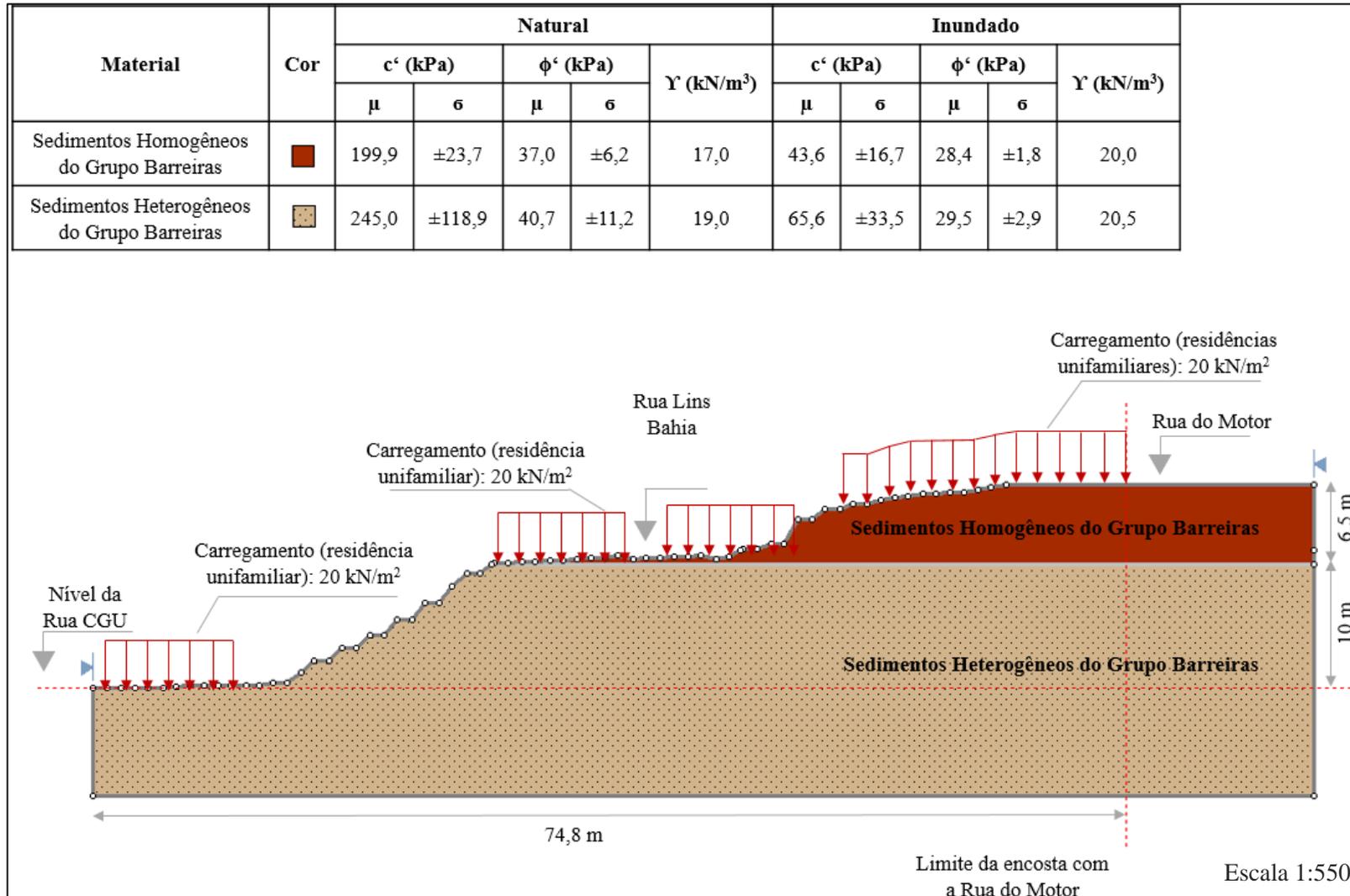


Figura 4.9 Seção de análise 02

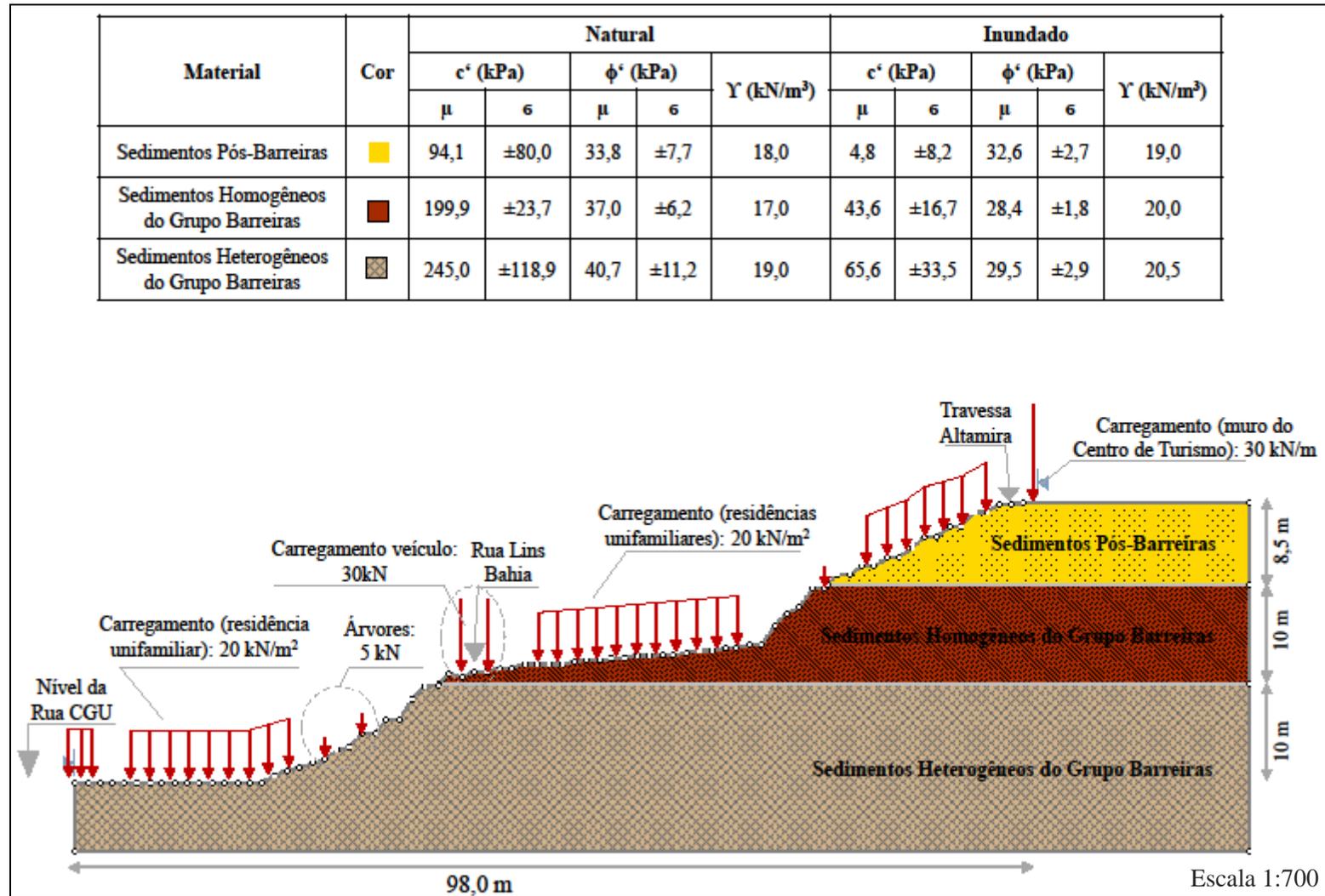


Figura 4.10 Seção de análise 03

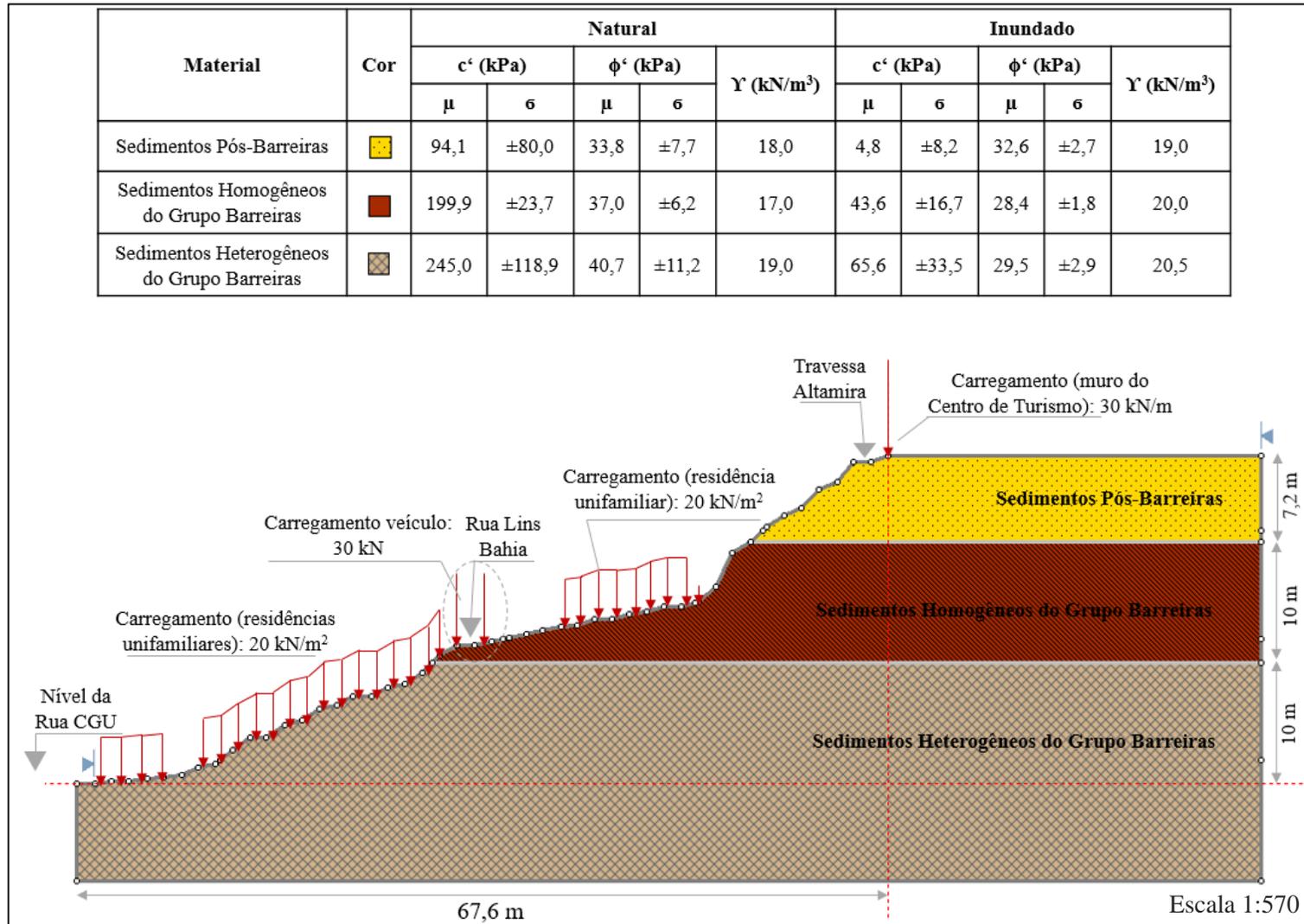


Figura 4.11 Seção de análise 04

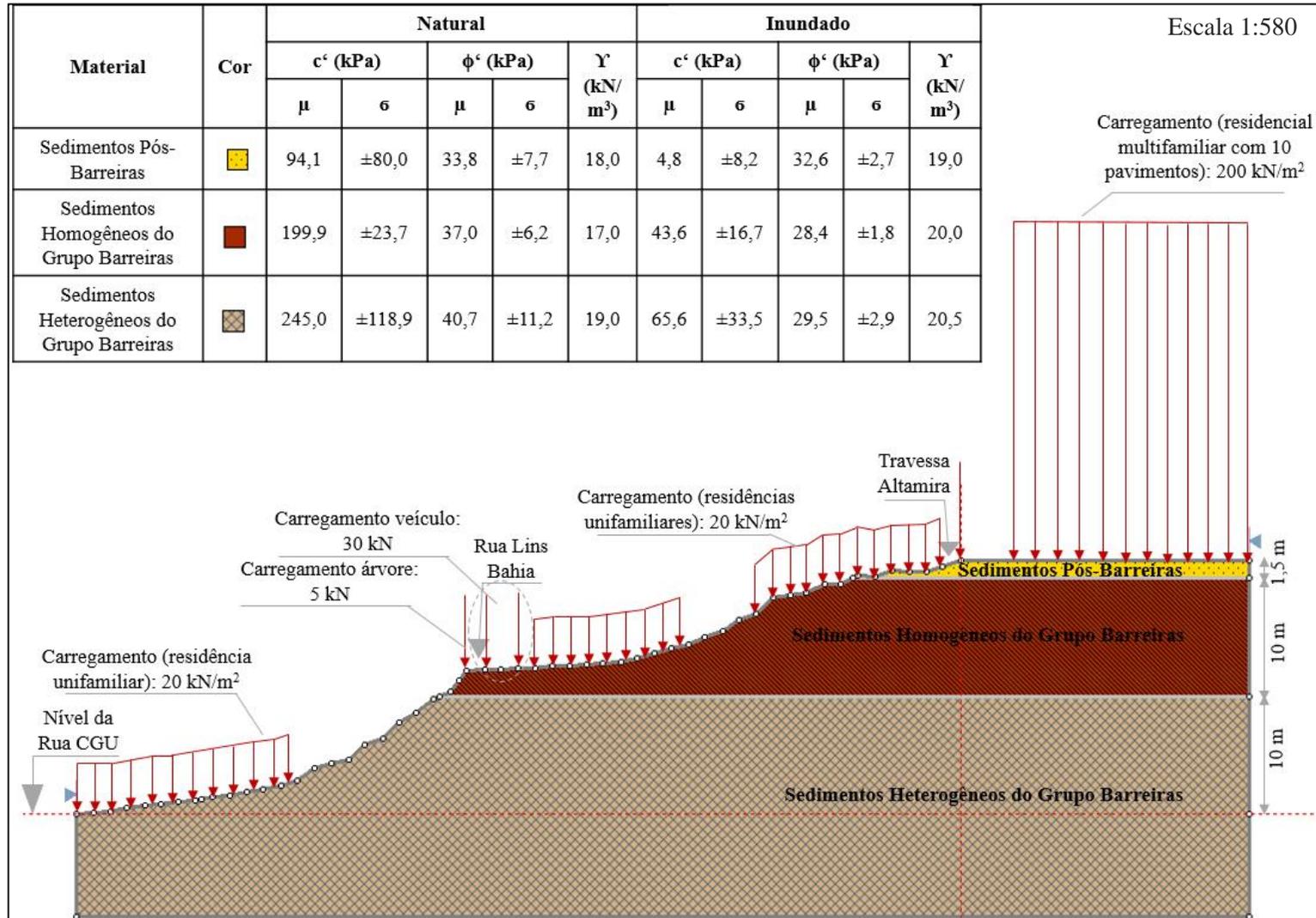


Figura 4.12 Seção de análise 05

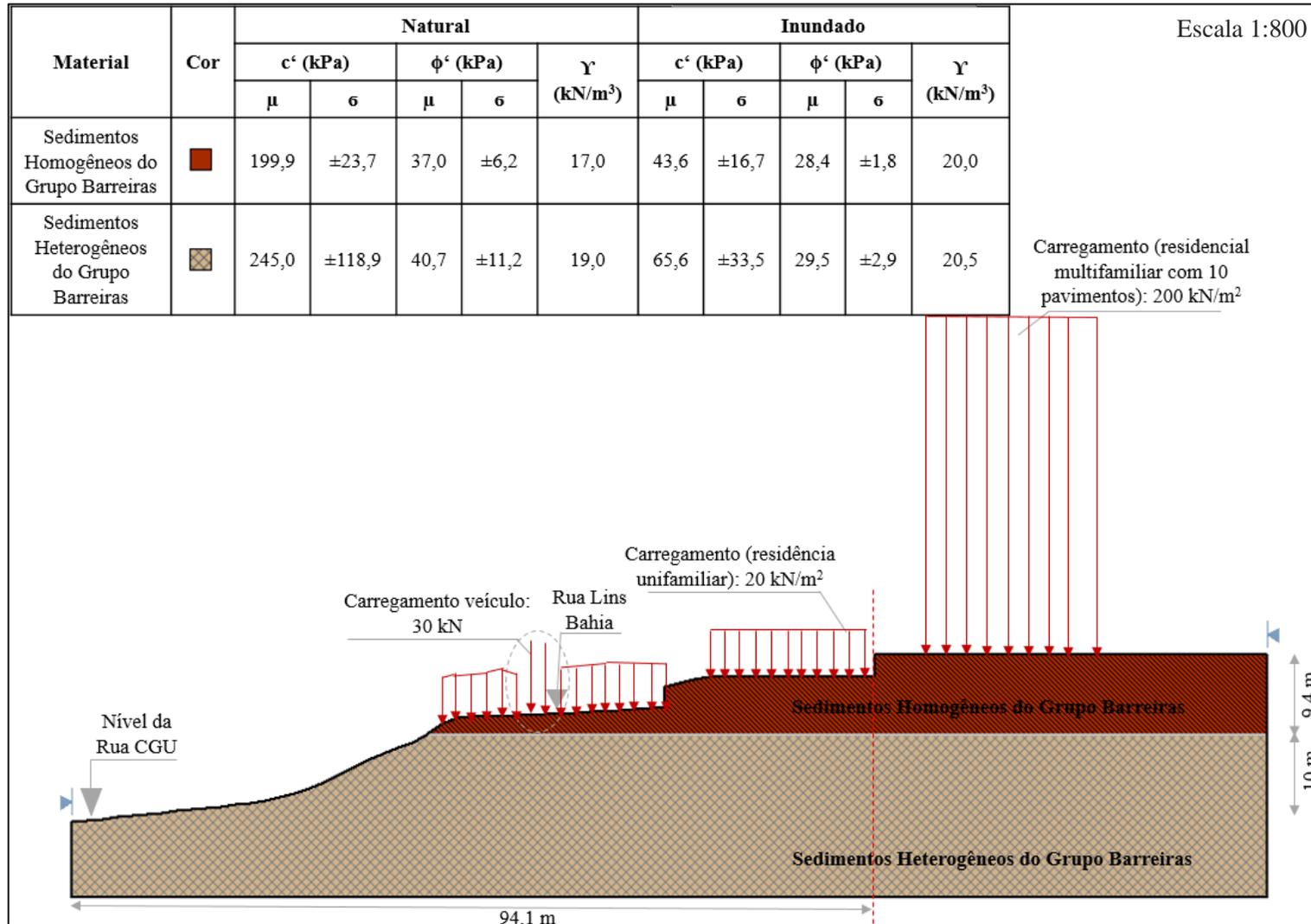
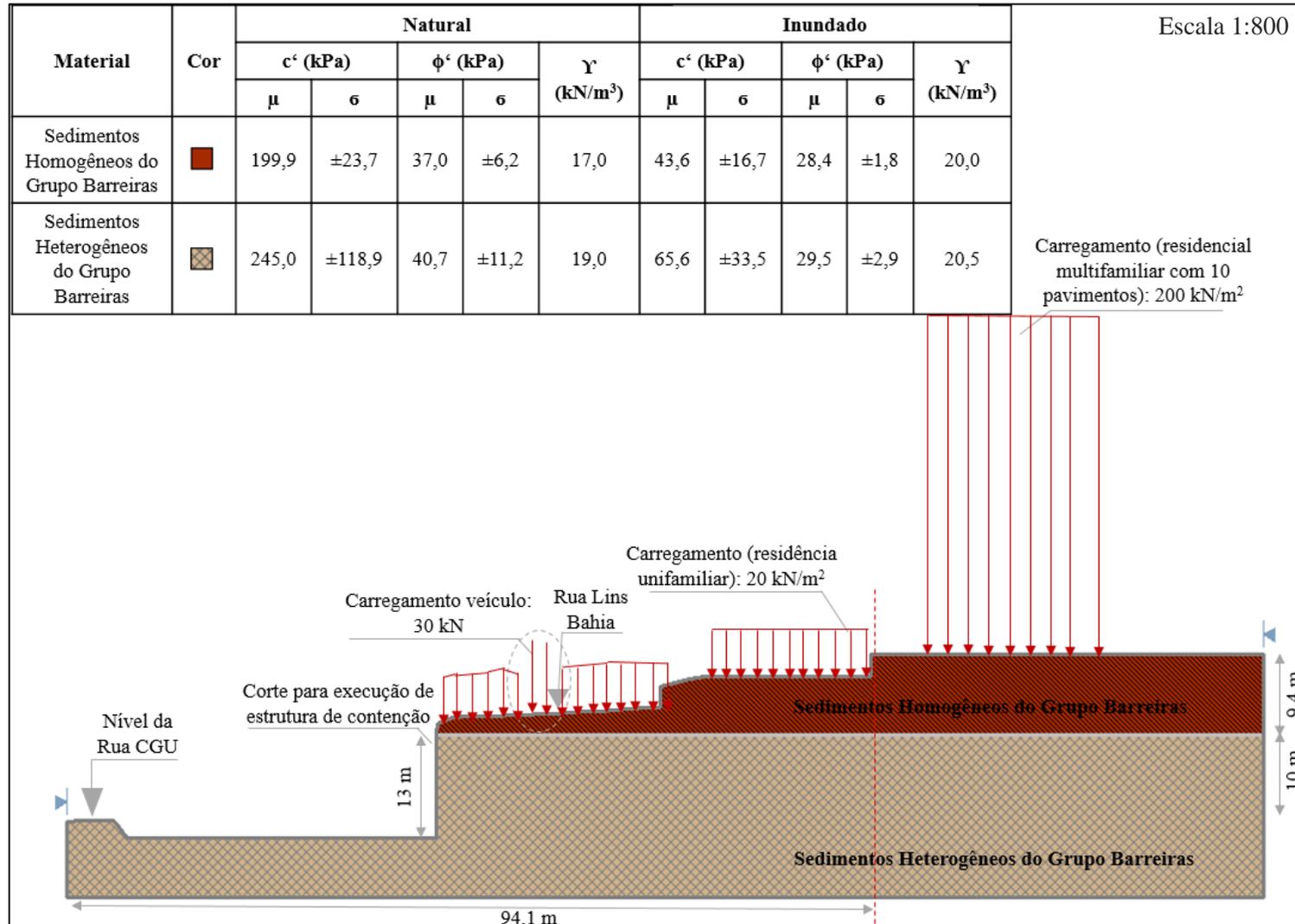


Figura 4.13 Seção de análise 06



A estratigrafia do solo das seções analisadas, definida visualmente a partir de observações feitas em campo, é composta por três camadas para 03 das 06 seções (02, 03 e 04), e duas camadas para as seções 01, 05 e 06, de menor amplitude. A litologia mais superficial, de espessura variável aparece a partir da cota 20 m, apresentando-se como um solo visualmente homogêneo, com alto teor de areia, de maneira geral acima de 70%, composto por materiais sedimentares que se depositaram após aqueles pertencentes ao Grupo Barreiras, sendo por esse motivo denominados Sedimentos Pós-Barreiras.

Na camada intermediária, delimitada entre as cotas 10 m e 20 m, encontra-se um solo típico do topo do Grupo Barreiras, composto por sedimentos visualmente homogêneos, normalmente classificados como areia argilosa ou areia siltosa, de coloração avermelhada ou marrom-avermelhada, com teor de areia variando, genericamente, entre 65% e 70%.

O solo de base do perfil estratigráfico da Comunidade São José do Jacó, assim como a camada de topo, também possui espessura variável e encontra-se até aproximadamente a cota 10 m, constituído por sedimentos heterogêneos do Grupo Barreiras, de coloração variegada, apresentando em sua constituição um maior teor de argila e, conseqüentemente, menor conteúdo de areia, abaixo de 65%.

As seções serão avaliadas sob dois diferentes cenários de umidade do solo, buscando simular a encosta em sua condição natural (cenário 1) e em uma situação hipotética de completa saturação (cenário 2), representando a condição mais crítica para o talude.

Através de informações extraídas da literatura técnica, assim como de observações feitas durante visita de campo ao local, constatou-se que o nível do lençol freático permanece abaixo da base da encosta em qualquer época do ano, não sendo considerada nas simulações numéricas. Logo, no cenário II, a saturação do solo teria origem pluvial.

Com relação às sobrecargas aplicadas, tanto às pontuais quanto às distribuídas foram estimadas tendo em conta que não se tem conhecimento acerca do tipo de fundação empregada em cada edificação, assim como da sobrecarga produzida por cada uma delas. Admitiu-se uma carga distribuída de aproximadamente 20 kN/m^2 para cada pavimento construído, no caso de residências multifamiliares. Nos locais de existência de árvores, bananeiras ou coqueiros, utilizou-se uma carga pontual de 500 kg ou 5 kN.

Na Rua Lins Bahia, como existe a possibilidade de circulação de veículos, inclusive de grande porte, adotou-se uma carga de 6000 kg ou 60 kN sobre cada eixo de um veículo modelo de eixos isolados com 2 pneumáticos, conforme regulamentação do DNIT sobre limites para dimensões, peso bruto total e peso por eixo, que devem ser observados para todos os veículos de carga que circulam nas vias terrestres.

Essa carga de 60 kN sobre o eixo foi redistribuída para os dois pneumáticos que estarão em contato com o solo. Assim, cada pneumático transmitirá cerca de 30 kN de carga pontual ao solo. O carregamento relativo ao muro de arrimo do Centro de Turismo de Natal também foi contabilizado na análise da estabilidade, sendo considerado igual a 30 kN/m.

4.3.2. Análise estatística dos dados do solo

4.3.2.1. Análise de sensibilidade

A primeira etapa para o tratamento estatístico dos dados a serem utilizados nas análises de estabilidade probabilísticas consiste na identificação de quais parâmetros deverão ser tratados como variáveis aleatórias. De forma geral, essa decisão depende da variabilidade nos valores medidos para cada parâmetro e também da sensibilidade da variável de saída em relação à variação da magnitude daquele parâmetro.

Nesse sentido, procedeu-se uma análise de sensibilidade, variando a coesão, o ângulo de atrito e o peso específico do material dentro de uma faixa compreendida entre os valores mínimos e máximos de cada um dos parâmetros, observando-se a influência dessa variação sobre os resultados da análise (fator de segurança determinístico, fator de segurança médio, probabilidade de desempenho insatisfatório e índice de confiabilidade), procedimento realizado para as seis seções em estudo através da ferramenta *Sensitivity Plot*, disponível no módulo de Interpretação de Resultados do Slide.

Na Figura 4.14 é possível observar o resultado da análise de sensibilidade para a Seção 03, com o solo na condição natural, e na Figura 4.15, com o solo na condição saturada.

Ambos os gráficos apresentam o fator de segurança, no eixo Y, versus a porcentagem de variação dos parâmetros de entrada (ângulo de atrito, coesão e peso específico) no eixo X. Quando a porcentagem de variação é igual a zero, significa que a variável aleatória que está sendo testada assume seu valor mínimo. Uma porcentagem de variação igual a 100% representa o valor máximo daquela variável. A curva com maior inclinação na análise de sensibilidade representa a variável que mais influencia no resultado do fator de segurança.

Ponderando sobre as informações fornecidas pela Figura 4.15, percebe-se que o FS é mais sensível à coesão e, em menor magnitude, ao ângulo de atrito do solo no qual encontra-se delimitada a superfície de ruptura, que, para a seção 03 na condição saturada é composta pelos Sedimentos Pós-Barreiras.

A variável aleatória com menor interferência sobre os valores de FS é o peso específico da camada de Sedimentos Pós-Barreiras, assim como todos os demais parâmetros das demais camadas de solo não afetadas pela superfície de ruptura crítica, tendo em vista que exibem uma reta praticamente horizontal, ou seja, sem inclinação.

Figura 4.14 Análise de sensibilidade para a seção 03 com dados do solo na condição natural e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price)

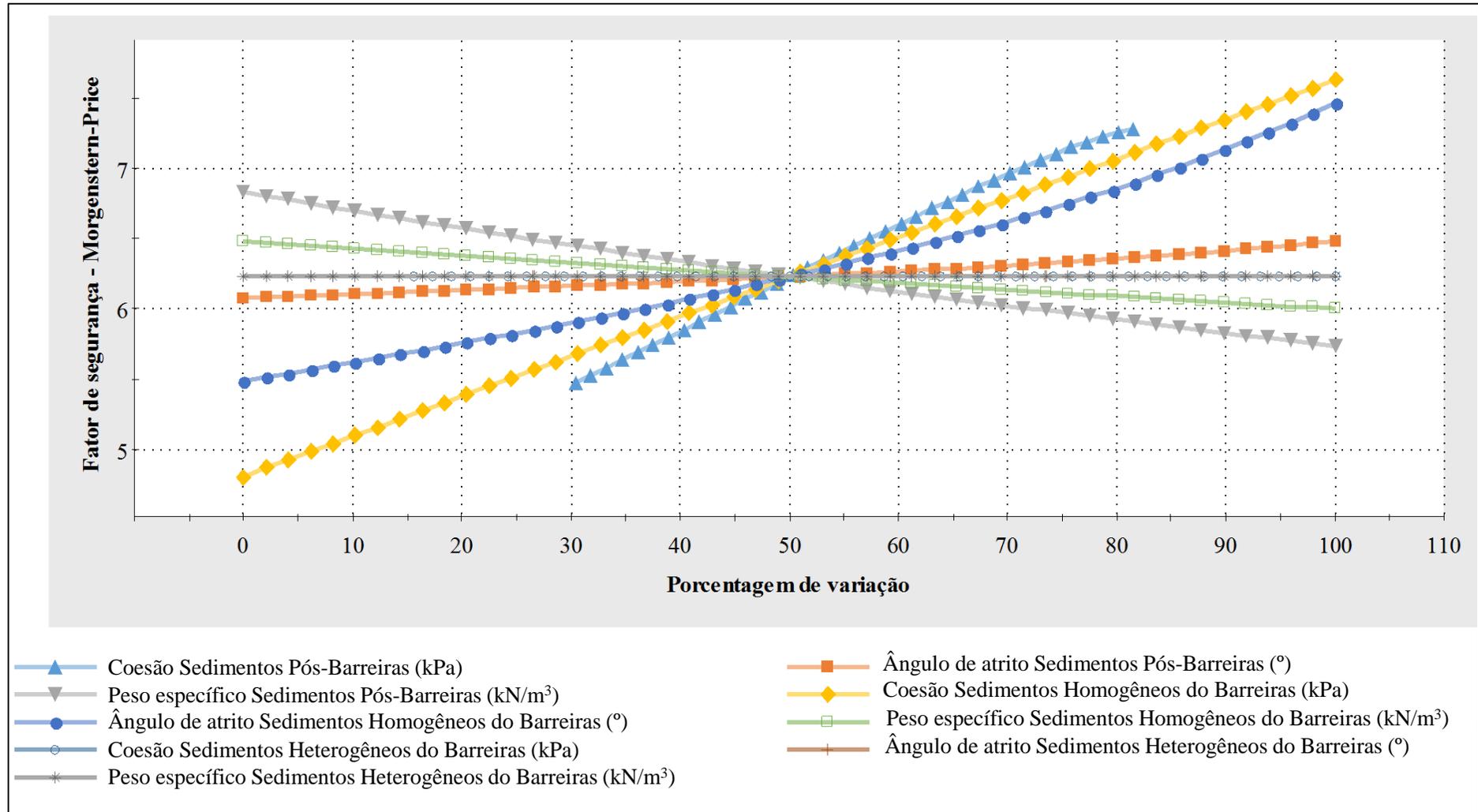
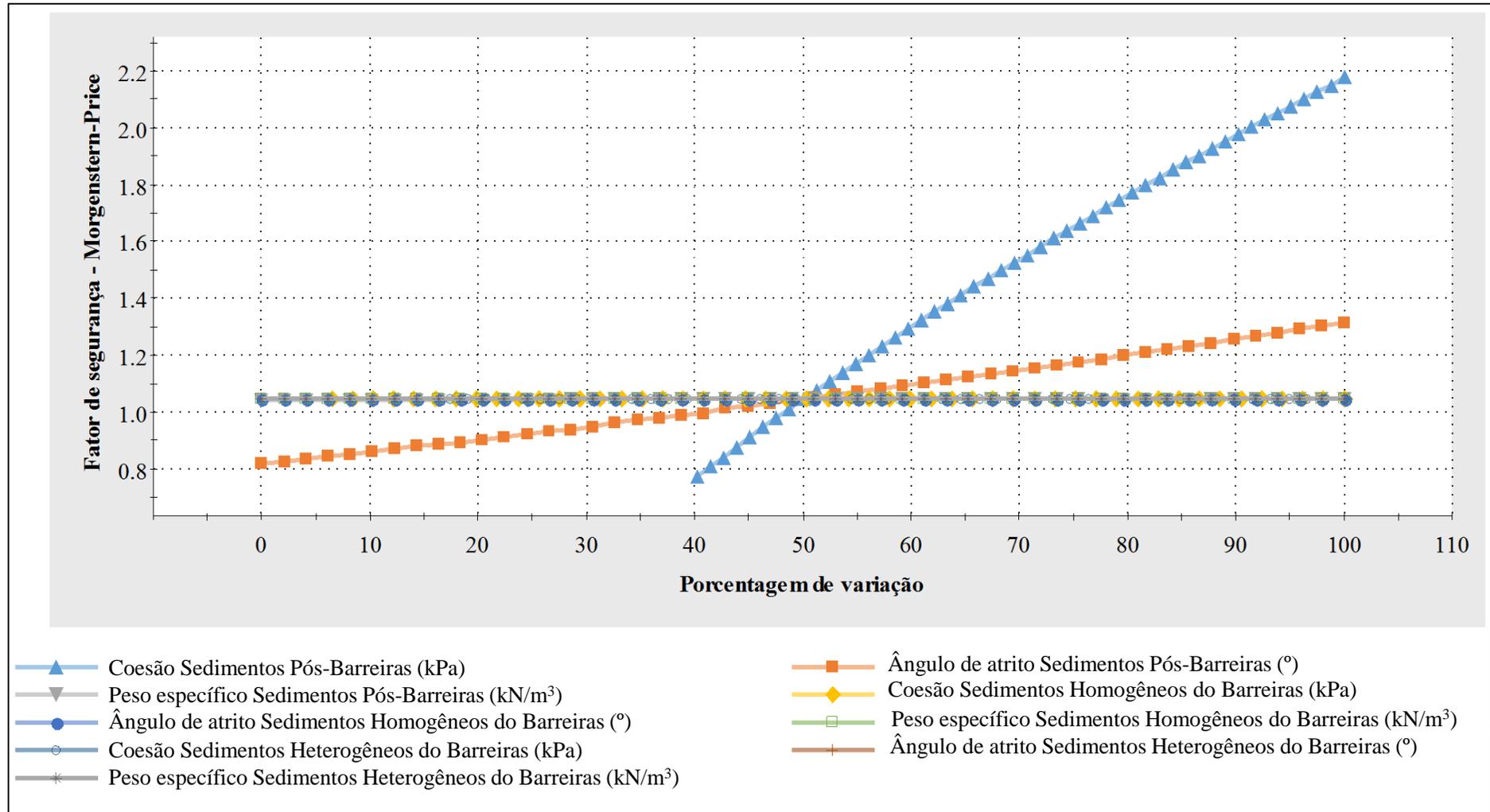


Figura 4.15 Análise de sensibilidade para a seção 03 da encosta ocupada pela Comunidade São José do Jacó com o solo ensaiado na condição saturada



As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam os gráficos de sensibilidade do FS versus uma única variável para a seção 03 com solo ensaiado sob condição natural. Esse tipo de informação serve para indicar o comportamento do FS frente a variação dos valores dos parâmetros de entrada.

Analisando-as é possível constatar que uma variação entre 0% e 100% no valor da coesão efetiva natural (130 kPa – 270 kPa) foi responsável pela elevação do FS de aproximadamente 4,8 a 7,6. Ao variar o ângulo de atrito efetivo natural do solo entre 0% e 100% (20° - 55°), o FS elevou-se de 5,5 para 7,5. Por outro lado, com a variação de 0% a 100% na magnitude do peso específico natural (14 kN/m³ – 20 kN/m³), o fator de segurança diminuiu de 6,5 a 6,0.

O mesmo padrão de comportamento acima descrito foi observado para as seis seções da encosta ocupada pela Comunidade São José do Jacó, tanto na condição natural quanto inundada, servindo como subsídio para escolha apenas dos parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, como variáveis aleatórias, e o fator de segurança como variável dependente de saída

Figura 4.16 Análise de sensibilidade da coesão efetiva do solo na condição natural versus FS para a seção 03

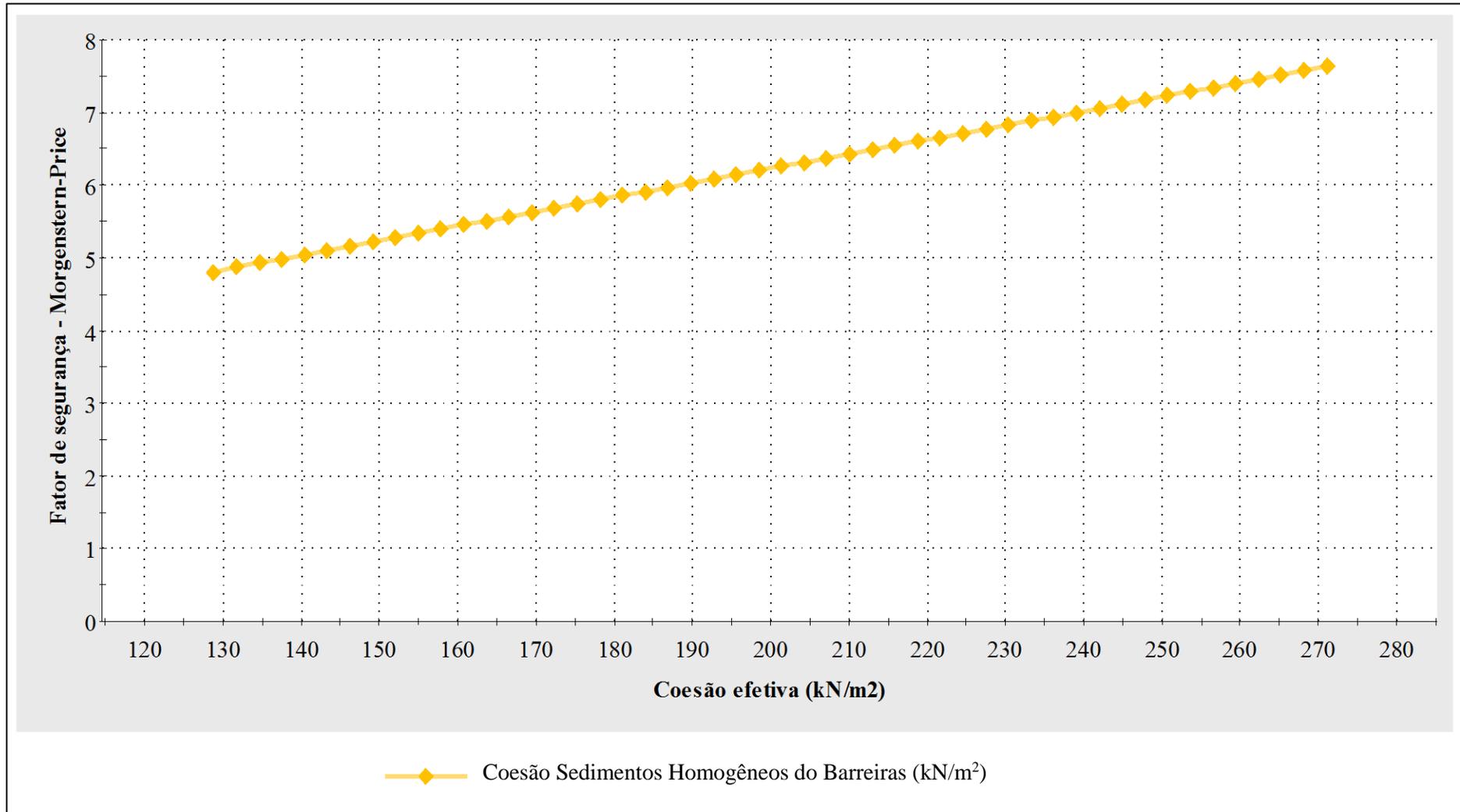


Figura 4.17 Análise de sensibilidade do ângulo de atrito efetivo natural versus FS para a seção 03

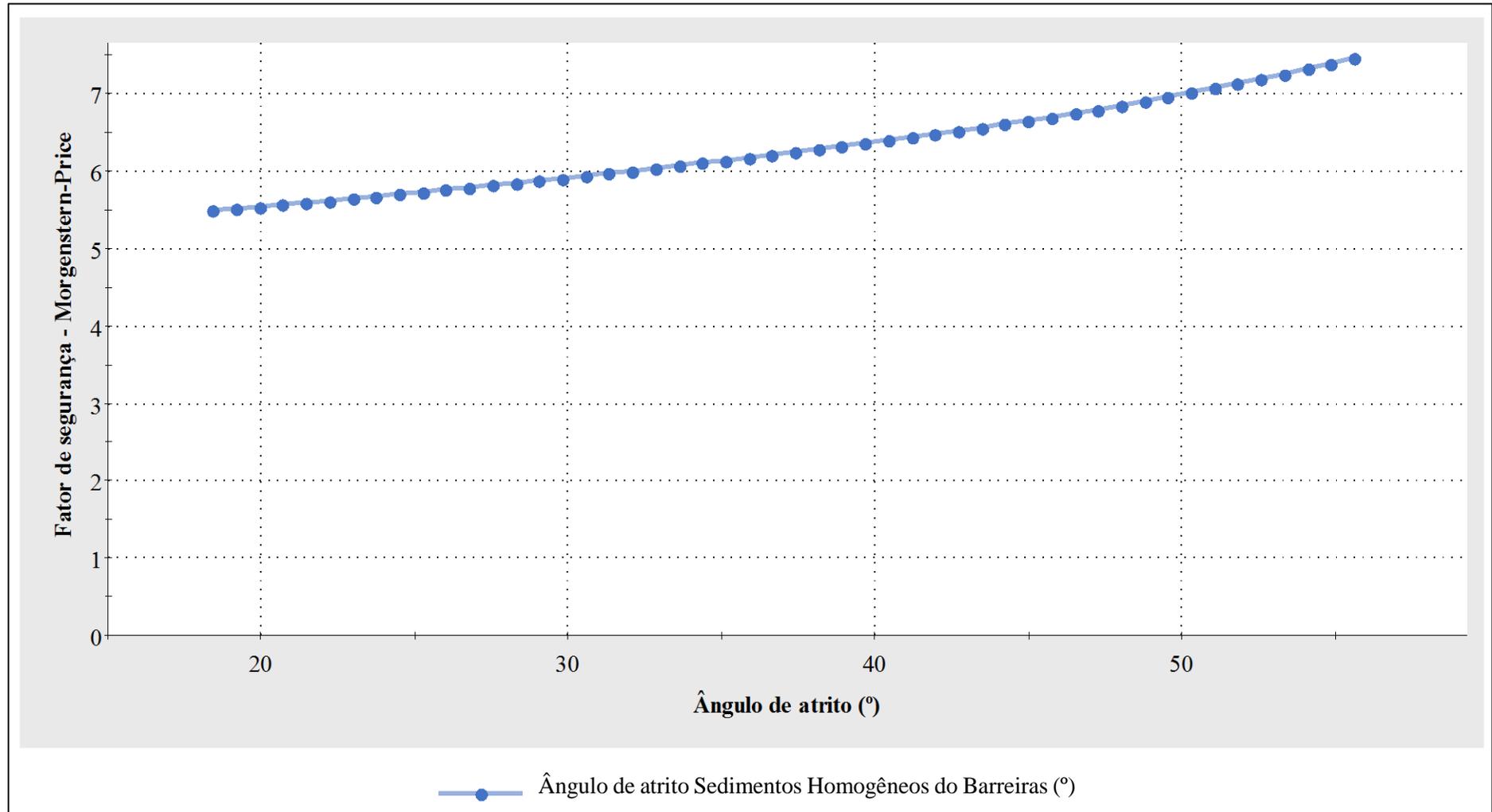
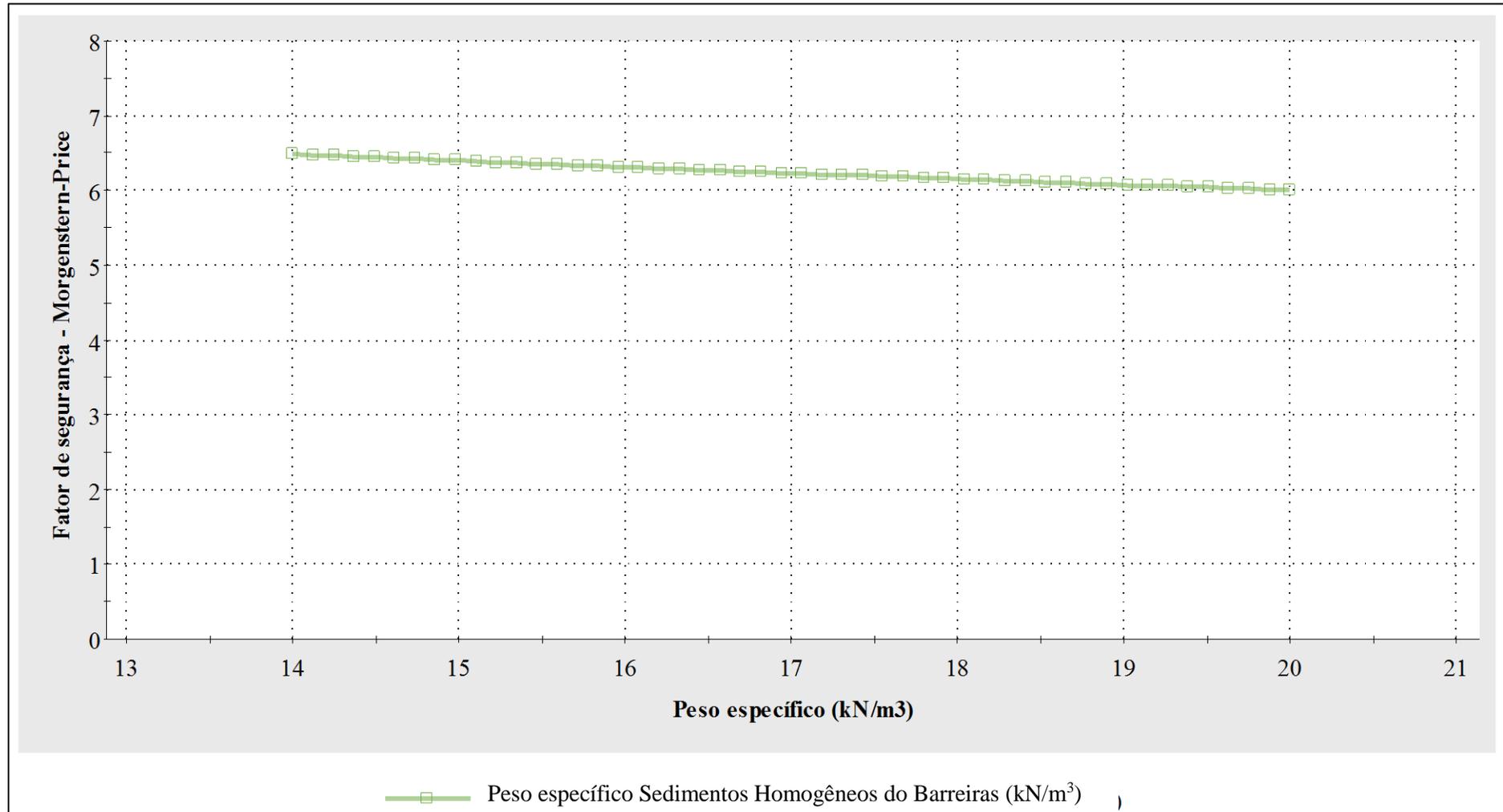


Figura 4.18 Análise de sensibilidade do peso específico natural versus FS para a seção 03



4.3.3.1. Estimativa dos parâmetros geotécnicos

Sabe-se que para se efetuar um tratamento estatístico das características geotécnicas do solo, o ideal para o desenvolvimento do trabalho seria a obtenção desses dados por meio de ensaios geotécnicos da área de estudo. No entanto, na situação em que não há a possibilidade de realização de ensaios, uma solução é adotar dados provenientes da literatura técnica na análise a ser realizada.

Dessa forma, para efeito de estimativa dos parâmetros necessários à realização das análises de estabilidade da Comunidade São José do Jacó, foram coletados dados em pesquisas anteriores desenvolvidas no estado do Rio Grande do Norte, em solos semelhantes aos encontrados no local de estudo, característicos das Formações Potengi (Sedimentos Pós-Barreiras) e Barreiras. A compilação de dados baseou-se nos trabalhos de Silva (2003), Severo (2005), Severo (2011), Souza Jr. (2013), Barbosa (2017), Taquez (2017) e Sousa (2018).

Na Tabela 4.15 são apresentados os dados obtidos por cada autor para os solos ensaiados em condição de umidade natural e na Tabela 4.16, os dados obtidos para os solos ensaiados com amostra saturada.

De posse desses dados, a próxima etapa é a caracterização estatística dos parâmetros geotécnicos de entrada, considerados como variáveis aleatórias. Como comentado anteriormente, dependendo da quantidade de dados disponíveis, diferentes abordagens podem ser adotadas para inferir a distribuição de probabilidades de cada parâmetro.

Na ausência de uma maior quantidade de dados, optou-se inicialmente nesse trabalho, por utilizar métodos gráficos, como o histograma de frequência e o teste Q-Q Plot, para verificar o formato da distribuição das variáveis ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva, tanto natural quanto saturado, e a adequação dela à distribuição contínua normal de todos os dados disponíveis, sem distinção entre as diferentes litologias existentes nos locais em que os ensaios foram realizados.

Tabela 4.15 Parâmetros das amostras de solo ensaiadas na condição natural

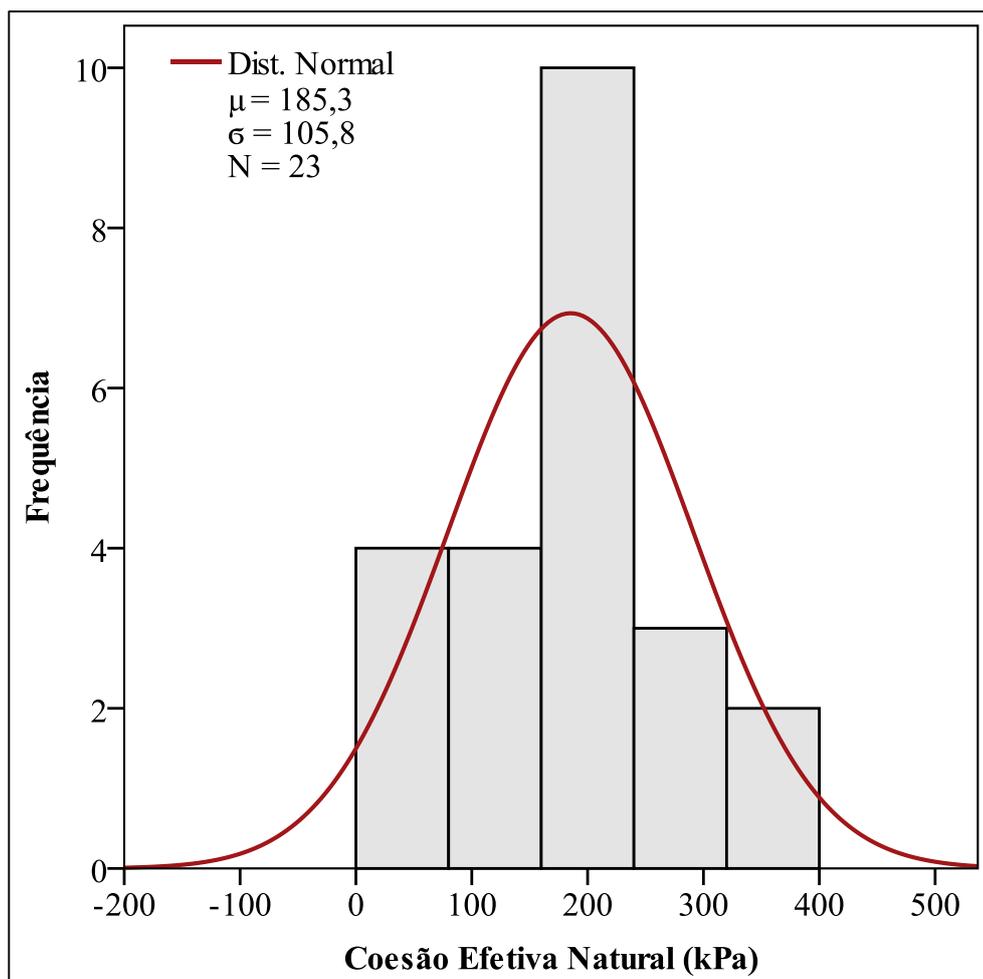
Localização	Tipo de ensaio	c' (kPa)	ϕ' (°)	Areia (%)	Referência
Tibau do Sul/RN	Triaxial (CD)	6,5	29,4	62,2	Severo (2011)
Barreira do Inferno	Triaxial (CU)	97,6	35,9	87,8	Taquez (2017)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	0,5	43,0	75,0	Sousa (2018)
Zona Norte Natal/RN	Cisalhamento Direto	134,4	19,5	62,6	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	206,3	39,9	71,9	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	167,7	36,1	88,0	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	46,0	32,6	74,3	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	193,0	45,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	232,0	43,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	233,0	27,7	37,5	Severo (2005)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	174,4	30,8	69,8	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	192,1	36,4	74,2	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Zona Leste de Natal/RN	Triaxial (CD)	196,7	38,7	65,1	Sousa (2018)
Zona Leste de Natal/RN	Triaxial (CD)	178,0	37,6	66,1	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	318,00	52,00	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	384,1	28,4	63,0	Severo (2005)
Piau/RN 003	Cisalhamento Direto	396,6	31,9	25,4	Severo (2005)
BR - 101 (km 131)	Cisalhamento Direto	259,3	48,3	54,8	Severo (2005)
Tibau do Sul/RN	Triaxial (CD)	62,7	30,5	45,5	Severo (2011)
Tibau do Sul/RN	Triaxial (CD)	110,5	28,3	65,4	Severo (2011)
Zona Leste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	148,6	58,1	62,0	Sousa (2018)
Zona Leste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	218,0	42,3	73,4	Sousa (2018)
Zona Leste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	306,8	46,3	62,1	Sousa (2018)

Tabela 4.16 Parâmetros das amostras de solo ensaiadas na condição saturada

Localização	Tipo de ensaio	c' (kPa)	ϕ' (°)	Areia (%)	Referência
Baia Formosa/RN	Cisalhamento Direto	16,9	29,5	-	Souza Jr. (2013)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	16,7	29,0	87,82	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	0,0	33,7	75,00	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	0,0	33,3	62,55	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	0,0	32,9	71,89	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	0,0	36,9	88,00	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	0,0	32,9	74,26	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	48,0	27,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	53,0	29,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	50,6	27,5	37,50	Severo (2005)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	53,3	12,1	69,77	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	60,6	27,6	74,23	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	22,1	27,2	65,05	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	17,5	31,7	66,70	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	45,0	27,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	45,4	26,8	63,00	Severo (2005)
Piau/RN 003	Cisalhamento Direto	95,5	29,6	25,38	Severo (2005)
BR - 101 (km 131)	Cisalhamento Direto	109,7	26,4	54,82	Severo (2005)
Baia Formosa/RN	Cisalhamento Direto	59,9	33,6	-	Souza Jr. (2013)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	106,7	30,2	61,95	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	38,3	28,4	73,42	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	24,2	33,6	62,05	Sousa (2018)

A Figura 4.19 apresenta o histograma de frequência da variável coesão efetiva natural para todos os dados descritos na Tabela 4.15. Desse histograma, foi possível constatar que essa variável possui distribuição de frequência que se aproxima da distribuição normal. O valor de média e desvio padrão foram, respectivamente, 185,3 kPa e 105,8 kPa, com população de 23 amostras.

Figura 4.19 Histograma de Frequência da variável coesão efetiva natural



Após análise preliminar do histograma de frequência, procedeu-se então o segundo teste, o gráfico Q-Q, cujo resultado é apresentado na Figura 4.20. Nele observa-se que o padrão dos pontos no gráfico Q-Q não é exatamente linear, com desvios das extremidades direita e esquerda com relação à linha de referência, podendo indicar caudas curtas em ambas extremidades da distribuição, corroborando com o aspecto visual do histograma de frequência desta variável.

Apesar disso, ao analisar a função linear de ajuste aos valores observados (dados disponíveis), representada pela linha azul pontilhada na Figura 4.20, verifica-se boa aproximação à função linear para os valores normais esperados, constatação ratificada pelo elevado valor de coeficiente de ajuste linear ($R^2 = 0,977$), próximo a 1,0, situação em que haveria uma relação linear perfeita entre as duas funções.

Em outras palavras, os resultados fornecidos pelo Gráfico Q-Q, assim como os observados no histograma de frequência, nos permitem assumir uma distribuição de frequência normal para a variável coesão efetiva natural. Padrões semelhantes de comportamento foram observados para o ângulo de atrito efetivo natural (Figura 4.21 e 4.22), cujos valores de média e desvio padrão foram, respectivamente, $37,5^\circ$ e $9,0^\circ$.

Ao tentar avaliar a adequação da função densidade de probabilidade dos dados coesão e ângulo de atrito saturado à distribuição normal, observou-se a existência de uma maior dispersão ao redor da linha de tendência dos valores normais esperados, evidenciado pelo menor valor de R^2 nas Figuras 4.24 e 4.26.

Figura 4.20 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural versus distribuição normal

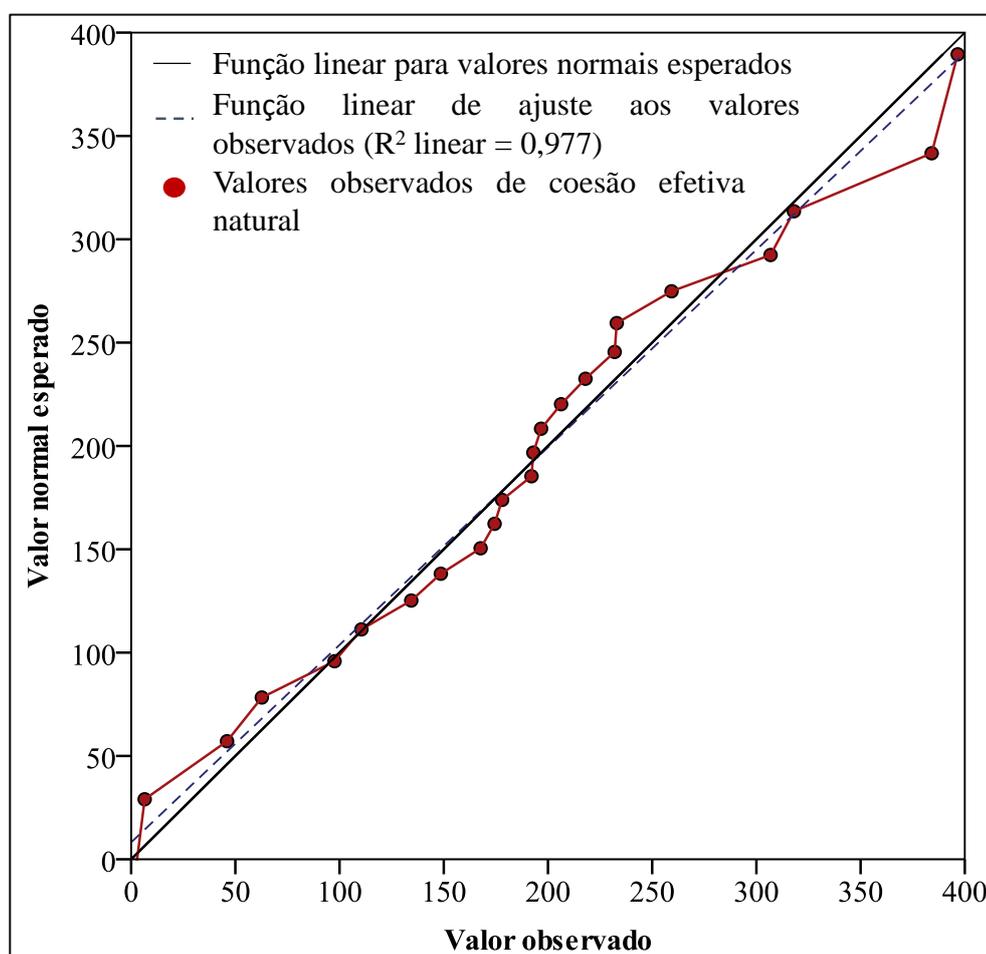


Figura 4.21 Histograma de Frequência do ângulo de atrito efetivo natural

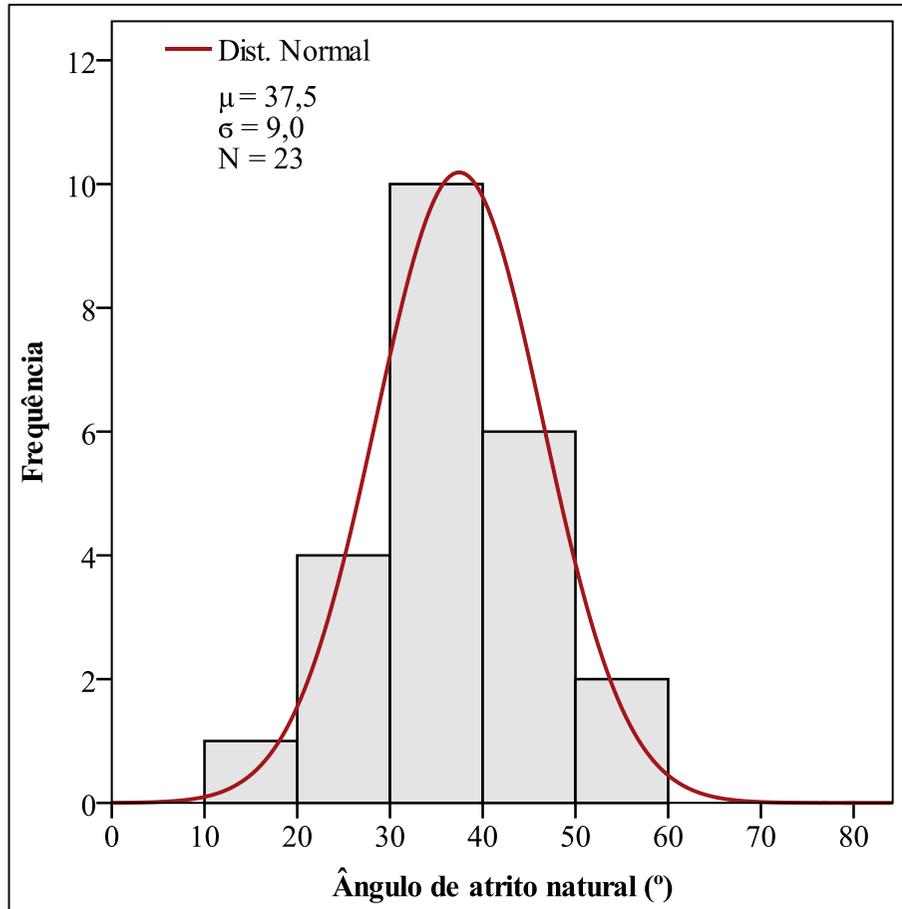


Figura 4.22 Teste Q-Q do ângulo de atrito efetivo natural versus distribuição normal

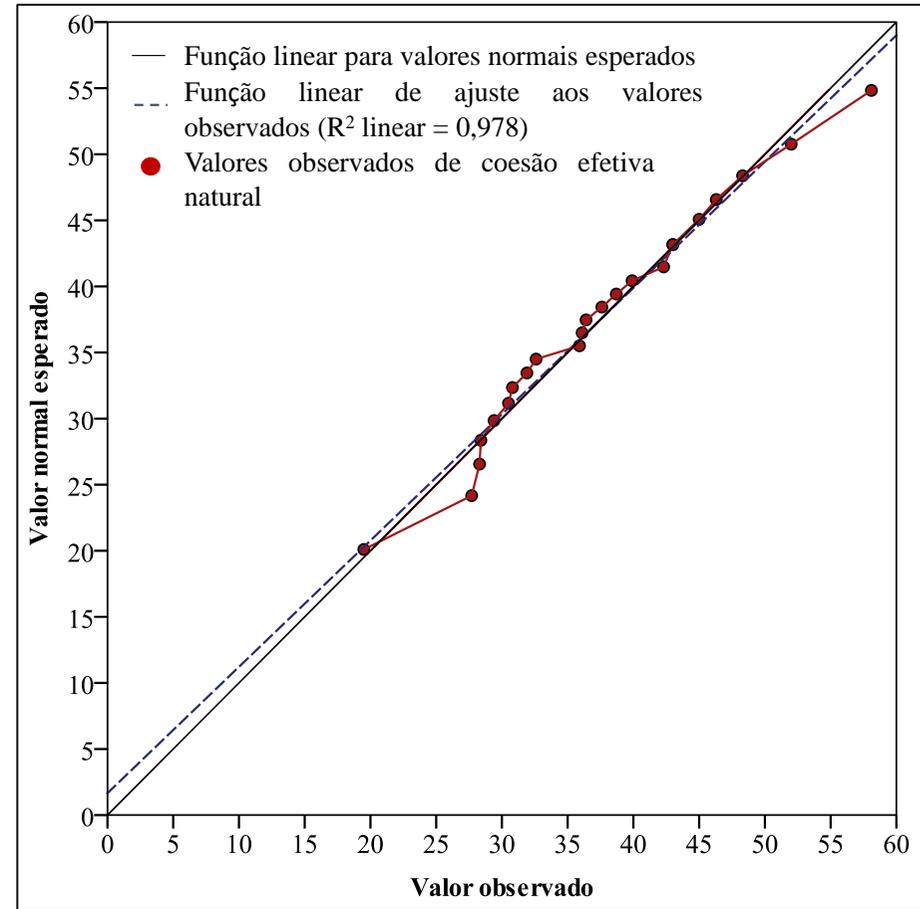


Figura 4.23 Histograma de frequência da coesão efetiva do solo ensaiado em condição saturada versus distribuição normal

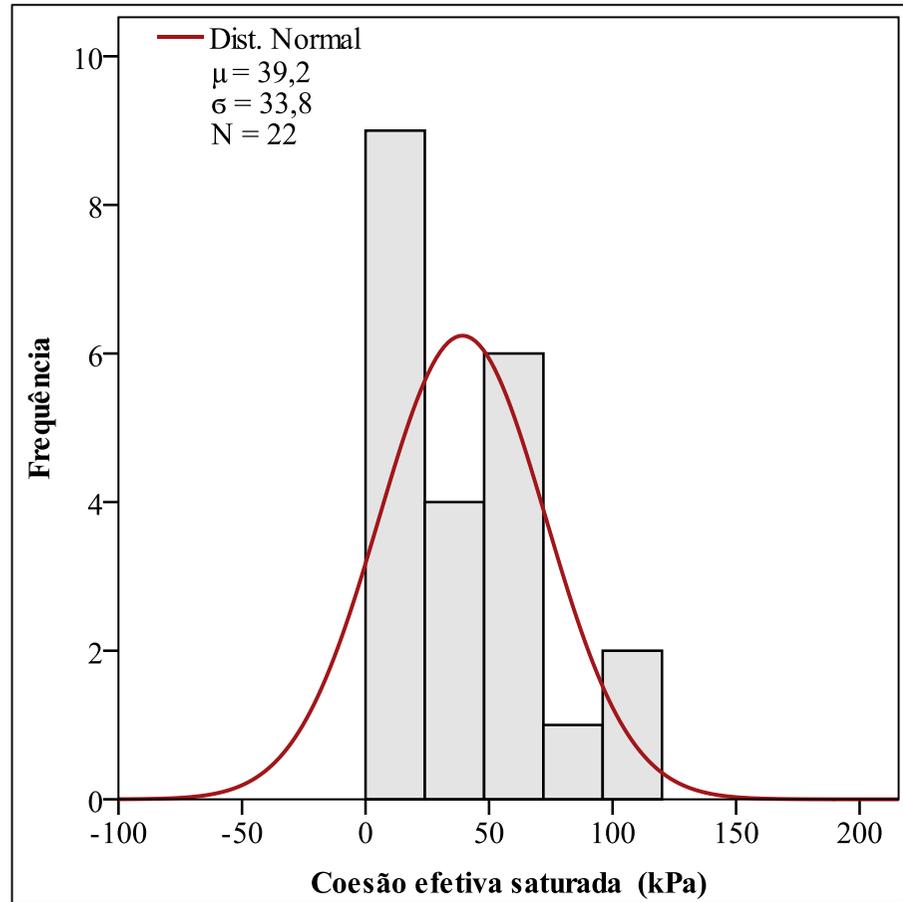


Figura 4.24 Teste Q-Q da coesão efetiva saturada versus distribuição normal

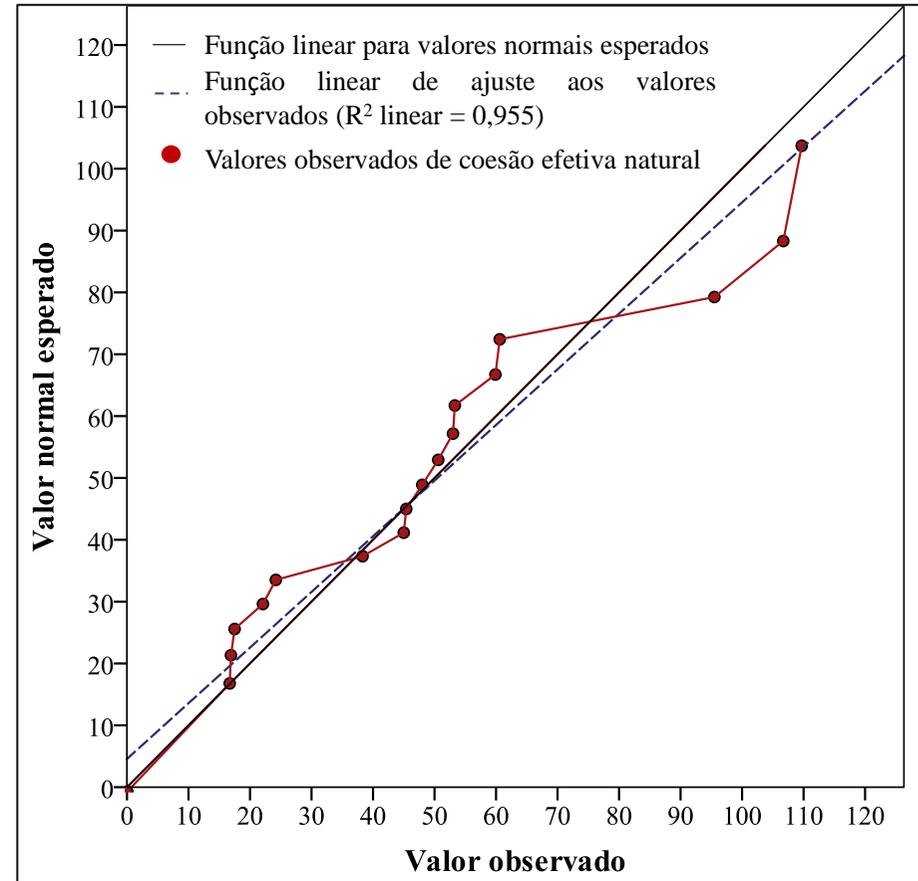


Figura 4.25 Histograma de Frequência do ângulo de atrito efetivo do solo ensaiado em condição saturada versus distribuição normal

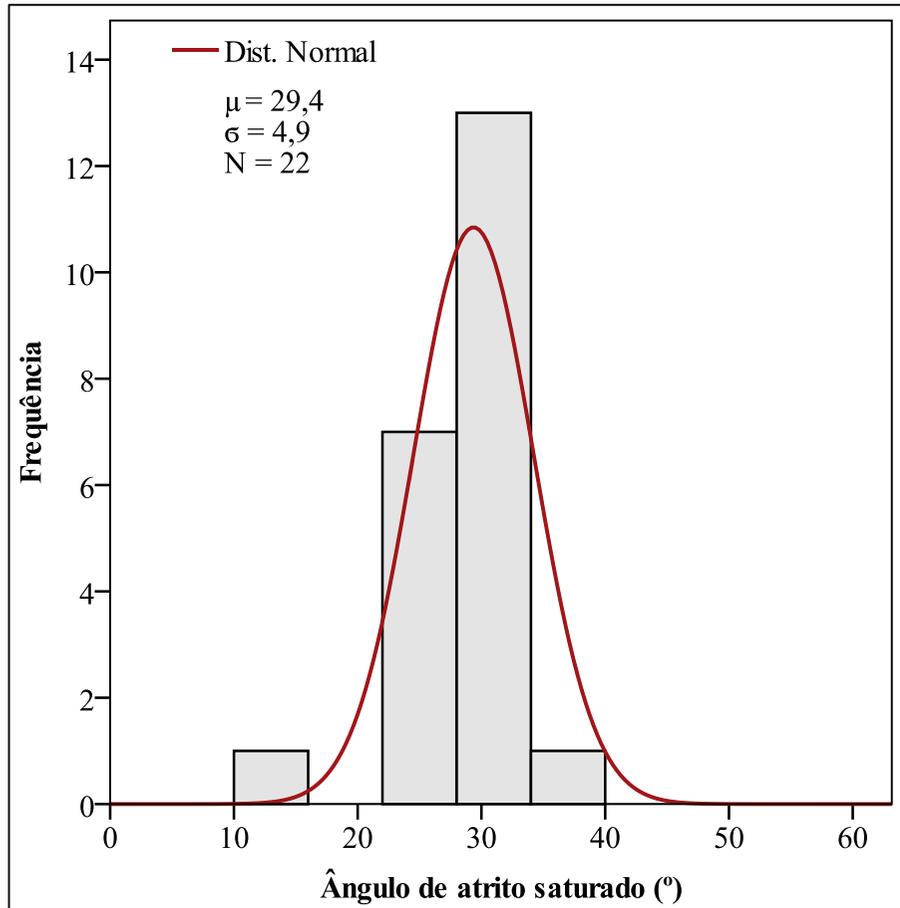
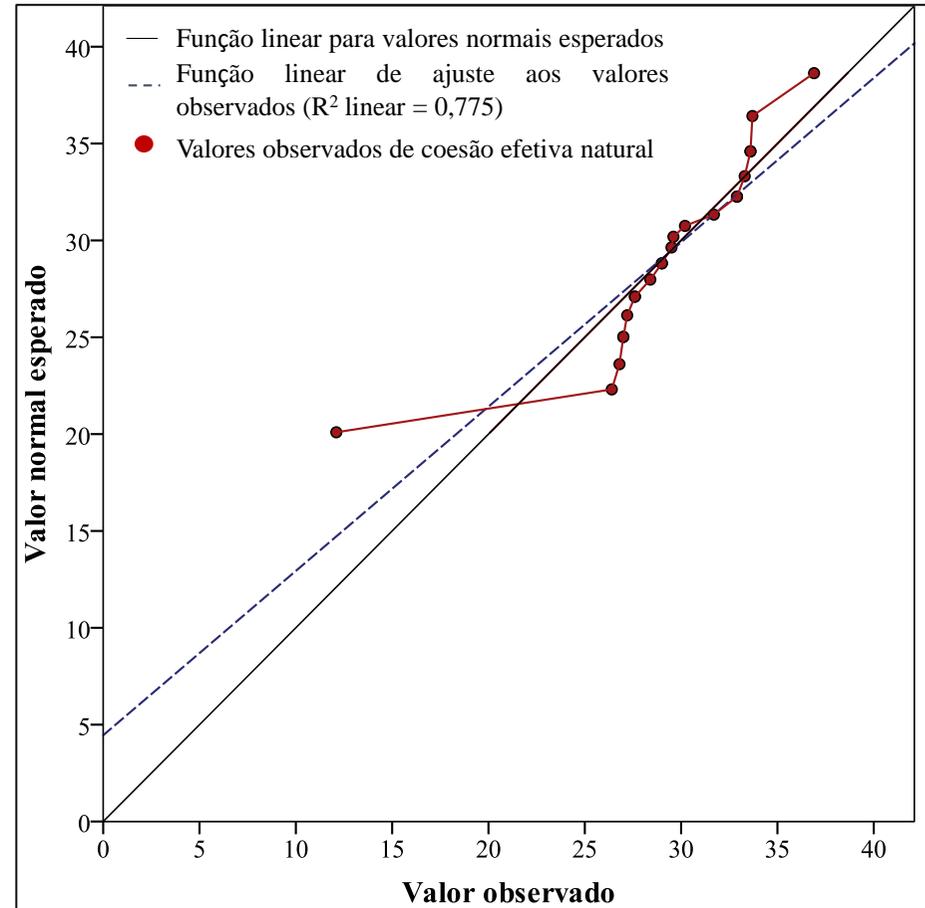


Figura 4.26 Teste Q-Q do ângulo de atrito efetivo saturado versus distribuição normal



Dando um maior enfoque aos resultados obtidos para o ângulo de atrito na condição saturada, percebe-se que tanto o histograma de frequência quanto o gráfico Q-Q desta variável foram afetados pelo baixo valor de ângulo ($12,1^\circ$) obtido por Taquez (2017), de modo que se optou por descartá-lo da análise em função da ausência de concordância entre a magnitude daquele parâmetro e o tipo de solo em estudo, com teor de areia na ordem de 70%.

Dessa forma, um novo gráfico Q-Q foi elaborado, agora sem a consideração do valor de ângulo de atrito igual a $12,5^\circ$, e é apresentado na Figura 4.27. Percebe-se na Figura 4.28, após essa ponderação, uma elevação do coeficiente de ajuste linear de 0,775 para 0,921, indicando a existência de uma melhor adequação, quando comparado à situação anterior, à distribuição normal.

Figura 4.27 Histograma de Frequência do ângulo de atrito efetivo do solo ensaiado em condição inundada sem a consideração do valor de ângulo de atrito igual a $12,1^\circ$

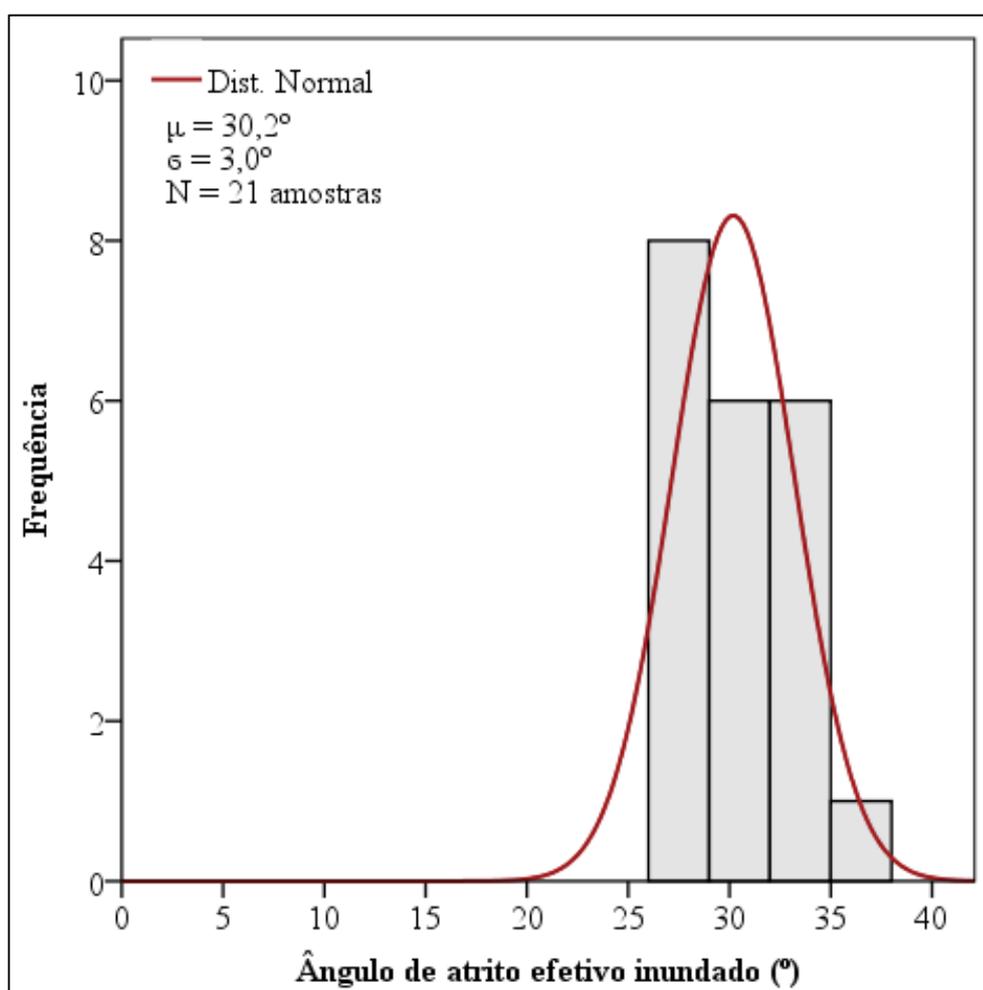
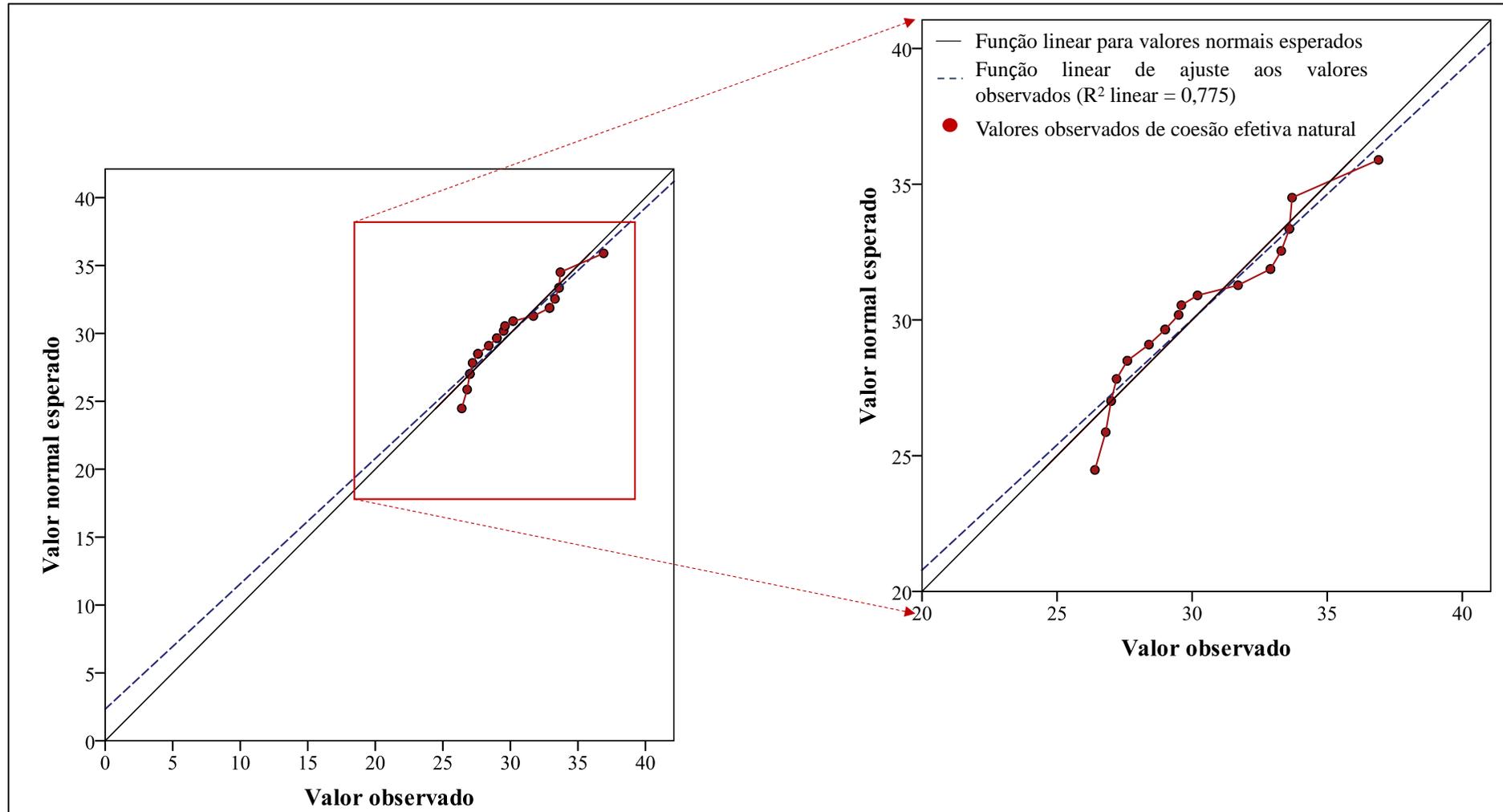


Figura 4.28 Teste Q-Q do ângulo de atrito efetivo inundado sem a consideração do valor de ângulo de atrito igual a $12,1^\circ$ 

Apesar da razoabilidade dos resultados obtidos, percebeu-se que a pequena quantidade de dados disponíveis para construção de uma curva de distribuição de probabilidade, associado, principalmente, à ausência de uma divisão desses dados por camada litológica de origem, levaram à obtenção de valores de coeficiente de variação elevados, sobretudo para o parâmetro coesão, tanto na condição natural quanto saturada, cuja variabilidade alcançou 60% e 90%, respectivamente, em torno da média.

Diante disso, para tentar diminuir a dispersão dos dados, eles foram divididos em três categorias: Sedimentos Pós-Barreiras; Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras e Sedimento Heterogêneos do Grupo Barreiras. Como já explicitado no Item 4.3.1, os critérios adotados nessa classificação basearam-se, principalmente, nas características tátil visuais descritas pelos autores dos trabalhos, no teor de areia existente nas amostras de solo submetidas à caracterização física e em menor grau, no teor de finos (argila + silte).

Nas Tabelas 4.17 a 4.22, são apresentados os parâmetros obtidos para os Sedimentos Pós-Barreiras e para os solos “homogêneo” e “heterogêneo” da Formação Barreiras, divididos naqueles ensaiados na condição natural de campo e nos saturados.

A partir dessa divisão, procedeu-se a caracterização estatística dos parâmetros geotécnicos de entrada das análises probabilísticas, através dos métodos gráficos histograma de frequência e teste Q-Q Plot, seguindo o mesmo processo já descrito para os todos os dados disponíveis.

As Figuras 4.29 a 4.52 apresentam os histogramas de frequência e os gráficos Q-Q das variáveis ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva das três camadas de solo, nas condições natural e saturada.

Tabela 4.17 Parâmetros dos Sedimentos Pós-Barreiras ensaiados na condição natural

Fonte	Severo (2011)	Taquez (2017)	Souza (2018)	Souza (2018)	Souza (2018)	Souza (2018)	Souza (2018)
Local	Tibau do Sul (Topo)	Barreira do Inferno (Topo)	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal
Tipo de ensaio	Triaxial (CD)	Triaxial (CU)	CD	CD	CD	CD	CD
Tipo de solo	SC	SP	SM-SC	SC	SM-SC	SW-SM	SP-SC
Caracterização física							
Pedregulho (%)	0,3	0,0	0,00	13,28	0,00	0,00	0,00
Areia (%)	62,2	87,8	75,00	62,55	71,89	88,00	74,26
Silte+Argila (%)	37,5	12,2	25,00	24,17	28,11	12,00	25,74
Parâmetros de resistência							
c' (kPa)	6,5	97,6	0,5	134,4	206,3	167,7	46,0
ϕ' (°)	29,4	35,9	43,0	19,5	39,9	36,1	32,6
Foto							
CD – Cisalhamento Direto; Triaxial (CU) – Ensaio Triaxial Consolidado Não-Drenado; Triaxial (CD) – Ensaio Triaxial Consolidado Drenado.							

Tabela 4.18 Parâmetros dos Sedimentos Pós-Barreiras ensaiados na condição saturada

Fonte	Souza Jr. (2013)	Taquez (2017) e Barbosa (2017)	Souza (2018)	Souza (2018)	Souza (2018)	Souza (2018)	Souza (2018)
Local	Baía Formosa	Barreira do Inferno (Topo)	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal	Zona Norte / Natal
Tipo de ensaio	CD	Triaxial (CU)	CD	CD	CD	CD	CD
Tipo de solo	Areia argilosa	SP	SM-SC	SC	SM-SC	SW-SM	SP-SC
Caracterização física							
Pedregulho (%)	-	0,0	0,00	13,28	0,00	0,00	0,00
Areia (%)	-	87,82	75,00	62,55	71,89	88,00	74,26
Silte+Argila (%)	-	12,18	25,00	24,17	28,11	12,00	25,74
Parâmetros de resistência							
c' (kPa)	16,9	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ϕ' (°)	29,5	29,0	33,7	33,3	32,9	36,9	32,9
Foto	-						
CD – Cisalhamento Direto; Triaxial (CU) – Ensaio Triaxial Consolidado Não-Drenado; Triaxial (CD) – Ensaio Triaxial Consolidado Drenado.							

Tabela 4.19 Parâmetros de solo homogêneo da Formação Barreiras ensaiado na condição natural

Fonte	Silva (2003)	Silva (2003)	Severo (2005)	Taquez (2017) e Barbosa (2017)	Taquez (2017) e Barbosa (2017)	Sousa (2018)	Sousa (2018)
Local	Tibau do Sul	Tibau do Sul	Tibau do Sul (Topo)	Barreira do Inferno (Meio)	Barreira do Inferno (Base)	Zona Leste/ Natal	Zona Leste/ Natal
Tipo de ensaio	CD	CD	CD	Triaxial (CW)	Triaxial (CW)	CD	CD
Tipo de solo			CL	SC-SM	SC	SC	SC
Caracterização física							
Pedregulho (%)	-	-	0,0	0,07	0,00	0,00	0,00
Areia (%)	-	-	37,5	69,8	74,2	65,05	66,70
Silte+Argila (%)	-	-	62,5	30,2	25,8	34,95	33,30
Parâmetros de resistência							
c' (kPa)	193,0	232,0	233,0	174,4	192,1	196,7	178,0
ϕ' (°)	45,0	43,0	27,7	30,8	36,4	38,7	37,6
Foto	-	-					
CD – Cisalhamento Direto; Triaxial (CU) – Ensaio Triaxial Consolidado Não-Drenado; Triaxial (CD) – Ensaio Triaxial Consolidado Drenado.							

Tabela 4.20 Parâmetros de solo homogêneo da Formação Barreiras ensaiado na condição saturada

Fonte	Silva (2003)	Silva (2003)	Severo (2005)	Taquez (2017) e Barbosa (2017)	Taquez (2017) e Barbosa (2017)	Sousa (2018)	Sousa (2018)
Local	Tibau do Sul	Tibau do Sul	Tibau do Sul	Barreira do Inferno (Meio)	Barreira do Inferno (Base)	Zona Leste/Natal	Zona Leste/Natal
Tipo de ensaio	CD	CD	CD	Triaxial (CU)	Triaxial (CU)	CD	CD
Tipo de solo			CL	SC-SM	SC	SC	SC
Caracterização física							
Pedregulho (%)	-	-	0,0	0,07	0,00	0,00	0,00
Areia (%)	-	-	37,5	69,77	74,23	65,05	66,70
Silte+Argila (%)	-	-	62,5	30,15	25,77	34,95	33,30
Parâmetros de resistência							
c' (kPa)	48,0	53,0	50,6	53,3	60,6	22,1	17,5
ϕ' (°)	27,0	29,0	27,5	12,1	27,6	27,2	31,7
Foto	-	-					
CD – Cisalhamento Direto; Triaxial (CU) – Ensaio Triaxial Consolidado Não-Drenado; Triaxial (CD) – Ensaio Triaxial Consolidado Drenado							

Tabela 4.21 Parâmetros de solo heterogêneo ensaiado na condição natural

Fonte	Severo (2005)	Severo (2005)	Severo (2005)	Severo (2011)	Severo (2011)	Sousa (2018)	Sousa (2018)	Sousa (2018)	Silva (2003)
Local	Tibau do Sul (Base)	Piau/RN 003	BR – 101, km 131	Tibau do Sul (Meio)	Tibau do Sul (Base)	Zona Leste/ Natal	Zona Leste/ Natal	Zona Leste/ Natal	Tibau do Sul (Base)
Tipo de ensaio	CD	CD	CD	Triaxial (CD)	Triaxial (CD)	CD	CD	CD	CD
Tipo de solo	CL	CL	CL	SM-SC	SM-SC	SC	SC	SC	-
Caracterização física									
Pedregulho (%)	0,03	2,62	0,68	27,5	1,6	0,00	0,00	0,00	-
Areia (%)	63,0	25,38	54,82	45,5	65,4	61,95	73,42	62,05	-
Silte+Argila (%)	37,00	72,0	44,5	27,0	33,0	38,05	26,58	37,95	-
Parâmetros de resistência									
c' (kPa)	384,1	396,6	259,3	62,7	110,5	148,6	218,0	306,8	318,0
ϕ' (°)	28,4	31,9	48,3	30,5	28,3	58,1	42,3	46,3	52
Foto									-
CD – Cisalhamento Direto; Triaxial (CU) – Ensaio Triaxial Consolidado Não-Drenado; Triaxial (CD) – Ensaio Triaxial Consolidado Drenado									

Tabela 4.22 Parâmetros de solo heterogêneo ensaiado na condição saturada

Fonte	Severo (2005)	Severo (2005)	Severo (2005)	Souza Jr. (2013)	Sousa (2018)	Sousa (2018)	Sousa (2018)	Silva (2003)
Local	Tibau do Sul (Base)	Piau/RN 003	BR – 101, km 131	Baía Formosa (Base)	Zona Leste/ Natal	Zona Leste/ Natal	Zona Leste/ Natal	Tibau do Sul (Base)
Tipo de ensaio	CD	CD	CD	CD	CD	CD	CD	CD
Tipo de solo	CL	CL	CL	Material argilo-arenoso	SC	SC	SC	-
Caracterização física								
Pedregulho (%)	0,03	2,62	0,68	-	0,00	0,00	0,00	-
Areia (%)	63,0	25,38	54,82	-	61,95	73,42	62,05	-
Silte+Argila (%)	37,00	72,00	44,50	-	38,05	26,58	37,95	-
Parâmetros de resistência								
c' (kPa)	45,4	95,5	109,7	59,9	106,7	38,3	24,2	45,0
ϕ' (°)	26,8	29,6	26,4	33,6	30,2	28,4	33,6	27,0
Foto				-				-
CD – Cisalhamento Direto; Triaxial (CU) – Ensaio Triaxial Consolidado Não-Drenado; Triaxial (CD) – Ensaio Triaxial Consolidado Drenado								

Figura 4.29 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).

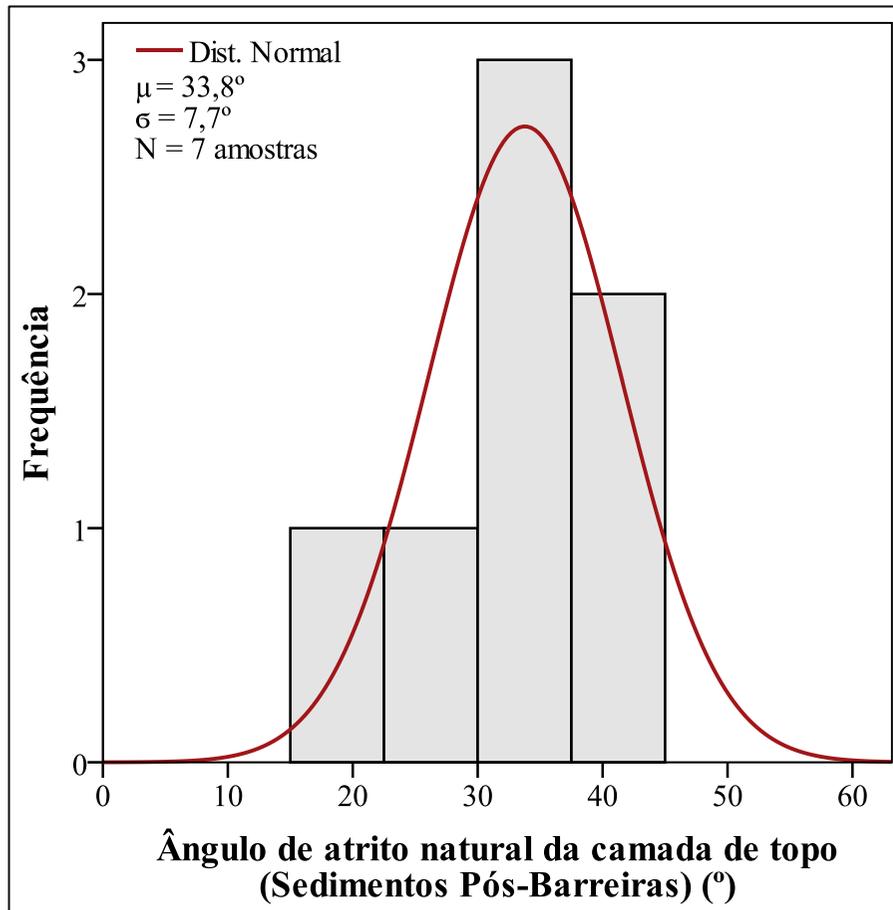


Figura 4.30 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito saturado da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras).

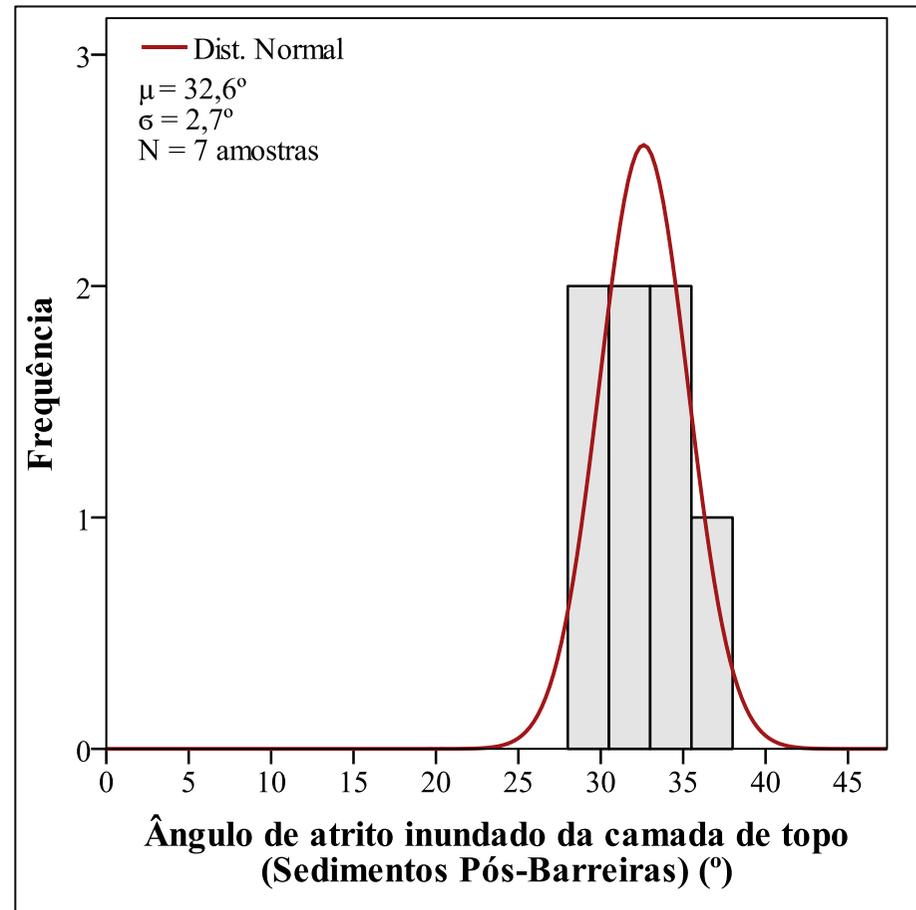


Figura 4.31 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)

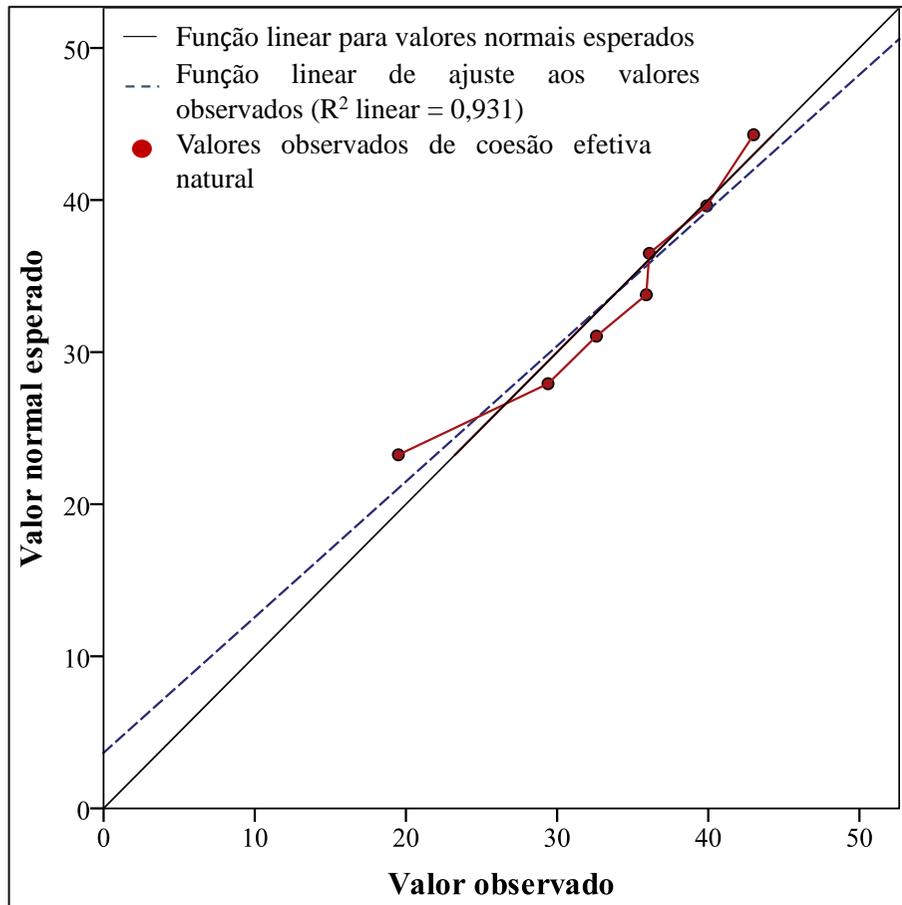


Figura 4.32 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito saturado da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)

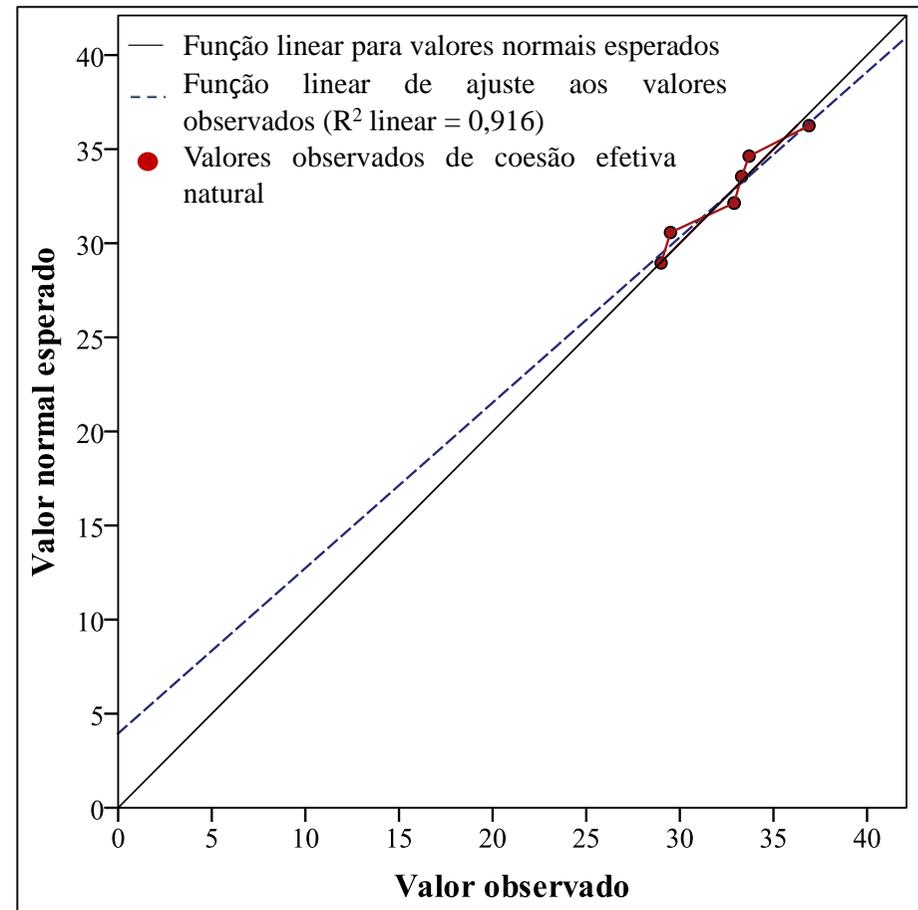


Figura 4.33 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

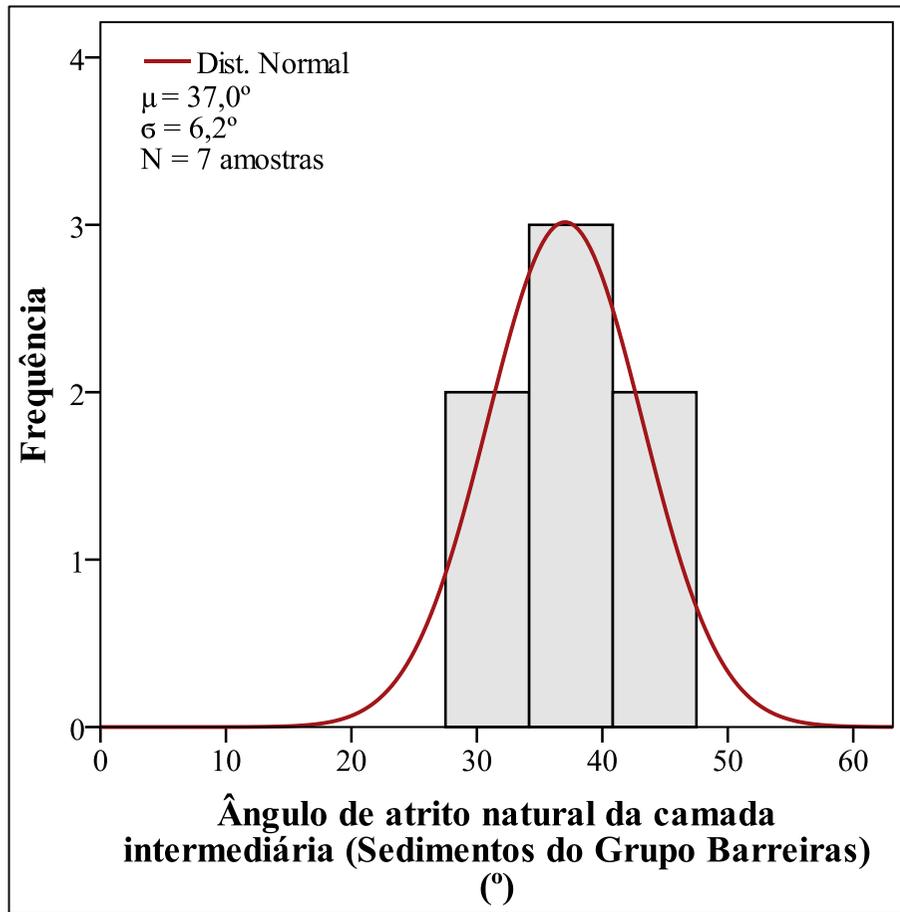


Figura 4.34 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável ângulo de atrito saturado da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

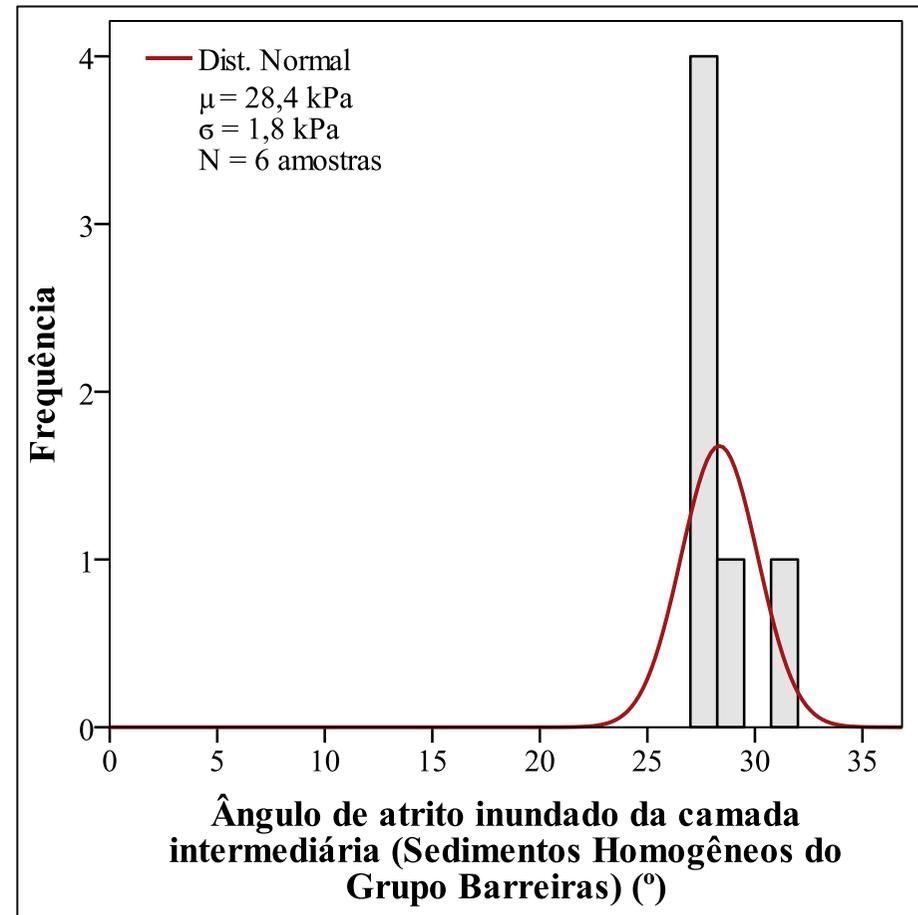


Figura 4.35 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

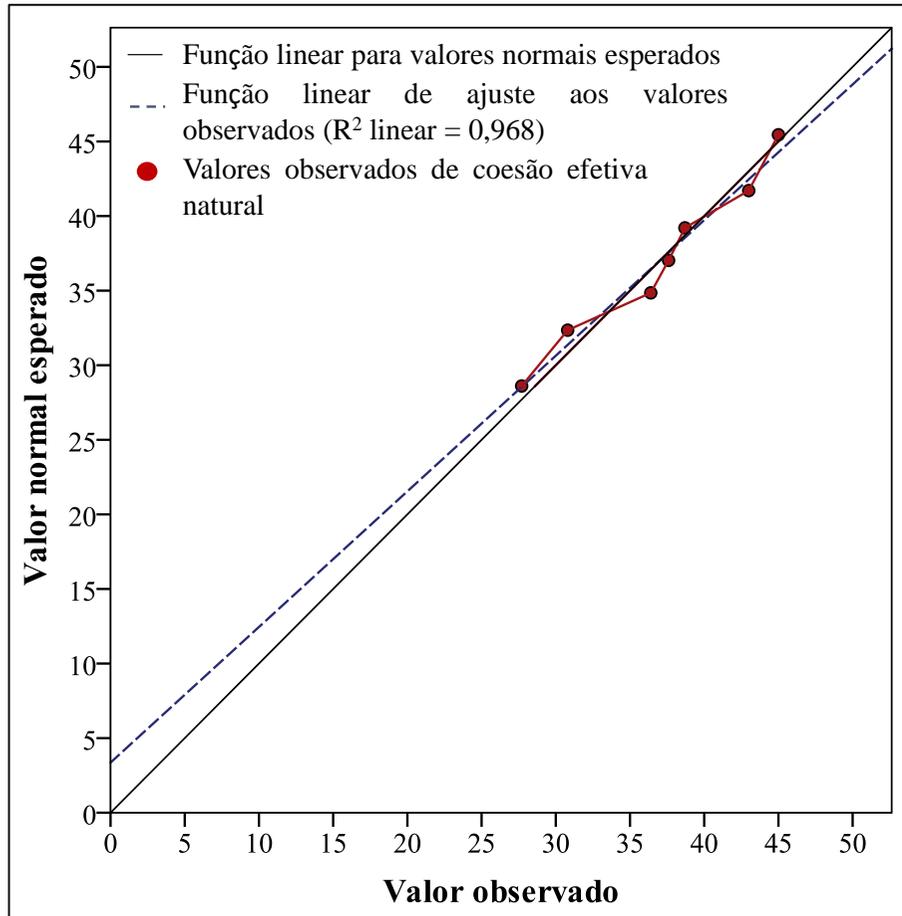


Figura 4.36 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito saturado da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

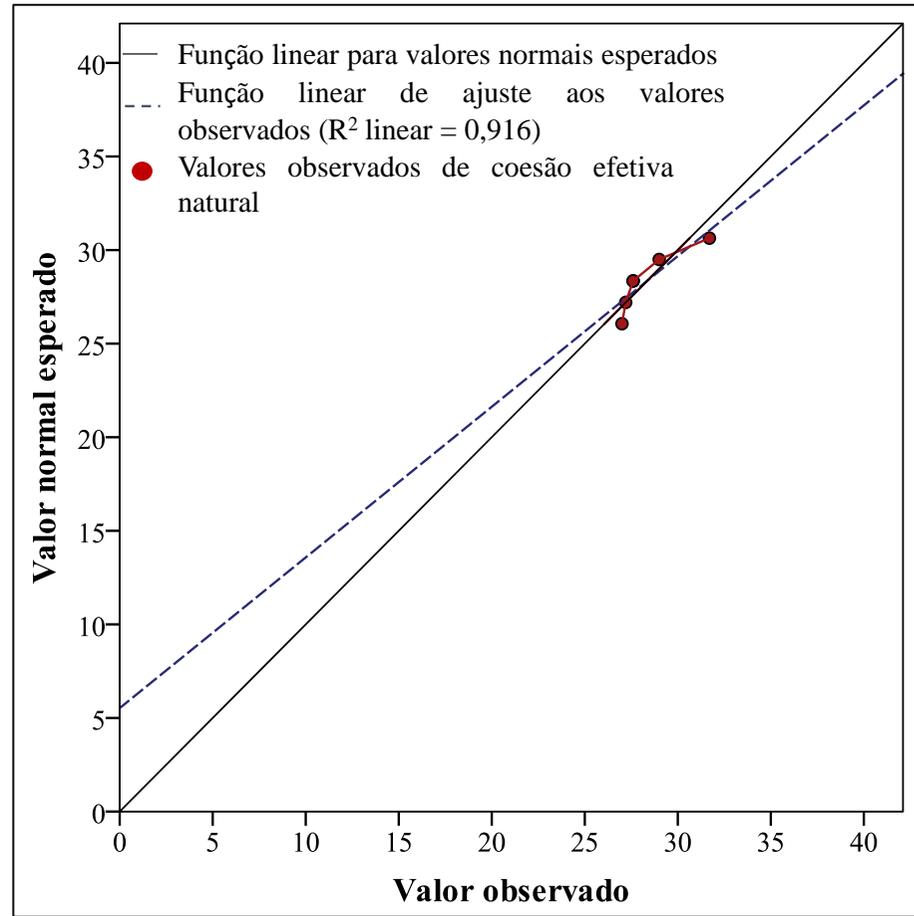


Figura 4.37 Histograma de frequência e distribuição probabilística do ângulo de atrito natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras)

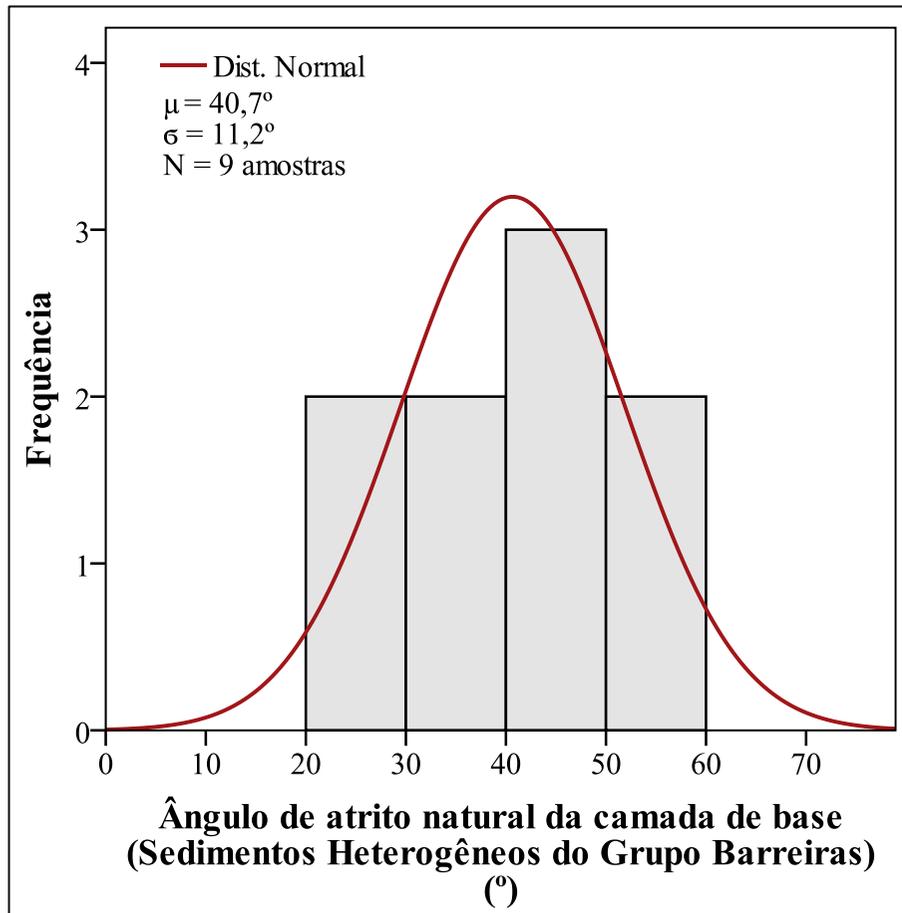


Figura 4.38 Histograma de frequência e distribuição probabilística do ângulo de atrito saturado da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras)

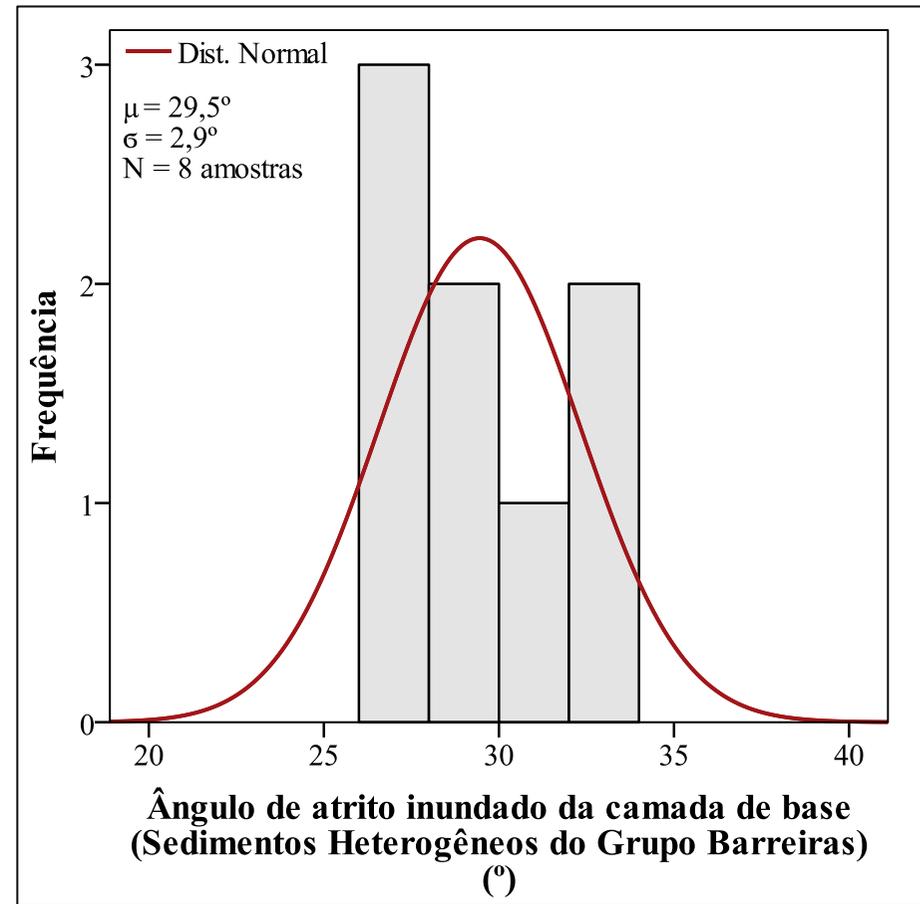


Figura 4.39 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras)

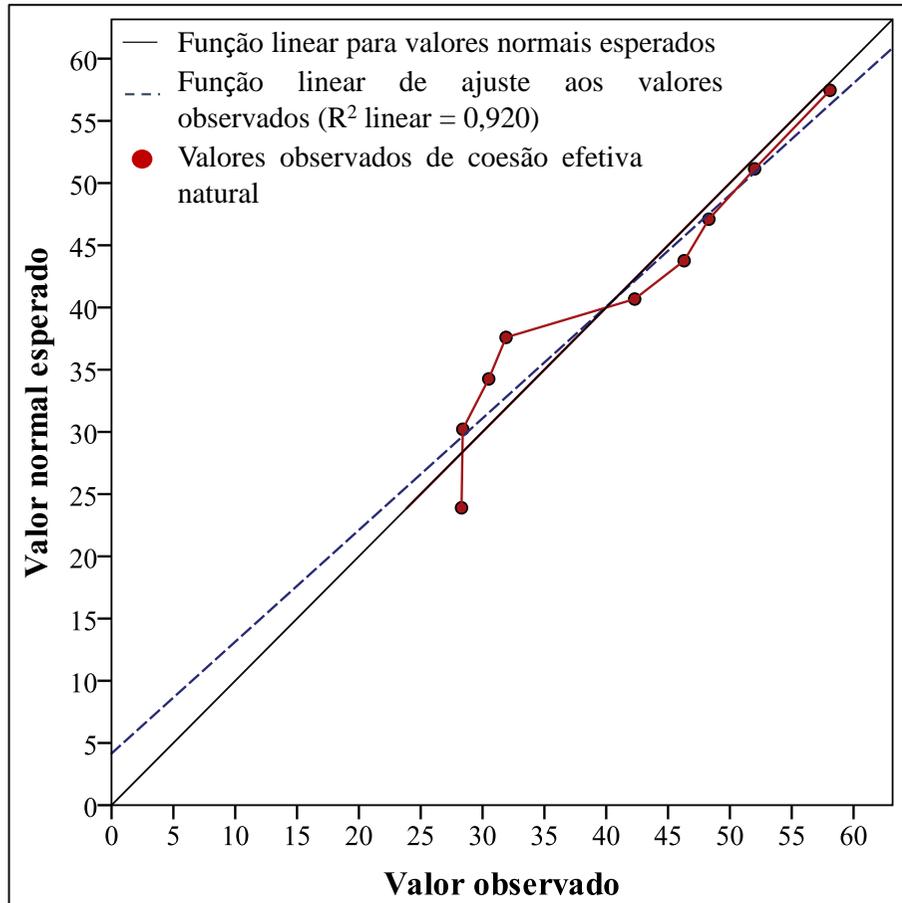


Figura 4.40 Teste Q-Q da variável ângulo de atrito saturado da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras)

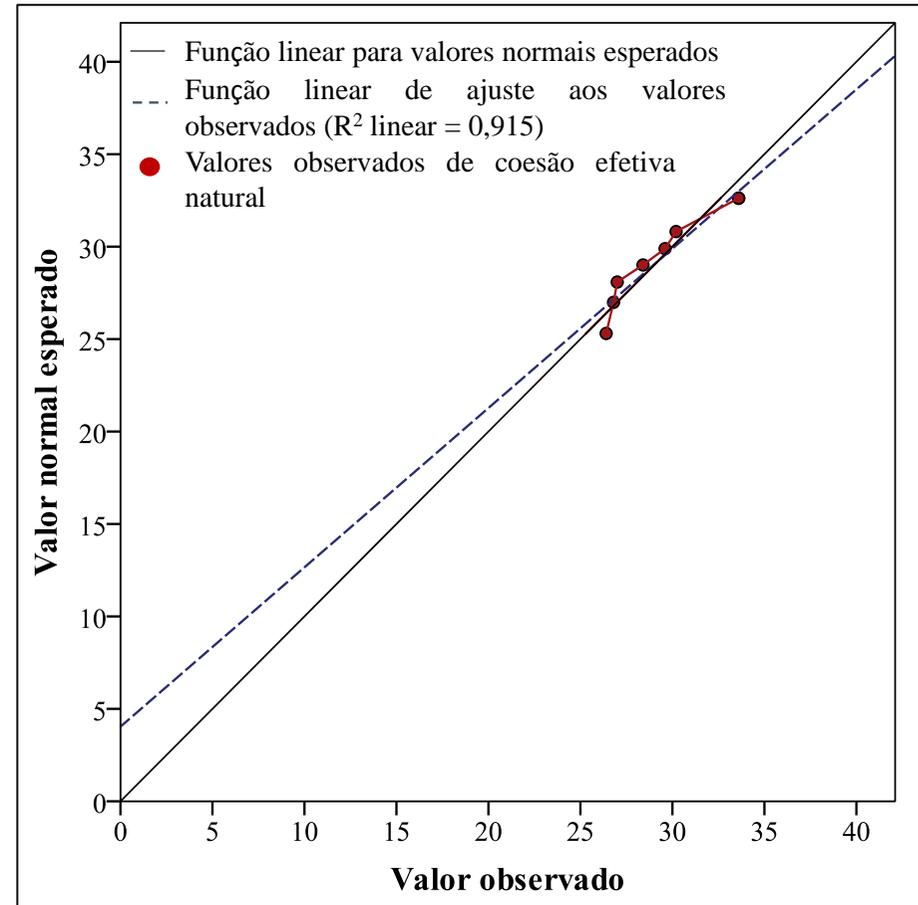


Figura 4.41 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)

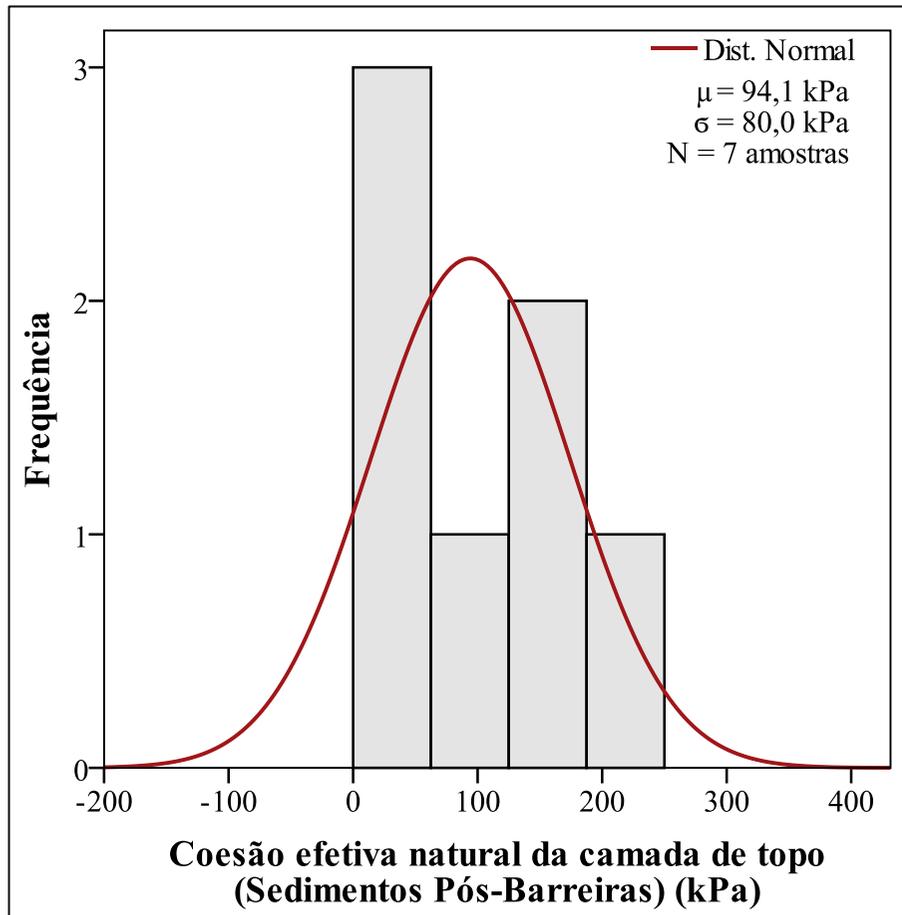


Figura 4.42 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva saturada da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)

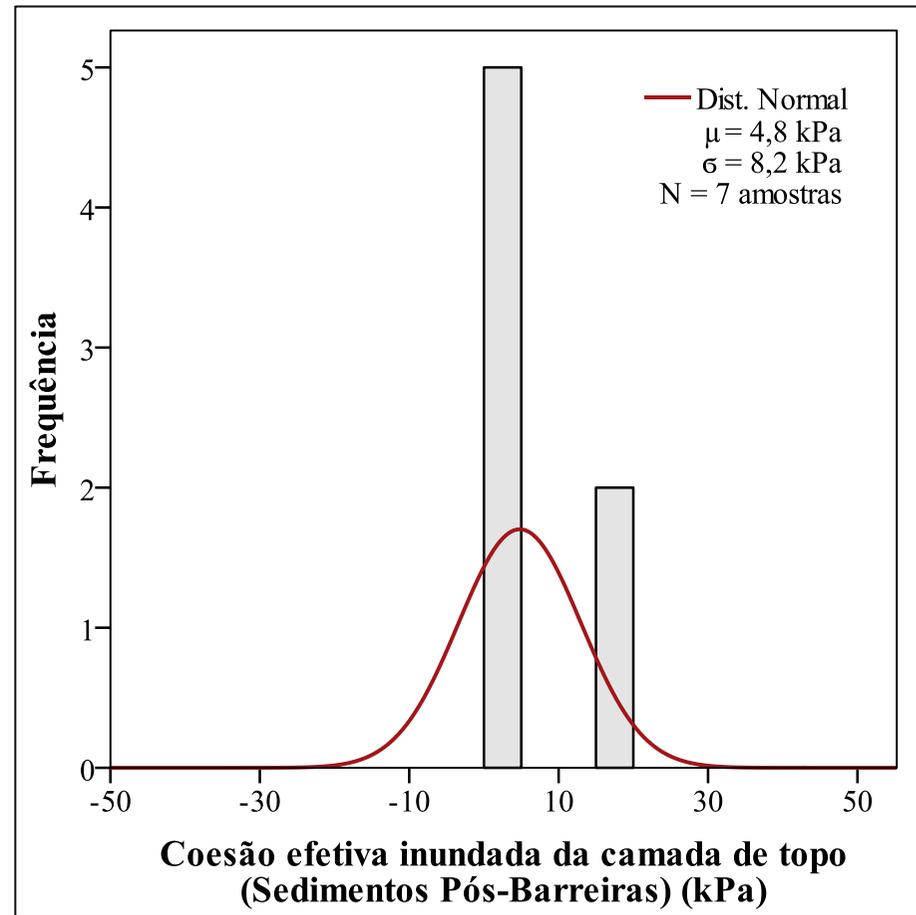


Figura 4.43 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)

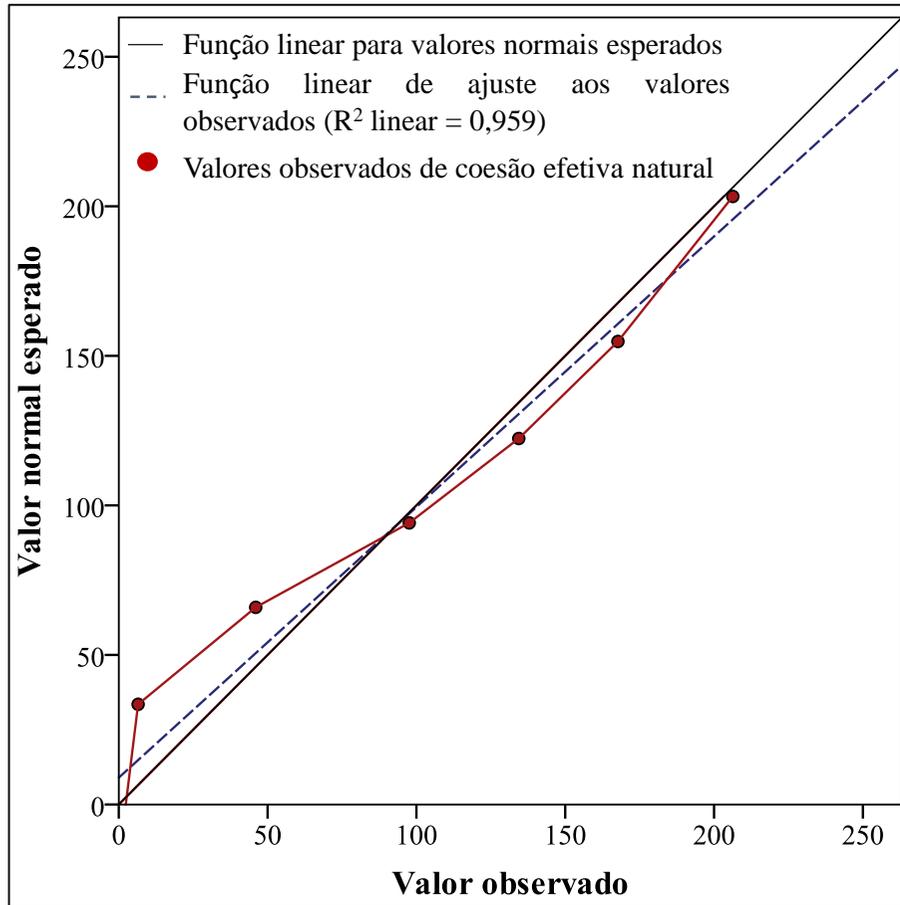


Figura 4.44 Teste Q-Q da variável coesão efetiva saturada da camada de topo (Sedimentos Pós-Barreiras)

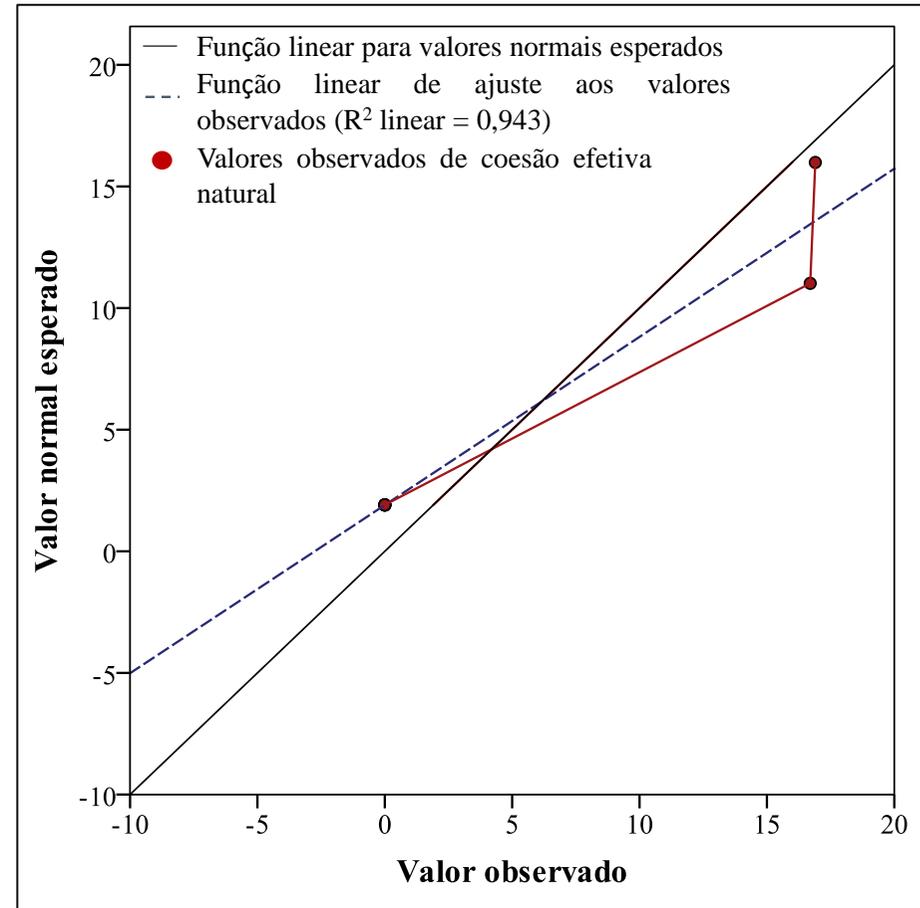


Figura 4.45 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

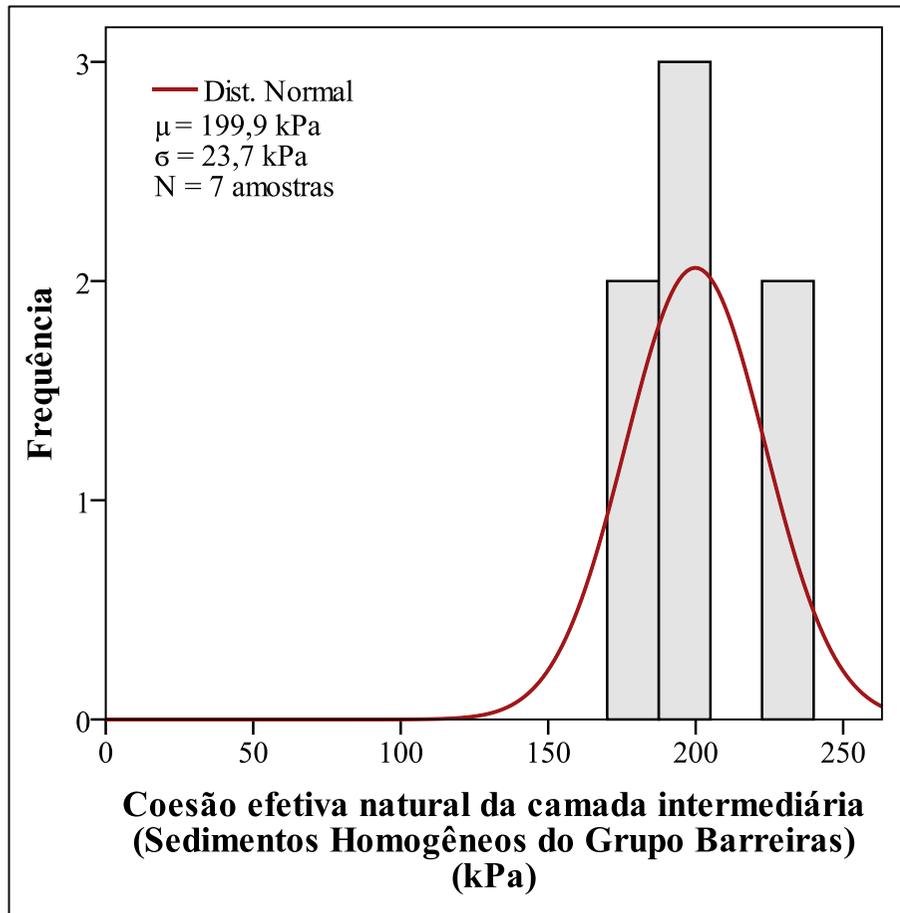


Figura 4.46 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva saturada da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

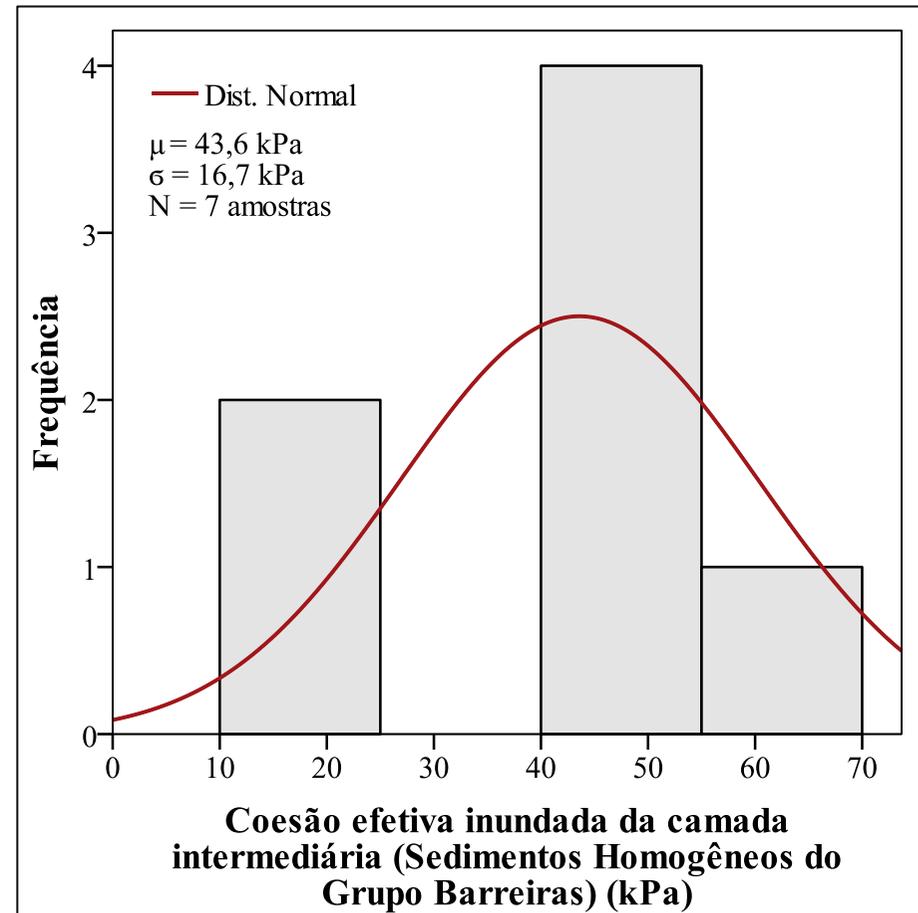


Figura 4.47 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

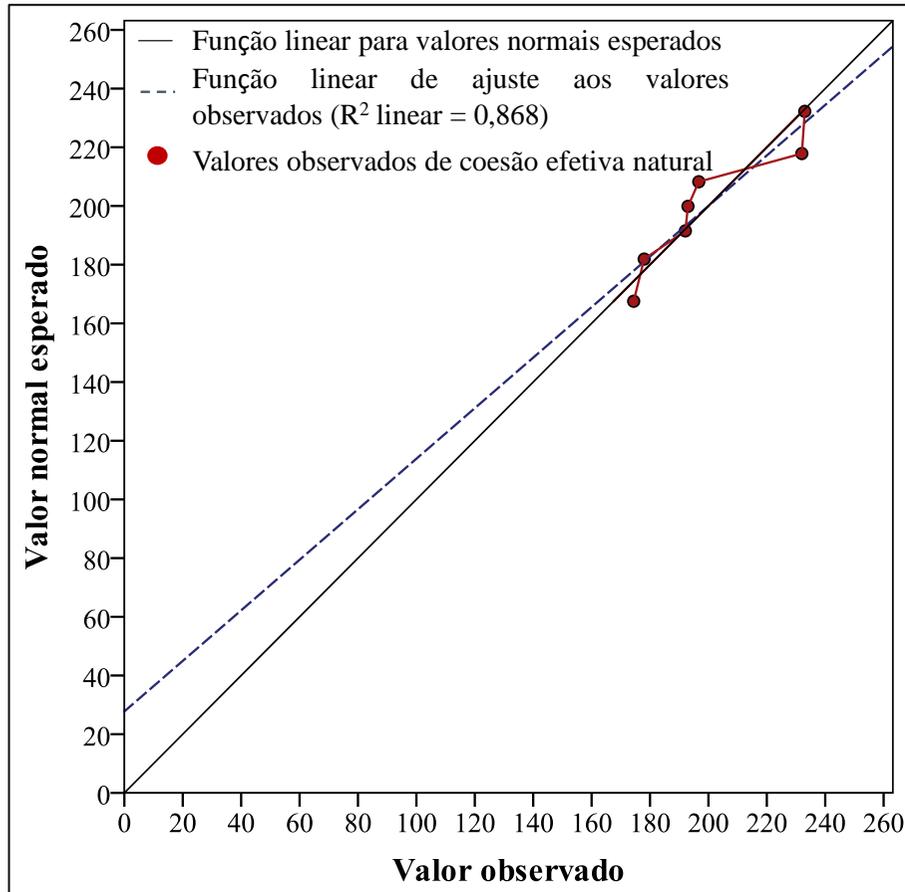


Figura 4.48 Teste Q-Q da variável coesão efetiva saturada da camada intermediária (Sedimentos Homogêneos do Grupo Barreiras)

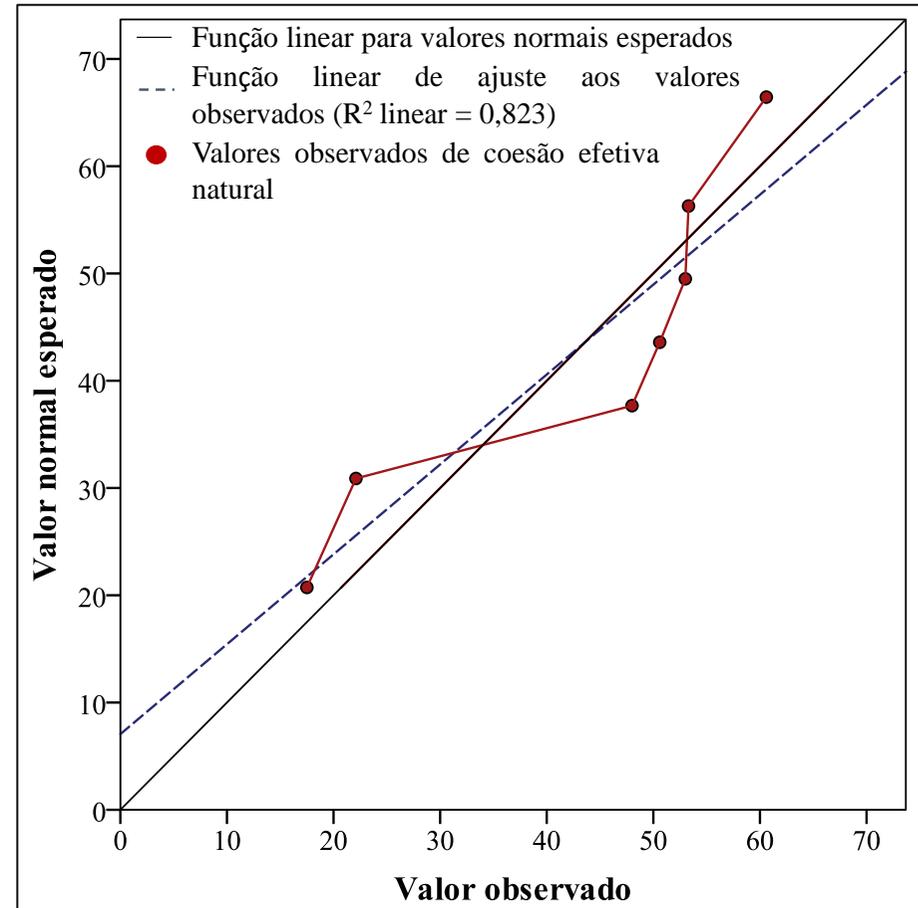


Figura 4.49 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras)

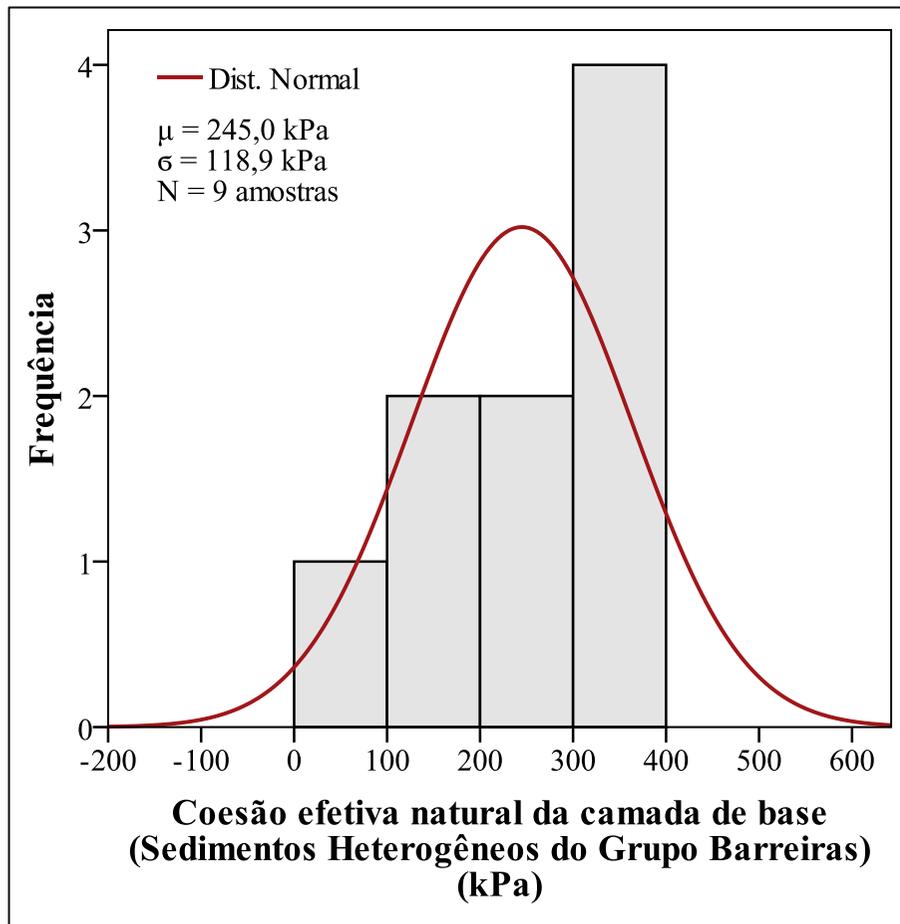


Figura 4.50 Histograma de frequência e distribuição probabilística da variável coesão efetiva saturada da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras)

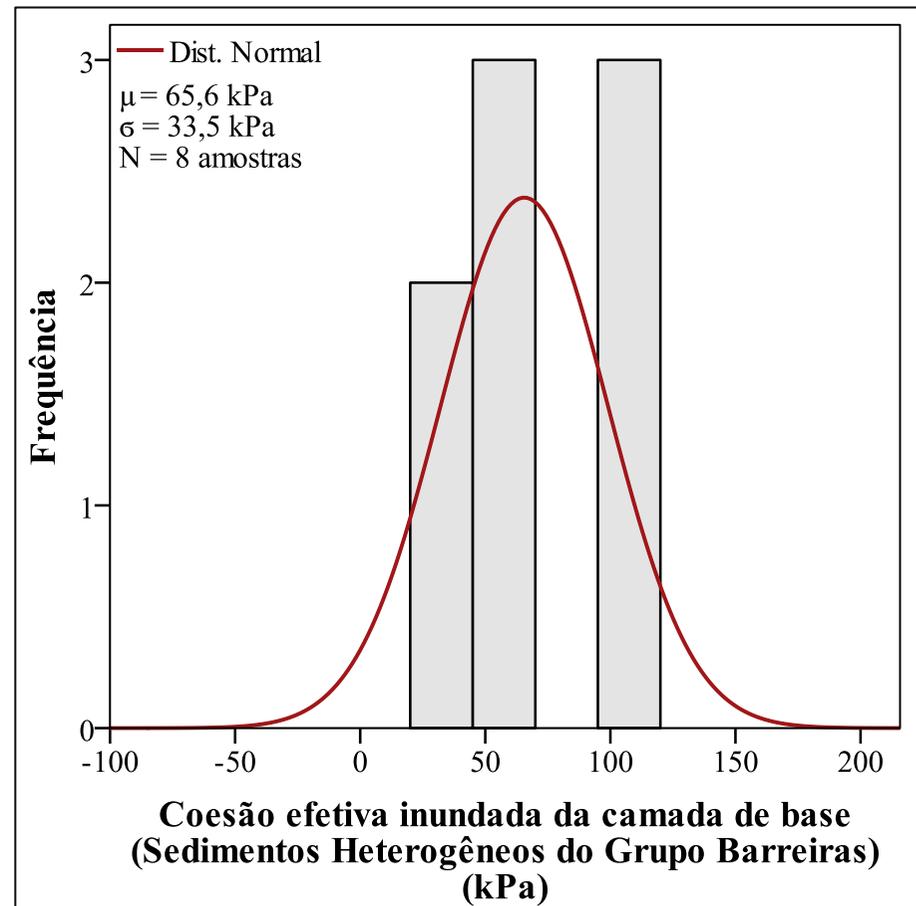


Figura 4.51 Teste Q-Q da variável coesão efetiva natural da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras).

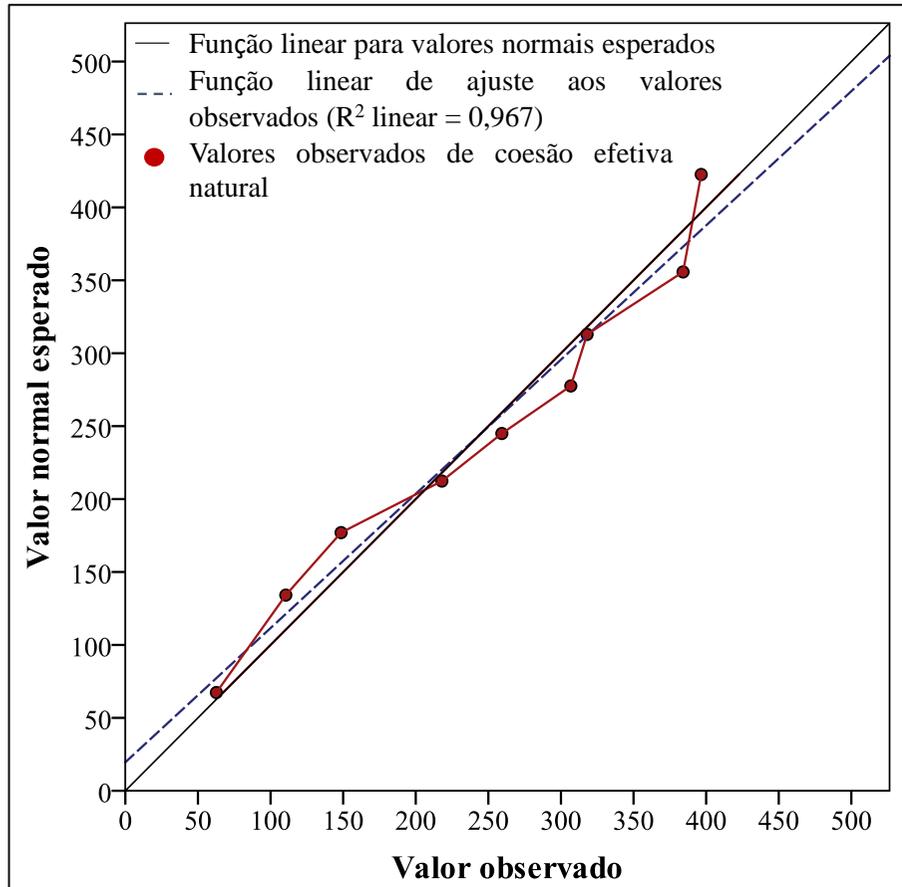
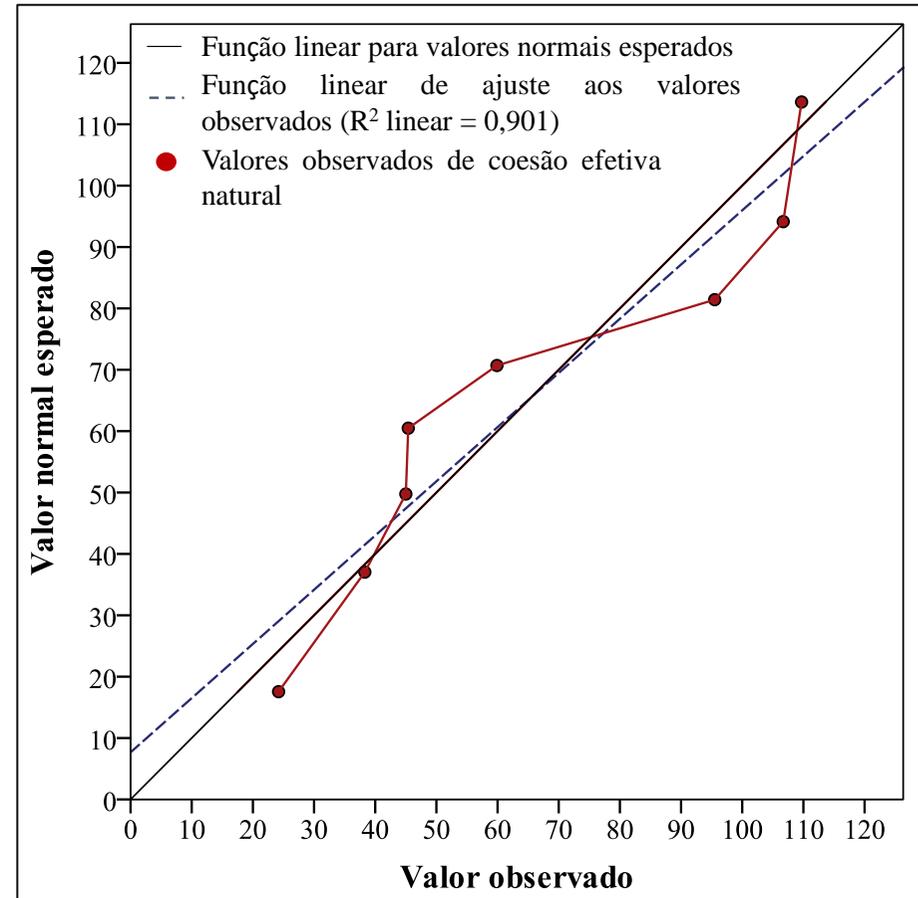


Figura 4.52 Teste Q-Q da variável coesão efetiva saturada da camada de base (Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras).



Para finalizar o tratamento estatístico das variáveis de entrada no *software* Slide, deve-se selecionar uma distribuição estatística que melhor se adeque a cada variável e indicar seus valores mínimos e máximos. Como a distribuição estatística adotada foi a Normal, por ter demonstrado ajuste aceitável aos dados categorizados, a Rocscience (2018) recomenda, na definição dos limites de variação das variáveis aleatórias, a utilização de uma variação de mais ou menos três desvios padrão em torno da média, para garantir que a função paramétrica obtida das análises seja respeitada.

No entanto, ressalta-se que para a coesão não foi possível atender à sugestão da Rocscience tendo em vista que essa variável, caso obedecesse à regra dos três desvios, passaria a assumir valores negativos, situação incompatível com os dados do solo extraídos da literatura. Dessa forma, a função paramétrica obtida foi truncada a partir de 0 kPa, de modo a permitir ao Slide testar apenas valores positivos para esse parâmetro.

A Tabela 4.23 traz um resumo dos dados de entrada inseridos no Slide 7.0.

Tabela 4.23 Caracterização estatística dos dados por litologia

Parâmetro	Ângulo de atrito			Coesão (kPa)			Peso específico (kN/m ³)
	μ	CV	σ	μ	CV	σ	
Sedimentos Pós Barreiras na condição natural	33,8	22,8 %	±7,7	94,1	85%	±80,0	18,0
Sedimentos Pós Barreiras na condição inundada	32,6	8,3%	±2,7	4,8	170%	±8,2	19,0
Camada homogênea da Formação Barreiras na condição natural	37,0	16,8 %	±6,2	199,9	11,85 %	±23,7	17,0
Camada homogênea da Formação Barreiras na condição inundada	28,4	6,3%	±1,8	43,6	38,3 %	±16,7	20,0
Camada heterogênea da Formação Barreiras na condição natural	40,7	27,5 %	±11,2	245,0	48,5 %	±118,9	19,0
Camada heterogênea da Formação Barreiras na condição inundada	29,5	9,8%	±2,9	65,6	51,1 %	±33,5	20,5

μ - Média aritmética; σ = Desvio-padrão; CV= Coeficiente de variação;

4.3.3. Modelagem numérica dos taludes

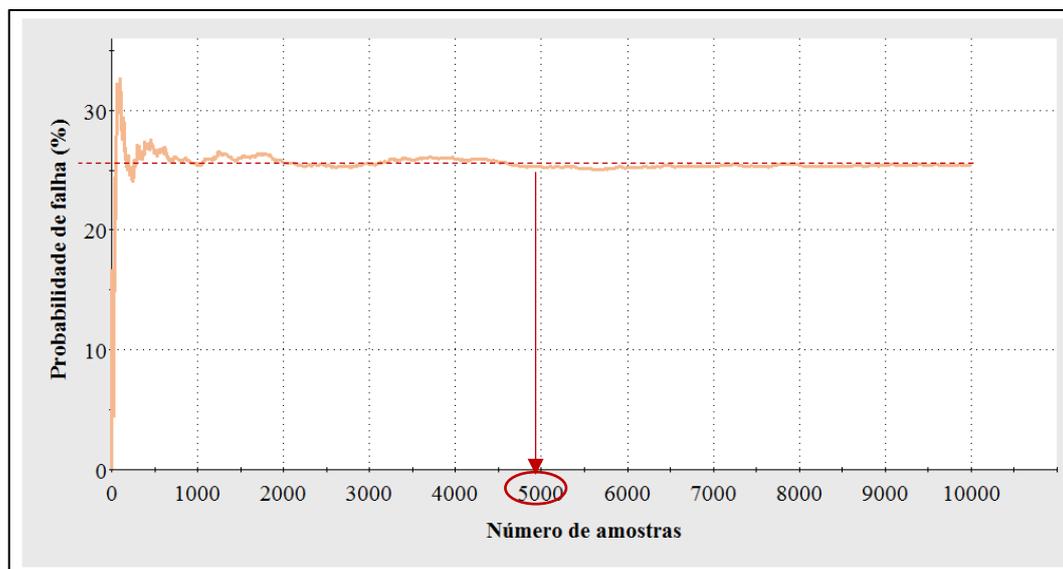
O *software* utilizado nas análises probabilísticas foi o Slide, versão 7.0, da Rocscience. Um programa de análise de estabilidade que além de calcular o fator de segurança, fornece a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade de superfícies circulares e não circulares, utilizando os métodos baseados na Teoria do Equilíbrio Limite que utilizam fatias verticais, como Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern e Price, Sarma e outros (ROCSCIENCE, 2018).

Para obtenção da probabilidade de falha e do índice de confiabilidade foi empregado o método de Monte Carlo para calcular a distribuição de probabilidade do FS, utilizando a superfície potencial de ruptura que obteve o menor FS nas análises determinísticas tradicionais.

Esse FS, obtido quando todos os parâmetros de entrada são iguais às suas médias, é recalculado N vezes, onde N é o número de “amostras”, informação a ser definida pelo usuário, aplicando em cada análise um conjunto diferente de variáveis geradas aleatoriamente.

Com o objetivo de descobrir o número ideal de amostras “N” para as análises aqui desenvolvidas, utilizou-se a ferramenta Gráfico de Convergência a qual indicou que a partir de 5000 amostras os resultados finais da análise probabilística convergiam para a estabilidade, ou seja, para seus valores finais, como indica a Figura 4.53, correspondente a seção de análise número três modelada na condição natural.

Figura 4.53 Gráfico de convergência para a seção de análise 03, com solo sob condição saturada



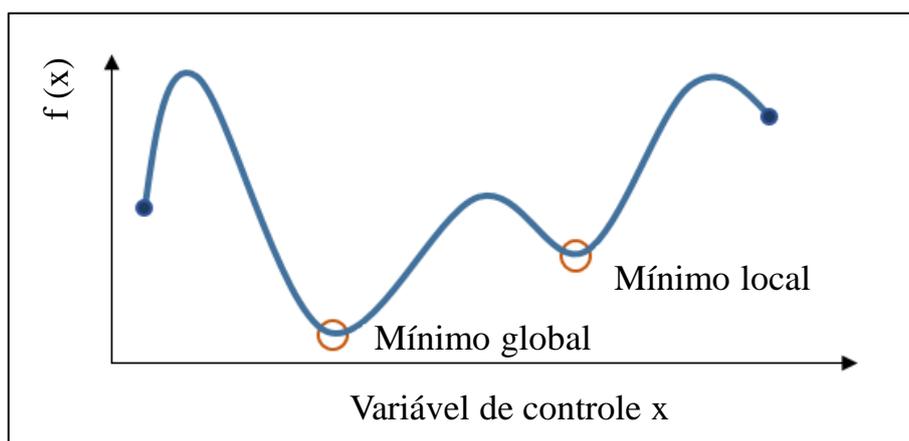
De acordo com a Rocscience (2018), no Slide versão 7.0 existem diferentes métodos de pesquisa disponíveis para realizar a busca pelas superfícies potenciais de ruptura, sejam elas circulares ou não. No entanto, para definir o método mais adequado à análise, é necessário inicialmente determinar se a superfície de ruptura será do tipo circular ou não-circular.

Assim, considerando a recomendação da Rocscience (2018) pela aplicação de superfícies de ruptura circulares apenas em análises de taludes homogêneos (com um único material), optou-se, nesse estudo, pelo emprego da **superfície não-circular**. Para esse tipo de superfície, existem os métodos de busca globais (*Simulated Annealing* e *Cuckoo Search*) e locais (*Path Search*, *Block Search*, e *Monte Carlo Optimization*).

Os métodos globais, recomendados pela Rocscience (2018) para resolução de problemas complexos de estabilidade de encosta, testam todas as regiões possíveis no espaço de busca, não ficando preso a mínimos locais e encontrando o verdadeiro mínimo global. Já os locais, como o próprio nome diz, por buscarem mínimos locais, não necessariamente testam todas as possibilidades de soluções, podendo ficar presos nos pontos de mínimo local, de modo a não encontrar o verdadeiro valor de FS mínimo global.

A Figura 4.54 ilustra a diferença entre mínimo global e local para uma função unidimensional.

Figura 4.54 Diferença entre mínimo global e local para uma função unidimensional



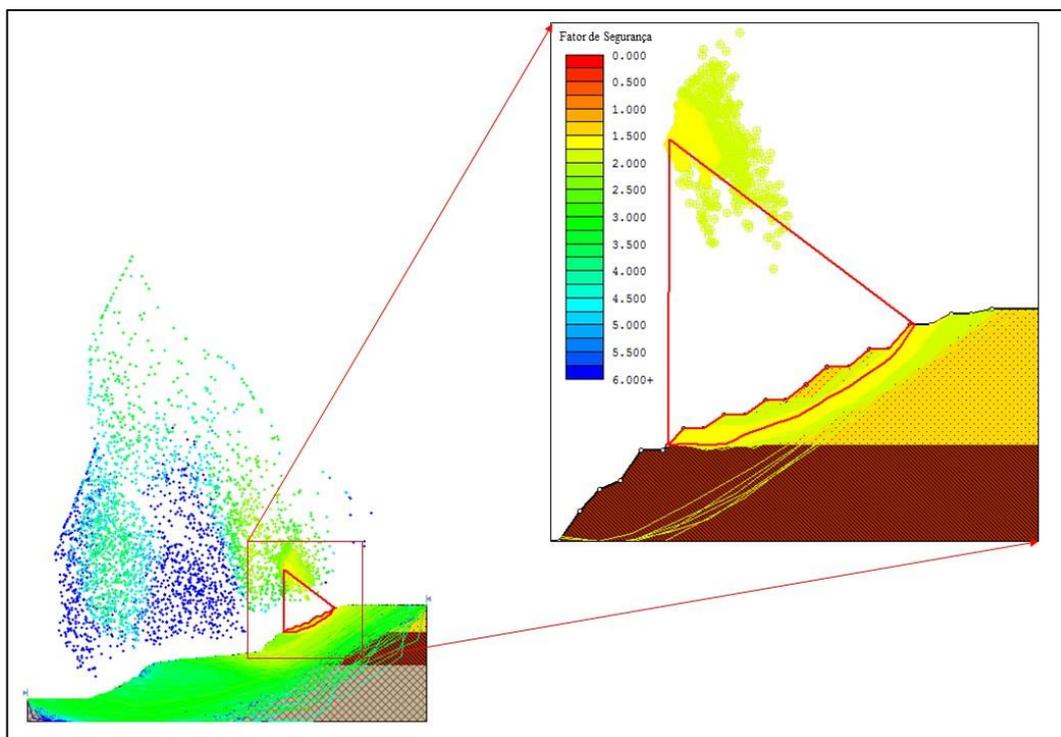
Fonte: Rocscience (2018)

Em função da acurácia nos resultados obtidos, velocidade de processamento, mais rápida que a do *Simulated Annealing*, e facilidade de utilização, a Rocscience (2018) sugere o emprego do procedimento de busca *Cuckoo Search*, dentro dos métodos globais para

superfícies não-circulares, o qual será utilizado neste trabalho aliado à técnica de otimização de superfície (*Optimize Surfaces*).

Ao contrário dos métodos de busca tradicionais, como o *Grid Search* e o *Slope Search*, que requerem que o usuário delimite a região da encosta onde a superfície de ruptura crítica será pesquisada, o *Cuckoo Search* busca a superfície com menor fator de segurança ao longo de toda a extensão do talude, conforme evidenciado na Figura 4.55.

Figura 4.55 Pesquisa por superfícies de ruptura ao longo de toda a extensão da encosta pelo Método Cuckoo Search



A superfície potencial de ruptura encontrada pelo *Cuckoo Search* foi então utilizada como ponto inicial da técnica de otimização de superfície, permitindo assim localizar o menor FS da encosta analisada. Os métodos de análise utilizados nesta pesquisa e recomendados pela Rocscience (2018) para a análise de superfícies de ruptura não-circulares são **Janbu Corrigido, Spencer e GLE/Morgenstern-Price**.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PESOS ATRIBUÍDOS PELO MÉTODO AHP

As comparações par a par dos indicadores de risco e suas respectivas classes de atributos com aplicação do AHP foram realizadas pela autora deste trabalho juntamente com 10 especialistas na área de gerenciamento de riscos em encostas. Os julgamentos paritários realizados pelos especialistas para a aplicação do AHP são apresentados no Apêndice C.

A Tabela 5.1 traz o resultado das comparações par a par realizadas, expressa através dos pesos obtidos para os indicadores de risco e suas respectivas classes de atributos. Esses pesos representam a ordem de importância de cada um dos indicadores de risco na ocorrência dos processos de movimento de massa na encosta urbana ocupada pela Comunidade São José do Jacó.

Tabela 5.1 Pesos obtidos para os indicadores de risco e suas respectivas classes

Indicadores de risco	Pesos (%)	Classes	Pesos
Amplitude	3,21%	$A \leq 10$ m	8,82%
		10 m < $A < 20$ m	24,31%
		$A \geq 20$ m	66,87%
Inclinação	5,79%	$I \leq 10^\circ$	8,33%
		$10^\circ < I < 20^\circ$	19,32%
		$I \geq 20^\circ$	72,35%
Morfologia em Planta	2,11%	Convexa	12,01%
		Retilínea	13,43%
		Côncava	74,56%
Morfologia em Perfil	2,15%	Convexa	20,00%
		Retilínea	20,00%
		Côncava	60,00%
Uso/cobertura do solo	8,63%	Arbórea	6,38%
		Campo/cultura	6,71%
		Cobertura urbana	30,77%
		Solo exposto	56,15%

(continua)

Tabela 5.1 Pesos obtidos para os indicadores de risco e suas respectivas classes (continuação)

Indicadores de risco	Pesos (%)	Classes	Pesos
Presença de água superficial	2,22%	Concentração baixa	10,62%
		Concentração média	26,05%
		Concentração alta / Linha de Drenagem	63,33%
Surgência de água no perfil da encosta	11,69%	Observado	87,50%
		Não Observado	12,50%
Feições de instabilidade	19,90%	Observado	87,50%
		Não Observado	12,50%
Material do substrato	11,51%	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	7,39%
		Depósitos eólicos litorâneos não vegetados	46,56%
		Depósitos arenosos e areno-argilosos	19,58%
		Depósitos flúvio-marinhos	14,42%
		Grupo Barreiras	12,06%
Estrutura geológica	12,16%	Favorável à estabilidade	8,82%
		Desfavorável	66,87%
		Não Observada	24,31%
Densidade demográfica	20,64%	Local inabitado	4,17%
		0 hab/ha < (DEN) ≤ 50	13,30%
		50 hab/ha < (DEN) ≤ 300	26,76%
		(DEN) > 300 hab/hectare	55,77%

Nas Tabelas 5.2 a 5.11, é apresentado um resumo dos resultados das análises de sensibilidade para todos os critérios, à exceção da Surgência de água na encosta e a Presença de Feições de Instabilidade, que por apresentarem apenas duas subclasses impossibilitam o cálculo da Razão de Consistência.

Tabela 5.2 Análise de sensibilidade da matriz recíproca dos indicadores de risco

Análise de sensibilidade – Indicadores de risco	
Ordem da Matriz	11,00
Autovalor máximo (λ máx)	12,09
Índice de Consistência Aleatória (CA)	1,53
Índice de Consistência (IC)	0,1086
Razão de consistência (RC)	7,10 %

Tabela 5.3 Análise de sensibilidade do indicador Amplitude

Análise de sensibilidade - Amplitude	
Ordem da Matriz	3,00
Autovalor máximo (λ máx)	3,01
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,58
Índice de Consistência (IC)	0,01
Razão de consistência (RC)	0,93 %

Tabela 5.4 Análise de sensibilidade do indicador Inclinação

Análise de sensibilidade - Inclinação	
Ordem da Matriz	3,00
Autovalor máximo (λ máx)	3,11
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,58
Índice de Consistência (IC)	0,06
Razão de consistência (RC)	9,61 %

Tabela 5.5 Análise de sensibilidade do indicador Morfologia em Planta

Análise de sensibilidade - Morfologia em Planta	
Ordem da Matriz	3,00
Autovalor máximo (λ máx)	3,02
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,58
Índice de Consistência (IC)	0,01
Razão de consistência (RC)	1,93 %

Tabela 5.6 Análise de sensibilidade do indicador Morfologia em Perfil

Análise de sensibilidade - Morfologia em Perfil	
Ordem da Matriz	3,00
Autovalor máximo (λ máx)	3,00
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,58
Índice de Consistência (IC)	$2,22 \times 10^{-16}$
Razão de consistência (RC)	0,00 %

Tabela 5.7 Análise de sensibilidade do indicador Uso e Cobertura do Solo

Análise de sensibilidade - Uso e Cobertura do Solo	
Ordem da Matriz	4,00
Autovalor máximo (λ máx)	4,20
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,90
Índice de Consistência (IC)	0,07
Razão de consistência (RC)	7,57 %

Tabela 5.8 Análise de sensibilidade do indicador Presença de Água Superficial

Análise de sensibilidade - Presença de Água Superficial	
Ordem da Matriz	3,00
Autovalor máximo (λ máx)	3,06
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,58
Índice de Consistência (IC)	0,03
Razão de consistência (RC)	4,77 %

Tabela 5.9 Análise de sensibilidade do indicador Material do Substrato

Análise de sensibilidade - Material do Substrato	
Ordem da Matriz	5,00
Autovalor máximo (λ máx)	5,48
Índice de Consistência Aleatória (CA)	1,12
Índice de Consistência (IC)	0,12
Razão de consistência (RC)	10,70 %

Tabela 5.10 Análise de sensibilidade do indicador Estrutura Geológica

Análise de sensibilidade - Estrutura Geológica	
Ordem da Matriz	3,00
Autovalor máximo (λ máx)	3,01
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,58
Índice de Consistência (IC)	0,01
Razão de consistência (RC)	0,93 %

Tabela 5.11 Análise de sensibilidade do indicador Densidade Demográfica

Análise de sensibilidade – Densidade Demográfica	
Ordem da Matriz	4,00
Autovalor máximo (λ máx)	4,26
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0,90
Índice de Consistência (IC)	0,09
Razão de consistência (RC)	9,46 %

O resultado da Razão de Consistência (RC), obtido por meio da análise de sensibilidade dos julgamentos dos indicadores de risco e de suas respectivas classes, foi inferior a 10% para todos os critérios estudados, conforme recomenda a metodologia AHP proposta por Saaty, indicando um nível de consistência aceitável nas comparações realizadas, com exceção do indicador Material do Substrato que apresentou valor, apesar de superior ao limite, bem próximo dele.

Outros dois indicativos da confiabilidade existente nos julgamentos realizados pelos especialistas são, em primeiro lugar, um valor de Índice de Consistência (IC) próxima a zero e a aproximação do valor do autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) à ordem da matriz de comparação. Essa última consideração deriva do corolário adotado no desenvolvimento do método AHP, por Saaty (1977), e considera que uma matriz recíproca A com valores de entrada positivos só é consistente se, e somente se, $\lambda_{\text{máx}} = n$.

No que se refere a ordem de importância dos indicadores, conforme apresentado na Tabela 5.1, temos, em primeiro lugar, a densidade demográfica, parâmetro representativo da exposição da população, com peso de 20,64 %, em segundo, a existência de feições de instabilidade na área de estudo (peso de 19,90%); seguidos da estrutura geológica (12,16%); surgência de água no perfil da encosta (11,69%); material que compõe o substrato (11,51%); uso e cobertura (8,63%); inclinação (5,79%); amplitude (3,21%); presença de água superficial (2,22%), e, por fim, morfologia em perfil e em planta (2,15% e 2,11%, respectivamente).

Levando em consideração o fato de que essa pesquisa trata da avaliação do risco geotécnico, e, partindo do pressuposto que para esse tipo de mapeamento é necessário considerar a exposição dos elementos em risco, dado neste trabalho pelo critério densidade demográfica, já era de se esperar que esse indicador estivesse ranqueado entre os mais importantes, ou seja, de maior influência no risco de ocorrência movimentos de massa, tendo em vista que se não houver exposição da população à ocorrência de um evento potencialmente danoso em determinada área, não há risco.

Esse mesmo padrão de comportamento no que se refere a importância do peso do indicador de vulnerabilidade em detrimento dos demais critérios em uma análise de risco pôde ser constatado em outros trabalhos que analisaram o risco de ocorrência de deslizamentos ou de ocorrência de outros processos de movimentação de massa, a exemplo de Abella e Van Westen (2007), que obtiveram em um mapeamento de risco desenvolvido em Cuba, 45,67% de importância para o critério densidade populacional, principal indicador da vulnerabilidade social.

De forma semelhante, Donassollo (2017), em um estudo de caso desenvolvido na rodovia RS-115, em Gramado/RS, com o objetivo de caracterizar o perigo de movimentos de massa em solo nos taludes rodoviários da área de estudo, obteve 15,1% de importância para o indicador de vulnerabilidade desse estudo, representado pela variável “Estruturas afetadas em caso de ocorrência de evento”, assumindo a posição de principal agente, entre os analisados pelo autor, para geração do movimento.

Os resultados alcançados nesse trabalho para o indicador presença de feições de instabilidade na encosta, considerado segundo parâmetro mais importante pelos especialistas, são compatíveis àqueles alcançados por Taquez (2017).

Entre os atributos ambientais naturais considerados na análise que afetam a estabilidade da encosta, a inclinação, tratada como declividade em outros trabalhos, apresentou peso maior que os demais (amplitude, morfologia em perfil e em planta), corroborando com resultados obtidos por trabalhos com enfoque no estudo da suscetibilidade e do perigo, a exemplo de Tominaga (2007), Abella e Van Westen (2007), Faria (2011), Pinto, Passos e Caneparo (2015), Taquez (2017), dentre outros.

Ao comparar os resultados dos pesos dos indicadores morfologia da encosta, em planta e em perfil, é possível notar que ambos desempenham papel similar no favorecimento à ocorrência de movimentos de massa.

Com relação às características dos solos e aos aspectos geológicos, nesse estudo representado pela estrutura geológica e o tipo de solo ou material que compõe o substrato da encosta, o resultado alcançado para os pesos desses indicadores aponta para existência de um outro grupo de características naturais da área de estudo de maior importância que o anterior na geração do risco.

Partindo agora para a análise das subclasses de cada indicador, atribui-se o maior peso para a Amplitude ao maior valor desse critério, ou seja, à classe de amplitude maior que 20 metros, a qual obteve peso de 66,87%; seguida da classe entre 10 e 20 metros com peso de 24,31% e da classe de amplitude menor ou igual a 10 metros, com peso de 8,82%, valores próximos aos obtidos por Faria (2011) e Taquez (2017).

Quanto à inclinação, assim como observado para a amplitude, a maior importância foi atribuída à classe com maior inclinação, condição crítica na deflagração dos movimentos de massa. Para a classe de inclinação com ângulo maior que 20°, o peso foi de 72,35%; para inclinação entre 10° e 20°, 19,32% e para inclinação menor ou igual a 10°, 8,33%, resultados também próximos aos alcançados por Faria (2011).

Analisando os resultados observados para o parâmetro morfologia em planta, a encosta que apresenta forma côncava possui maior influência na geração do risco (peso 74,56%), tendo em vista que esse modelo provoca a convergência das linhas de fluxo de água e de sedimentos para a parte central da região.

As outras duas formas, retilínea e convexa apresentaram pesos bastante aproximados (13,43% e 12,01%, respectivamente), indicando pouca diferença no padrão de comportamento de encostas com essas duas morfologias. Resultados semelhantes podem ser

observados nos estudos desenvolvidos por Silva Junior *et al.* (2014) e Effgen e Marchioro (2017).

No que se refere a morfologia em perfil, também chamada de curvatura vertical, o talude que apresenta forma côncava possui maior importância para a ocorrência de um processo de movimentação de massa, obtendo, em decorrência disso, maior peso (60,00%) na análise realizada pelos especialistas, visto que esse modelo provoca a aceleração do fluxo d'água, expondo a encosta a processos erosivos quando da ocorrência de precipitações intensas. As outras duas formas, retilínea e convexa apresentaram pesos iguais (20%). Resultados semelhantes podem ser constatados mais uma vez em Silva Junior *et al.* (2014).

A maior importância para o indicador uso/cobertura do solo foi atribuída à classe sem cobertura, ou seja, com solo exposto, representando condição crítica na deflagração dos escorregamentos. Os resultados do autovetor, em ordem de importância das classes foram: solo exposto (com peso de 56,15 %); cobertura urbana (com peso de 30,77 %); campo/cultura (com peso de 6,71 %) e cobertura arbórea (com peso de 6,38%).

Em relação às classes da presença de água superficial, de acordo com os julgamentos paritários, o resultado do autovetor em ordem de importância foi: linha de drenagem/concentração alta com peso de 63,33%; seguida da concentração média com 26,05% e concentração baixa com 10,62%, valores semelhantes aos observados por Faria (2011) e Taquez (2017).

5.2. MAPAS ELABORADOS

A avaliação e mapeamento de risco foi realizado, neste trabalho, seguindo a proposta de Einstein (1988), o qual sugere, para realização de um mapeamento de riscos adequado, o cumprimento de cinco etapas, são elas: elaboração de mapas do estado da natureza; mapas de inventário de escorregamentos; mapas de perigo; mapas de risco; e mapas de gerenciamento de movimentos de massa. Das cinco etapas propostas por Einstein (1988), quatro delas foram realizadas e serão apresentadas nessa fase de resultados e discussão.

Dessa forma, inicialmente serão apresentados os mapas temáticos elaborados (nível I), incluindo o mapa de feições de instabilidade, nível II da proposta de Einstein (1988), em seguida será discutido o mapa de perigo (nível III), representando o potencial do terreno em gerar movimentos de massa, função das características físicas do ambiente; o mapa de vulnerabilidade, designando condições e características sociais da população, neste caso, a densidade demográfica, e, por fim, o mapa de risco (nível IV).

A partir dos mapas temáticos, buscou-se também tentar compreender a influência de cada indicador no risco de ocorrência de movimentos de massa. Para isso, o trabalho utilizou o Método Estatístico Bivariado, descrito por Soeters e Van Westen (1996), o qual baseia-se no diagnóstico dos locais em que é possível observar feições de instabilidade e na correlação espacial delas com características físicas e de ocupação da encosta potencialmente favoráveis a tais processos, para que sejam feitas predições para áreas livres de feições anteriores, onde se observam condições similares.

A respeito da identificação e mapeamentos de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa, Pinto (2015), aponta que de 36 trabalhos analisados cuja temática incide sobre o gerenciamento de áreas de suscetibilidade, perigo e risco de movimentos de massa, considerável quantidade dos trabalhos consultados, 18 pesquisas, utilizaram como base o mapa de feições de instabilidade com registros de eventos pretéritos para estabelecer correlações entre os diferentes atributos e a localização das cicatrizes identificadas e mapeadas.

Dessa forma, procedeu-se a realização de uma tabulação cruzada entre cada um dos 06 critérios que possuem subclasses na área de estudo (amplitude, inclinação, morfologia em planta e em perfil, uso/cobertura do solo, densidade demográfica) e a frequência ou densidade de ocorrência de feições de instabilidade, obtendo-se um peso para cada parâmetro analisado, como mostra a Equação 24.

$$P_i = \frac{N_i}{N} \quad (\text{Equação 24})$$

Onde P_i refere-se ao peso da variável; N_i ao número de ocorrências de feições envolvendo a variável e N ao número total de ocorrência de feições de instabilidade na área.

5.2.1. Mapa de Inventário de Feições de Instabilidade

Um importante recurso para análise de risco de movimentos de massa é a elaboração de um inventário das cicatrizes de movimentação que ocorreram anteriormente na área objeto de estudo. Abella e Van Westen (2007) citam alguns exemplos existente na literatura de utilização de inventários de feições de instabilidade voltados à avaliação e ao gerenciamento de riscos.

Diante da relevância desse tipo de informação nos trabalhos de mapeamento de áreas de risco, perigo e suscetibilidade, decidiu-se elaborar um mapa de evidências de movimentações anteriores ocorridas no Jacó. Durante a visita a área de estudo, no entanto, não foi possível obter um cadastro de cicatrizes de movimentos de massa que ocorreram no passado.

O que se tem disponível é um levantamento das ocorrências registradas pela Defesa Civil Municipal, sobretudo após períodos de alta pluviosidade, e as informações obtidas pelas atividades de campo deste trabalho, as quais buscaram identificar informações, como patologias existentes nas edificações, que possam indicar a ocorrência ou a possibilidade de desenvolvimento de movimentos de massa na localidade.

Logo, para elaboração do Mapa de Feições de Instabilidade foram realizadas inspeções em 62 pontos da encosta, englobando moradias e a área da superfície da encosta, além das informações contidas nos Registros de Ocorrência fornecidos pela Defesa Civil Municipal. Do total de pontos inspecionados, foram constatados indícios de movimentação em 36 dos 62 locais analisados, o que representa 58,04%. Em termos de área de ocupação, observou-se a existência de feições de instabilidade em aproximadamente 78% da Comunidade.

Um resumo das informações acerca da presença e da frequência dessas feições observadas no Jacó é apresentado na Tabela 5.12. A Figura 5.1 traz um mapa com locação dos pontos de coleta de informações sobre a presença ou ausência de feições. Na Figura 5.2 é apresentado o Mapa de Feições de Instabilidade elaborado utilizando a Estimção de Densidade Kernel, conforme descrito no Item 4.2.7.d, para estimar, através de interpolação, a distribuição das feições pela área de estudo.

Tabela 5.12 Feições de Instabilidade observadas na Comunidade São José do Jacó

Indicador de risco	Classes	Área (ha)	% da área	Ni	N	Peso
Feições de Instabilidade	Observado	1,9704	77,57%	36	62	58,06%
	Não observado	0,5698	22,43%	26		41,94%

Figura 5.1 Pontos de coleta de informações sobre Feições de Instabilidade na Comunidade São José do Jacó

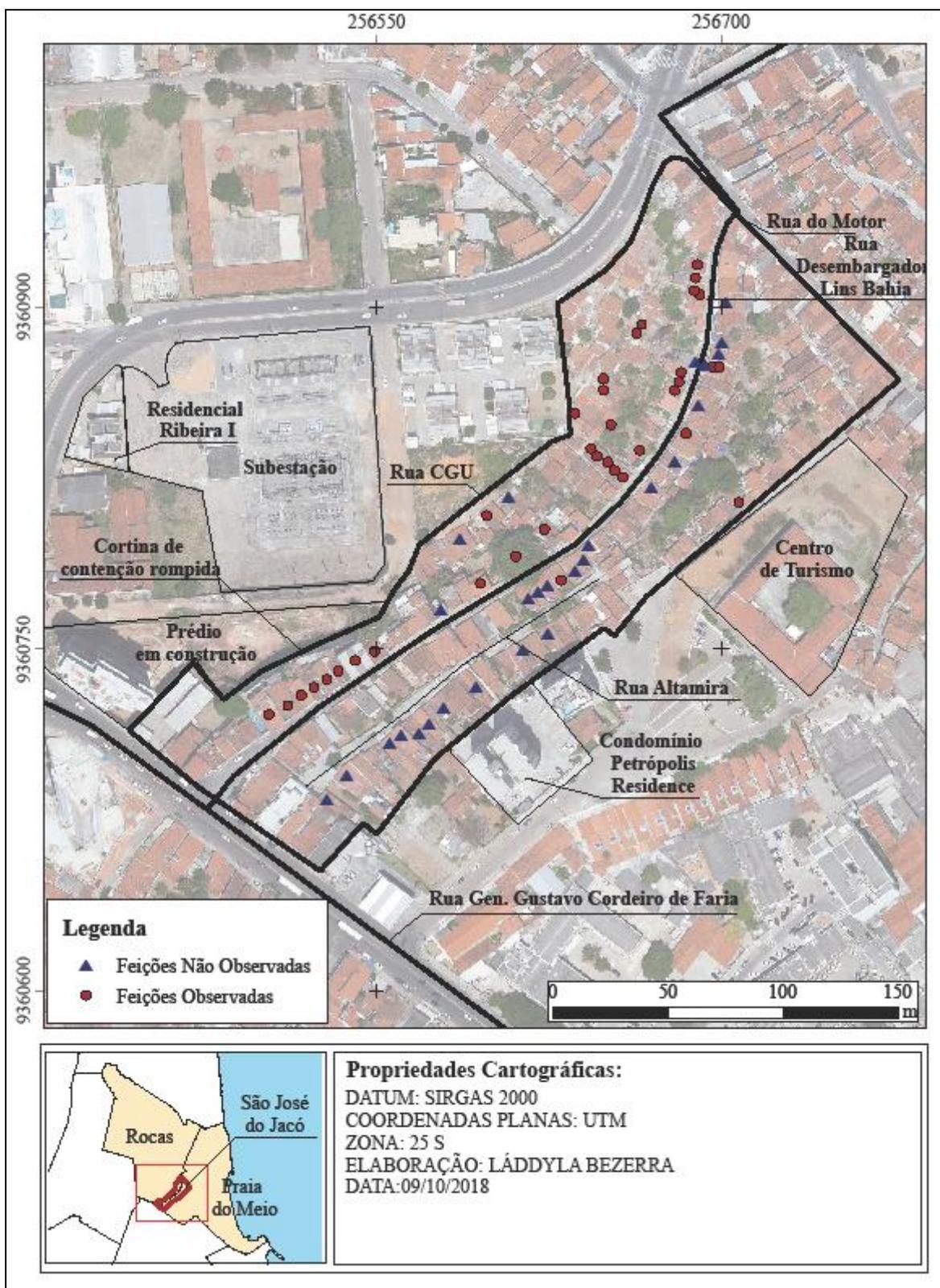
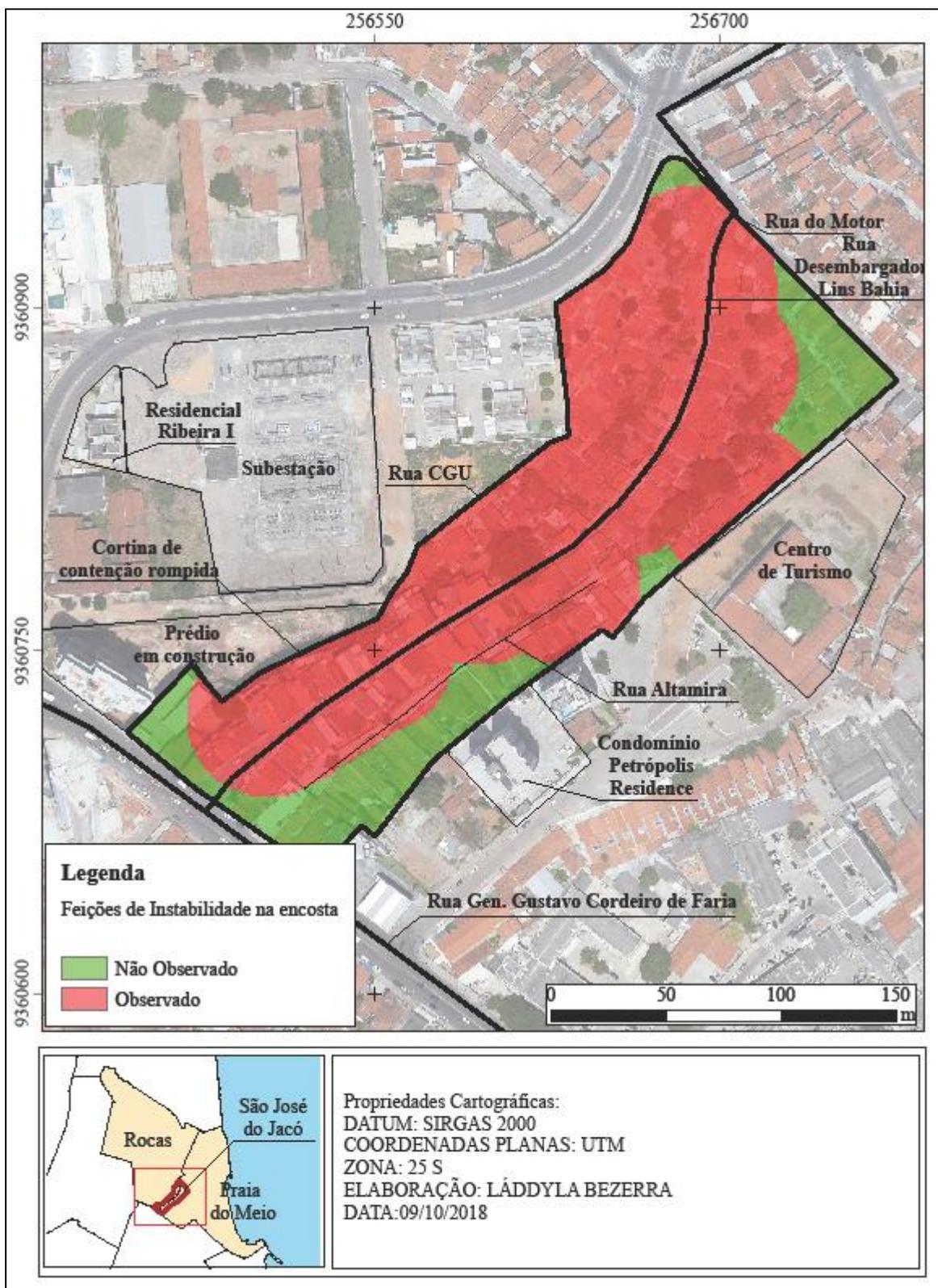


Figura 5.2 Mapa de Feições de Instabilidade da Comunidade São José do Jacó



Foram observados diversos tipos de feições na área de estudo, dentre elas, as que apareceram com maior frequência foram: a existência de fissuras verticais, horizontais e

diagonais em piso e/ou alvenaria, totalizando 22 dos 36 pontos analisados, a inclinação de estruturas rígidas, como muros de contenção, árvores de grande porte, cercas, postes, e a fachada das residências, representando 13 evidências, ou 36 % das feições totais, e subsidência do piso da residência (5 pontos), como pode ser verificado na Figura 5.3 e exemplificado nas Figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.3 Tipologia das feições de instabilidade observadas na Comunidade São José do Jacó

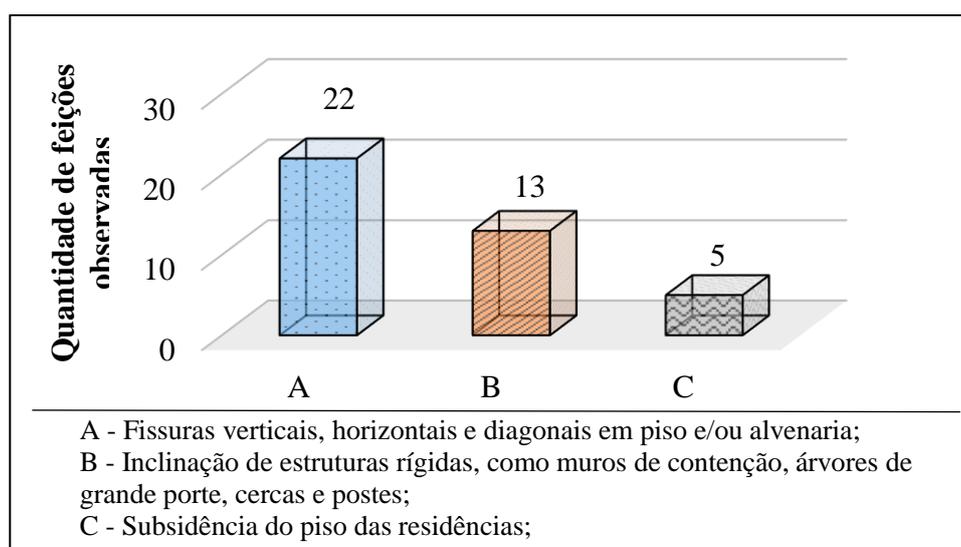


Figura 5.4 Fissuras verticais, horizontais e diagonais em alvenaria e/ou piso de residências da Comunidade São José do Jacó

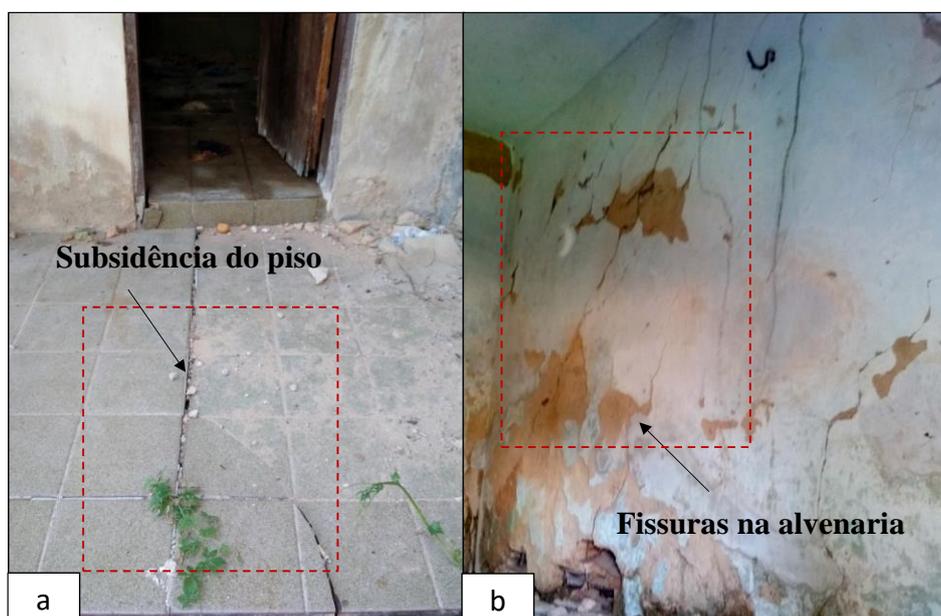


Figura 5.5 Curvatura de estruturas rígidas, como muros de contenção, árvores de grande porte, cercas e postes na Comunidade São José do Jacó



Vale ressaltar que a soma dos tipos de feições observadas é superior ao número total de pontos de feições obtidos nas inspeções de campo, 36, uma vez que nas vistorias realizadas foi possível constatar mais de uma tipologia de indícios de movimentação em cada local, a exemplo da casa número 52, localizada na Rua Desembargador Lins Bahia, mostrada na Figura 5.6, na qual foi possível evidenciar dois tipos de feições: existência de trincas verticais, horizontais e diagonais na alvenaria e no piso e a subsidência do piso da residência.

Figura 5.6 Constatação de mais de uma tipologia de indícios de movimentação em uma mesma localidade da Comunidade São José do Jacó: a) Subsidência do piso da residência; b) Fissuras na alvenaria



A observação de evidências de movimentação do tipo inclinação de árvores ou qualquer outro marco fixo é uma feição extremamente importante, sobretudo em encostas urbanas ocupadas, à exemplo do Jacó, uma vez que pode estar indicando a ocorrência de um processo de rastejo, denotando que a área tem movimentação antiga.

Para ter uma aproximação do período de tempo em que esse movimento de massa vem ocorrendo, Brasil (2007) sugere avaliar o tronco das árvores existentes no local, de modo que quando o tronco for reto e estiver inclinado, a exemplo da situação observada na Comunidade São José do Jacó e visualizada na Figura 5.7 implica dizer que o movimento é posterior ao crescimento da árvore. No entanto, quando o tronco for torto e inclinado, o crescimento é simultâneo com o movimento.

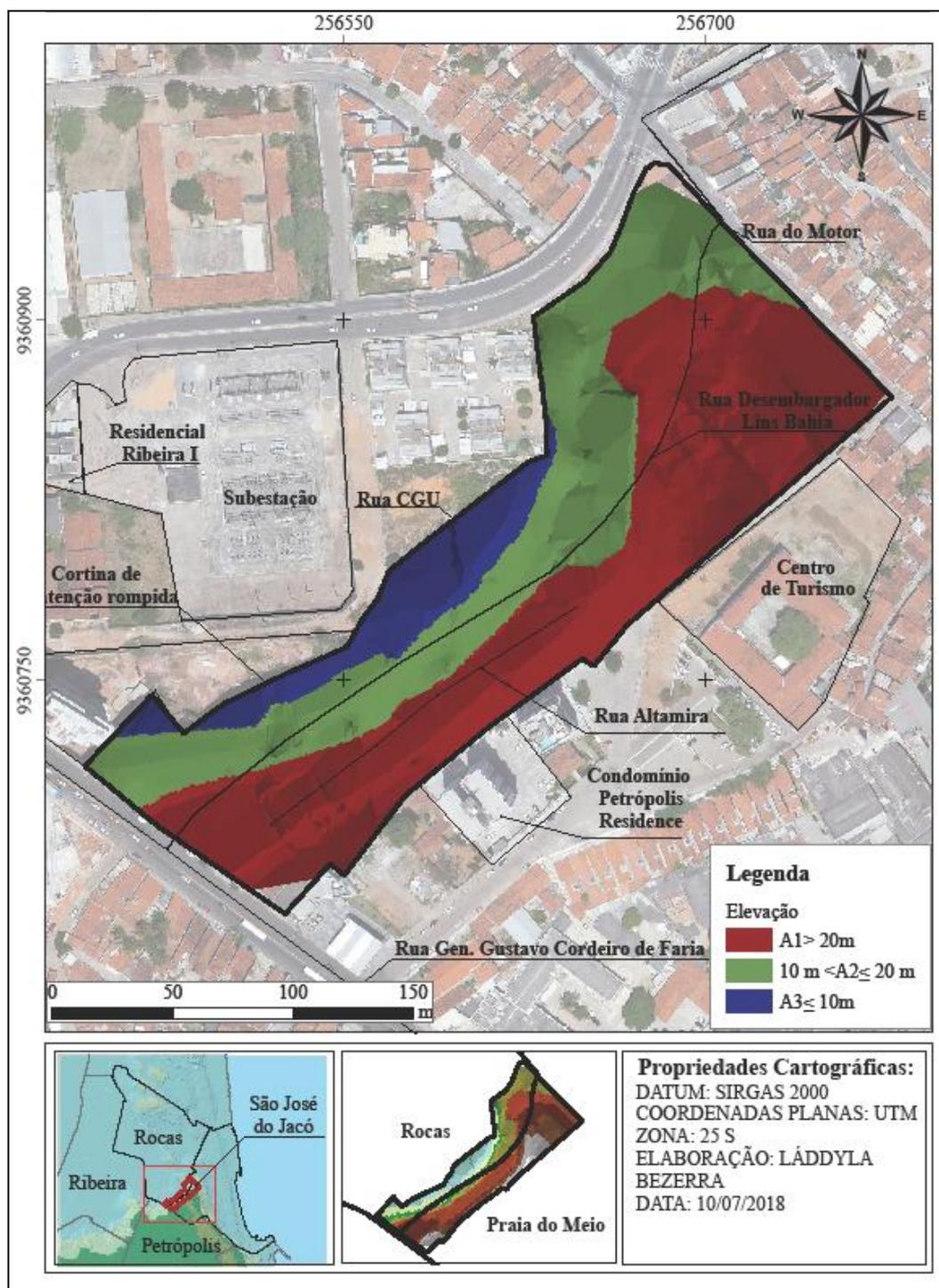
Figura 5.7 Árvores com tronco reto e inclinado



5.2.2. Mapa de Amplitude

O Mapa de Amplitude elaborado é apresentado na Figura 5.8. Nele é possível constatar que a classe de amplitude com maior abrangência na região é aquela cuja altura do talude é superior a 20 m, seguida pela classe que compreende os taludes com alturas entre 10 a 20 metros, contemplando juntas cerca de 90% da área total da Comunidade São José do Jacó.

Figura 5.8 Mapa Altimétrico da Comunidade São José do Jacó



Realizando a correlação entre o Mapa de Amplitude e o Mapa de Feições de Instabilidade (Tabela 5.13), observa-se que as classes com altura entre 10 m e 20 m e maior que 20 m, ou seja, os trechos de maior altitude, são aqueles que apresentam a maior frequência de evidências de instabilização na área de estudo.

Tabela 5.13 Feições de instabilidade observadas em cada classe de amplitude na Comunidade São José do Jacó

Indicador de risco	Classes	Área (ha)	% da área	Ni	N	Peso	Peso AHP
Amplitude	$A \leq 10$ m	0,2625	11,17	2	36	5,55%	8,82%
	$10 \text{ m} < A < 20$ m	0,8253	35,10	22		61,11%	24,31%
	$A \geq 20$ m	1,2633	53,73	12		33,33%	66,87%

5.2.3. Mapa de Inclinação

Analisando o mapa de inclinação elaborado e apresentado na Figura 5.9 e os dados fornecidos na Tabela 5.14, percebe-se que a classe de inclinação predominante na região de estudo é àquela que compreende os taludes inferiores a 10° , totalizando pouco mais de 50 % da área da Comunidade. Em seguida, aparece a classe de inclinação superior a 20° , que corresponde a 26,31% da área ocupada, e por fim, as encostas com inclinação entre 10° e 20° .

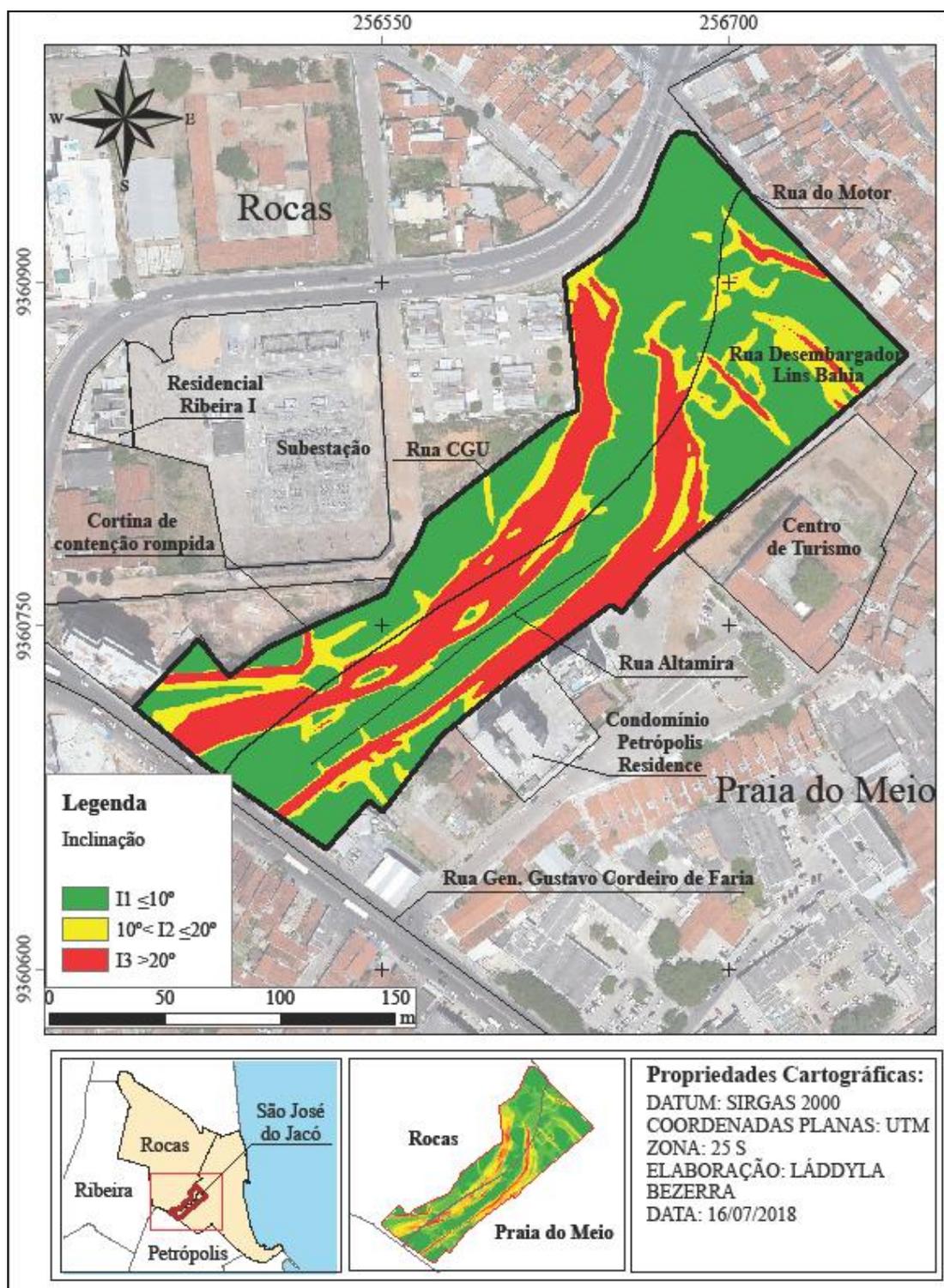
Correlacionando a quantidade de feições de instabilidade com os valores de inclinação, percebe-se que no intervalo de inclinação entre 0 e 10° ocorre a maior frequência de cicatrizes e evidências, totalizando 24 feições, seguido pelos taludes com inclinação superior a 10° , apresentando 12 evidências. A concentração de 66,67% das feições na Classe II pode indicar que nessa área os processos de instabilização são comandados por outros indicadores.

Resultado semelhante foi observado no trabalho de Bhatt *et al.* (2013), que, ao realizar o zoneamento de perigo em uma região do Nepal, obteve como resultado a inexistência de uma relação direta entre o aumento de declividade das vertentes e o incremento na densidade de deslizamentos.

Tabela 5.14 Feições de instabilidade observadas em cada classe de inclinação na Comunidade São José do Jacó

Indicador de risco	Classes	Área (ha)	% da área	Ni	N	Peso	Peso AHP
Inclinação	$I1 \leq 10^\circ$	1,3345	56,76%	24	36	66,67%	8,33%
	$10^\circ < I2 < 20^\circ$	0,3984	16,94%	6		16,67%	19,32%
	$I3 \geq 20^\circ$	0,6186	26,31%	6		16,67%	72,35%

Figura 5.9 Mapa de Inclinação da Comunidade São José do Jacó



5.2.4. Mapa de Morfologia em Planta e em Perfil

Analisando primeiramente o mapa de morfologia em planta (Figura 5.10), percebe-se da Tabela 5.15 que 45,79% da área de estudo possui forma convexa, 44,51% forma côncava e 9,70% retilínea. Compatibilizando a localização das feições com a morfologia,

observa-se 18 das 36 cicatrizes sobre a região côncava da encosta, representando 50% das feições totais observadas, seguido pela morfologia convexa, com 44,44% e a retilínea, com 5,56%.

Figura 5.10 Mapa de morfologia em planta da Comunidade São José do Jacó

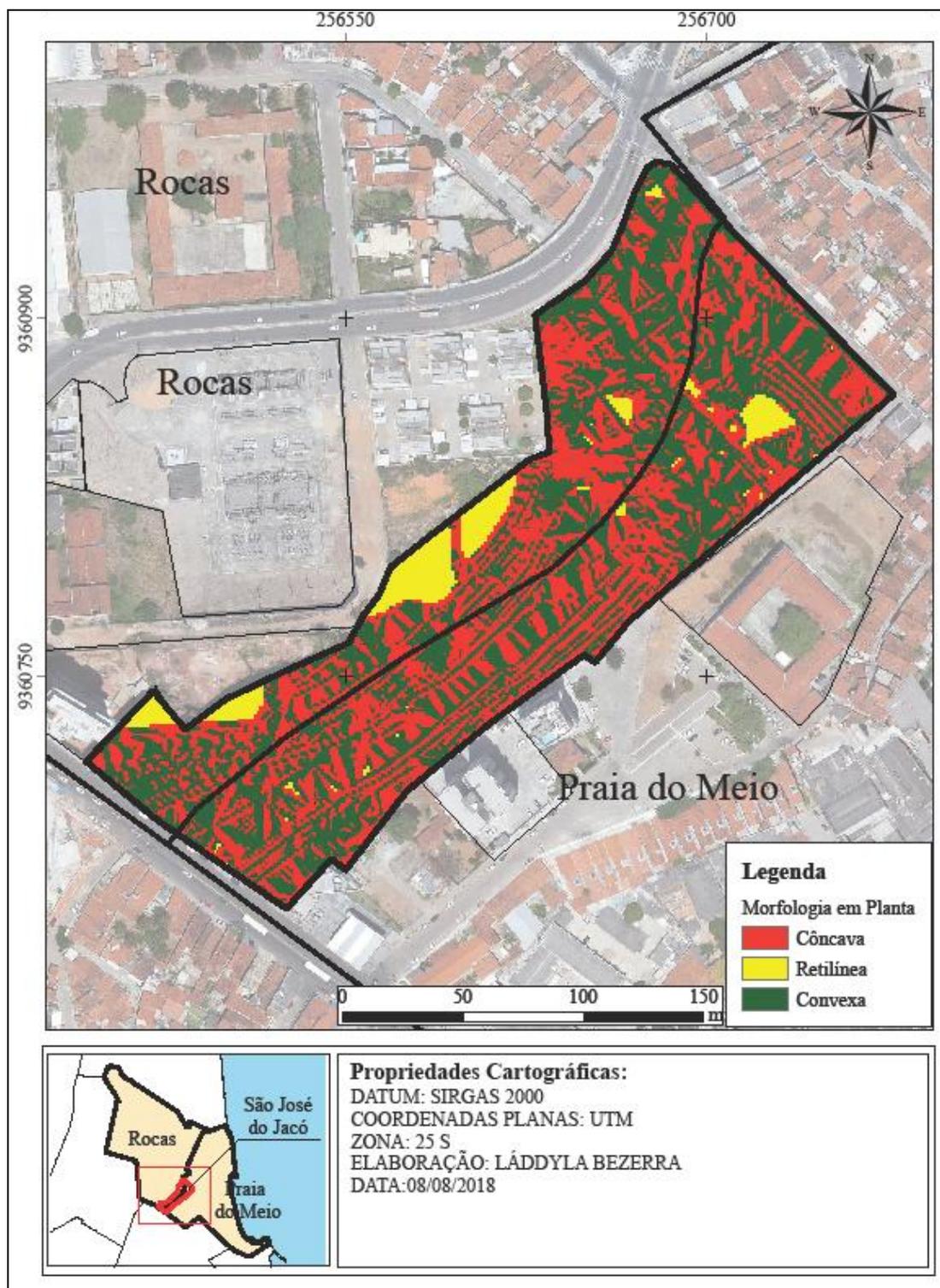


Tabela 5.15 Feições de instabilidade observadas em cada classe de morfologia em planta na Comunidade São José do Jacó

Indicador de risco	Classes	Área (ha)	% da área	Ni	N	Peso	Peso AHP
Morfologia em Planta	Côncava	1,0531	44,51%	18	36	50,00%	74,56%
	Retilínea	0,2295	9,70%	2		5,56%	13,43%
	Convexa	1,0833	45,79%	16		44,44%	12,01%

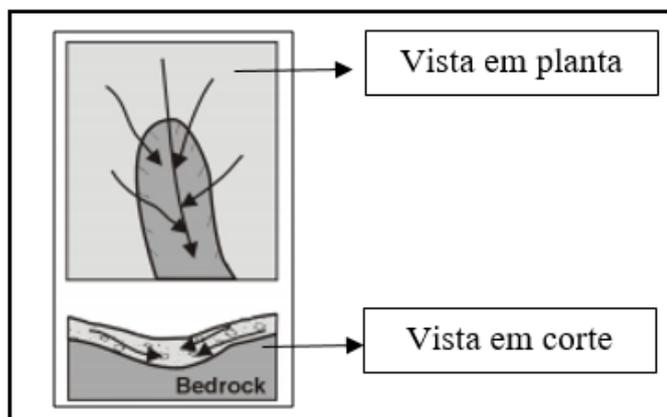
Como já era esperado, a maior parte das cicatrizes de movimentação se deram nos trechos côncavos da encosta, isso porque esse tipo de morfologia forma zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, favorecendo a ocorrência de movimentos de massa.

Ratificando essa constatação, Komac (2005), em um trabalho desenvolvido na Eslovênia de avaliação de suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos utilizando o Método AHP e estatística multivariada, observou que áreas nas quais ocorre predominância de morfologia em planta côncava há maior tendência à ocorrência de deslizamentos.

Isso acontece devido à concentração de água, tanto em superfície quanto em subsuperfície, condição que favorece a saturação do solo e o aumento da poropressão, aliviando assim as tensões normais efetivas, o que provoca a diminuição da resistência do solo.

A Figura 5.11 modificada de Crosta *et al.* (2003) demonstra o processo de convergência de fluxo superficial e subsuperficial em encostas que apresentam concavidade em plano.

Figura 5.11 Convergência de fluxo superficial e subsuperficial em encostas com concavidade em plano

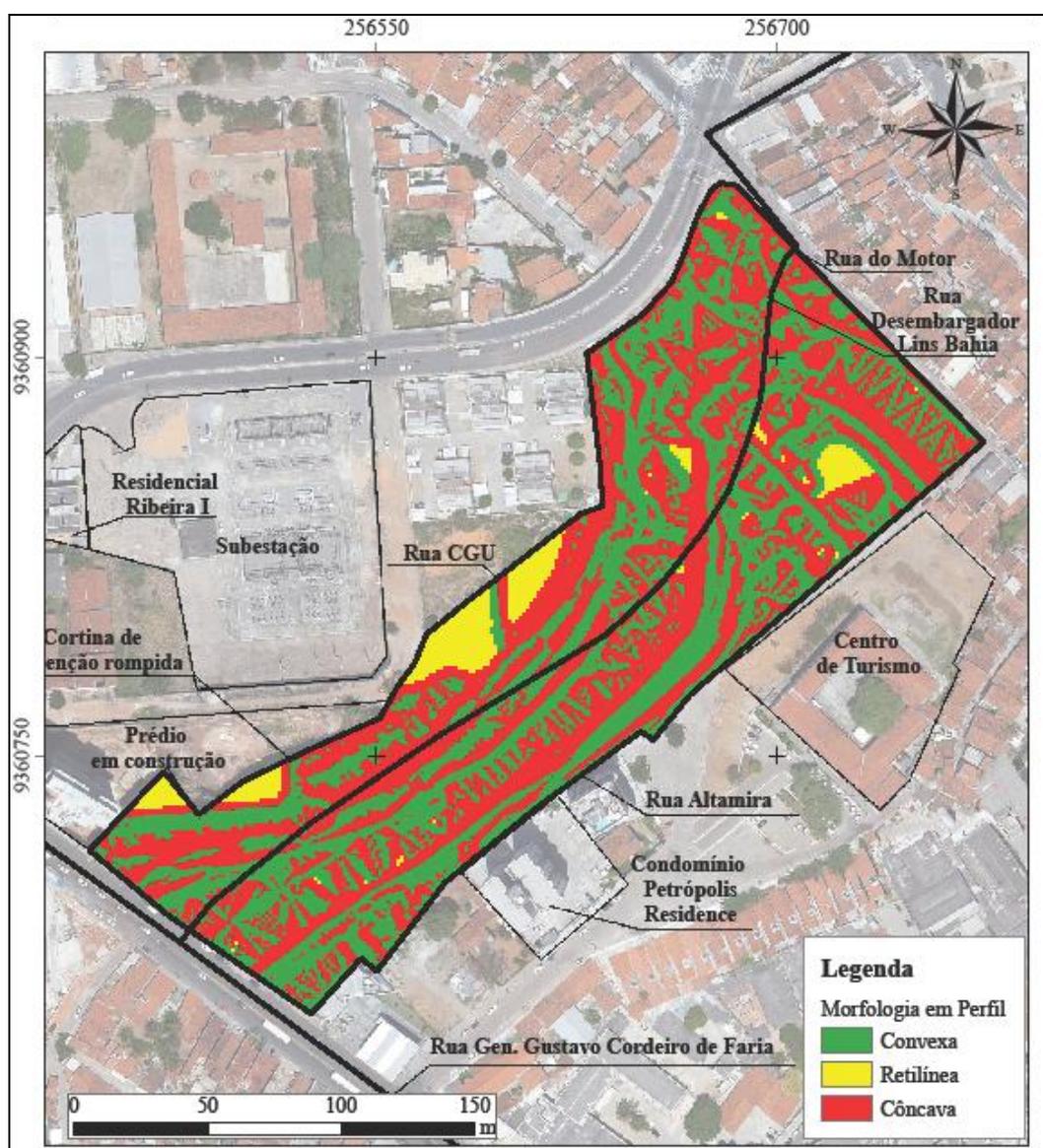


Fonte: Modificada de Crosta *et al.* (2003)

De forma semelhante, Lobato, Silva e Volotão (2016) ao tentar propor uma metodologia para identificar áreas com susceptibilidade aos deslizamentos através do *Analytic Hierarchy Process* (AHP), verificaram em seus resultados que a maior incidência dos deslizamentos ocorreu nas áreas côncavas com 55,36% contra 42,86% das áreas convexas. Ainda segundo os autores, as áreas côncavas diferentemente das convexas acumulam mais sedimentos e o seu processo de cisalhamento ocorre mais a montante em declividades menos íngremes.

O mapa de morfologia em perfil é apresentado na Figura 5.12.

Figura 5.12 Mapa de morfologia em perfil da Comunidade São José do Jacó



Partindo agora para análise desse mapa, percebe-se, dos dados apresentados na Tabela 5.16, assim como observado para o atributo morfologia em planta, a predominância das classes côncava e convexa sobre a encosta.

Além disso, constata-se que a maior parte das feições de instabilidade observadas ocorreram sobre as regiões de talude com perfil convexo, totalizando 22 das 36 evidências de movimentação obtidas, seguido pelas encostas com perfil côncavo, responsável por 38,89% de concentração de cicatrizes.

Tabela 5.16 Feições de instabilidade observadas em cada classe de morfologia em perfil na Comunidade São José do Jacó

Indicador de risco	Classes	Área (ha)	% da área	Ni	N	Peso	Peso AHP
Morfologia em Perfil	Côncava	1,1352	47,98%	14	36	38,89%	60,00%
	Retilínea	0,1887	7,98%	0		0,00%	20,00%
	Convexa	1,0419	44,04%	22		61,11%	20,00%

Corroborando com os resultados obtidos, Bonuccelli (1999) citado por Kozciak (2005), em seu estudo visando avaliar a influência da variação na forma da encosta para a ocorrência de movimentos de massa, aponta que as encostas com perfis côncavos são geralmente mais evoluídas em termos geomorfológicos e estariam menos sujeitas a ocorrência de movimentos de massa que as convexas.

Além disso, o autor complementa afirmando que as encostas côncavas geralmente estão associadas a solos de espessura mediana, enquanto que àquelas com forma convexa, são ligadas a solos com camadas de maior espessura, podendo favorecer movimentos mais profundos, como escorregamentos do tipo rotacional.

Nesse sentido, Kozciak (2005), ao realizar análises de estabilidade de taludes determinísticas na Bacia do Rio Marumbi, na Serra do Mar paranaense, constatou que a forma convexa, devido a maior espessura do solo acumulado, mostrou fatores de segurança menores que às côncavas e retilíneas, apresentando-se mais instáveis.

5.2.5. Mapa de Uso/Cobertura do Solo

As informações extraídas do mapa uso/cobertura do solo refletem as ações antrópicas, ou seja, as modificações feitas na paisagem pelas atividades de ocupação do homem na encosta. Esse mapa contemplou, além da classe cobertura urbana, as categorias relacionadas a cobertura vegetal (distinguidas quanto ao porte arbóreo e campo/cultura) e a área de solo exposto.

Da análise do mapa de uso/cobertura (Figura 5.13) e da Tabela 5.17, verifica-se que apenas três classes de uso/cobertura do solo foram verificadas na área, são elas: cobertura urbana, campo/cultura e solo exposto. A maior parte da Comunidade São José do Jacó é ocupada pela classe cobertura urbana, seguido pela classe campo/cultura e, finalmente, solo exposto.

Figura 5.13 Mapa de Uso/Cobertura do solo da Comunidade São José do Jacó

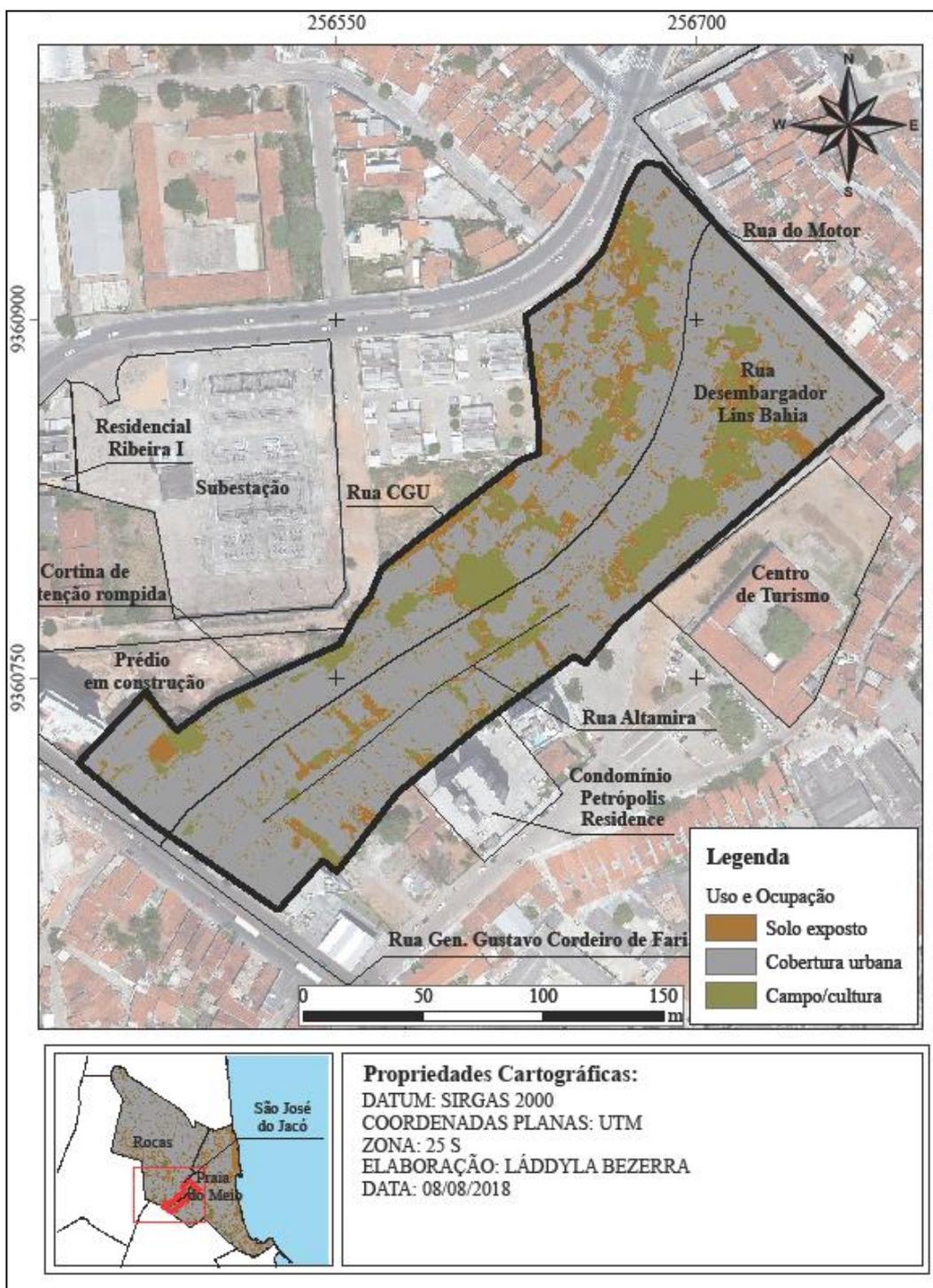


Tabela 5.17 Feições de instabilidade observadas em cada classe de uso/cobertura do solo na Comunidade São José do Jacó

Indicador de risco	Classes	Ni	N	Peso	Peso AHP
Uso/Cobertura do solo	Campo/Cultura	1	36	2,78%	6,71%
	Cobertura urbana	33		91,67%	30,77%
	Solo exposto	2		5,56%	56,15%

Acerca da classe cobertura urbana, as visitas *in loco* realizadas permitiram constatar que a maior parte das edificações presentes na Comunidade São José do Jacó é destinada ao uso residencial, com destaque para as unifamiliares e horizontais. No entanto, é possível encontrar alguns imóveis para uso comercial e misto. Outra característica relevante observada foi a incidência maior de edificações térreas em relação as com mais de um pavimento.

Com relação à cobertura vegetal, foi possível observar a existência de setores com vegetação do tipo campo/cultura, compreendendo áreas de gramíneas e/ou áreas de plantio, como bananeiras.

Correlacionando as feições de instabilidade observadas e as classes de uso/cobertura do solo, observa-se que a quase totalidade das feições, 91,67% delas, se desenvolveram na área ocupada pela cobertura urbana, a qual também representa a maior classe de ocupação na Comunidade São José do Jacó.

Essa grande densidade de pontos de feições nos locais em que a encosta foi ocupada pela população pode estar relacionada à existência de uma ampla quantidade de cortes desordenados, de tamanho e altura variáveis, tanto na crista do talude, quanto sobre a superfície em declive, realizados para possibilitar a construção das moradias e das vias de acesso; à supressão da vegetação; ao despejo de lixo e entulho sobre o talude e ao baixo padrão construtivo de inúmeras moradias observadas na área, conforme evidenciado na Figura 5.14.

Figura 5.14 Forma de ocupação da Comunidade São José do Jacó



5.2.6. Mapa de Densidade Demográfica

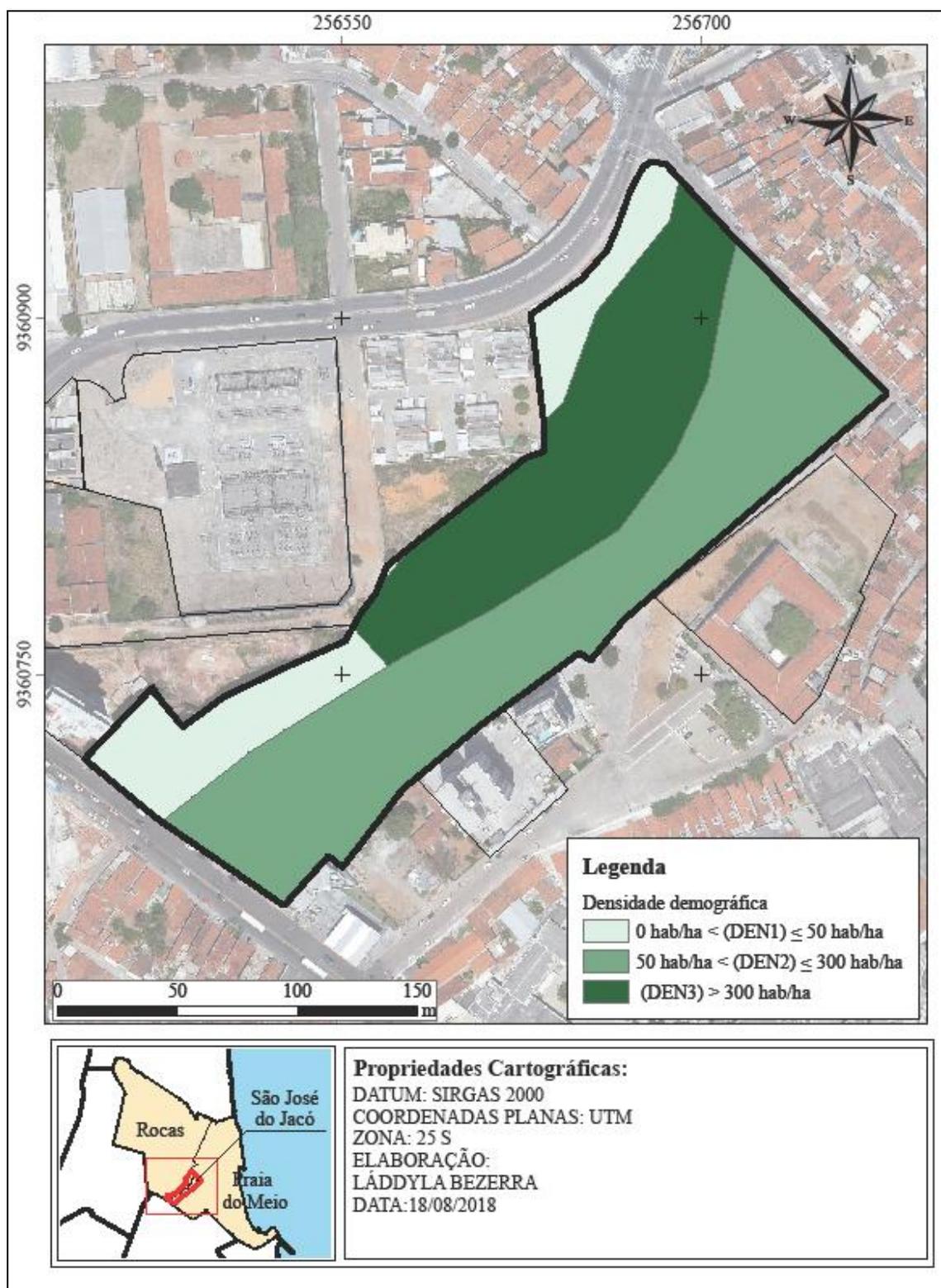
Para elaboração do mapa de densidade demográfica da Comunidade São José do Jacó foram propostas 04 classes de adensamento: local inabitado, densidade igual ou inferior a 50 hab/ha, maior que 50 e menor ou igual a 300 hab/ha, e superior a 300 hab/ha. Das quatro, apenas uma não foi observada na região de estudo, a categoria que compreende locais inabitados da encosta, visto que se trata de uma vertente urbana ocupada.

Considerando os dados fornecidos pelo mapa de densidade demográfica elaborado (Figura 5.15) e pela Tabela 5.18, nota-se valores de densidade populacional variando entre 0 e 50 hab/ha nas regiões mais baixas da encosta, correspondendo a 22,22 % da área total da Comunidade, chegando a densidades superiores a 300 hab/ha nas cotas mais elevadas da localidade, sendo este último valor àquele com maior incidência de evidências de movimentação, abarcando 72,22% das 36 feições observadas.

Tabela 5.18 Feições de instabilidade observadas em cada classe de densidade demográfica na Comunidade São José do Jacó

Indicador de risco	Classes	Área (ha)	% da área	Ni	N	Peso	Peso AHP
Densidade Demográfica (hab/ha)	$0 < (\text{DEN}2) \leq 50$	0,4323	17,02%	8	36	22,22%	13,30%
	$50 < (\text{DEN}3) \leq 300$	1,2949	50,97%	2		5,56%	26,76%
	$(\text{DEN}4) > 300$	0,8131	32,01%	26		72,22%	55,77%

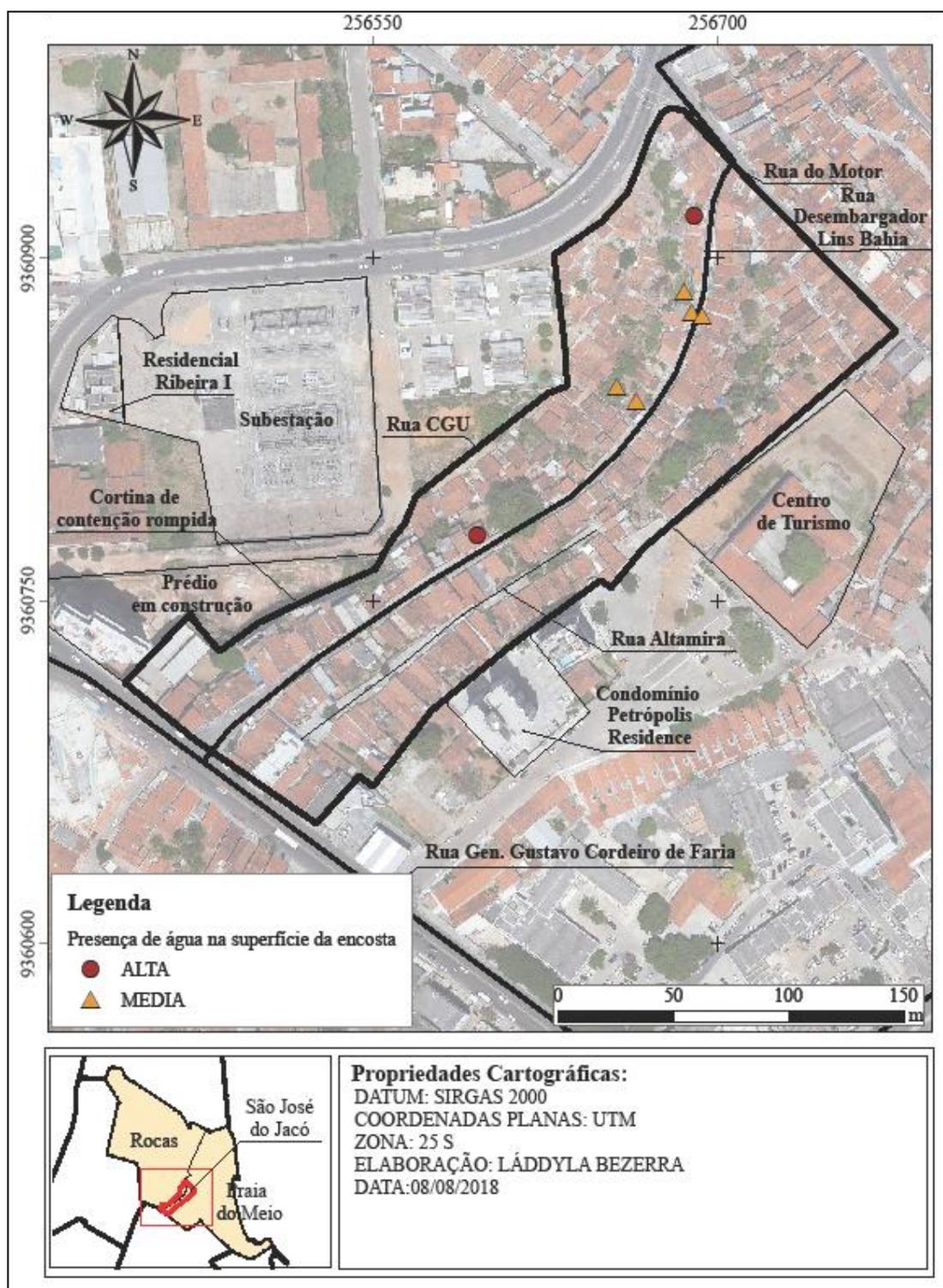
Figura 5.15 Mapa de densidade demográfica da Comunidade São José do Jacó



5.2.7. Presença de água na superfície da encosta

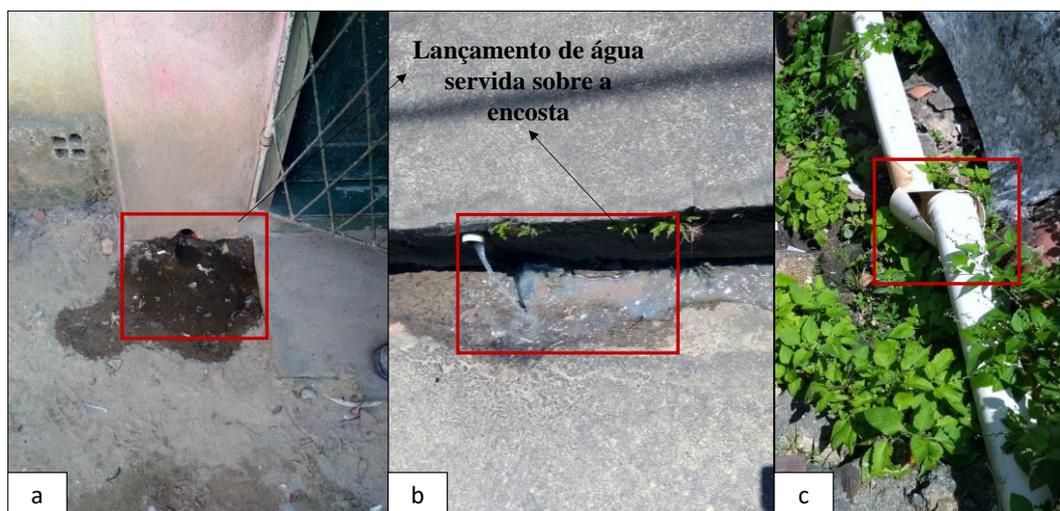
Durante as visitas realizadas à Comunidade do Jacó, foram constatados 7 pontos com presença de água superficial, 05 deles com concentração média e 02 com concentração alta, como pode ser observado na Figura 5.16.

Figura 5.16 Mapa de presença de água superficial da Comunidade São José do Jacó



Esses pontos estavam sempre relacionados ao lançamento de água servida de algumas casas sobre a encosta, mesmo existindo uma rede de esgotamento sanitário na área em estudo (Figura 5.17, a e b); ao vazamento em tubulações de esgotamento sanitário, como demonstrado na Figura 5.17, c; e a presença de um sistema de drenagem superficial incipiente.

Figura 5.17 Presença de água na superfície da encosta

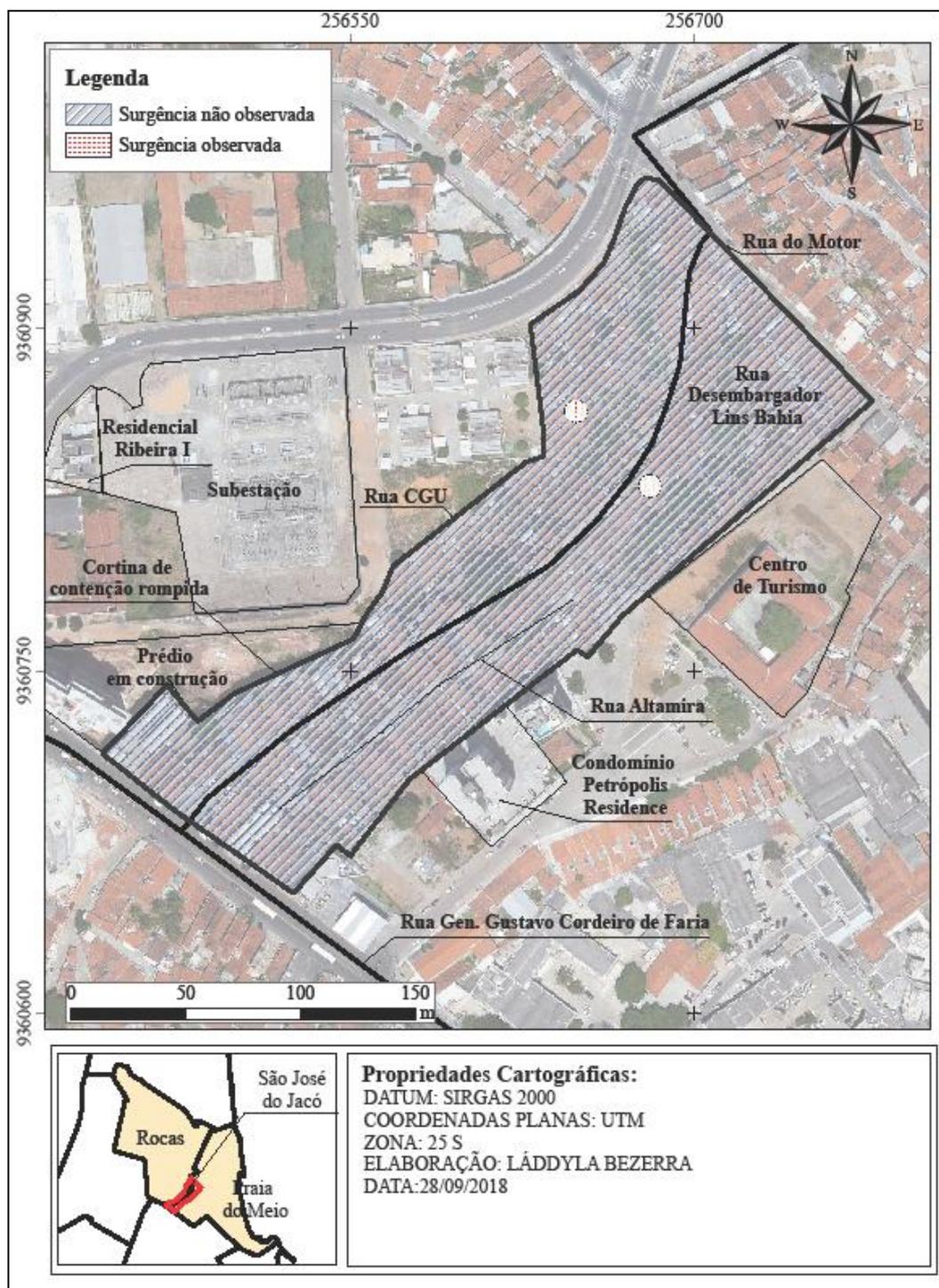


Para os indicadores de risco representados de forma pontual, como a presença de água superficial ou a surgência de água no perfil da encosta, não foi possível fazer uma correlação entre as feições de instabilidade observadas e as classes de cada um desses parâmetros.

5.2.8. Surgência de água no perfil da encosta

Na Figura 5.18 é apresentado o mapa de surgência de água no perfil da encosta. Nele verifica-se que só foi possível identificar, dentre as inúmeras moradias inspecionadas, apenas dois pontos de surgência.

Figura 5.18 Mapa de surgência de água no perfil da encosta na Comunidade São José do Jacó



Apesar desse resultado positivo, ainda existem diversas moradias na região que adotam como forma de disposição das águas servidas, a utilização de tanque séptico e sumidouro (Figura 5.19).

Alheiros *et al.* (2003) afirma que a existência de fossas sépticas e sumidouros nos taludes gera pontos de concentração de água, e que, quanto mais próximos e numerosos, maior o risco de ocorrência de movimentos de massa.

Figura 5.19 Presença de tanque séptico na encosta



Além disso, é importante ressaltar que tanto a presença como a ausência de pontos de surgência no perfil da encosta é uma variável muito sensível às condições climáticas e à precipitação ocorrida em dias anteriores. Diante disso, dado que as visitas e a coleta de dados no Jacó ocorreram durante o mês de setembro, período de baixa pluviosidade do Município de Natal, atribui-se também a isso a baixa frequência de pontos de surgência observados.

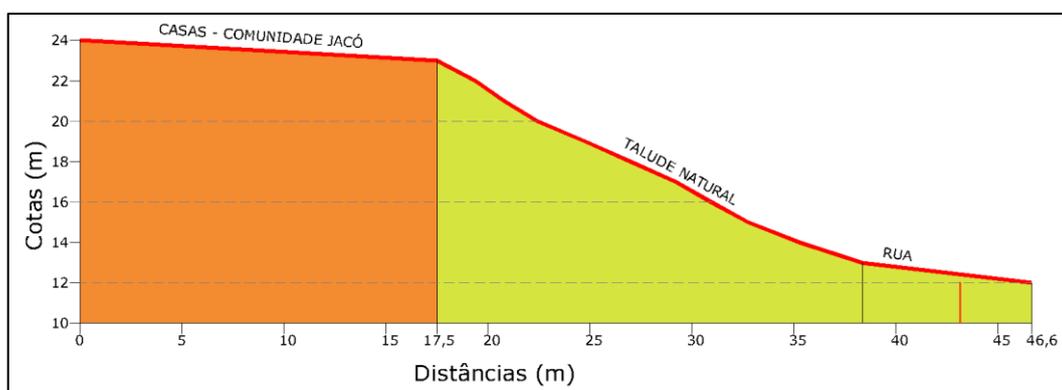
O fluxo de água subterrâneo é uma característica a ser constantemente monitorada na Comunidade do Jacó, sobretudo em períodos chuvosos, tendo em vista que nessa localidade, no passado, existiu uma lagoa, na área de cota altimétrica mais baixa, aterrada para a construção da Subestação de Energia da Ribeira e de outras edificações, como o Colégio Padre Monte.

Essa concentração de fluxo de água subterrânea possui relação direta com um acidente geotécnico ocorrido em 14 de junho de 2014 na área de estudo, em que parte de uma estrutura de contenção com aproximadamente 13m de altura entrou em colapso e rompeu após cerca de 50 horas de chuva ininterrupta, totalizando 315 mm acumulados.

A contenção foi executada com objetivo de possibilitar a realização de um corte em um talude natural existente, com desnível entre a Rua Desembargador Lins Bahia (na parte superior) e a rua de terra que dá acesso à comunidade do Jacó (Rua CGU), para construção de uma das torres residenciais do empreendimento imobiliário RESIDENCIAL ACTUALITHÉ.

A Figura 5.20, retirada de Santos Júnior, Severo e Freitas Neto (2014), traz o perfil topográfico do talude natural e do talude de corte. Na Figura 5.21, visualiza-se a situação do talude natural com incidência de vegetação antes de iniciar a obra da estrutura de contenção. A Figura 5.22 apresenta a situação da área após execução do corte e construção contenção.

Figura 5.20 Perfil topográfico do talude natural e de corte



Fonte: Santos Júnior, Severo e Freitas Neto (2014)

Figura 5.21 Fotos de antes da execução do corte no talude natural



Fonte: Natal (2008)

Figura 5.22 Fotos de depois da execução do corte no talude natural



Segundo relato extraído do laudo técnico elaborado por Santos Júnior, Severo e Freitas Neto (2014), as intervenções sobre o talude natural, alteraram o fluxo de água subterrânea no local, passando a ser observado, antes da construção da contenção, afloramento de água durante períodos chuvosos no talude de corte.

Ainda conforme Santos Júnior, Severo e Freitas Neto (2014), a principal causa da ruptura foi a ausência de um sistema de drenagem eficiente. “Com as chuvas que caíram nos dias 13 e 14 de junho de 2014, as águas infiltraram na parte superior, associado com a elevação natural do nível freático durante a estação chuvosa, migraram como sempre fizeram em direção a parte mais baixa (onde ficava a Lagoa do Jacó) e foram barradas pela face de concreto da estrutura de contenção”. Com este “barramento” e desvio do fluxo de água a estrutura do talude tornou-se instável e susceptível a desmoronamentos.

5.2.9. Mapa de Perigo

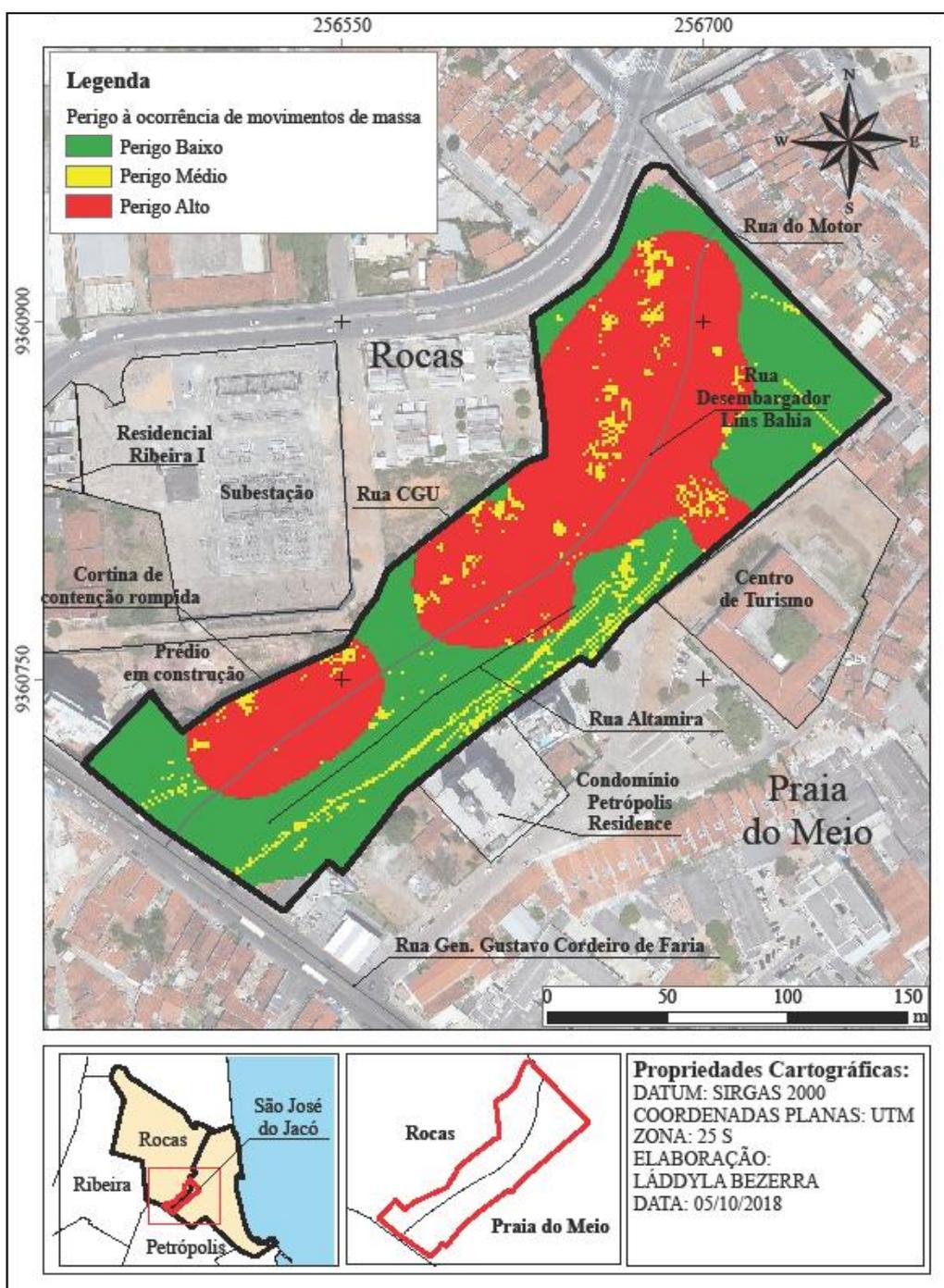
No contexto dessa pesquisa, o mapa de perigo à ocorrência de movimentos de massa representa um indicativo da probabilidade, primordialmente espacial, de ocorrência de movimentos de massa, com potencial para causar danos sociais, sendo sua produção fundamental para as análises risco.

Inúmeros fatores podem ser utilizados no mapeamento de perigo, a depender da escala de trabalho e do escopo do estudo. Os indicadores de perigo selecionados para este trabalho foram os atributos geomorfológicos (amplitude, inclinação, morfologia, tanto em planta quanto em perfil), geológicos (material que compõe o substrato e estrutura geológica);

e os fatores antrópicos, dado pelo parâmetro uso/cobertura do solo, presença de água superficial, surgência de água no perfil da encosta, e, o principal deles, presença de feições de instabilidade.

O mapa de perigo apresentado na Figura 5.23 foi elaborado a partir do Índice de Perigo calculado de acordo com os procedimentos apresentados no Item 4.2.7.3, e agrupado em três classes: Baixo, Médio e Alto.

Figura 5.23 Mapa de perigo da Comunidade São José do Jacó



A definição dos limites para cada classe foi realizada comparando-se o Índice de Perigo existente em cada *pixel* do *raster* com a média aritmética (μ) do Índice de Perigo de todos os *pixels*, somada e também diminuída da metade do desvio padrão (σ), conforme critérios apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 Critérios adotados para a classificação do Grau de Perigo (GP)

Índice de Perigo (IP)	Grau de Perigo (GP)
$IP < 0,193$	Baixo
$0,193 \leq IP \leq 0,269$	Médio
$IP > 0,269$	Alto

Os dados estatísticos de média aritmética e de desvio padrão foram calculados pelo próprio *software* para 17101 *pixels* e assumiram, respectivamente, os valores, $\mu = 0,231$ e $\sigma = 7,638 \times 10^{-2}$. Esses valores são baixos por causa da multiplicação dos pesos, sempre inferiores a unidade, atribuídos a cada mapa temático considerado na obtenção do mapa de perigo.

O mapa de perigo utilizando o método AHP (Figura 5.23) mostrou que a maior parte da Comunidade São José do Jacó está inserida na classe de perigo alto para a ocorrência de movimentos de massa, isto é 1,10 ha, ou, em termos de porcentagem, 48,00% da área total, seguido pela categoria de perigo baixo, correspondente a 45,31% da área total, e apenas 0,15 ha da região do Jacó apresentou perigo médio. A porcentagem de área coberta por cada classe de perigo é mostrada na Tabela 5.20.

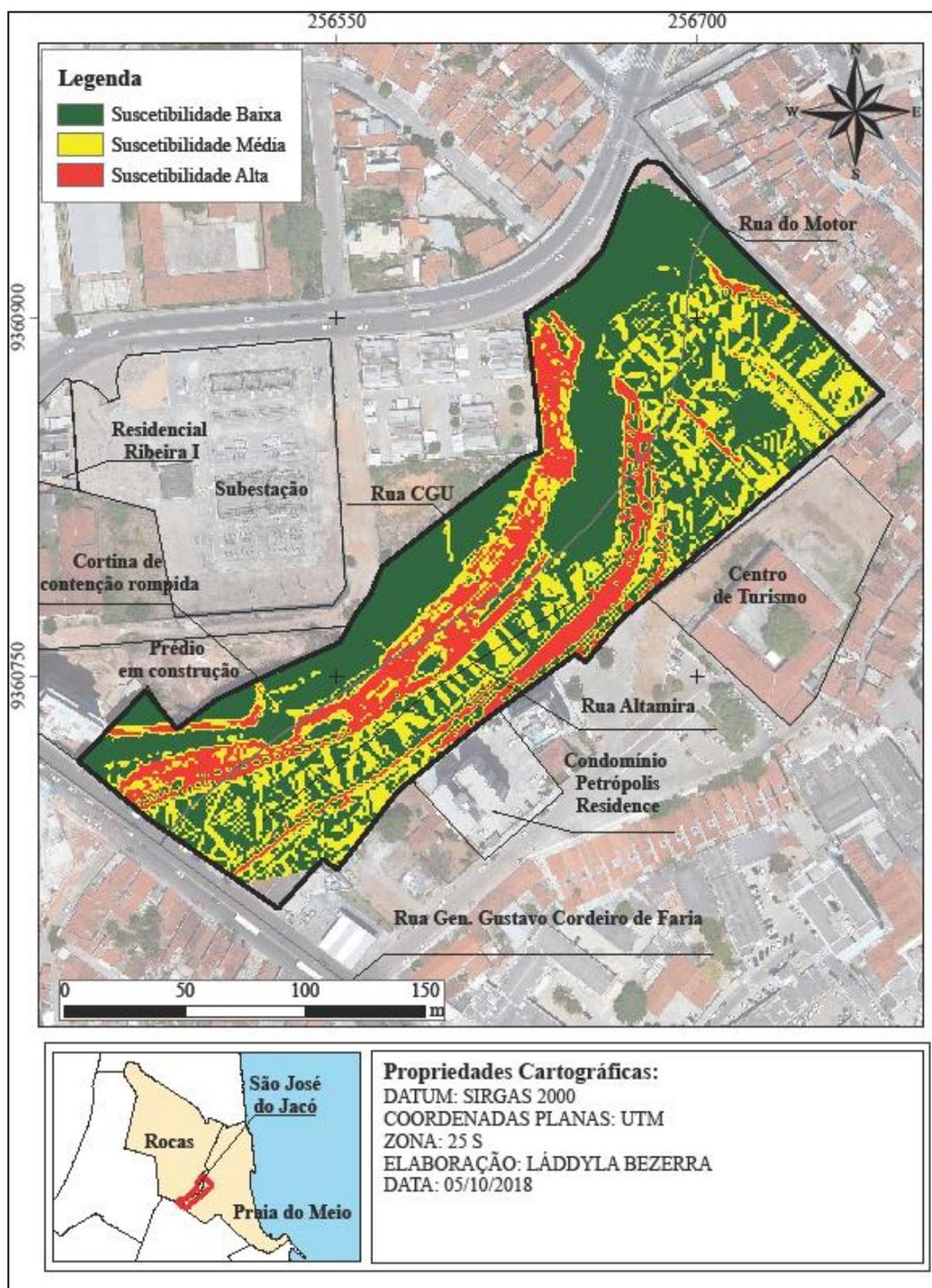
Tabela 5.20 Porcentagem de área coberta por cada classe de perigo

Classes	Área (ha)	% da área
Perigo Baixo	1,04	45,31%
Perigo Médio	0,15	6,69%
Perigo Alto	1,10	48,00%

Com o objetivo de estabelecer uma correlação entre a espacialização das classes de perigo obtidas sobre a encosta e cada um dos indicadores avaliados, analisou-se separadamente a contribuição das características físicas naturais (atributos geomorfológicos, geológicos e geotécnicos), através de um mapa de suscetibilidade da área, para que posteriormente, fossem analisadas as contribuições dos fatores antrópicos para a obtenção dos graus de perigo.

O mapa de suscetibilidade da Comunidade São José do Jacó, apresentado na Figura 5.24, foi elaborado a partir do Índice de Suscetibilidade calculado de acordo com os mesmos procedimentos apresentados acima para obtenção do Índice de Perigo, e também foi agrupado em três classes de suscetibilidade: Baixa, Média e Alta.

Figura 5.24 Mapa de suscetibilidade da Comunidade São José do Jacó



Nele, evidencia-se que a classe de suscetibilidade baixa está localizada nas porções da encosta com amplitudes inferiores a 20 m, baixa inclinação (inferior a 10°), morfologia em planta divergente e/ou planar, e morfologia em perfil retilínea e/ou convexa.

Na categoria de suscetibilidade média foram observados valores de amplitude altos (superiores a 20 m), inclinação inferior a 20° e morfologia em planta convergente. Nessa situação não foi possível observar um padrão quanto ao comportamento do atributo morfologia em perfil.

Por fim, nos trechos da Comunidade do Jacó com amplitudes entre 10 e 20 metros e maior que 20 metros, inclinação alta (superior a 20°), morfologia em planta convergente e forma da encosta em perfil côncava, predominou a suscetibilidade alta.

Os indicadores material que compõe o substrato e estrutura geológica, apesar de terem sido considerados através de seus pesos para o cálculo da suscetibilidade, não foram discutidos nessa análise, tendo visto que só possuem uma classe na área de estudo, não contribuindo para diferenciação entre os níveis de suscetibilidade.

Acerca do atributo material que compõe o substrato, a partir de uma coluna estratigráfica do município de Natal (Tabela 3.3), retirada do trabalho de Moreira *et al.* (2018) e de observações feitas em campo, foi possível extrapolar a composição do perfil estratigráfico da área de estudo, o qual consistia de uma capa de sedimentos Pós-Barreiras sobreposta aos sedimentos homogêneos e heterogêneos da Formação Barreiras.

O material constituinte da Formação Potengi (Sedimentos Pós-Barreiras), assim como os sedimentos da Formação Barreiras, estão entre aqueles que apresentam maior facilidade de remoção, apresentando maiores índices de erodabilidade, e, além disso, por serem constituídos por um alto conteúdo de feldspatos, quando sujeitos a um clima quente e úmido que favorece o intemperismo químico, podem sofrer um processo conhecido como “argilização”, propiciando episódios de movimentação de massa (BANDEIRA, 2003); (ALHEIROS *et al.*, 2003).

Partindo para análise da contribuição dos fatores antrópicos (uso/cobertura do solo, presença de água superficial, surgência de água no perfil da encosta e presença de feições de instabilidade), percebe-se que a presença de feições de instabilidade comandou a disposição espacial das classes de perigo. Logo, nos pontos em que foram observados indícios de instabilidade, o perigo elevou-se para a categoria alto, já naqueles em que não se observou cicatrizes, a classe foi baixa ou média.

As áreas classificadas como de perigo Alto foram consideradas impróprias à ocupação humana devido, principalmente, à associação de fatores extremos que geram uma

grande possibilidade de ocorrência de movimentos de massa. Dessa forma, como a Comunidade São José do Jacó é uma encosta já ocupada, é importante o monitoramento por parte dos órgãos competentes com o objetivo de se prevenir a perda de vidas e bens materiais.

5.2.10. Mapa de Vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade, produzido a partir da densidade demográfica dos setores censitários existentes dentro da Comunidade São José do Jacó é apresentado na Figura 5.25. A Tabela 5.21 traz a porcentagem de área coberta por cada classe de vulnerabilidade.

Tabela 5.21 Porcentagem de área coberta por cada classe de vulnerabilidade

Classes	Área (ha)	% da área
Vulnerabilidade Baixa	0,43	17,02 %
Vulnerabilidade Média	1,29	50,97 %
Vulnerabilidade Alta	0,81	32,01 %

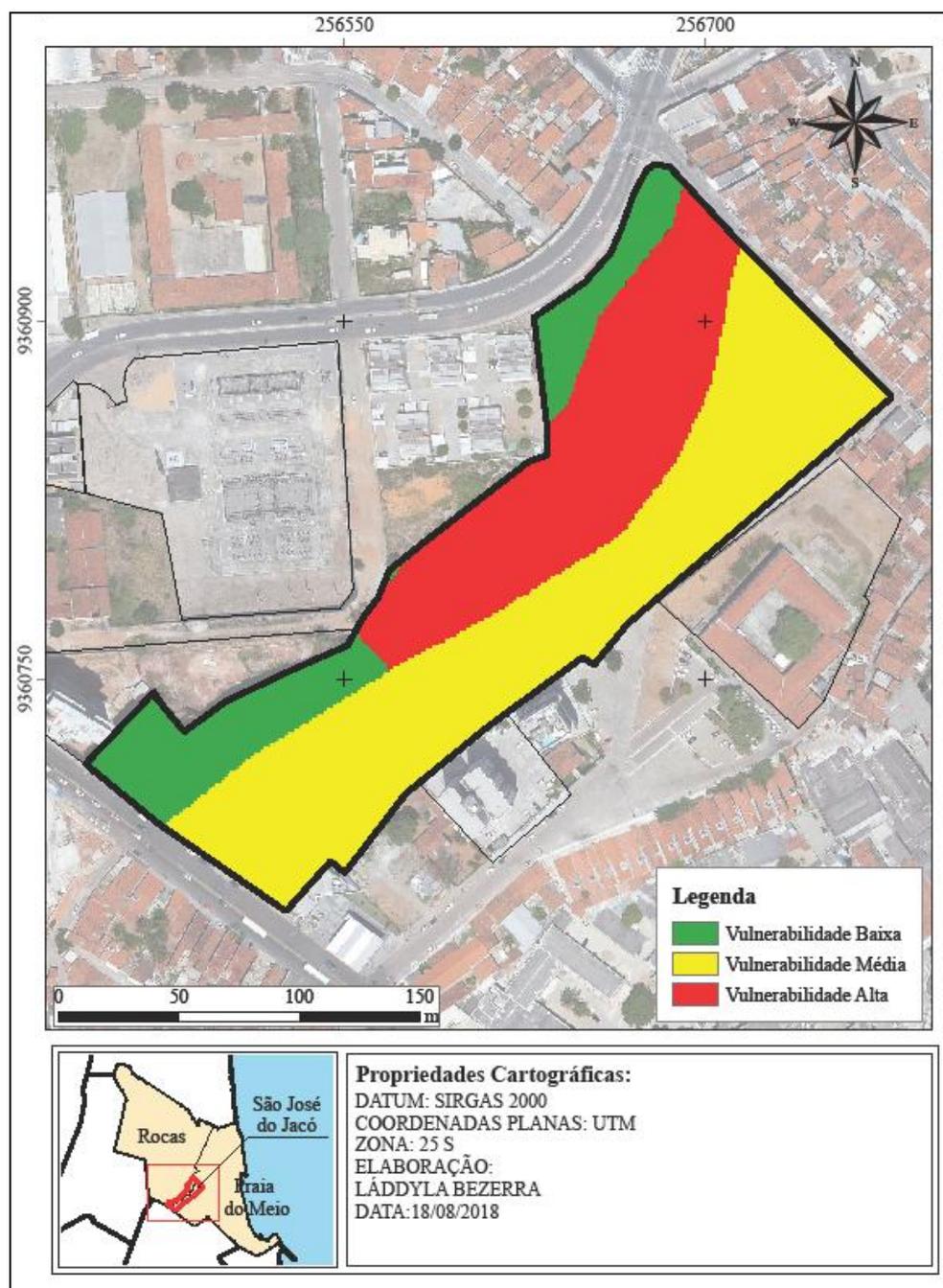
Analisando a Figura 5.25 e a Tabela 5.21, é possível observar que grande parte da área de estudo apresenta média (50,97%) à alta (32,01%) vulnerabilidade, estando geralmente associada a existência de expressivas áreas de residências com padrão construtivo muito baixo e densidade populacional muito alta sobre terrenos declivosos que exigiriam técnicas construtivas mais adequadas, além de um espaçamento maior entre as moradias.

Na localidade foi possível observar também imóveis de padrão construtivo mediano, com mais de 1 pavimento e taxa de adensamento menor, região na qual a vulnerabilidade classificou-se, principalmente, como baixa.

Correlacionando a quantidade de feições de instabilidade com as classes do indicador em análise, percebe-se uma concentração intensa de pontos de instabilização sobre a área categorizada como de alta vulnerabilidade, totalizando 26 de 36 cicatrizes, o que, em termos de porcentagem, representa 72,22% do total. Em seguida, aparece a classe de vulnerabilidade baixa, com 8 das 36 feições, e, por fim, a média, com apenas 2 feições.

Embora a classe de vulnerabilidade baixa tenha registrado 08 feições concentradas, valor superior àquele obtido para a categoria média, é importante ressaltar que essas cicatrizes de movimentação estão diretamente relacionadas a patologias decorrentes de problemas construtivos ocorridos em uma estrutura de contenção construída na região para permitir a realização de uma obra residencial multifamiliar, como comentado no Item 5.2.8.

Figura 5.25 Mapa de vulnerabilidade da Comunidade São José do Jacó



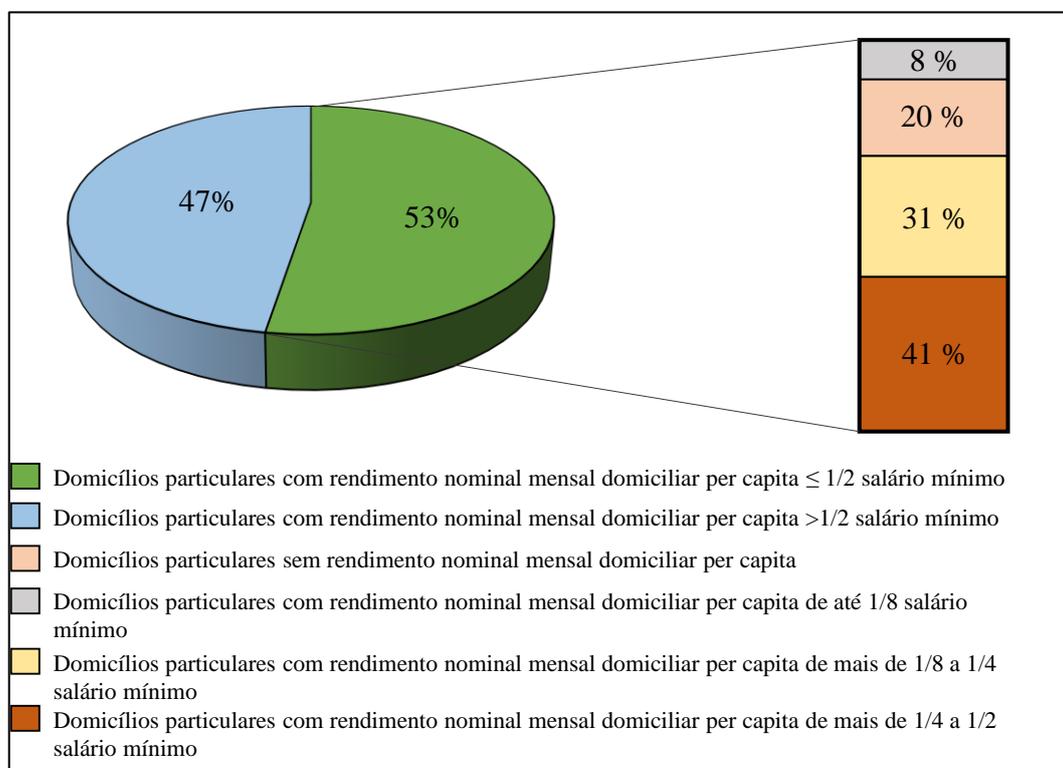
Apesar da questão financeira da população que habita a Comunidade do Jacó não ter sido considerada na fase de atribuição dos pesos pela aplicação do Método AHP, é importante incorporá-la na análise da vulnerabilidade da área, posto que esse tipo de característica interfere na forma com que os moradores enfrentam a ocorrência de desastres naturais, como os movimentos de massa.

Normalmente há uma concordância no entendimento de que domicílios com maior renda tendem a ser munidos por melhores infraestruturas, obtendo assim melhores condições

de suportar eventos naturais extremos. Partindo dessa hipótese, ao avaliar a distribuição de renda dos setores censitários, extraídos de IBGE (2011), verifica-se que da totalidade de domicílios particulares lá existentes, aproximadamente 53% do setor 1 é composto por população de baixa renda, estando nessa categoria, as pessoas com renda familiar mensal per capita de até $\frac{1}{2}$ salário mínimo, critério adotado pelo Governo Federal para classificar as famílias brasileiras em situação de pobreza e extrema pobreza.

A Figura 5.26 apresenta a distribuição de renda do setor censitário 1, único totalmente compreendido dentro dos limites da Comunidade São José do Jacó.

Figura 5.26 Distribuição de renda no Setor Censitário 1, compreendido na Comunidade São José do Jacó.



Fonte: Modificado de IBGE, 2011

É importante observar, portanto, que no setor em que as famílias são mais carentes, apresentando-se em situação de pobreza ou extrema pobreza, encontra-se a maior densidade demográfica da área, superior a 300 habitantes por hectare. Ou seja, além de haver uma maior dificuldade de evacuação da população caso ocorra um desastre nessa região, há também maior vulnerabilidade física das pessoas em função das características de infraestrutura da própria edificação e do seu entorno.

Na Figura 5.27 é possível evidenciar a diferenciação entre o padrão construtivo e de infraestrutura das edificações em função dos diferentes níveis de renda encontrados no Jacó.

Figura 5.27 Diferença no padrão construtivo das moradias em função dos diferentes níveis de renda; a) Padrão construtivo de um domicílio baixa renda. b) Padrão construtivo de um domicílio que não é baixa renda



Além desses indicadores já apresentados e discutidos, outros trabalhos que abordam esse tipo de mapeamento, a exemplo de Henrique (2014), Leone, Asté e Leroi (1996), sugerem a consideração de fatores como a capacidade de mobilidade e o grau de escolaridade na análise da vulnerabilidade social da área.

De acordo com Leone, Asté e Leroi (1996) a vulnerabilidade de um indivíduo a um processo natural potencialmente danoso possui dependência com a intensidade do fenômeno e com fatores intrínsecos e extrínsecos de sensibilidade desse indivíduo. Como exemplo de elementos intrínsecos, os autores citam fatores cognitivos como o nível de percepção do perigo e o conhecimento de como se proteger sozinho, os quais possuem relação com o grau de escolaridade; e fatores de mobilidade, como o nível de mobilidade face a uma situação de perigo.

A capacidade de mobilidade, tratada também como dependência social ou autonomia das pessoas, busca abranger casos em que seja necessária uma rápida evacuação dos domicílios, e nesse tipo de situação, geralmente crianças, deficientes e idosos têm maior dificuldade na rápida remoção dos locais. Além disso, é considerada também uma forma de quantificar a população potencialmente produtiva, com acesso a trabalho e renda e, conseqüentemente, melhor infraestrutura das moradias e resposta à ocorrência de um movimento de massa.

Diante disso, para considerar a capacidade de mobilidade nas análises de vulnerabilidade, foram seguidas as recomendações de Henrique (2014) e Anazawa, Feitosa e Monteiro (2013), os quais propõem realizar o cálculo da razão entre a soma da população de crianças (0 a 14 anos) e idosos (maior que 59 anos) pela população economicamente ativa (15 a 59 anos).

De acordo com os dados do Censo Demográfico 2010, 109 crianças e idosos e 219 ativos vivem na área do setor censitário 1, totalizando 328 habitantes. A população mais vulnerável, que deve ter prioridade em caso de acidente, representa 33% da quantidade de pessoas que vivem naquela área, e aproximadamente 50% em proporção à população economicamente ativa, ou seja, uma a cada três pessoas é dependente socialmente. Situação mais agravante pode ser constatada no setor censitário 3 com relação a dependência social, no qual há 56,32% de população dependente em proporção à economicamente produtiva.

Tabela 5.22 Capacidade de mobilidade dos setores censitários inclusos na área da Comunidade São José do Jacó

Setor Censitário	Número de Crianças	Número de Idosos	Número de Ativos	População Total	Capacidade de mobilidade (%)
Setor 1	92	17	219	328	49,77 %
Setor 2	89	28	345	462	33,91 %
Setor 3	196	147	609	952	56,32 %

Com relação ao fator grau de escolaridade, Anazawa, Feitosa e Monteiro (2013) comenta que indivíduos que frequentam a escola desde criança além de possuírem maior chance de desenvolver melhor a percepção do perigo e o conhecimento de como se proteger sozinho, aumentam sua capacidade para inserção no mercado de trabalho e para o seu desenvolvimento pessoal e profissional (IBGE, 2010).

Para abordar o tema educação, Anazawa, Feitosa e Monteiro (2013) sugerem avaliar a proporção de pessoas alfabetizadas com mais de 5 anos de idade com relação à totalidade de indivíduos do setor censitário. Realizando essa análise para os três setores censitários existentes na região do Jacó, percebe-se que uma quantidade significativa da população de cada um deles, aproximadamente 81% nos setores 1 e 3 e 91% no setor 2 é alfabetizada, reduzindo a vulnerabilidade social da área com relação a esse aspecto.

Tabela 5.23 Grau de escolaridade dos setores censitários inclusos na área da Comunidade São José do Jacó

Setor Censitário	Número de Alfabetizados com idade igual ou superior a 5 anos	População Total	Porcentagem de alfabetizados em proporção à população total (%)
Setor 1	265	328	81,29%
Setor 2	422	462	91,34%
Setor 3	775	952	81,41%

5.2.11. Mapa de Risco

O mapeamento de risco mostrou que a Comunidade apresenta grau de risco variando entre Baixo e Alto. Da extensão total ocupada, verificou-se a predominância da classe de risco Baixo, representando 46% da área total ou cerca de 1,06 hectares, seguido da classe de risco Alto, totalizando 41% ou 0,94 hectares, e, por fim, a classe de risco Médio, com 13% ou aproximadamente 0,30 hectares da área de estudo (Tabela 5.24).

Tabela 5.24 Porcentagem de área coberta por cada classe de risco

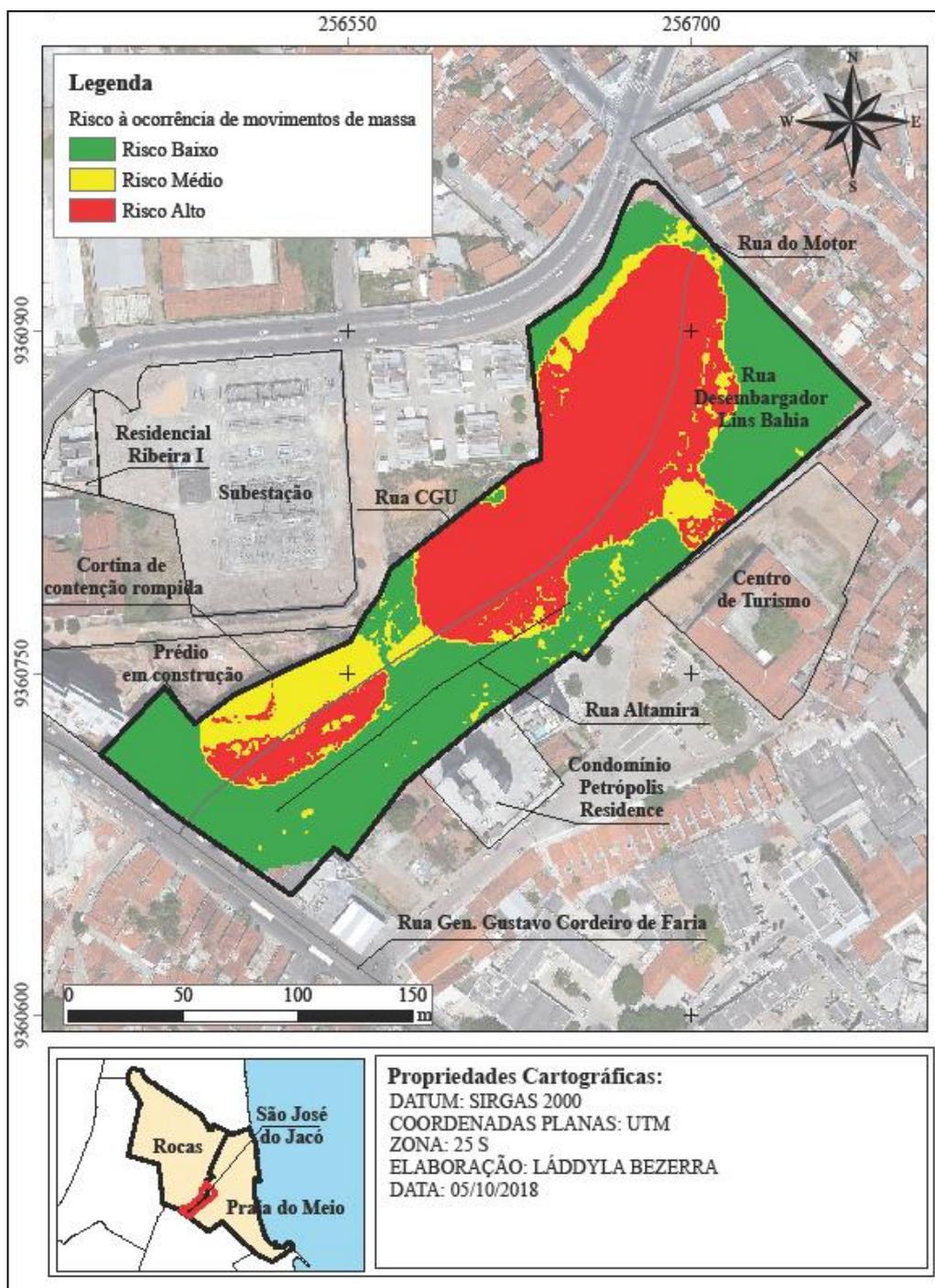
Classes	Área (ha)	% da área
Grau de risco baixo	1,06	46,00 %
Grau de risco médio	0,30	13,00 %
Grau de risco alto	0,94	41,00 %

O elemento final do processo de mapeamento, o Mapa de Risco de ocorrência de movimentos de massa, produzido para a Comunidade São José do Jacó, é apresentado na Figura 5.28.

A codificação desse mapa, assim como o de suscetibilidade, perigo e vulnerabilidade, se deu, conforme recomendação de Alheiros (1998), através das cores semafóricas, sendo verde para o risco baixo, amarelo para o risco médio, e vermelho para o risco alto. A utilização desse padrão de cores é indicada dada a relação imediata com a noção implícita de referencial de risco.

Ponderando sobre a influência de cada indicador na espacialização do risco na área em estudo, comparou-se os resultados obtidos no mapa de suscetibilidade, perigo e vulnerabilidade. Essa avaliação entre os três mapas nos permitiu também estabelecer uma relação entre os critérios da classificação de risco adotados por Brasil (2007) e a desenvolvida neste trabalho através da aplicação do método AHP.

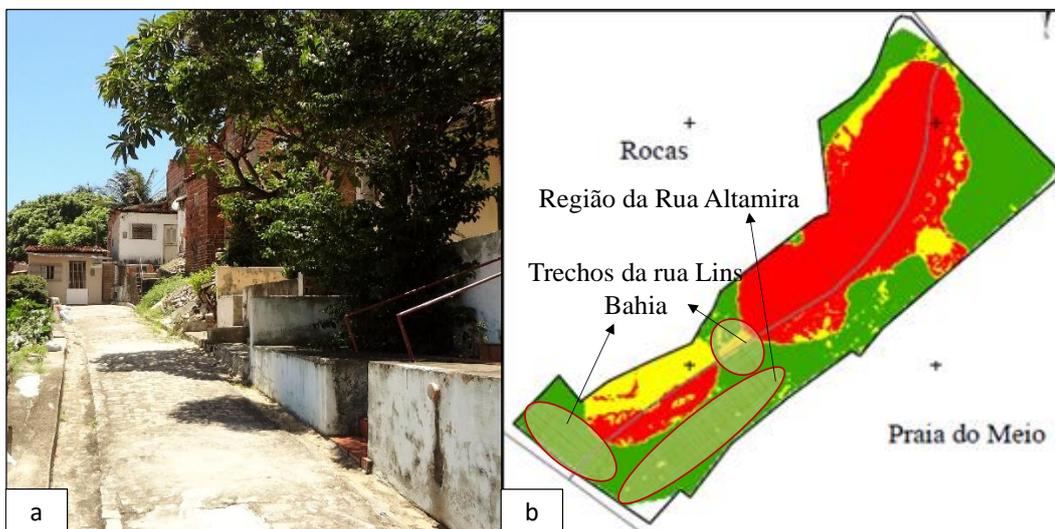
Figura 5.28 Mapa de Risco da Comunidade São José do Jacó



De modo geral, percebe-se, nas áreas da encosta classificadas como de risco baixo, as quais concentram-se, principalmente, na Rua Altamira e na parte inicial da Rua Desembargador Lins Bahia que não foi afetada pela ruptura da cortina de contenção (Figura 5.29), condicionantes geomorfológicos (inclinação, amplitude, morfologia em planta, morfologia em perfil) de baixa potencialidade para o desenvolvimento de movimentos de

massa, com valores de amplitude inferiores a 20 m, baixa inclinação (inferior a 10°), morfologia em planta convexa/divergente e morfologia em perfil retilínea e/ou convexa.

Figura 5.29 Detalhamento das regiões em que foi possível observar Risco Baixo: a) Rua Altamira; b) Destaque das regiões de baixo risco no mapa de risco



Acerca da contribuição das interferências antrópicas nessas localidades, observa-se ausência ou redução de indícios de processos de instabilização anteriores ou em desencadeamento; inexistência de água sobre a superfície da encosta ou pontos de surgência ao longo do perfil da vertente, que podem estar relacionados à existência, mesmo que incipiente, de rede de esgotamento sanitário, rede de abastecimento de água e sistema de drenagem de águas pluviais.

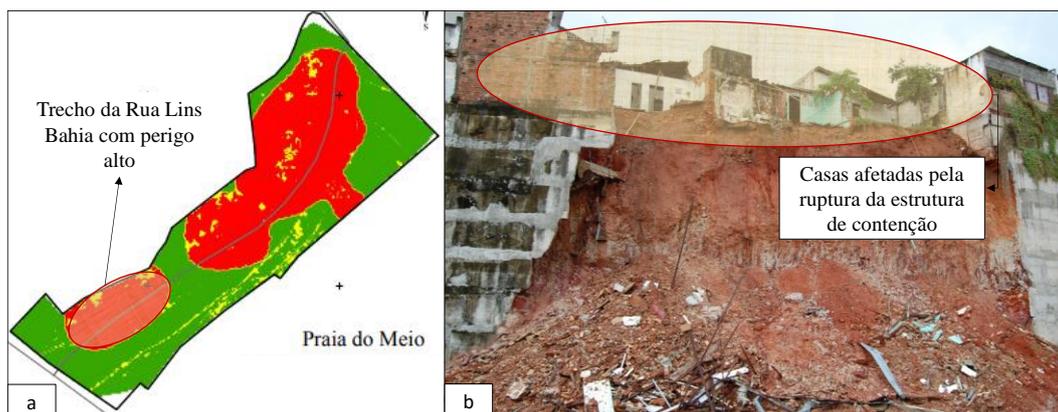
Aliado a isso, nessas áreas de menor risco, notam-se situações de baixa à média vulnerabilidade, fruto de menores valores de densidade demográfica; existência de domicílios com maior renda, quando comparado às regiões de risco médio ou alto, o que, como discutido anteriormente, possui uma relação direta com uma melhor infraestrutura das moradias, e, por conseguinte, à resposta à ocorrência de um movimento de massa.

Nas regiões da encosta classificadas como Risco Médio, que se concentrou na região da Rua Desembargador Lins Bahia, ao lado da estrutura de contenção ali existente, os condicionantes geológicos-geotécnicos não foram de grande influência para espacialização do risco. Nessas localidades, a maior contribuição para ocorrência de movimentos de massa foi dada pela forma de interferência antrópica sobre a encosta e pela influência do parâmetro vulnerabilidade.

A contribuição desfavorável das intervenções humanas na área fica evidente no trecho da Rua Desembargador Lins Bahia em que o perigo para ocorrência de movimentos de massa foi elevado, de Baixo para Alto (Figura 5.2-30, a), em decorrência da execução de um corte para construção de uma estrutura de contenção que rompeu em duas ocasiões, ocasionando o surgimento de feições de instabilidade pontuais, extremamente importantes na análise do perigo e do risco.

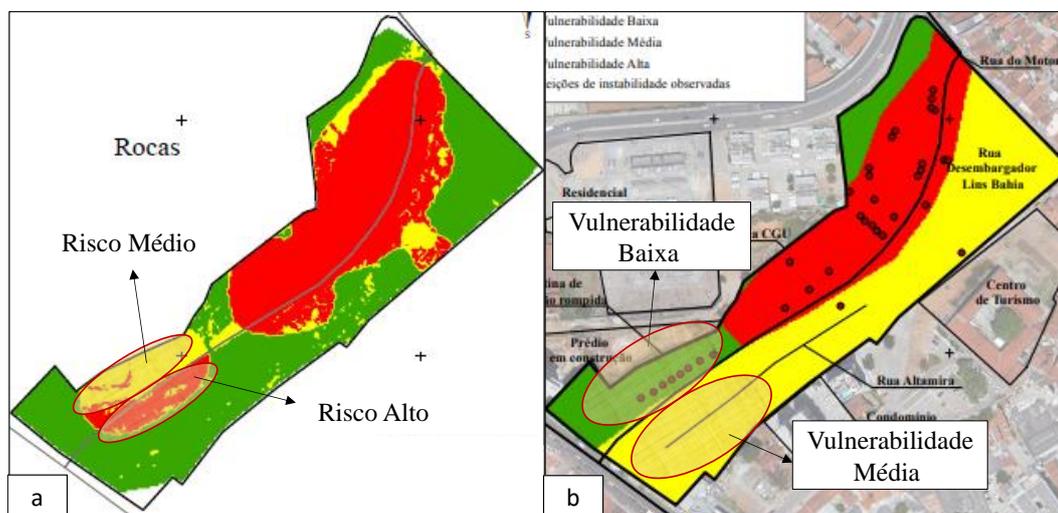
Como já discutido anteriormente, as intervenções antrópicas sobre o talude natural, dado pela remoção da cobertura vegetal composta por vegetação rasteira, realização de um corte vertical, construção da cortina de contenção ineficiente do ponto de vista de drenagem, e, conseqüente alteração do fluxo natural de água subterrânea no local, tornaram esse trecho da encosta instável e susceptível a movimentos de massa.

Figura 5.30 Contribuição desfavorável das intervenções humanas na área próxima à cortina de contenção para obtenção de Risco Médio: a) Trecho da rua Lins Bahia com perigo Alto; b) Casas afetadas pela ruptura da estrutura de contenção



Com relação à colaboração da vulnerabilidade para obtenção dos respectivos graus de risco na área em discussão, constata-se a diferenciação do risco entre Médio e Alto (Figura 5.2-31, a), no trecho próximo à contenção, no qual o perigo era alto, em função do parâmetro densidade demográfica, representante da vulnerabilidade social da área, a qual assumiu as classes baixa e média, respectivamente, conforme mostra a Figura 5.2-31, b.

Figura 5.31 Influência do parâmetro vulnerabilidade na área próxima à cortina de contenção para espacialização do risco: a) Destaque dos trechos com diferenciação entre risco Médio e Alto no mapa de risco; b) Destaque dos trechos com diferenciação entre vulnerabilidade Baixa e Alta.

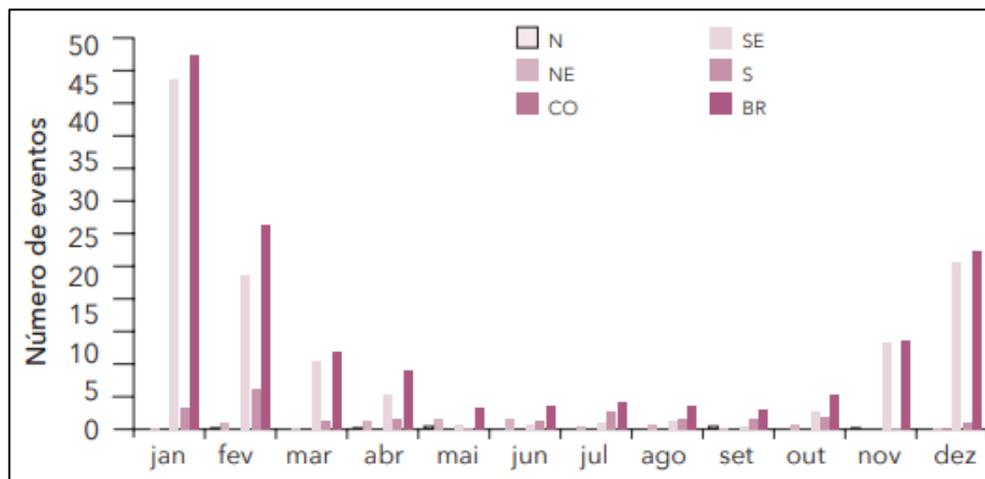


Nas localidades em que se observa Risco Alto, quase 50% da área total do Jacó, os condicionantes geológicos-geotécnicos são de maior potencialidade para o desenvolvimento de movimentos de massa, com valores de amplitude entre 10 e 20 metros e maior que 20 metros, inclinação superior a 20°, morfologia em planta predominantemente convergente, forma da encosta em perfil côncava e áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal ou até superfícies impermeáveis.

Ainda com relação aos aspectos físicos naturais, apesar do parâmetro pluviosidade não ter sido analisado na fase de atribuição dos pesos pelo método AHP, tendo em vista a uniformidade espacial de comportamento na área estudada, ressalta-se a sua relevância nos estudos voltados à temática do risco, tendo em vista a relação existente entre a ocorrência de chuvas intensas e a deflagração de movimentos de massa, decorrente da elevação do fluxo de água, saturação do solo, redução de sua resistência e aumento das solicitações externas resultado do acréscimo no valor do peso específico dos materiais.

Os dados apresentados na Figura 5.32, retirado de Universidade Federal de Santa Catarina (2013), acerca da frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil entre os anos 1991 e 2012, ratificam a correlação entre chuvas intensas e deflagração de movimentos de massa. Nele, observa-se que os meses que apresentaram a maior quantidade de registros de movimentos de massa foram novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril, período mais chuvoso no país, associado às estações da primavera e do verão.

Figura 5.32 Frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil no período de 1991 a 2012



Fonte: Universidade Federal de Santa Catarina (2013)

No que se refere às intervenções antrópicas sobre a encosta, durante as visitas de campo realizadas foi possível observar uma grande quantidade de cortes desordenados, de tamanho e altura variáveis, realizados com o objetivo de permitir a construção das vias de acesso e, principalmente, das moradias, localizadas, tanto na crista ou no pé do talude, quanto sobre a superfície em declive da encosta, apresentando a viabilidade de queda da que se encontra na parte superior e de atingimento da residência no pé do talude.

Esse tipo de situação, ilustrado nas Figuras 5.33 e 5.34, levou a Defesa Civil Municipal a atuar de forma preventiva no Jacó e interditar algumas moradias que se encontravam em meia encosta e na parte inferior do talude.

Figura 5.33 Construção de residências em meia encosta



Figura 5.34 Construção de residências em meia encosta



A ação humana na área é refletida também no despejo de lixo e entulho sobre o talude (Figura 5.35, a e b). Segundo Wiggers (2013), estes materiais caracterizam-se por possuírem um caráter heterogêneo e comportamento geotécnico bastante instável, o que atua no aumento do peso sobre a encosta, ajudando assim a deflagrar a ocorrência de movimentos.

Figura 5.35 Lançamento de lixo e entulho sobre a encosta



Verificou-se ainda vazamentos em tubulações de abastecimento e de esgotamento sanitário. Além disso, mesmo existindo uma rede de esgotamento sanitário na área, implantada no ano de 2014, nota-se a utilização intensa de fossas sépticas e sumidouros como sistema de esgotamento nas moradias localizadas nessas áreas de alto risco.

Alheiros (2003) evidencia que, sobretudo os sumidouros, funcionam como pontos de concentração de água, logo, quanto mais juntos e numerosos, maior o risco de movimentos de massa para as moradias próximas.

Por fim, a presença de significativos indícios de instabilidade (existência de fissuras verticais, horizontais e diagonais em piso e/ou alvenaria, a inclinação de estruturas rígidas, como muros de contenção, árvores de grande porte, cercas, postes e a fachada das residências e subsidência do piso da residência) foi um fator expressivo para obtenção do grau de risco Alto em determinados setores do Jacó.

A Tabela 5.25, apresenta a caracterização dos principais fatores existentes na encosta, distribuídos por classes de risco.

Tabela 5.25 Características utilizadas na classificação do Risco a Movimentos de Massa na Comunidade São José do Jacó

Grau de Risco	Descrição
Baixo	Os condicionantes geológicos-geotécnicos e as intervenções antrópicas sobre a localidade são de baixa potencialidade para o desenvolvimento de movimentos de massa. Ausência de indícios de processos de instabilização da encosta, inexistência de água sobre a superfície da encosta ou pontos de surgência ao longo do perfil da vertente. Observa-se ainda baixa à média vulnerabilidade, fruto de menores valores de densidade demográfica.
Médio	Os condicionantes geológicos-geotécnicos são baixa potencialidade para o desenvolvimento de movimentos de massa. No entanto, observa-se a presença de algumas feições de instabilidade (sobretudo fissuras em alvenaria e piso de residências e inclinação de estruturas rígidas) pontuais. Ademais, verifica-se baixa à média vulnerabilidade, fruto de menores valores de densidade demográfica. Mantidas as condições existentes, são médias as possibilidades de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
Alto	Os condicionantes geológicos-geotécnicos e as intervenções antrópicas sobre a área são de maior potencialidade para o desenvolvimento de movimentos de massa, com valores de amplitude entre 10 e 20 metros e maior que 20 metros, inclinação alta (superior a 20°), morfologia em planta convergente, forma da encosta em perfil côncava e áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal superficial, impermeáveis. Observa-se a presença de significativas evidências de instabilidade (existência de fissuras verticais, horizontais e diagonais em piso e/ou alvenaria, a inclinação de estruturas rígidas, como muros de contenção, árvores de grande porte, cercas, postes e a fachada das residências e subsidência do piso da residência). Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a sua evolução. Presença de vazamentos em tubulações de abastecimento ou mesmo em tubulações de esgotamento sanitário. Presença de fossas sépticas e sumidouros. Alta vulnerabilidade, associada a elevados valores de densidade demográfica, concentração de moradias em situação de baixa renda, e piores condições de infraestrutura das residências. Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.

5.3. COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS REALIZADOS NA COMUNIDADE SÃO JOSÉ DO JACÓ

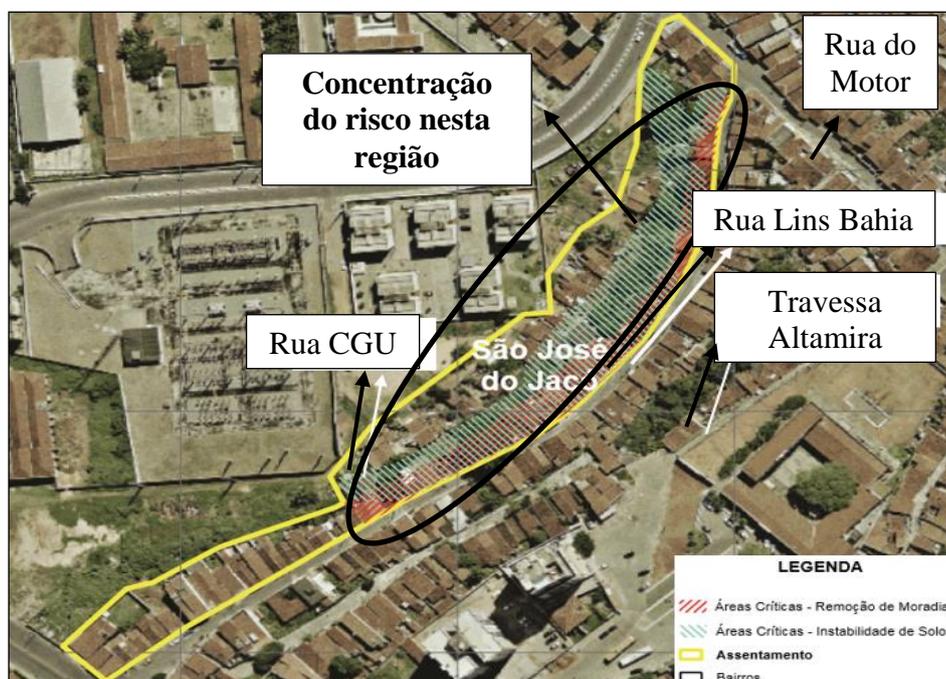
Durante pesquisa bibliográfica, constatou-se a existência de outros três trabalhos desenvolvidos na área de estudo, associados ao mapeamento de movimentos de massa.

O primeiro deles, elaborado no ano de 2008 e apresentado em Natal (2008), atribuiu ao Jacó grau de risco Alto para queda de barreiras. Utilizando como referência a classificação de Augusto Filho (1992), equivale ao movimento de massa do tipo escorregamento.

A metodologia utilizada para a realização da análise de risco não foi especificada no relatório final elaborado pela empresa Acquatool Consultoria. No entanto, considerando que o grau de risco é definido por meio da comparação das situações de risco sem a realização de cálculos probabilísticos deduz-se, portanto, que se trata de uma metodologia qualitativa.

Um aspecto importante a ser ressaltado é que para o mapeamento realizado em Natal (2008) o assentamento São José do Jacó limitava-se apenas à área compreendida entre a Rua Desembargador Lins Bahia, na parte superior da encosta, e a Rua CGU, na parte inferior, como é possível observar na Figura 5.36.

Figura 5.36 Mapa de risco elaborado pelo Plano Municipal de Redução de Riscos do Município de Natal

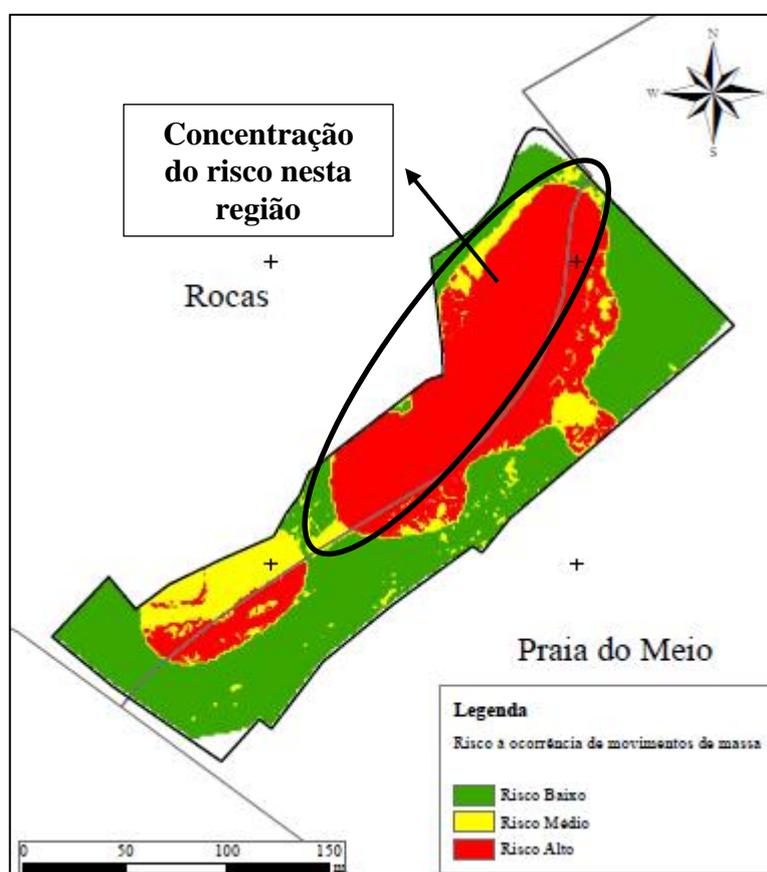


Fonte: Modificado de Natal (2008)

Todavia, na análise aqui desenvolvida a delimitação da área da Comunidade foi modificada, conforme recomendação da Defesa Civil Municipal, passando a limitar-se pela Travessa Altamira, na divisa com o muro do Centro de Turismo, pela Rua C.G.U, na parte inferior da encosta, pela Rua do Motor e pela Rua Coronel Joaquim Manoel.

Comparando o resultado do mapeamento da Figura 5.37 e do obtido neste trabalho, visualiza-se, apesar da diferenciação quanto aos limites da área ocupada pelo Jacó, como mencionado acima, a proximidade nos resultados alcançados entre ambos, denotando a concentração de uma região de alto risco à ocorrência de movimentos de massa na área compreendida entre as ruas Desembargador Lins Bahia e CGU.

Figura 5.37 Mapa de Risco da Comunidade São José do Jacó

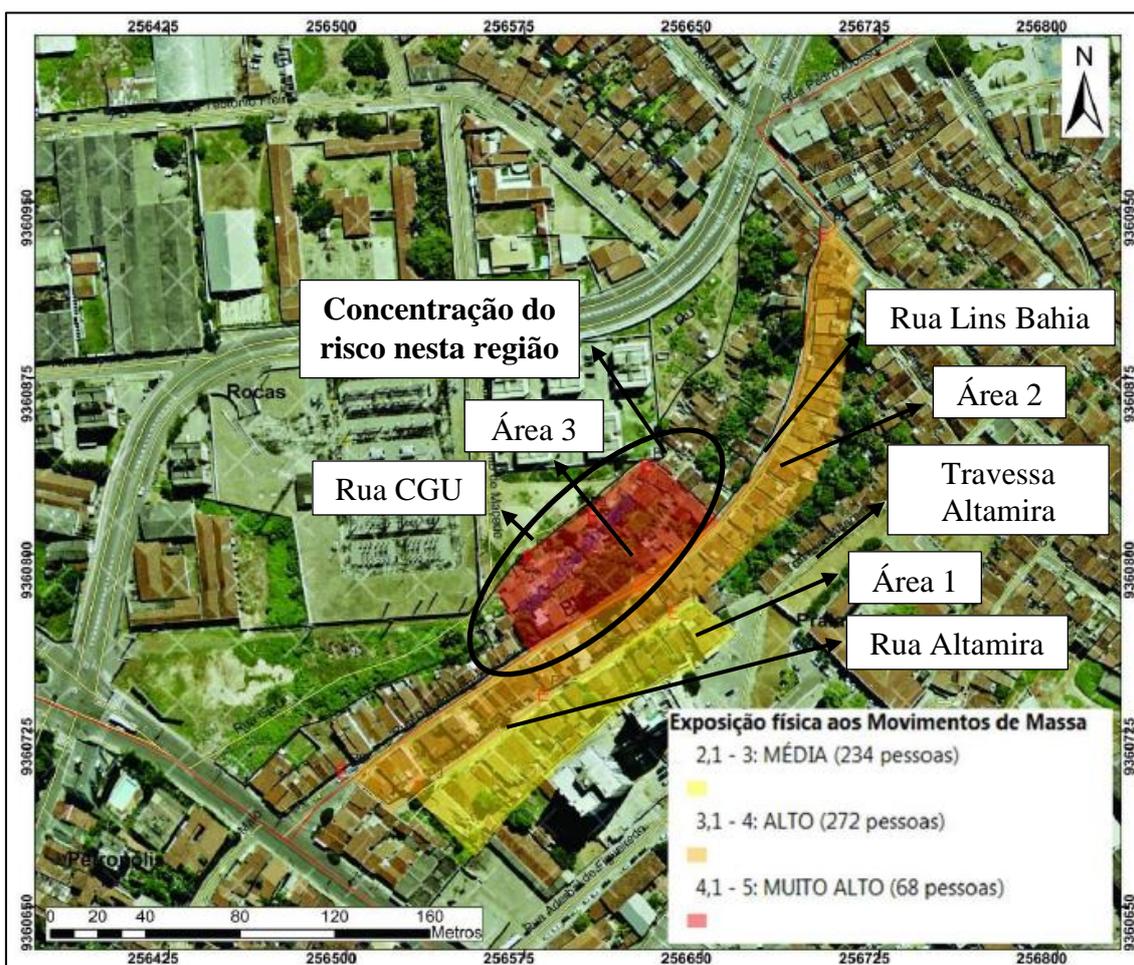


O trabalho de Silva, Almeida e Macedo (2015), vinculado ao projeto “Riscos naturais e vulnerabilidade social no município de Natal, RN”, desenvolvido no Departamento de Geografia da UFRN, identificou e classificou os pontos de maior vulnerabilidade a escorregamentos no Jacó por meio da aplicação da metodologia proposta por Guerra (2009).

A Figura 5.38 traz o mapa produzido por Silva, Almeida e Macedo (2015). Nele é possível observar que para as residências localizadas entre a rua Desembargador Lins Bahia e a Rua Altamira (área 1 do mapa) foi atribuído risco médio; a maior parte das residências ao lado direito da Rua Lins Bahia obtiveram risco alto (área 2 do mapa) e algumas moradias localizadas entre a Lins Bahia e a CGU, totalizando 68 pessoas, estão expostas a um risco muito alto para ocorrência de movimentos de massa.

Ao realizar a comparação entre o mapeamento proposto por Silva, Almeida e Macedo (2015) e o obtido nesta pesquisa, exposto na Figura 5.37, constata-se, mais uma vez, a conformidade nos resultados alcançados entre ambos na região denominada área 3, compreendida entre as ruas Desembargador Lins Bahia e CGU, a qual apresentou maior risco à ocorrência de movimentos de massa. No entanto, nas demais regiões da encosta percebe-se menor correlação nos resultados alcançados entre as duas pesquisas.

Figura 5.38 Mapa de vulnerabilidade aos movimentos de massa na comunidade do Jacó, elaborado por Silva, Almeida e Macedo (2015)



Fonte: Silva, Almeida e Macedo (2015)

Além disso, é importante destacar que para obtenção dos dados necessários à elaboração do mapa de risco de Silva, Almeida e Macedo (2015), foram coletadas informações pontuais, no início, meio e fim de cada uma das três ruas do Jacó: a Rua Altamira, a Rua Lins Bahia e a Rua CGU, e, posteriormente, esses pontos foram resumidos de forma a estabelecer uma única análise para cada rua. Logo, percebe-se que houve uma extrapolação de características pontuais para uma área, podendo diminuir a confiabilidade do produto final obtido.

Uma sistemática de coleta de dados semelhante foi implementada por Bezerra (2016) ao mapear o risco de movimentos de massa no Jacó por meio da aplicação da metodologia de Gusmão Filho *et al.* (1992). Para realização do estudo, a Comunidade São José do Jacó foi fragmentada em 5 setores de encosta que possuíam características semelhantes, de modo que o grau de risco foi obtido através da extrapolação da análise qualitativa de uma seção de encosta dentro de cada setor para uma área de influência em torno desta seção, conforme exemplificado na Figura 5.39.

Figura 5.39 Mapa locação das seções e setores de encosta analisados na Comunidade São José do Jacó, extraído de Bezerra (2016)

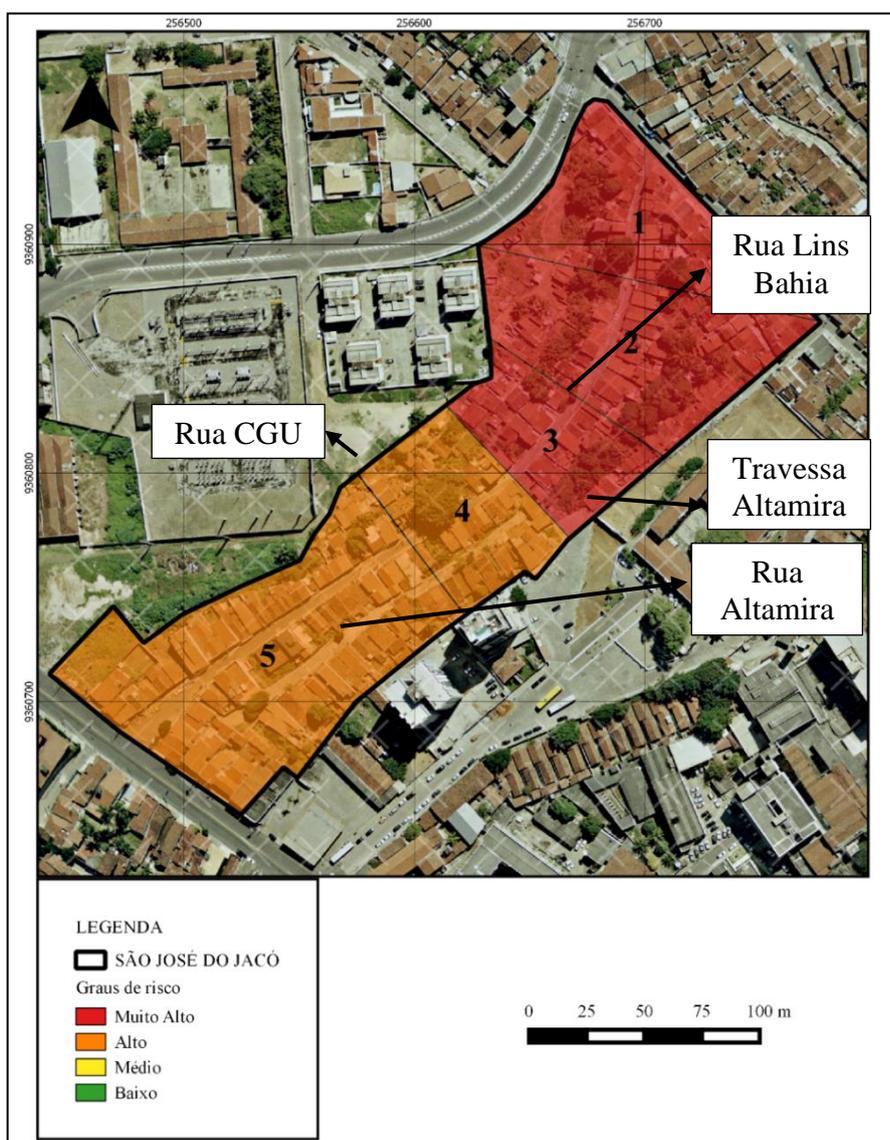


Fonte: Bezerra (2016)

Contudo, a autora explicita que as informações obtidas refletem as características médias de cada setor de encosta, de modo que situações de risco diferenciadas podem ocorrer dentro de um mesmo setor.

No tocante aos resultados alcançados pelo mapeamento de risco proposto por Bezerra (2016) (Figura 5.40), nota-se que a Comunidade apresentou grau de risco variando entre Alto e Muito Alto. Do total de 5 setores analisados, 3 obtiveram Grau de Risco Muito Alto e os outros 2, Grau de Risco Alto para a ocorrência de movimentos de massa, sobretudo rastejos e escorregamentos.

Figura 5.40 Mapa de risco da Comunidade São José do Jacó extraído de Bezerra (2016).



Fonte: Modificado de Bezerra (2016)

De forma semelhante ao que foi observado nos outros dois mapeamentos, ao analisar a existência de correlação entre o mapeamento de Bezerra (2016) e o obtido nesta pesquisa, constata-se mais uma vez a conformidade nos resultados quanto à existência de um risco maior na região compreendida entre as ruas Desembargador Lins Bahia e CGU.

Por fim, a comparação realizada entre os quatro trabalhos desenvolvidos na Comunidade São José do Jacó nos permite concluir a existência de uma situação crítica de risco para a população residente da área, principalmente relacionada a possibilidade de ocorrência do movimento de massa do tipo escorregamento, com possíveis danos sociais, econômicos e ambientais.

5.4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE PROBABILÍSTICA

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos através das simulações numéricas de análise de estabilidade probabilística para os dois cenários preliminarmente definidos, com superfície de ruptura do tipo não circular. Em primeiro lugar apresentam-se os resultados do Cenário I, situação em que o solo se encontra sob umidade natural. Em sequência, seguem os resultados das simulações realizadas para o Cenário II, com o solo hipoteticamente saturado.

Esses resultados contemplam o FS determinístico, a média e o desvio padrão dos FS obtidos pelos métodos de Janbu Corrigido, Spencer e GLE/Morgenstern-Price; histogramas de frequência do FS, fornecendo secundariamente a função distribuição de probabilidade da variável dependente; a curva de distribuição acumulada do FS, da qual é possível extrair também a probabilidade de desempenho insatisfatório; além do Índice de Confiabilidade para cada uma das 06 seções analisadas.

5.4.1. Seção 1

A Tabela 5.26 traz os resultados obtidos na simulação probabilística para a seção de análise 1 com dados do solo nos dois cenários de análise (natural e saturado) e superfície de ruptura não-circular.

Tabela 5.26 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 1 com superfície de ruptura não-circular

Cenário de análise	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Cenário I: Natural	FS determinístico	9,36	9,81	9,57
	μ (FS)	9,71	10,23	9,99
	σ (FS)	3,21	3,06	2,96
	P_f (%)	0,00	0,00	0,00
	β	2,71	3,02	3,04
Cenário II: Saturado	FS determinístico	3,36	3,51	3,49
	μ (FS)	3,43	3,59	3,56
	σ (FS)	0,86	0,94	0,92
	P_f (%)	0,00	0,00	0,00
	β	2,82	2,76	2,79
FS – Fator de segurança determinístico; μ (FS) – Fator de segurança médio; σ (FS) – desvio padrão do fator de segurança médio; P_f – Probabilidade de desempenho insatisfatório; β – Índice de confiabilidade;				

A simulação de Monte Carlo para a seção 1, utilizando 400 fatias e 5000 pares de coesão e ângulo de atrito diferentes, resultou em fatores de segurança determinísticos variando entre 9,36 (Janbu Corrigido) e 9,81 (Spencer), quando considerado o Cenário de análise I, com o solo na condição de umidade natural de campo. O fator de segurança médio ficou compreendido entre 9,71 e 10,23; o desvio padrão entre 2,96 e 3,21; a probabilidade de desempenho insatisfatório foi igual a zero pelos três métodos de cálculo e o nível de segurança aproximadamente 3,00.

Na situação hipotética de completa saturação, a análise resultou em um FS determinístico variando entre 3,36 (Janbu Corrigido) e 3,51 (Spencer); um fator de segurança médio entre 3,43 e 3,59; um desvio padrão de aproximadamente 0,90, um índice de confiabilidade de 2,79 pelo método de Morgenstern e Price e uma probabilidade de desempenho insatisfatório (P_f) nula para todos os métodos de análise.

As Figuras 5.41 e 5.42 mostram o resultado da análise de estabilidade pelo Método de Morgenstern e Price para os Cenários de análise I e II, respectivamente, com ênfase para as superfícies de ruptura críticas não-circulares encontradas.

Figura 5.41 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 01 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

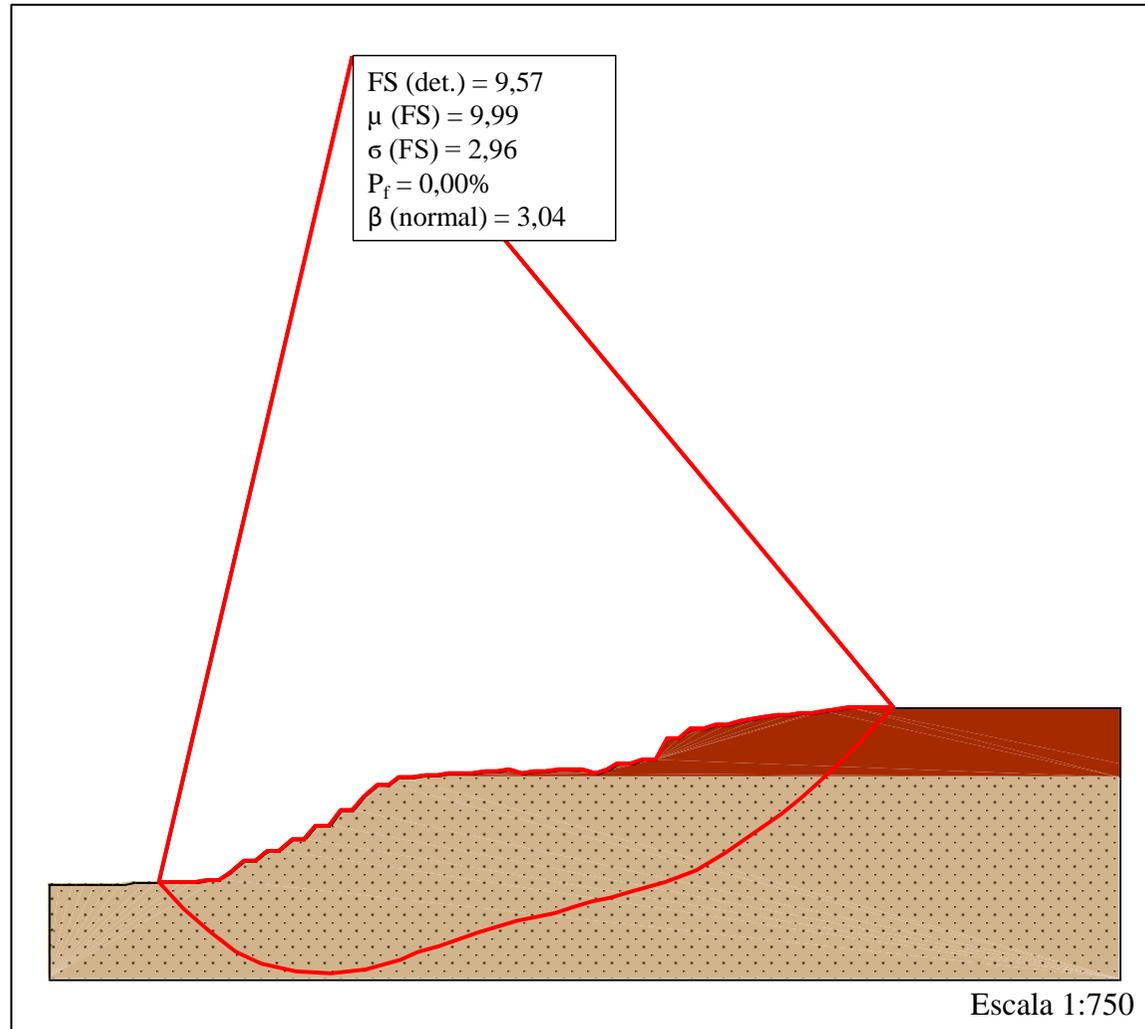
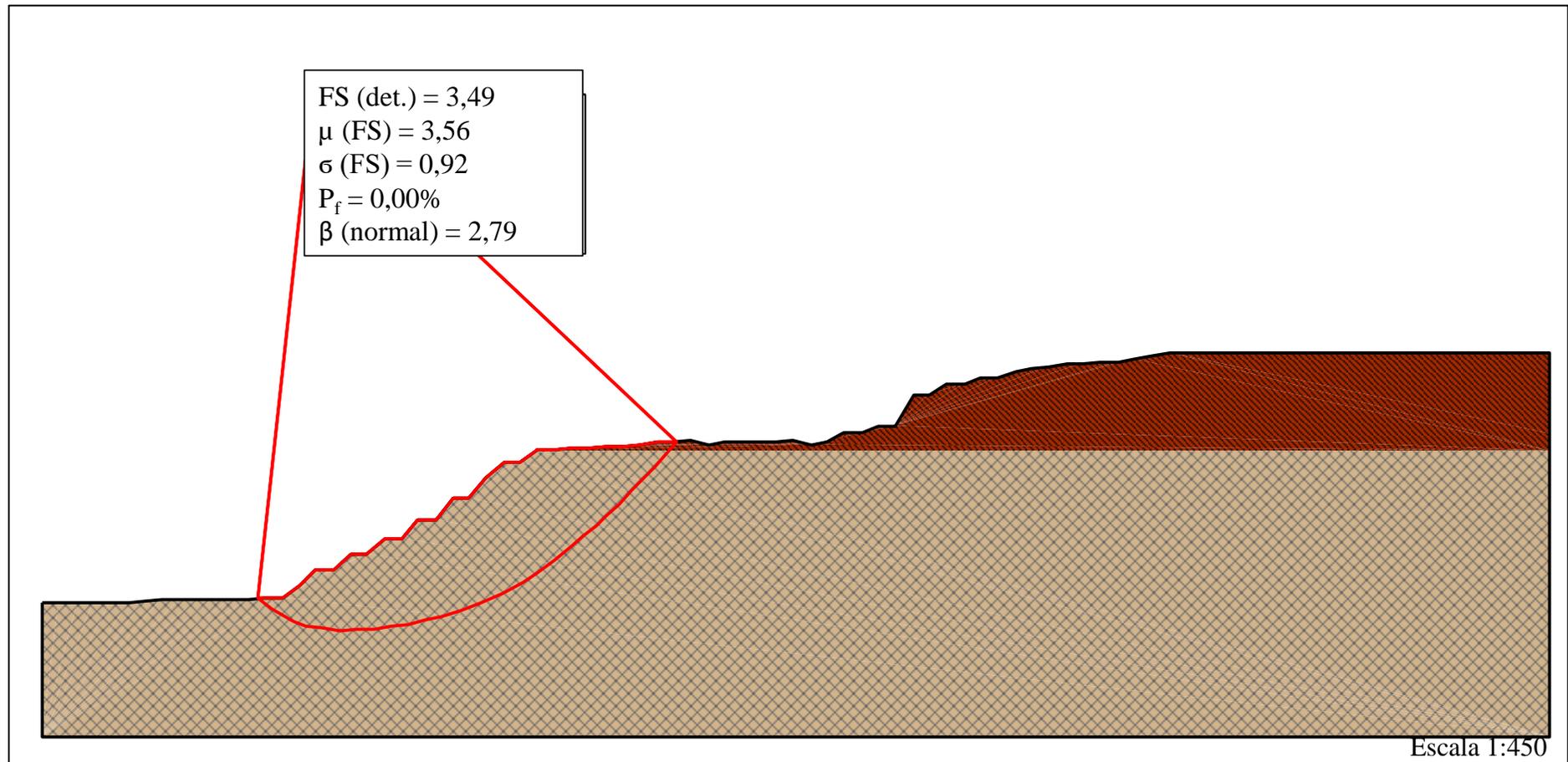


Figura 5.42 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 01 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)



Comparando os resultados alcançados entre os Cenários I e II, percebe-se deslocamento da superfície de ruptura para a camada de solo composta por Sedimentos Heterogêneos do Grupo Barreiras e redução significativa dos fatores de segurança alcançados, da ordem de 60%.

As Figuras 5.43 e 5.44 mostram o histograma de frequência e a curva de distribuição acumulada do fator de segurança para o Cenário I. Os mesmos gráficos relativos ao Cenário II são apresentados nas Figuras 5.45 e 5.46.

O histograma de frequência apresentado, também conhecido como distribuição de frequência, representa graficamente o agrupamento dos fatores de segurança obtidos nas simulações realizadas em classes de ocorrência. Esse gráfico foi construído no Slide 7.0, aplicando a simulação de Monte Carlo aos métodos de análise de estabilidade determinísticos de Janbu Corrigido, Morgenstern e Price e Spencer.

Para isso, o *software* utilizou um gerador de números aleatórios que selecionou um valor aleatório para a coesão e para o ângulo de atrito, baseado na distribuição de probabilidade dessas variáveis de entrada. Os valores selecionados foram aplicados na formulação matemática dos métodos de análise de estabilidade escolhidos e o fator de segurança foi então calculado.

Esse processo foi repetido 5000 vezes, em que 5000 refere-se ao número de iterações/amostras, permitindo a construção da função distribuição de probabilidade da variável dependente (fator de segurança), que, para a seção 1, com dados do solo nos dois cenários de análise, aproximou-se da distribuição de probabilidade paramétrica Beta.

A distribuição de probabilidade do fator de segurança foi obtida dividindo-se cada barra vertical do histograma de frequência pelo total de iterações realizadas ($n=5000$), fornecendo a frequência relativa dos valores observados em cada intervalo. Essa frequência relativa, quando o volume de dados é expressivo e o intervalo de classes tende a zero, pode ser interpretada como a probabilidade de ocorrência da variável de estudo.

Logo, a obtenção da distribuição de probabilidade do fator de segurança é de extrema importância na análise de estabilidade probabilística, dado que é a partir dela que se extrai graficamente a probabilidade de desempenho insatisfatório da seção da encosta analisada.

Conceitualmente, a probabilidade de desempenho insatisfatório será dada pela área compreendida sob a curva distribuição de probabilidade do fator de segurança, para as classes de fator de segurança inferiores a 1,00. Em outras palavras, P_f será igual ao número de análises com fator de segurança inferior à unidade dividido pelo número total de amostras

(n). Para a seção 01 nos dois cenários de análise, a probabilidade de ruptura é igual a 0,00%, o que significa que em nenhuma das 5000 simulações realizadas foi encontrado $FS < 1,00$.

A visualização desse conceito gráfico de probabilidade de desempenho insatisfatório fica mais clara a partir da análise da função de probabilidade acumulada (CDF) do fator de segurança. Essa função, construída somando-se as frequências relativas da extremidade inferior dos dados até à superior, indica a probabilidade de uma variável ter um valor menor ou igual a determinado valor selecionado, que para as análises de estabilidade utilizando a teoria do equilíbrio limite é 1,00.

O valor de probabilidade de desempenho insatisfatório nulo nas simulações realizadas nos dois cenários de análise atende às mais diversas propostas de nível de risco aceitável expostas no Item 2.4.2.1.3. De maneira geral nessas metodologias um risco considerado aceitável para uma encosta urbana ocupada envolve probabilidade de falha da ordem de 10^{-4} /ano para até 10 (dez) fatalidades.

Quanto aos resultados alcançados para os índices de confiabilidade, observa-se que tanto para o Cenário I quanto para o Cenário II, o β supera o valor de confiabilidade mínimo ($\beta = 2,0$) tido por Whitman (1984) como admissível na engenharia geotécnica. Além disso, aproxima-se também do valor de referência de $\beta = 3,00$ proposto por U. S. Army Corps of Engineers (1995) (Tabela 2.17), indicando um nível de desempenho da seção analisada acima da média.

O índice de confiabilidade (β), também chamado de nível de confiança, é uma forma de avaliar o FS médio com relação a sua incerteza, traduzida nesta análise pela magnitude do desvio-padrão. Esse índice descreve a estabilidade de um talude pelo número de desvios-padrão que separam o fator de segurança médio do valor limítrofe para a ruptura ($FS = 1,0$).

Dessa forma, se as incertezas envolvidas na análise de estabilidade forem elevadas, a exemplo da seção 1 na condição natural, cujo valor de desvio-padrão ($\sigma (FS) = 2,96$), os fatores de segurança médios necessários para manter um nível de segurança aceitável deverão ser ainda maiores. Logo, percebe-se que o alto valor de FS médio obtido ($\mu (FS) = 9,99$) para esse trecho da encosta possibilitou valores de nível de segurança aceitáveis nessa situação.

Figura 5.43 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 1 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

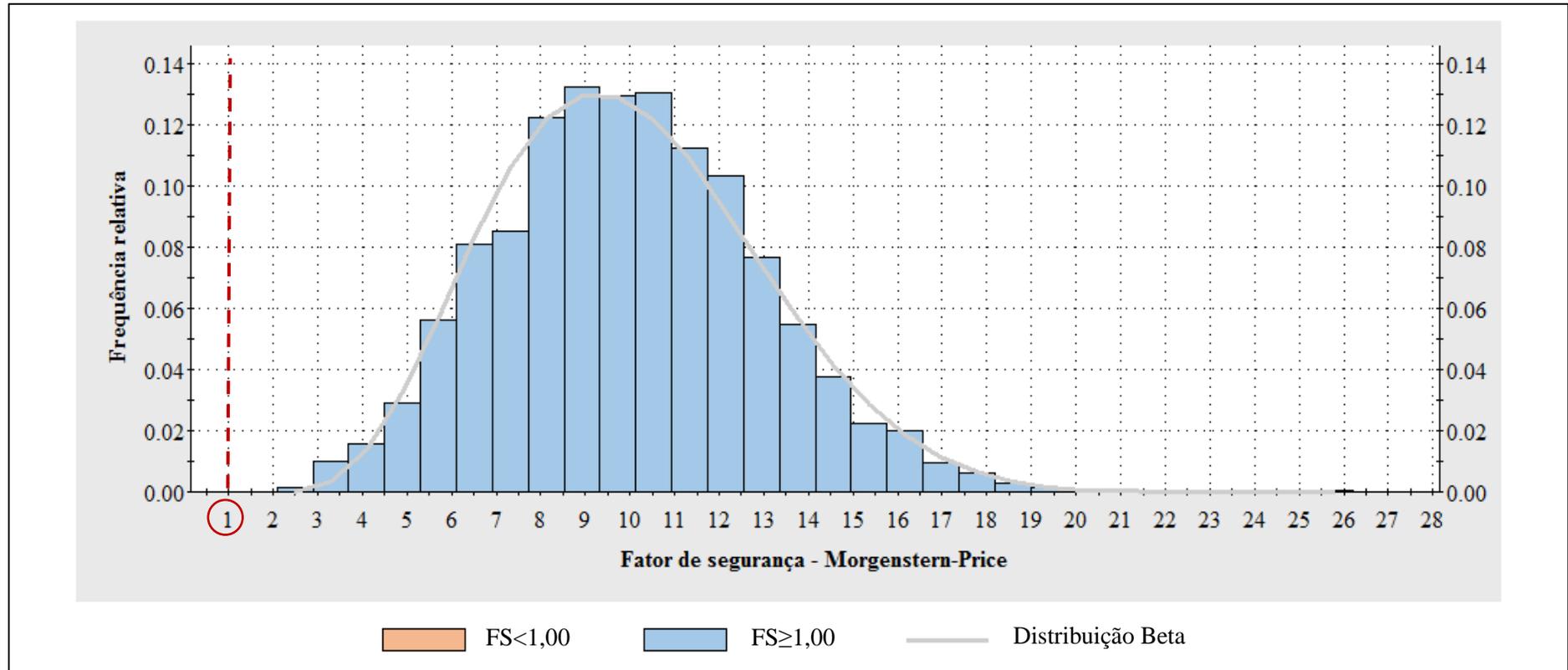


Figura 5.44 Curva de distribuição acumulada para a seção 1 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).

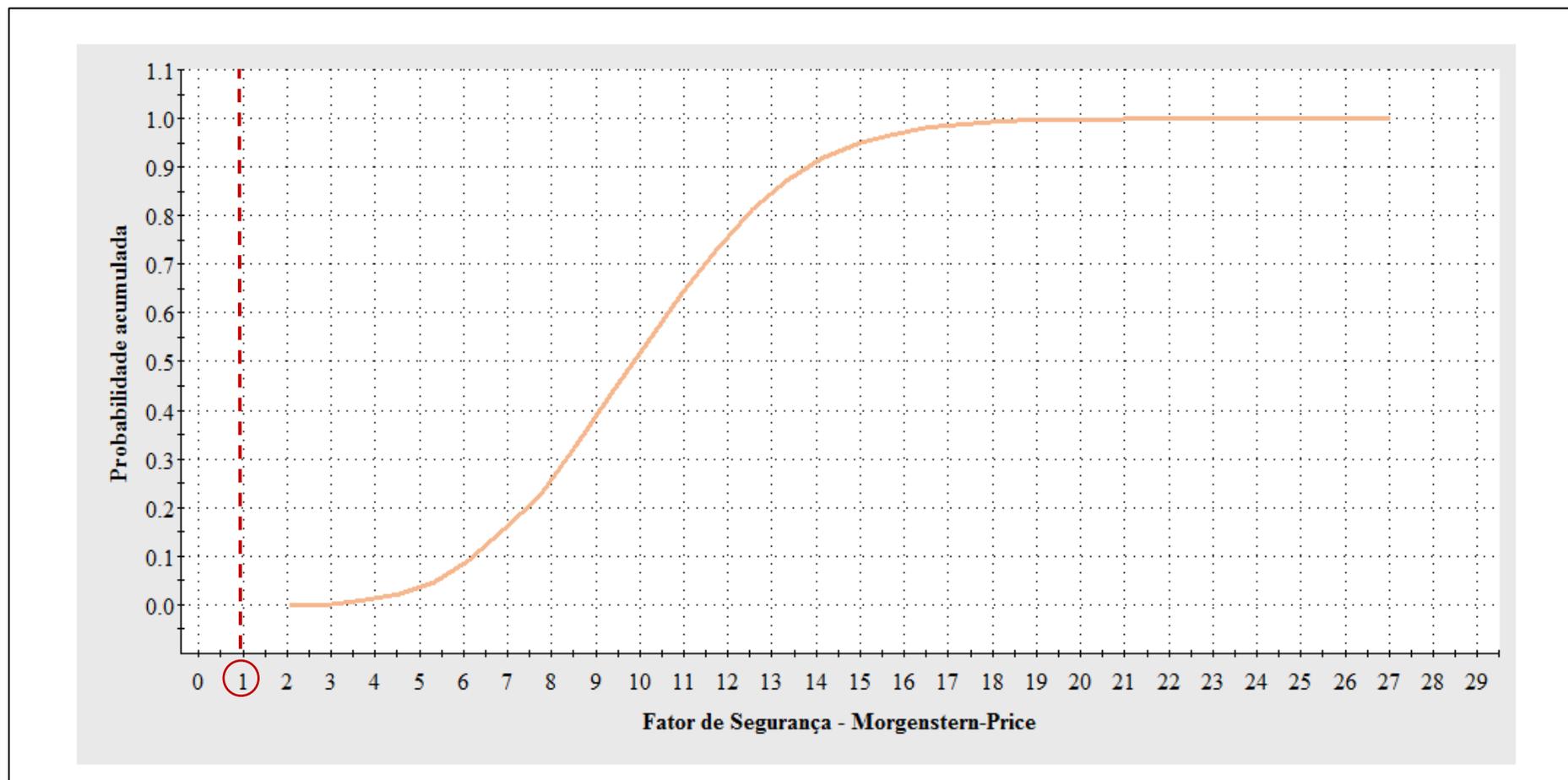


Figura 5.45 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 1 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price).

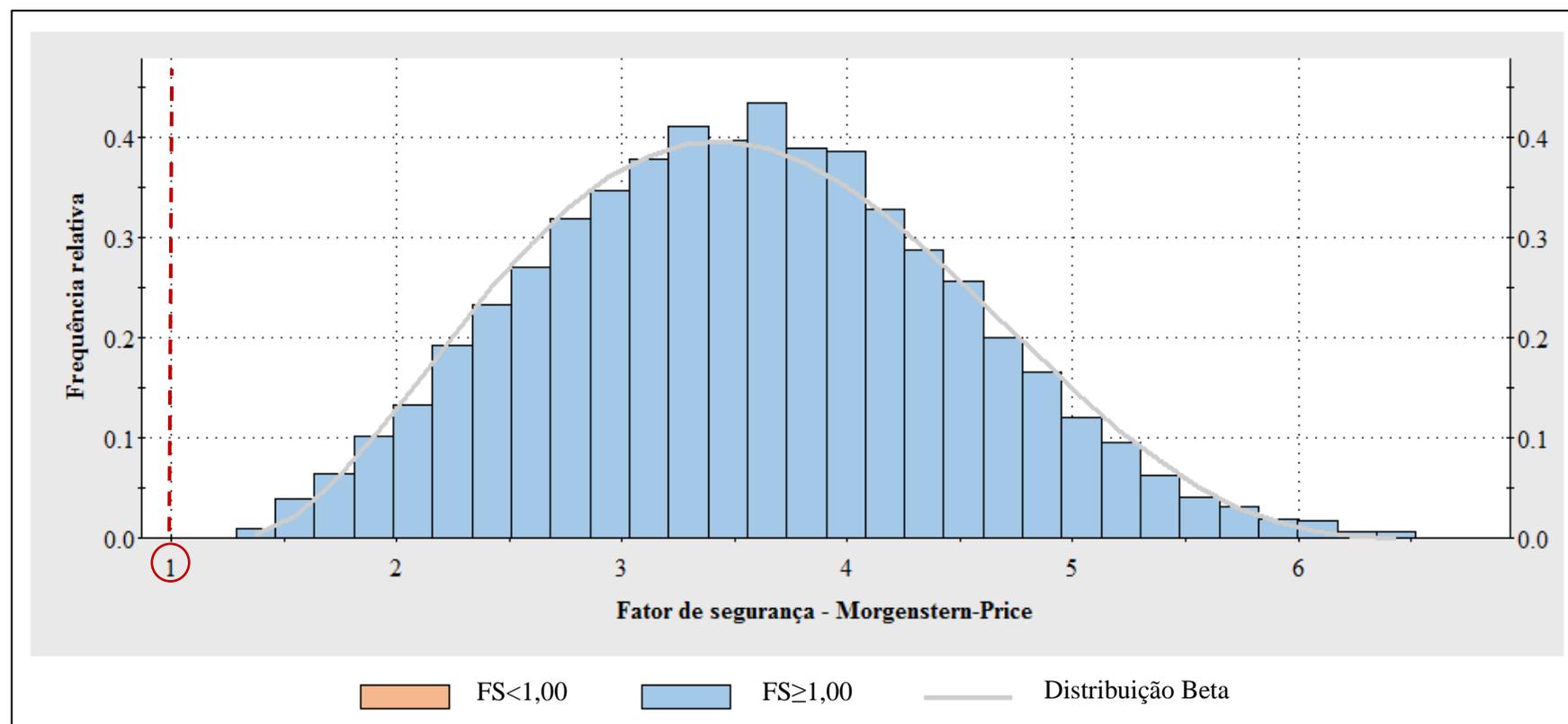
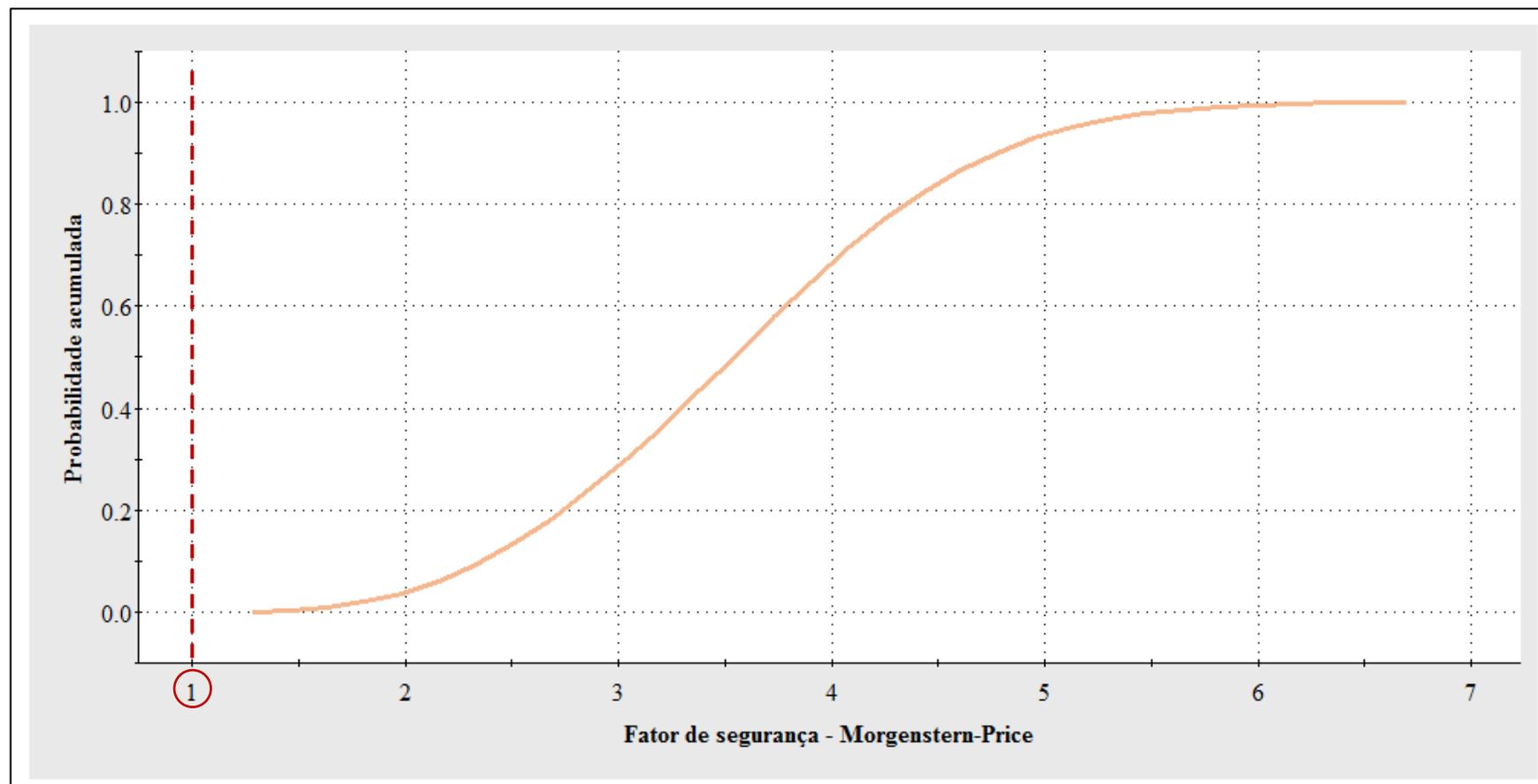


Figura 5.46 Curva de distribuição acumulada para a seção 1 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price).



Por fim, analisando os FS determinísticos obtidos, pode-se dizer que nas atuais condições de carregamento, nível freático, e demais variáveis assumidas nas simulações dessa seção para os dois cenários de saturação, esse trecho da encosta encontra-se seguro, atendendo também ao critério estabelecido pela NBR 11682/2009 de FS mínimo de 1,5 para deslizamentos (Tabela 5.27), considerando o nível de segurança desejado contra perdas de vidas humanas alto e o nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais médio.

Tabela 5.27 Fator de segurança mínimo para deslizamentos

NÍVEL DE SEGURANÇA CONTRA DANOS MATERIAIS E AMBIENTAIS →	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	1,5	1,5	1,4
MÉDIO	1,5	1,4	1,3
BAIXO	1,4	1,3	1,2

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

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

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

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009)

5.4.2. Seção 2

Na Tabela 5.28 são apresentados os resultados obtidos para a seção de análise 2.

O fator de segurança determinístico para a seção da encosta 2, com dados do solo na condição de umidade natural, ficou compreendido entre 5,78 e 6,21. O FS médio, calculado através do método de Morgenstern e Price foi igual a 6,19; o desvio padrão σ (FS) = 0,78, a probabilidade de desempenho insatisfatório ($P_f = 0,00\%$) e o índice de confiabilidade β superior a 6,00.

Para a seção 2 na condição saturada, o FS mínimo determinístico encontrado nas simulações variou entre 1,62 e 1,64; o FS médio por Janbu Corrigido e Morgenstern e Price

foi 1,87 e por Spencer 1,89; o desvio padrão foi igual pelos três métodos de cálculo (σ (FS) = 0,39), assim como a probabilidade de desempenho insatisfatório ($P_f = 0,00\%$); e o índice de confiabilidade foi da ordem de 2,20.

Tabela 5.28 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 2 com dados do solo nos dois cenários de saturação

Cenário de análise	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Cenário I: Natural	FS determinístico	5,78	6,21	5,99
	μ (FS)	6,00	6,44	6,19
	σ (FS)	0,79	0,73	0,78
	P_f (%)	0,00	0,00	0,00
	β	6,31	7,47	6,66
Cenário II: Saturado	FS determinístico	1,62	1,64	1,63
	μ (FS)	1,87	1,89	1,87
	σ (FS)	0,39	0,39	0,39
	P_f (%)	0,00	0,00	0,00
	β	2,21	2,25	2,23
FS – Fator de segurança determinístico; μ (FS) – Fator de segurança médio; σ (FS) – desvio padrão do fator de segurança médio; P_f – Probabilidade de desempenho insatisfatório; β – Índice de confiabilidade;				

Apesar da probabilidade de desempenho insatisfatório ter sido nula nos dois cenários de saturação, atendendo às mais diversas propostas de nível de risco aceitável expostas no Item 2.4.2.1.3, os índices de confiabilidade encontrados foram bem discrepantes.

No cenário em que o solo se encontra sob condições de umidade natural, β foi aproximadamente 7, superando amplamente o valor de referência estabelecido como aceitável por Whitman (1984), assim como o valor de $\beta=3,0$ proposto por U. S. Army Corps of Engineers (1995) (Tabela 2.17), indicando um nível de desempenho alto para esse trecho do talude estudado.

Ao analisar essa seção sob condição de completa saturação, constata-se que o nível de confiança obtido foi ligeiramente superior ao limite mínimo estabelecido por Whitman (1984). Todavia, sob a ótica da classificação proposta por U. S. Army Corps of Engineers (1995), a encosta apresenta nível de desempenho situado entre abaixo da média e pobre.

As Figuras 5.47 e 5.48 apresentam os resultados da análise probabilística pelo Método de Morgenstern e Price. No Cenário I, a superfície de ruptura crítica abrange as duas camadas menos resistentes do solo, compreendendo os sedimentos Pós-Barreiras e os

sedimentos homogêneos do Grupo Barreiras. No Cenário II, essa superfície, de menor volume, passa a compreender apenas a camada de solo mais superficial, menos resistente.

Atribui-se esse deslocamento da superfície de ruptura crítica à redução de aproximadamente 95% na magnitude da coesão efetiva da camada de solo composta pelos sedimentos Pós-Barreiras, que passou de 94,1 kPa na condição natural para 4,8 kPa no cenário de completa saturação. Em consequência disso, houve redução de cerca de 70% na magnitude dos fatores de segurança obtidos nas análises.

Nas Figuras 5.49 e 5.50 são apresentados, respectivamente, o histograma de frequência e a curva de distribuição acumulada do fator de segurança para a seção 2 sob condição de umidade natural. Os mesmos gráficos elaborados para o cenário de análise II são visualizados nas Figuras 5.51 e 5.52.

Nos quatro gráficos se percebe ausência de valores de FS inferiores a 1,00, resultando em probabilidades de desempenho insatisfatório nulas ($P_f = 0,00\%$). Ambas seções, assim como a anterior, encontram-se seguras, atendendo tanto ao critério estabelecido pela NBR 11682/2009 de $FS_{min} > 1,5$ para deslizamentos, quanto aos critérios de índice de confiabilidade mínimo e nível de risco aceitável.

Figura 5.47 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 2 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

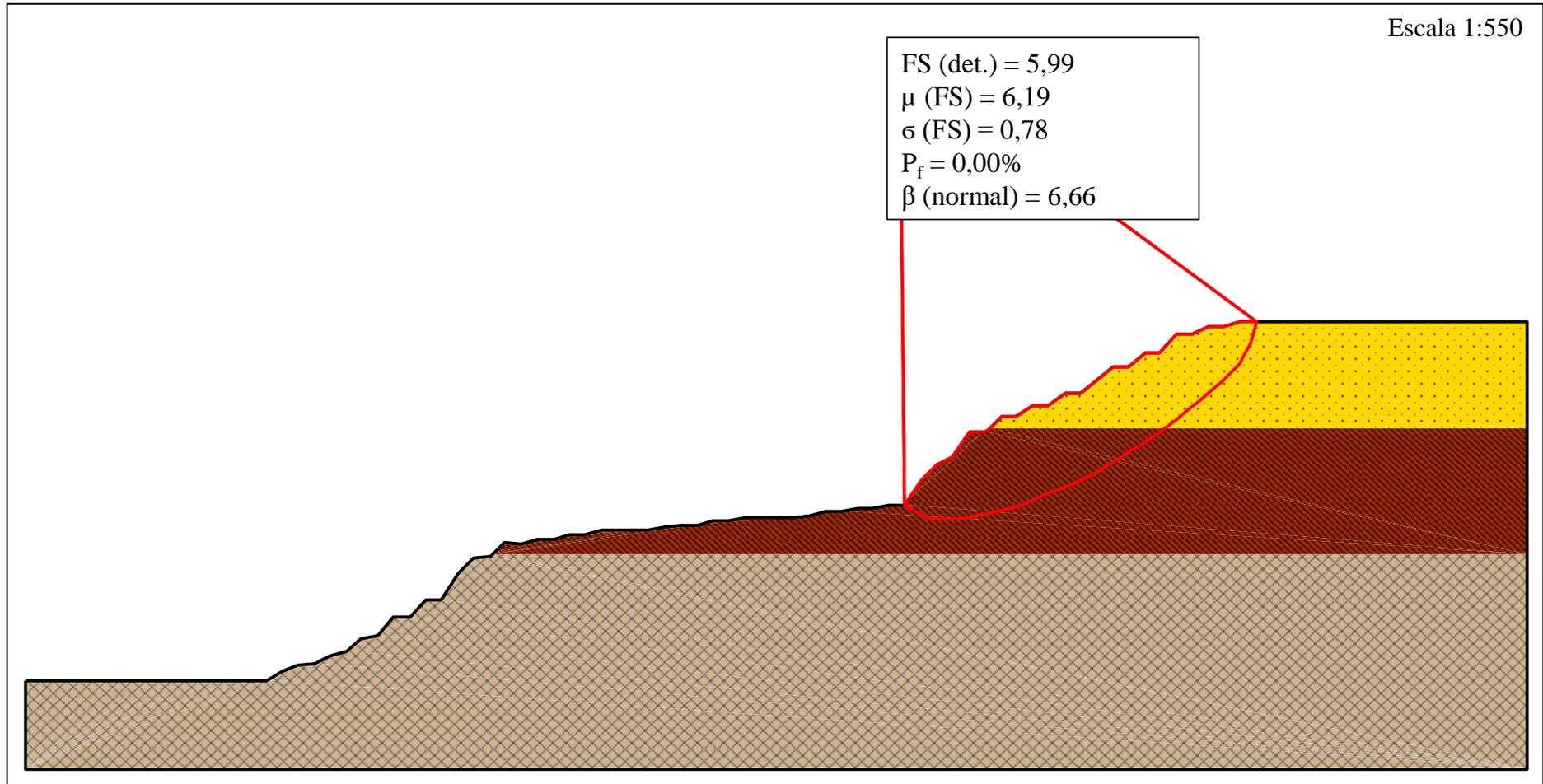


Figura 5.48 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 2 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

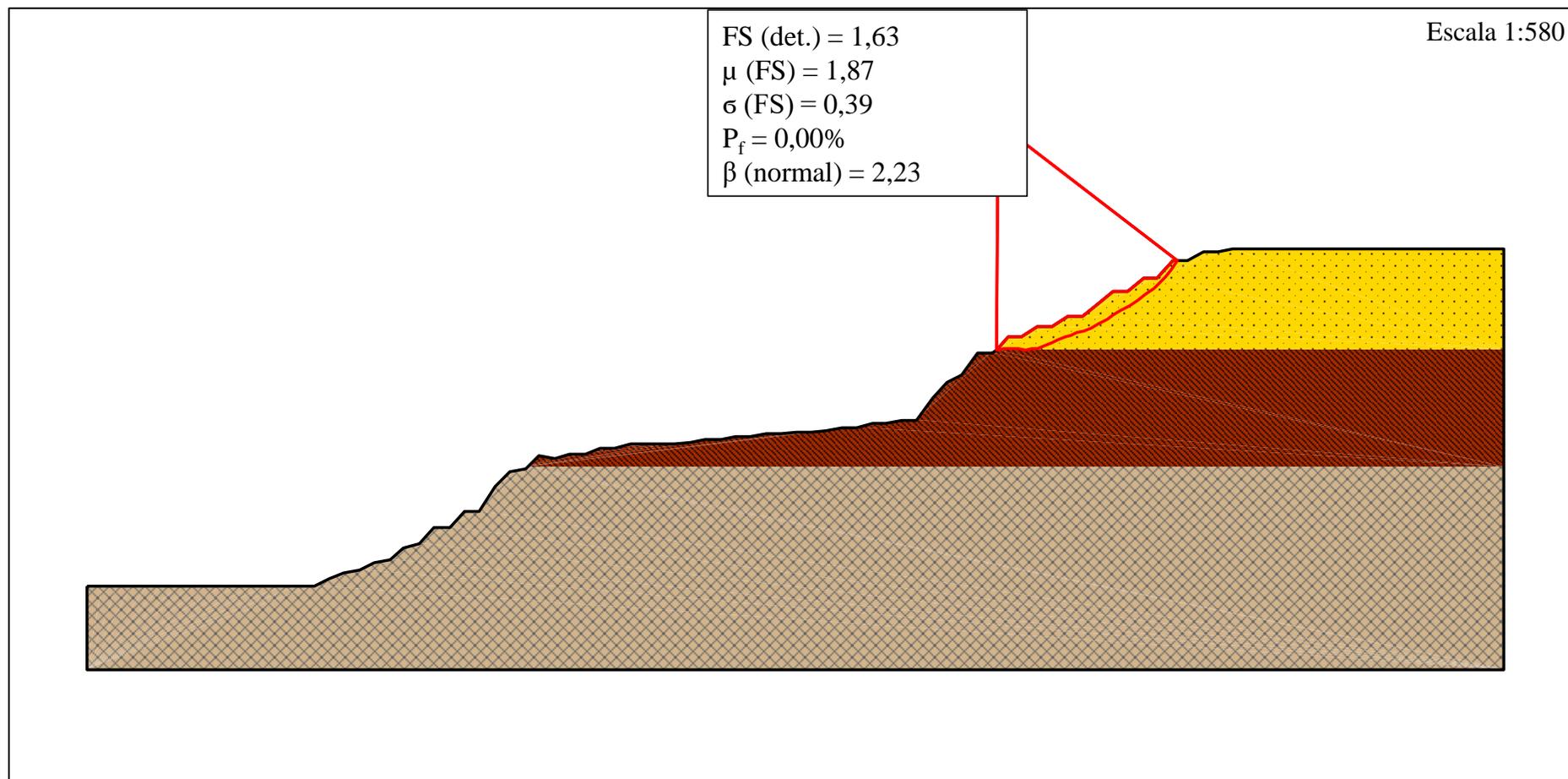


Figura 5.49 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 2 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

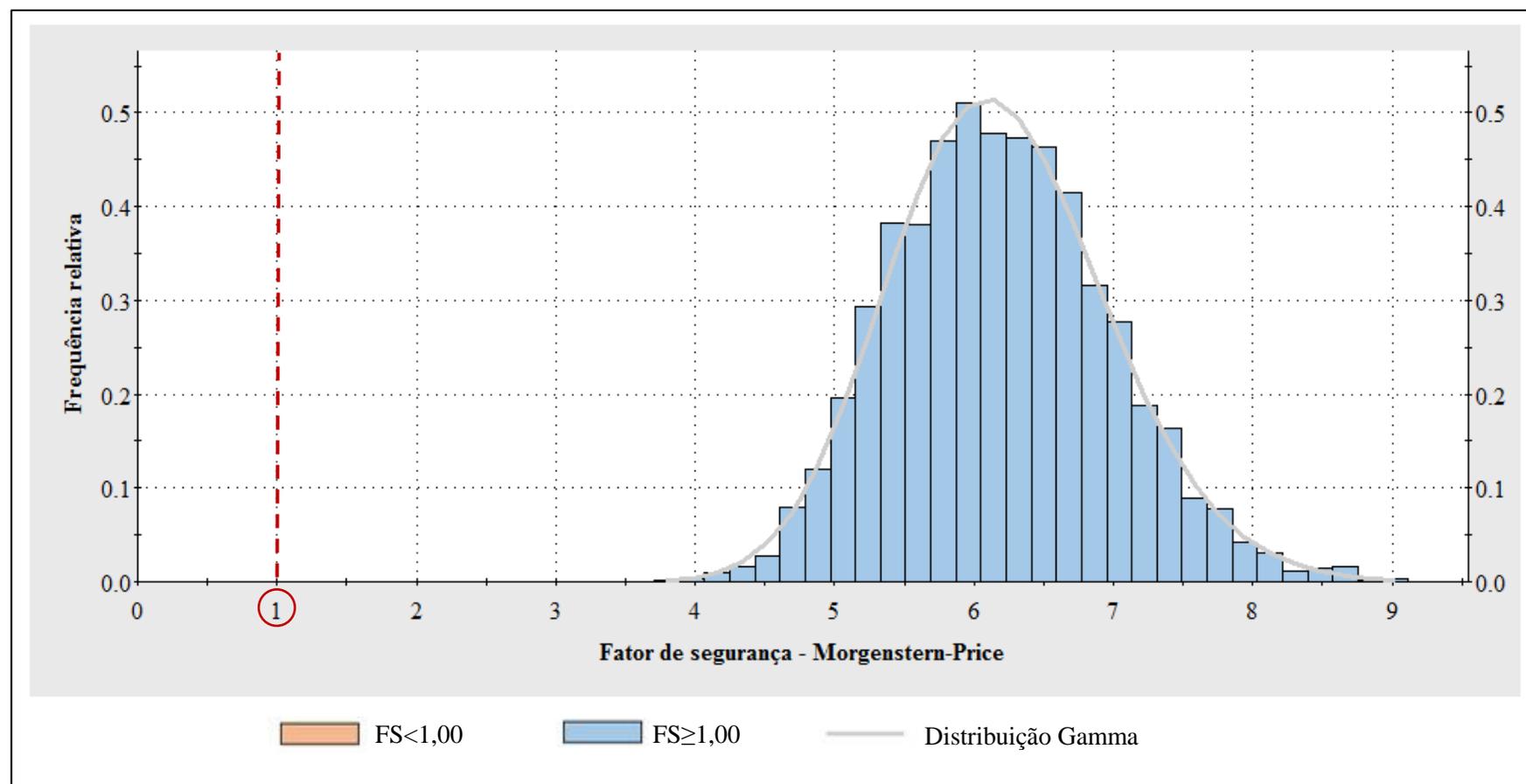


Figura 5.50 Curva de distribuição acumulada para a seção 2 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

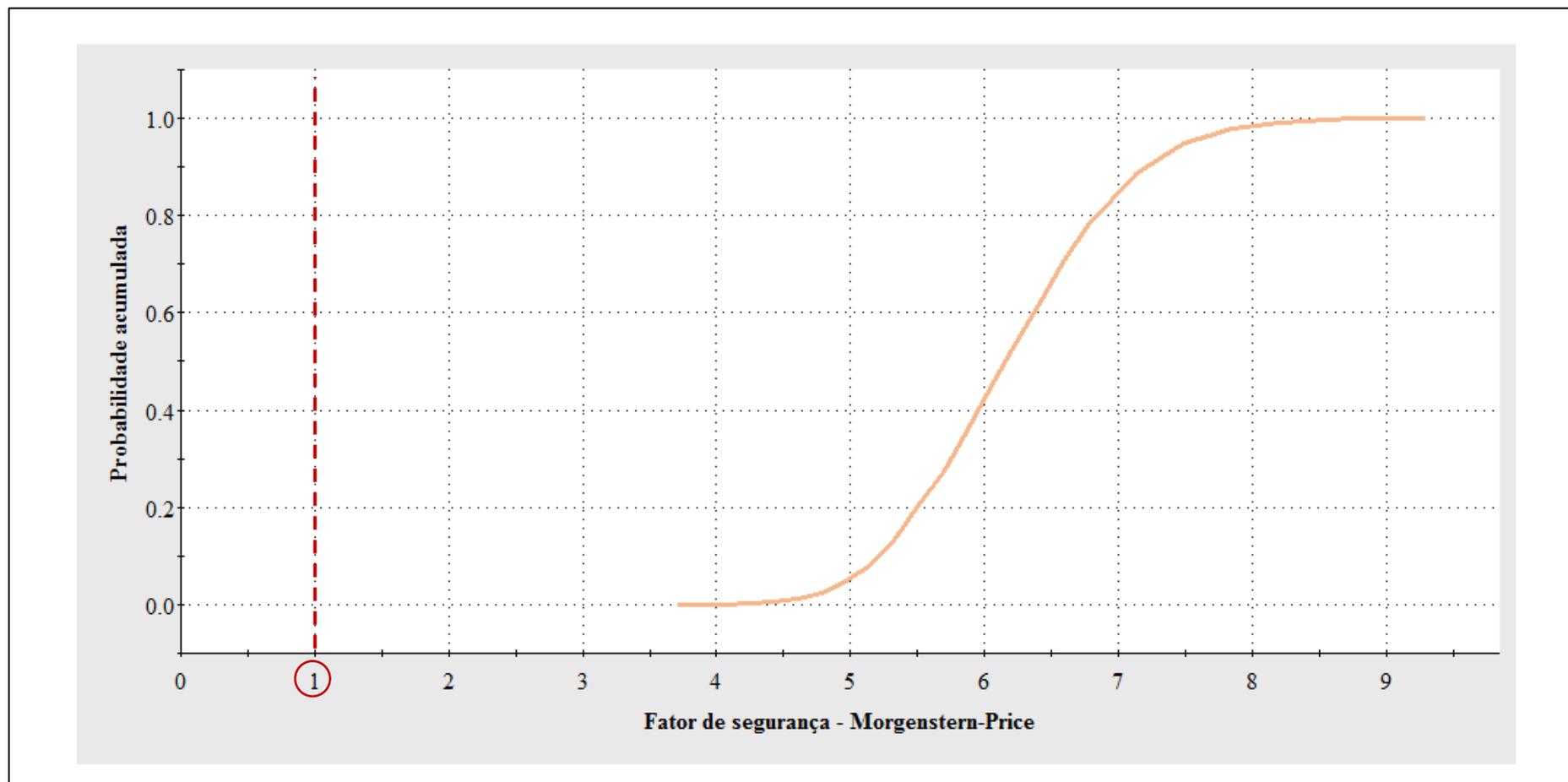


Figura 5.51 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 2 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

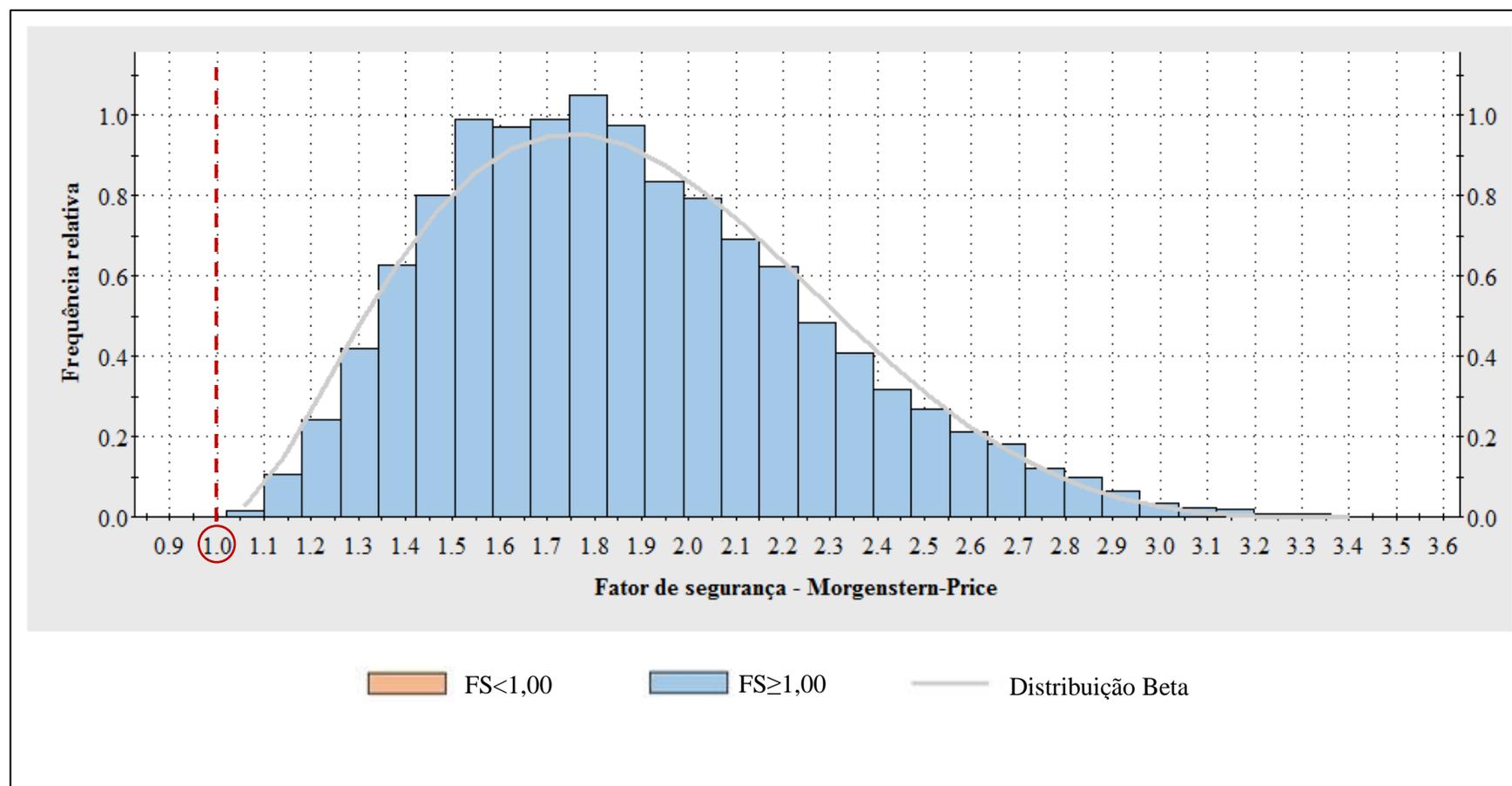


Figura 5.52 Curva de distribuição acumulada para a seção 2 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price).



5.4.3. Seção 3

A Tabela 5.29 apresenta os resultados obtidos para a seção de análise 3.

Tabela 5.29 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 com dados do solo na condição natural e saturada

Cenário de análise	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Cenário I: Natural	FS determinístico	6,05	6,46	6,23
	μ (FS)	6,24	6,58	6,35
	σ (FS)	0,83	0,76	0,76
	P_f (%)	0,00	0,00	0,00
	β	6,31	7,33	7,01
Cenário II: Saturada	FS determinístico	1,01	1,36	1,05
	μ (FS)	1,20	1,31	1,23
	σ (FS)	0,31	0,18	0,30
	P_f (%)	29,9	2,25	26,14
	β	0,65	1,76	0,77
FS – Fator de segurança determinístico; μ (FS) – Fator de segurança médio; σ (FS) – desvio padrão do fator de segurança médio; P_f – Probabilidade de desempenho–insatisfatório; β – Índice de confiabilidade;				

As potenciais superfícies de ruptura, determinadas pelo método de Morgenstern e Price para os dois cenários de análise, são apresentadas nas Figuras 5.53 e 5.54.

Da Figura 5.53 percebe-se que na condição de umidade natural a superfície de ruptura crítica parte do topo da encosta e intercepta a camada intermediária, composta por sedimentos homogêneos da Formação Barreiras. Nessa simulação, o fator de segurança determinístico variou entre 6,05 (Janbu Corrigido) e 6,46 (Spencer).

No Cenário II, assim como observado para a seção 2 na condição de solo completamente saturado, a potencial superfície de ruptura deslocou-se, passando a compreender apenas a camada de solo mais superficial, menos resistente. O fator de segurança determinístico nessa análise variou entre 1,01 (Janbu Corrigido) e 1,36 (Spencer).

Atribui-se a queda de aproximadamente 80% no coeficiente de segurança da seção 3 à redução em cerca de 95% na magnitude da coesão efetiva da camada de solo formada por sedimentos Pós-Barreiras, variável esta que mais possui influência sobre o fator de segurança, como demonstrado na análise de sensibilidade apresentada na Figura 5.55

Figura 5.53 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

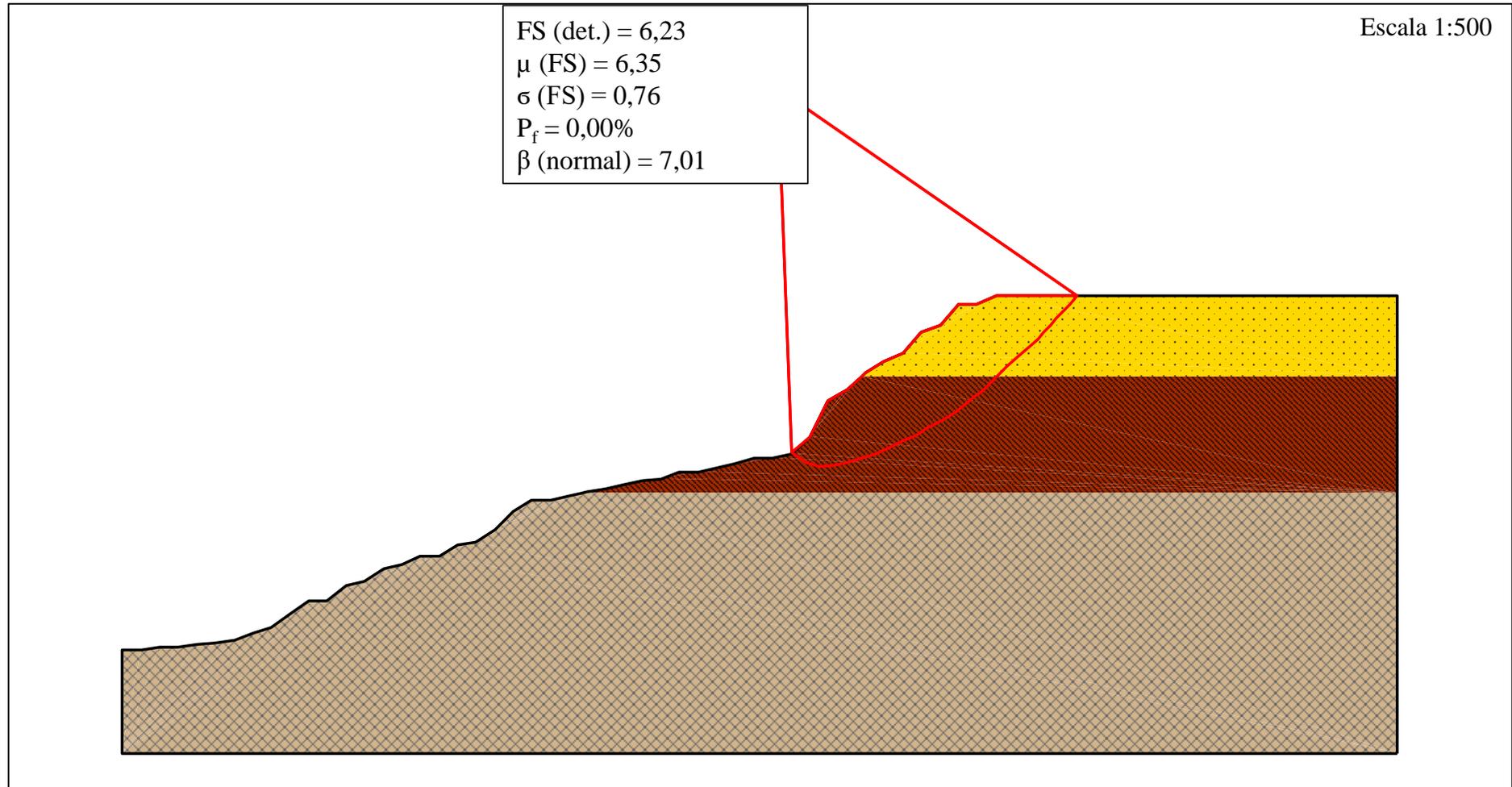


Figura 5.54 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

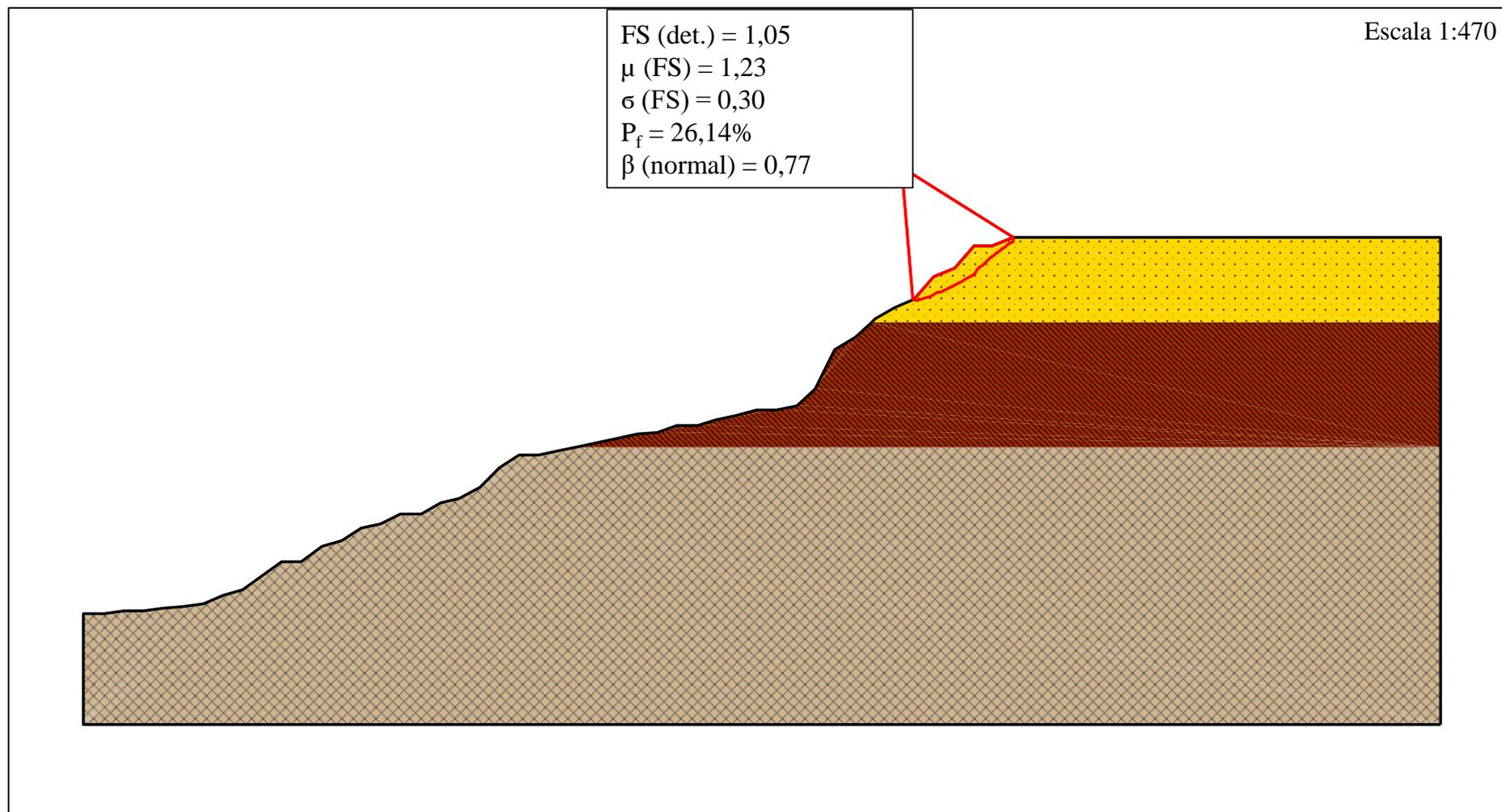
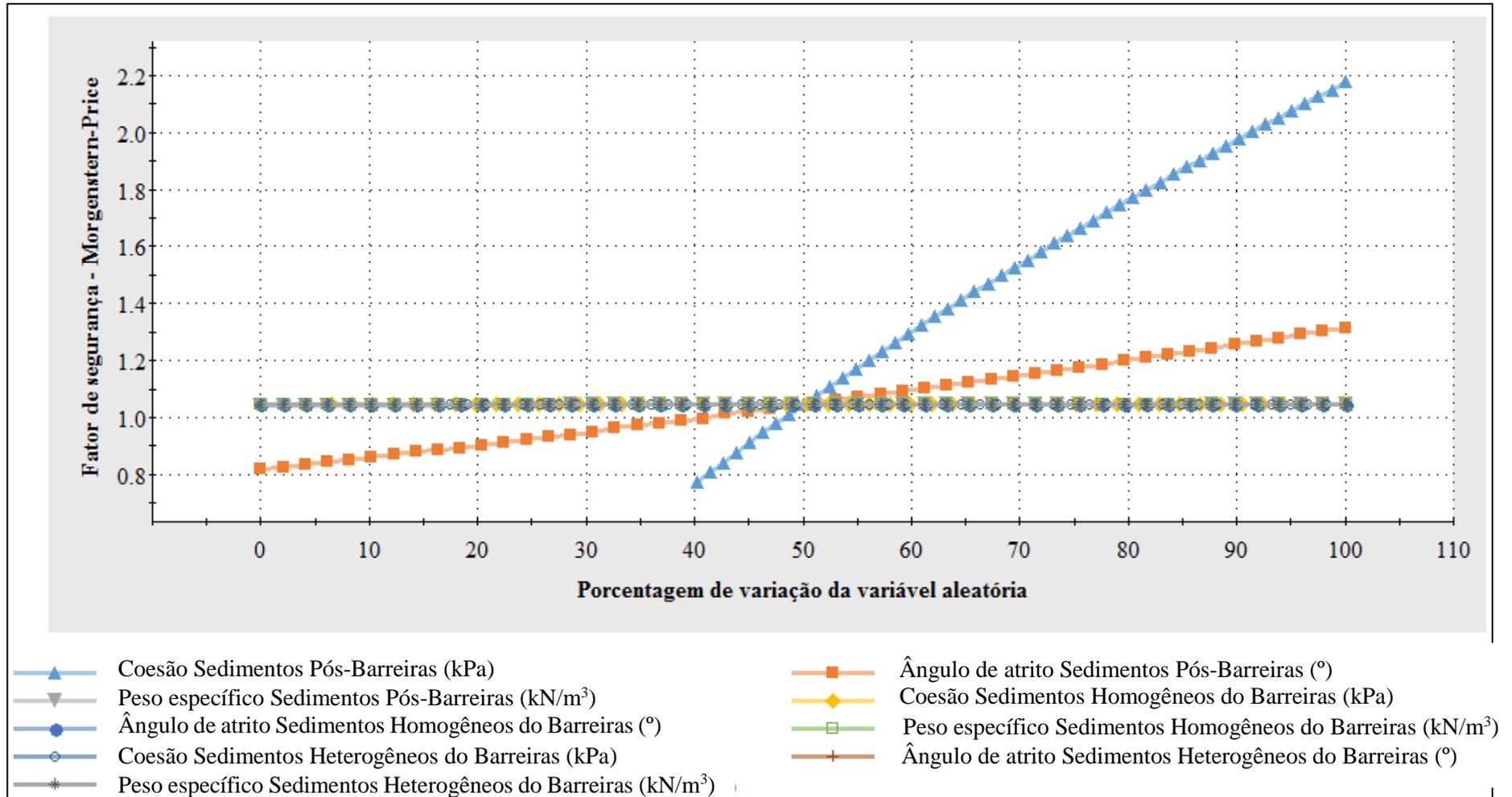


Figura 5.55 Análise de sensibilidade da variável dependente (fator de segurança) em função das variáveis aleatórias (coesão, ângulo de atrito e peso específico) para a seção 3 com dados do solo na condição saturada e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price)



As Figuras 5.56 e 5.57 apresentam, respectivamente, o histograma de frequência e a curva de distribuição acumulada do fator de segurança para a seção 3 sob condição de umidade natural. Nessa condição, o fator de segurança médio por Morgenstern e Price foi $\mu = 6,35$, o desvio padrão $\sigma = 0,76$, a probabilidade de ruptura $P_f = 0,00\%$ e o índice de confiabilidade $\beta = 7,01$. A inexistência de valores de fator de segurança inferiores a 1,00 nessa simulação ratificam o resultado alcançado para a probabilidade de desempenho insatisfatório nula.

Os dois gráficos também foram elaborados para a seção 3 na condição saturada e podem ser visualizados nas Figuras 5.58 e 5.59. Ao assumir a hipótese de completa saturação do solo, o fator de segurança médio, assim como o determinístico, diminuiu cerca de 80% ($\mu = 1,23$), o desvio padrão reduziu para 0,30, a probabilidade de desempenho insatisfatório foi igual a 26,14% e o índice de confiabilidade 0,77.

Dentre as 5000 simulações de valores aleatórios atribuídos às variáveis coesão e ângulo de atrito, 1307 delas apresentaram $FS < 1$, resultando na P_f de 26,14%. Nessas circunstâncias, a probabilidade de desempenho insatisfatório não atende às propostas de nível de risco aceitável expostas no Item 2.4.2.1.3, indicando a existência de uma situação de risco para a população residente nesse trecho da encosta.

Quanto aos resultados alcançados para o índice de confiabilidade da seção 3 hipoteticamente saturada, observa-se que β é inferior ao valor de confiabilidade mínimo ($\beta = 2,0$) proposto por Whitman (1984) como admissível na engenharia geotécnica, indicando um nível de desempenho perigoso para esse trecho da Comunidade São José do Jacó, considerando a proposta de U. S. Army Corps of Engineers (1995) (Tabela 2.17).

Figura 5.56 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 3 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

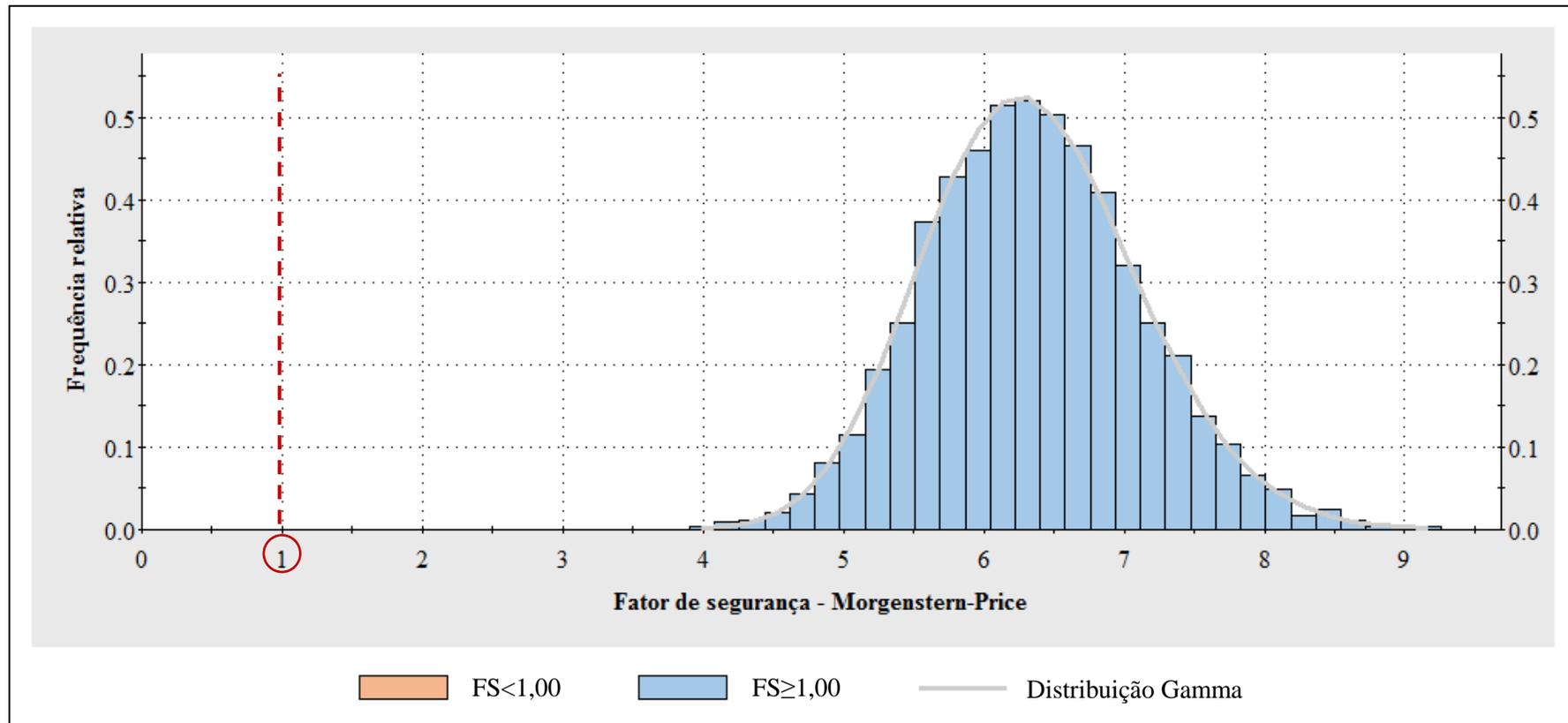


Figura 5.57 Curva de distribuição acumulada para a seção 3 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

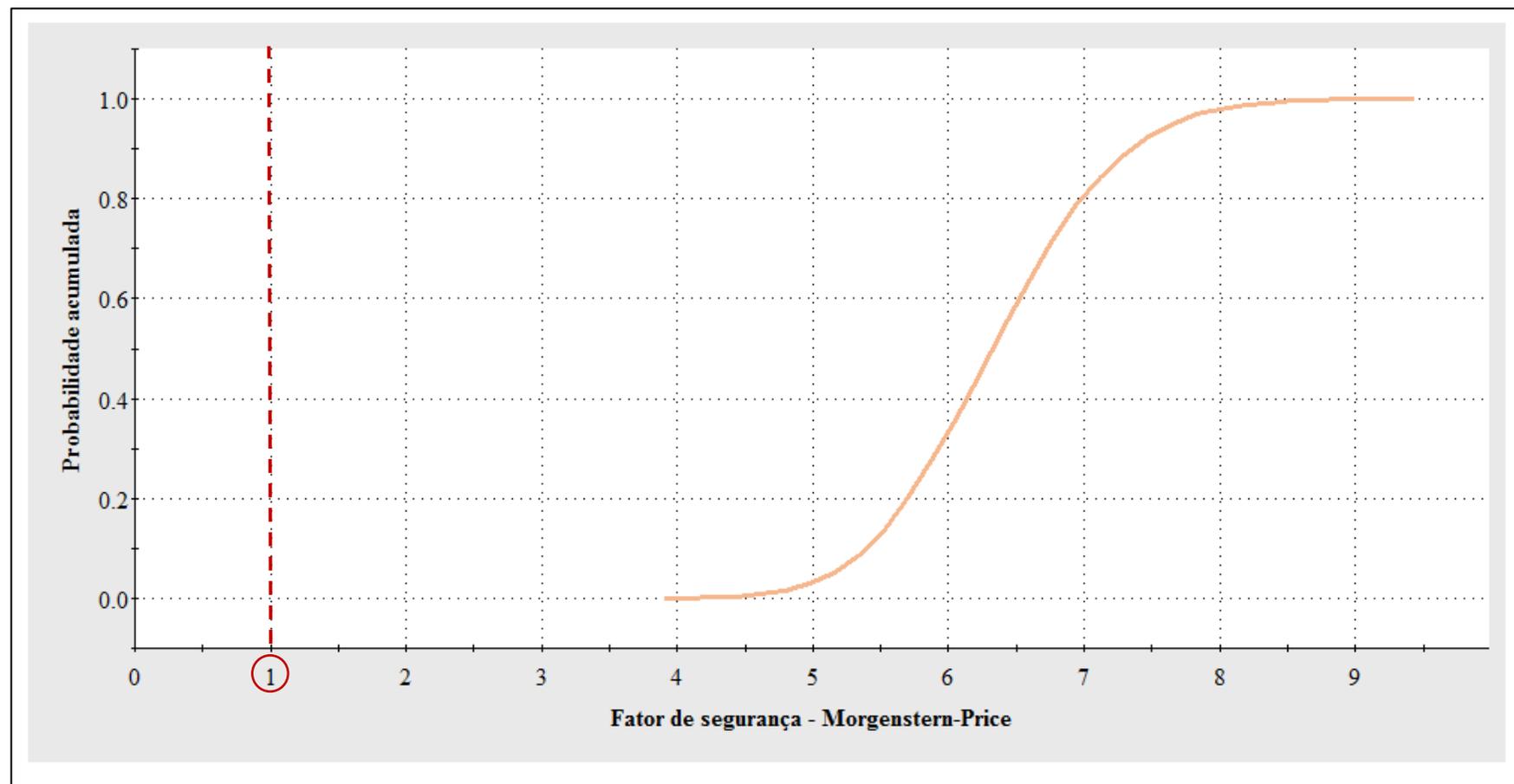


Figura 5.58 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 3 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

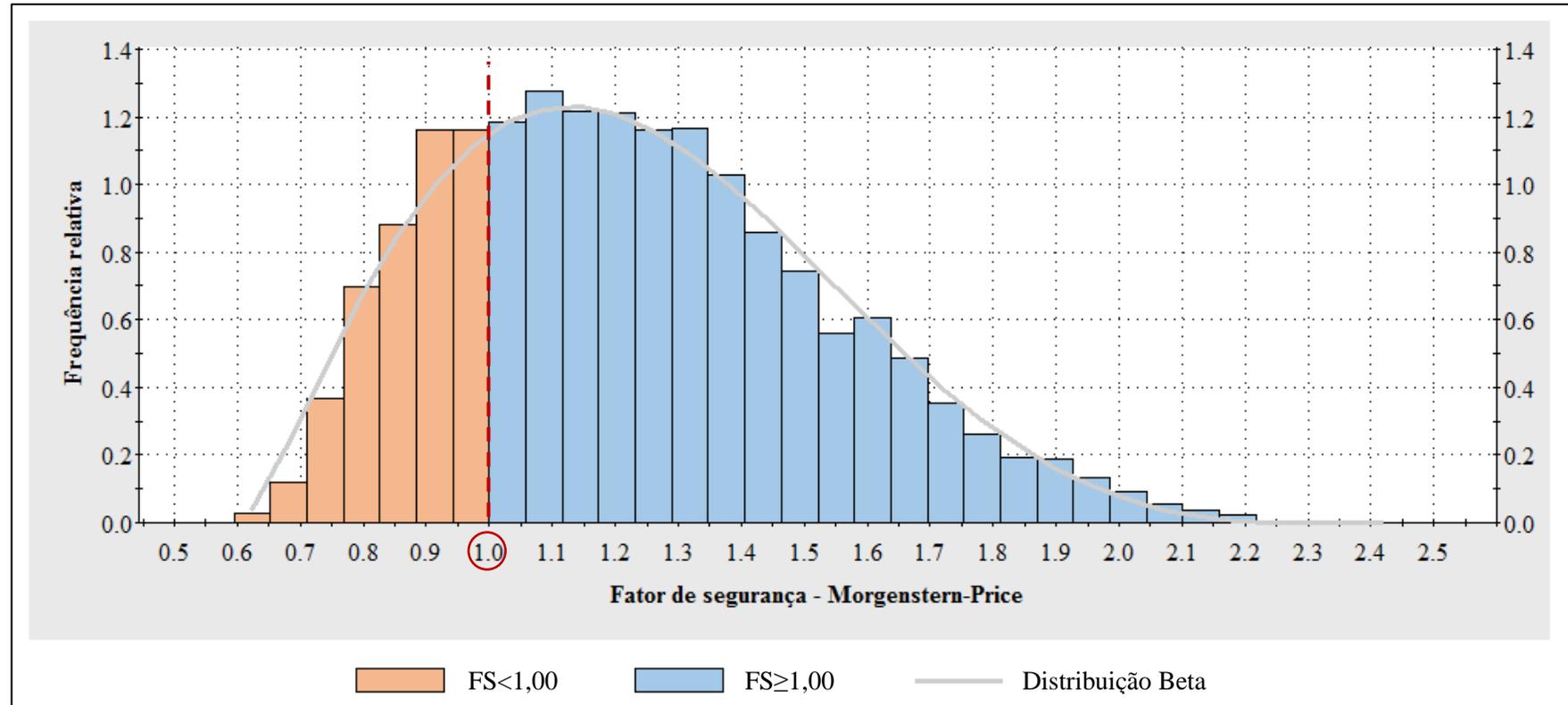


Figura 5.59 Curva de distribuição acumulada para a seção 3 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)



Como o processo de simulação utilizando o Método de Monte Carlo baseia-se no sorteio aleatório do valor das variáveis de entrada, o resultado da análise, a probabilidade de desempenho insatisfatório também é uma variável, cujo valor pode diferir do real. Por causa disso, El Ramly (2001) recomenda repetir a simulação algumas vezes utilizando diferentes valores para esses parâmetros, a cada vez, para garantir a consistência nos resultados alcançados.

Logo, como nessa seção houve probabilidade de desempenho insatisfatório superior a 0,00%, a simulação foi repetida 10 vezes, conforme sugere El Ramly (2001), de modo a permitir a construção de um histograma de frequência para a variável de saída Probabilidade de Desempenho Insatisfatório (P_f). O resultado das simulações é apresentado na Figura 5.60 e na Tabela 5.30.

Figura 5.60 Histograma de frequência da probabilidade de desempenho insatisfatório para a seção 3 na condição saturada

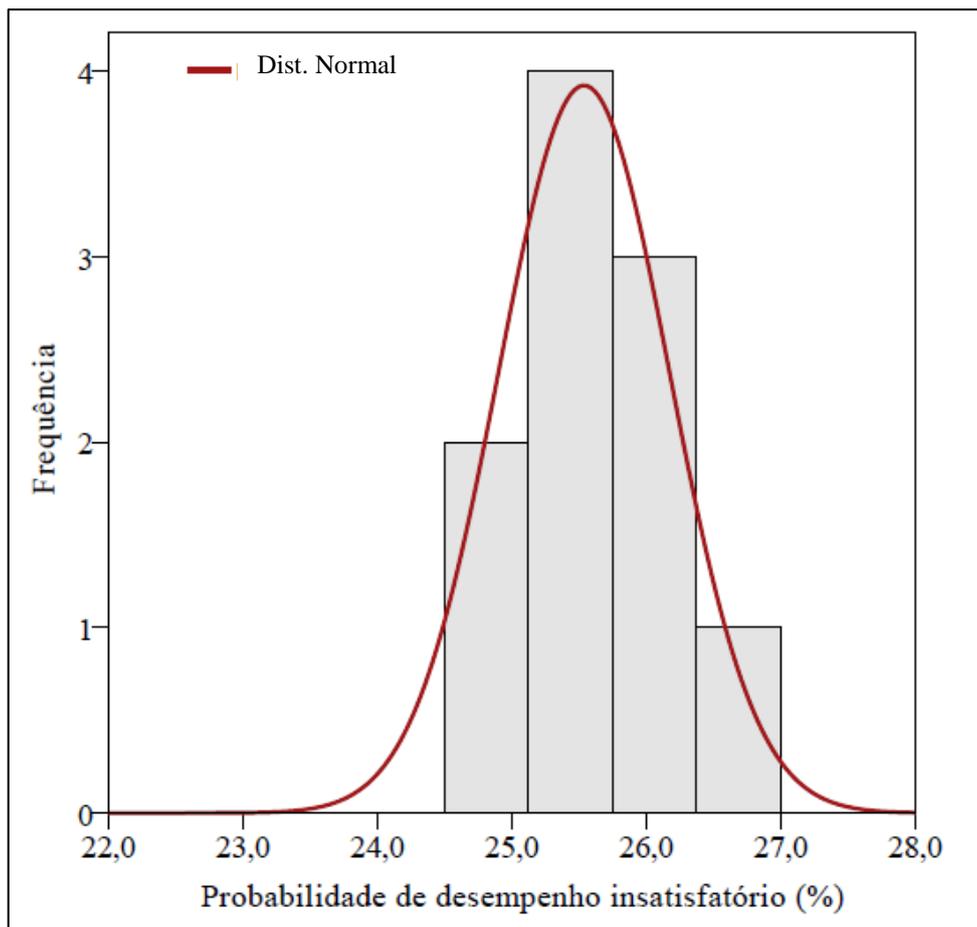


Tabela 5.30 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 3 da encosta analisadas com dados do solo na condição inundada e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price).

Variável	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_f (%)	25,58	25,78	26,66	25,2	24,84	24,52	25,8	25,2	25,54	26,14
β	0,77	0,76	0,75	0,78	0,79	0,80	0,76	0,77	0,76	0,77

Nas Figuras 5.61 e 5.62 são apresentados os histogramas de frequência dos valores de coesão e ângulo de atrito para os sedimentos Pós-Barreiras, litologia na qual encontra-se inserida a superfície potencial de ruptura da seção 3 com dados do solo saturado. A análise desses histogramas é importante pois informa para quais valores da variável aleatória considerada, a variável dependente (fator de segurança) foi inferior a 1,00.

Da análise desses histogramas, verifica-se que as superfícies potenciais de ruptura com $FS < 1,00$ foram geradas predominantemente por valores de coesão baixos, menores que 10 kPa. Quanto ao comportamento do ângulo de atrito, não foi possível determinar um padrão para essa variável, devido a grande dispersão nos valores de ângulo responsáveis pela geração de superfície de ruptura com FS inferiores à unidade.

Figura 5.61 Histograma de frequência da coesão efetiva do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price)

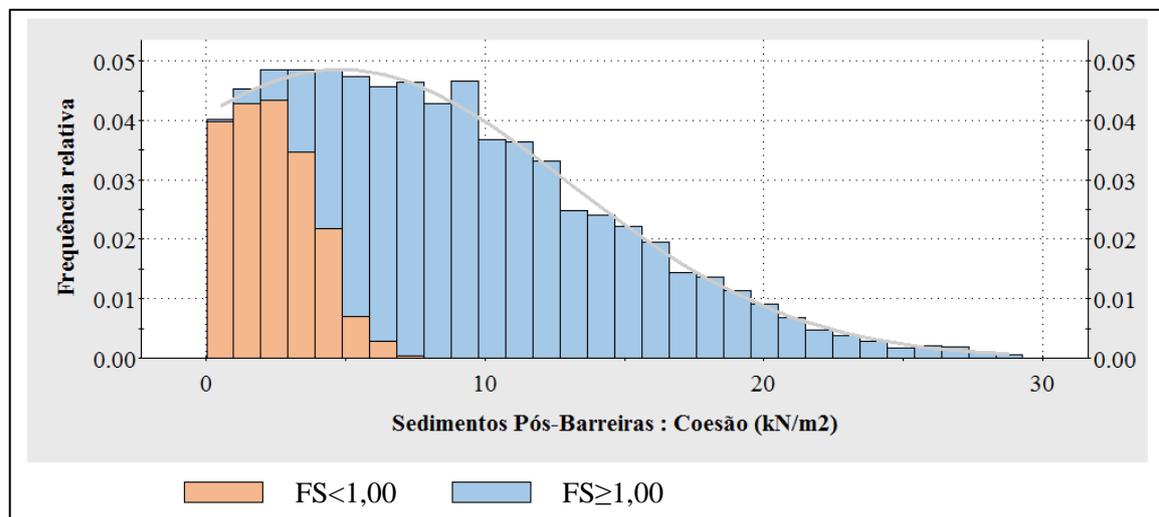
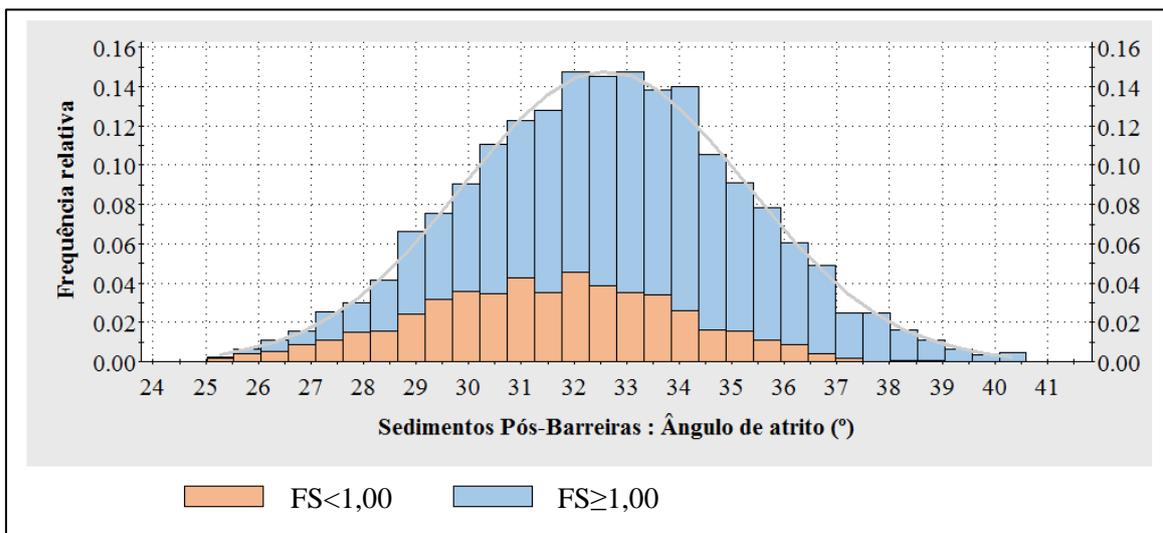


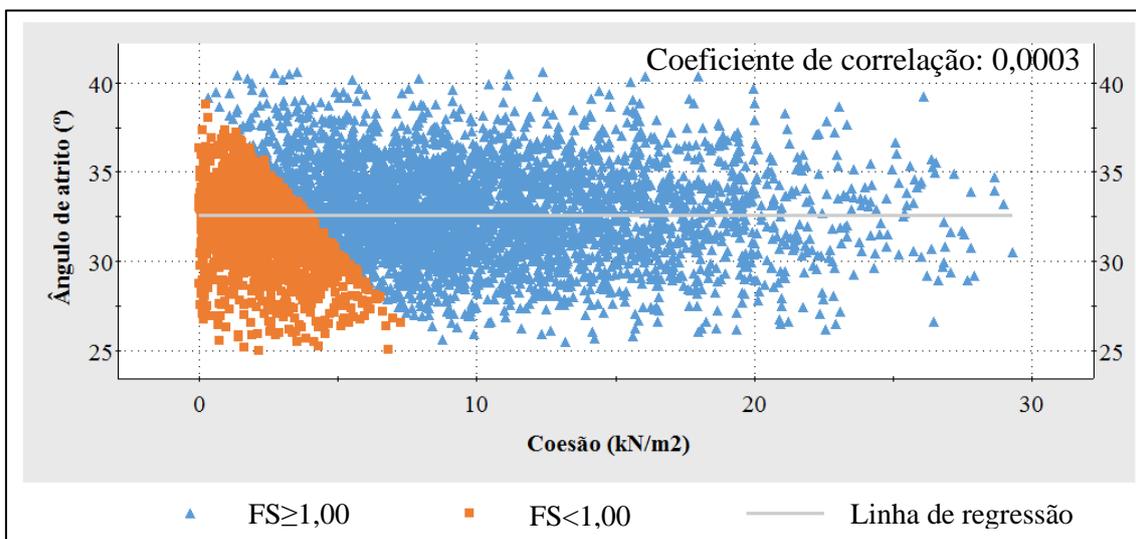
Figura 5.62 Histograma de frequência do ângulo de atrito efetivo do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price)



Um aspecto importante a ser considerado nas análises de estabilidade probabilísticas é a existência de uma correlação entre essas duas variáveis aleatórias. No *software* Slide, existe a possibilidade de definir um coeficiente de correlação entre a coesão e o ângulo de atrito, de forma que quando as amostras forem geradas, os valores atribuídos à ambas serão correlacionados.

No entanto, nas simulações aqui desenvolvidas optou-se por assumir c' e ϕ' como variáveis independentes (coeficiente de correlação nulo) e, utilizando a geração aleatória das amostras, verificar se havia uma correlação natural dos dados (Figura 5.63).

Figura 5.63 Gráfico de dispersão das variáveis aleatórias coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo da camada de sedimentos Pós-Barreiras



Da Figura 5.63, percebe-se pela inclinação da linha de regressão, praticamente horizontal, e pelo coeficiente de correlação obtido (0,0003), que a hipótese adotada de inexistência de correlação entre as duas variáveis aleatórias foi coerente.

5.4.4. Seção 4

Na Tabela 5.31 são apresentados os resultados obtidos na simulação probabilística para a seção de análise 4, com dados do solo nos dois cenários de análise.

Tabela 5.31 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 4 com dados do solo na condição natural e saturada

Seção de análise	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Cenário I: Natural	FS determinístico	6,09	6,46	6,32
	μ (FS)	6,34	6,72	6,57
	σ (FS)	1,70	1,81	1,78
	P_f (%)	0,00	0,00	0,00
	β	3,14	3,15	3,14
Cenário II: Saturado	FS determinístico	2,72	2,84	2,74
	μ (FS)	2,75	2,88	2,77
	σ (FS)	0,40	0,42	0,41
	P_f (%)	0,00	0,00	0,00
	β	4,41	4,46	4,32
FS – Fator de segurança determinístico; μ (FS) – Fator de segurança médio; σ (FS) – desvio padrão do fator de segurança médio; P_f – Probabilidade de desempenho insatisfatório; β – Índice de confiabilidade;				

A análise probabilística para a seção 4 na condição natural resultou em um FS determinístico que variou entre 6,09 (Janbu Corrigido) e 6,46 (Spencer), em um fator de segurança médio entre 6,34 e 6,72, um desvio padrão da ordem de 1,80, um índice de confiabilidade de 3,14 e uma probabilidade de desempenho insatisfatório (P_f) nula.

A potencial superfície de ruptura, obtida pelo método de Morgenstern e Price, é apresentada na Figura 5.64. Dela percebe-se que na condição de umidade natural a superfície de ruptura crítica parte do topo da encosta e intercepta a camada de base, composta por sedimentos heterogêneos da Formação Barreiras.

Nas Figuras 5.65 e 5.66 são apresentados, respectivamente, o histograma de frequência e a curva de distribuição acumulada do fator de segurança para a seção 4 na condição natural.

Figura 5.64 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 04 com dados do solo na condição natural e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price)

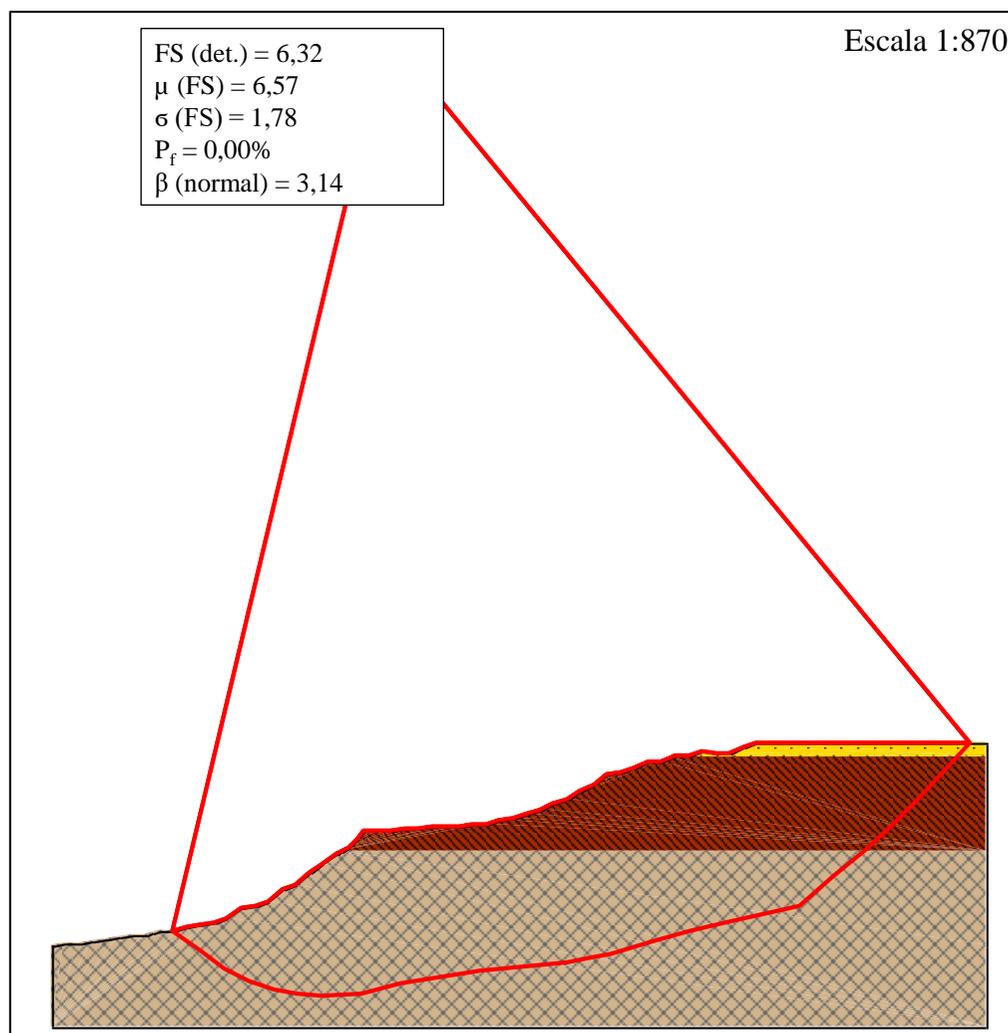


Figura 5.65 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 4 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

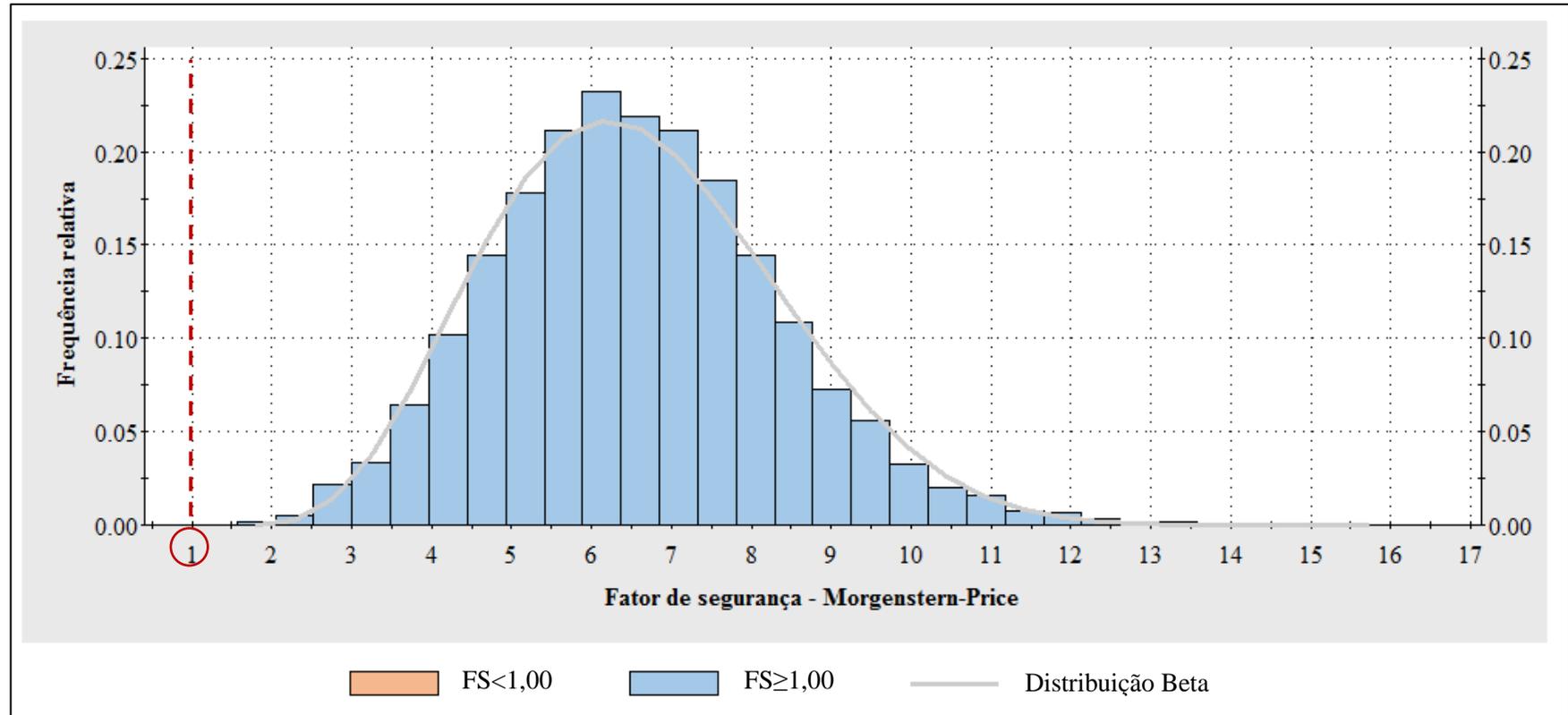
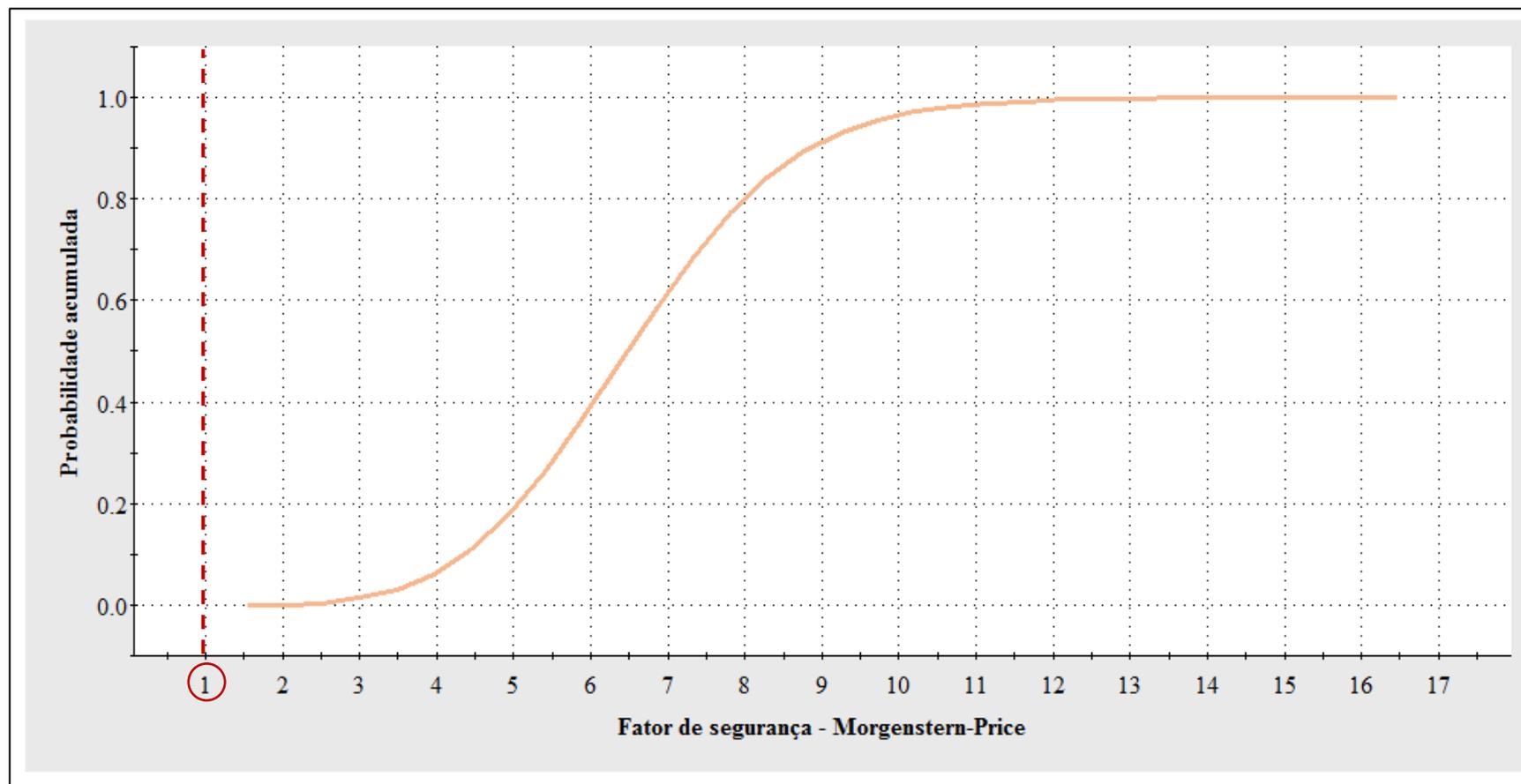


Figura 5.66 Curva de distribuição acumulada para a seção 4 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)



Na condição saturada, as simulações realizadas resultaram em um FS determinístico que variou entre 2,72 (Janbu Corrigido) e 2,84 (Spencer), em um fator de segurança médio entre 2,75 e 2,88, um desvio padrão da ordem de 0,40, um índice de confiabilidade de aproximadamente 4,40 e uma probabilidade de desempenho insatisfatório (P_f) nula pelos três métodos de análise.

A potencial superfície de ruptura, obtida pelo método de Morgenstern e Price, é apresentada na Figura 5.67. Nas Figuras 5.68 e 5.69 visualiza-se, respectivamente, o histograma de frequência e a curva de distribuição acumulada do fator de segurança para a seção 4 considerando o cenário de análise II.

Figura 5.67 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 04 com dados do solo na condição natural e superfície de ruptura não-circular (Método Morgenstern e Price).

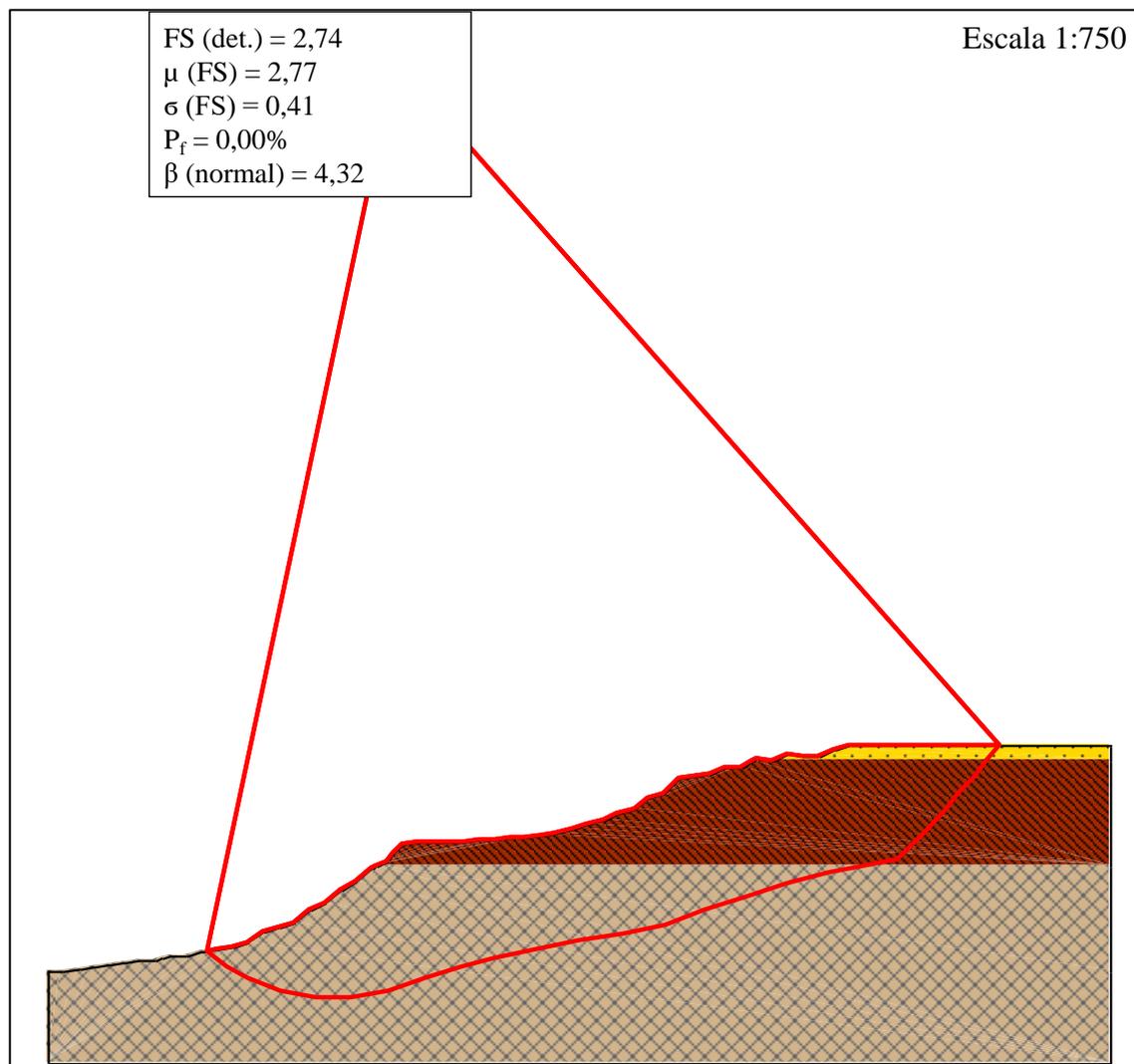


Figura 5.68 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 4 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

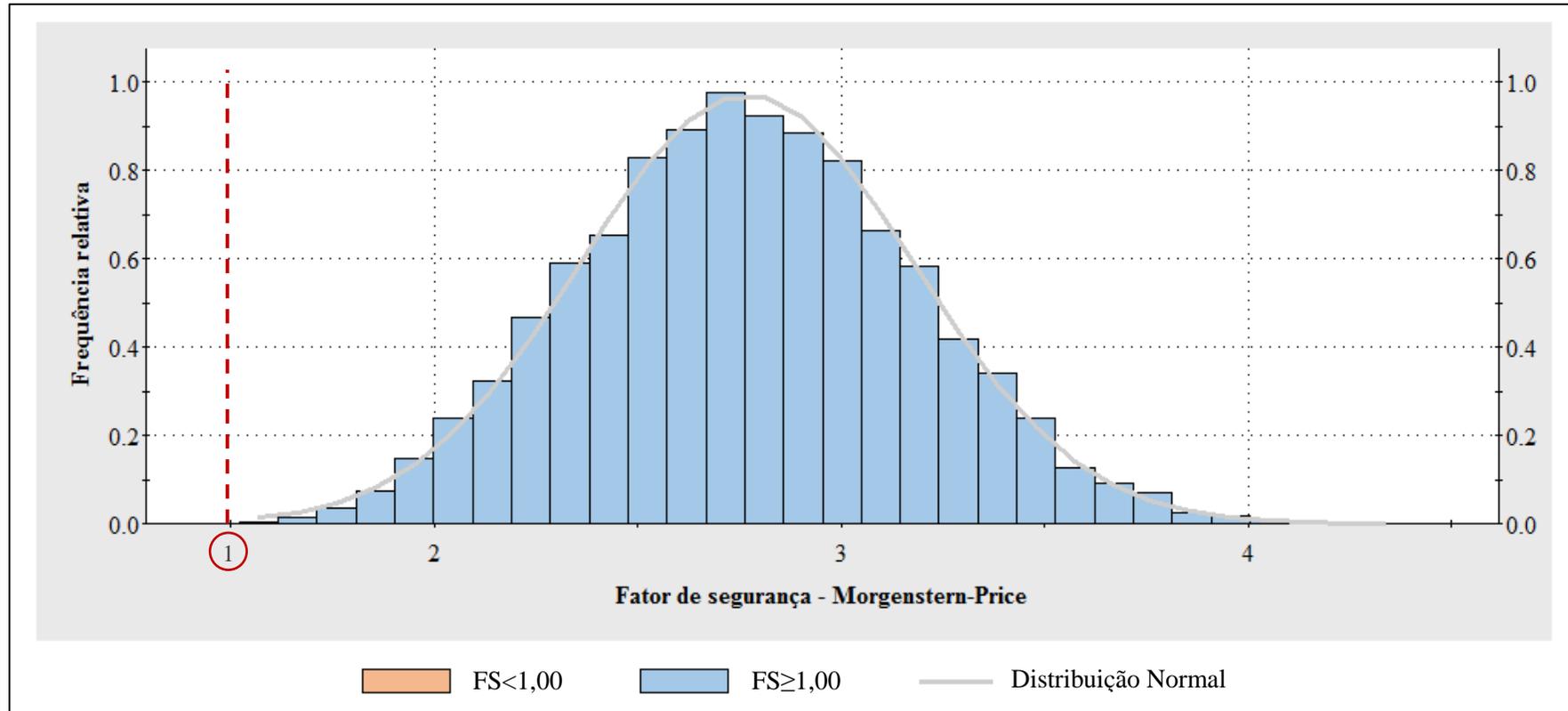
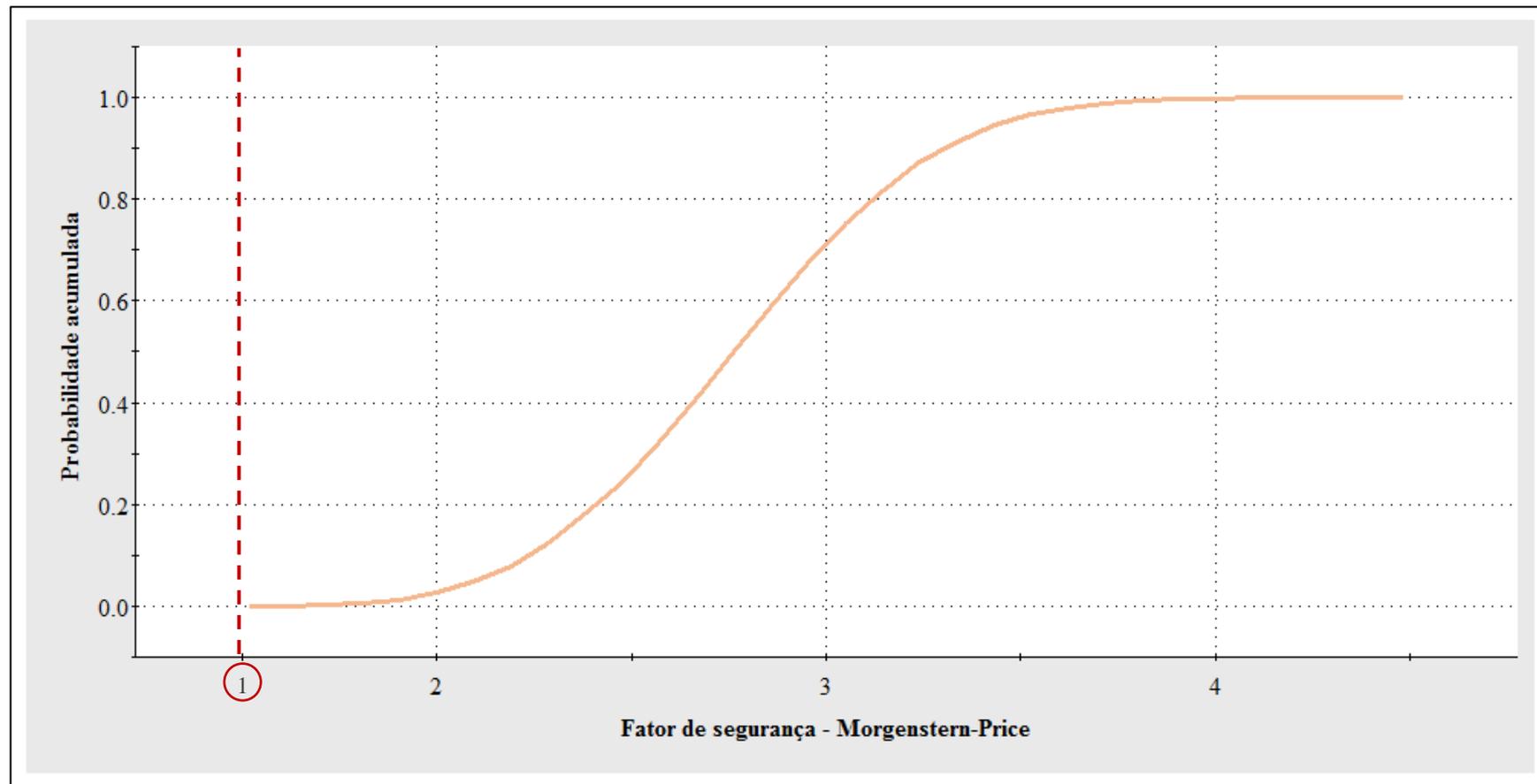


Figura 5.69 Curva de distribuição acumulada para a seção 4 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)



Nos quatro gráficos se percebe ausência de valores de FS inferiores a 1,00, resultando em probabilidades de desempenho insatisfatório nulas ($P_f = 0,00\%$). Esta seção encontra-se segura sob os dois cenários de análise, atendendo tanto ao critério estabelecido pela NBR 11682/2009 de $FS_{min} > 1,5$ para deslizamentos, quanto aos critérios de índice de confiabilidade mínimo e nível de risco aceitável.

5.4.5. Seções 5 e 6

As seções 5 e 6 fazem referência a duas situações de análise para o mesmo trecho da encosta. Na seção 5 simula-se o talude natural com desnível de aproximadamente 10 metros entre as ruas Desembargador Lins Bahia e a CGU. Na seção 6 analisa-se a estabilidade da encosta após a execução de um corte no terreno associado à posterior construção de uma estrutura de contenção.

Essa comparação entre as duas seções é importante para compreender se a área já possuía tendência de instabilização do talude natural, principalmente durante períodos chuvosos, ou se a execução do corte e da estrutura de contenção ali existente pode ter contribuído para ocorrência de movimentações de massa no local.

As Tabelas 5.32 e 5.33 trazem um resumo dos resultados obtidos na análise probabilística para as seções 5 e 6, respectivamente, sob os dois cenários de umidade do solo.

Tabela 5.32 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 5, com dados do solo na condição natural e saturada

Seção	Cenário	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Seção 5	Natural	FS	9,86	10,14	10,11
		μ (FS)	9,27	10,52	10,54
		σ (FS)	3,03	3,22	3,21
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	3,13	3,02	3,04
	Saturado	FS	3,65	3,85	3,83
		μ (FS)	3,70	3,91	3,89
		σ (FS)	0,87	0,97	0,98
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	3,09	2,99	2,96

Tabela 5.33 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 6, com dados do solo na condição natural e saturada

Seção	Cenário	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Seção 6	Natural	FS	4,24	4,24	4,16
		μ (FS)	3,89	3,09	3,41
		σ (FS)	1,37	0,97	1,08
		P_f (%)	0,29	0,40	0,04
		β	2,11	2,15	2,24
	Saturado	FS	1,22	1,22	1,43
		μ (FS)	1,07	0,98	1,46
		σ (FS)	0,25	0,30	0,25
		P_f (%)	37,03	49,58	5,56
		β	0,28	-0,05	1,84
FS – Fator de segurança determinístico; μ (FS) – Fator de segurança médio; σ (FS) – desvio padrão do fator de segurança médio; P_f – Probabilidade de desempenho insatisfatório; β – Índice de confiabilidade;					

Nas análises probabilísticas das duas seções em questão, o talude foi dividido em 400 fatias e foram realizadas 5000 iterações para a simulação de Monte Carlo, tanto na condição de umidade natural, quanto saturada. O número de iterações representa o número a partir do qual o valor da probabilidade de ruptura resultante se estabiliza dentro de uma tolerância de mais ou menos 0,005%.

A simulação para a seção 5 na condição natural resultou em um fator de segurança determinístico que variou entre 9,86 (Janbu Corrigido) e 10,14 (Spencer), um fator de segurança médio entre 9,27 e 10,54, com um desvio padrão e um índice de confiabilidade da ordem de 3,00 e probabilidade de desempenho insatisfatório (P_f) nula.

Na Figura 5.70 é apresentado o resultado dessa análise probabilística, com ênfase para a superfície potencial de ruptura encontrada. O gráfico da função de densidade de probabilidade e o gráfico da função de distribuição acumulada do fator de segurança podem ser visualizados nas Figuras 5.71 e 5.72.

Figura 5.70 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 5 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

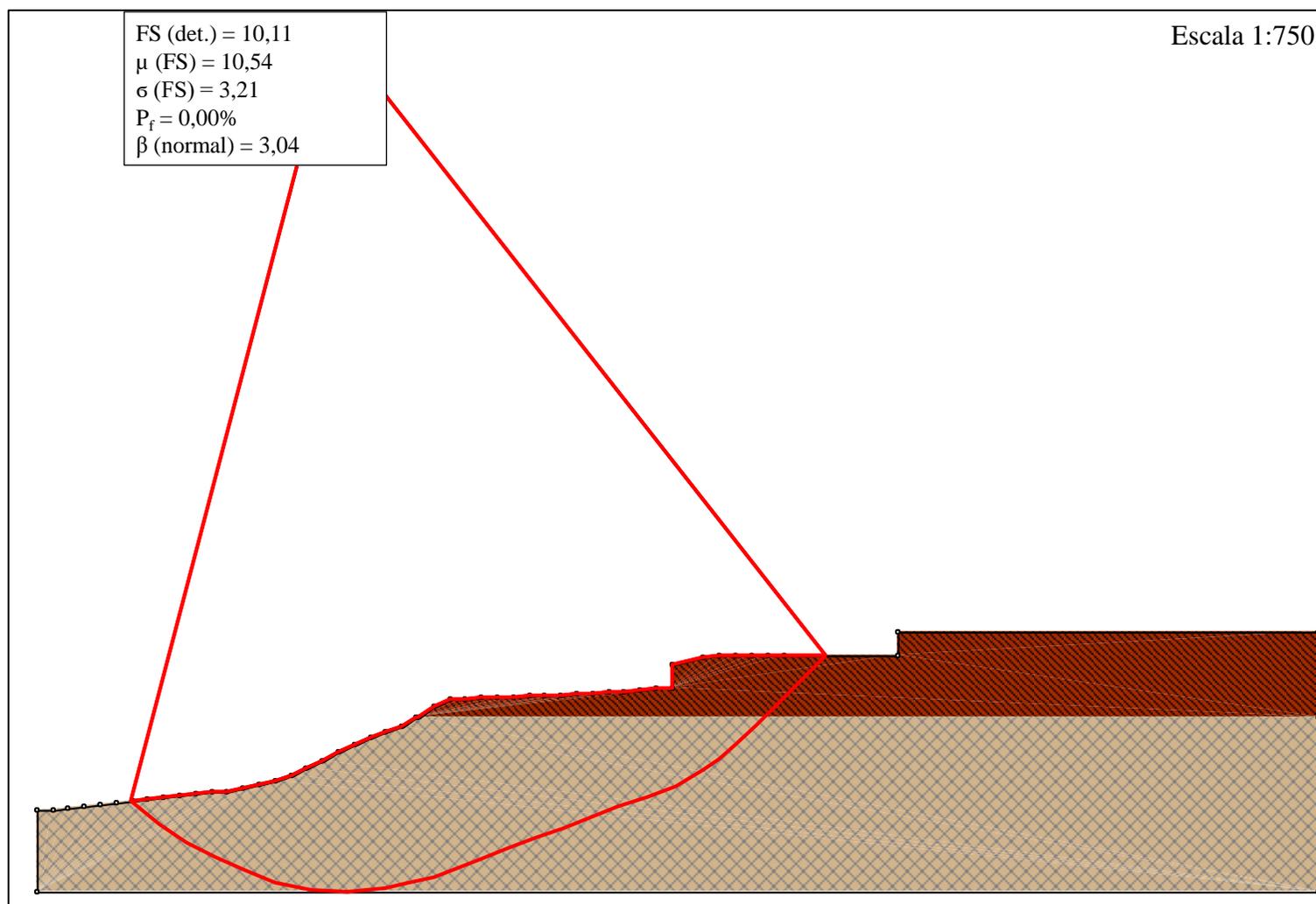


Figura 5.71 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 5 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

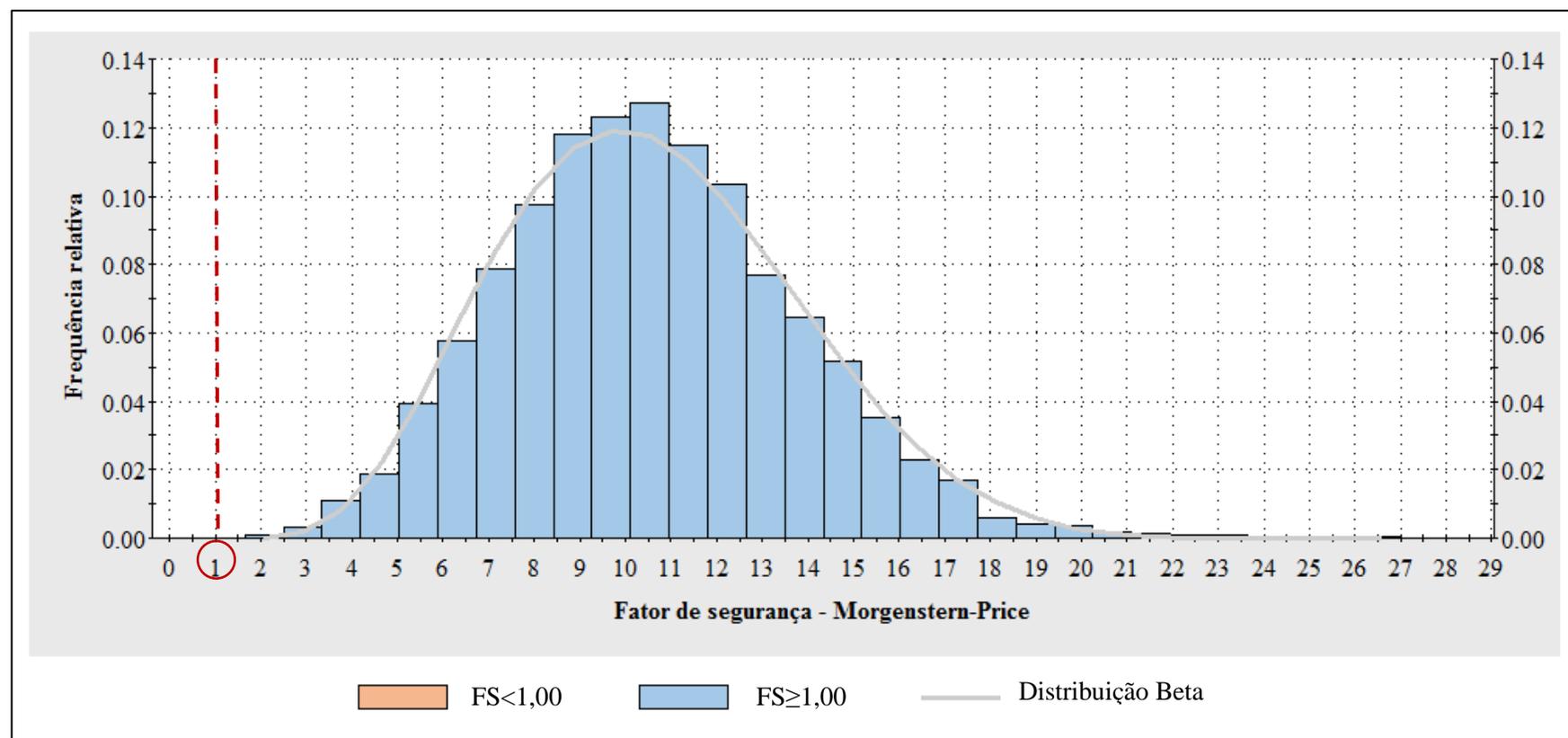
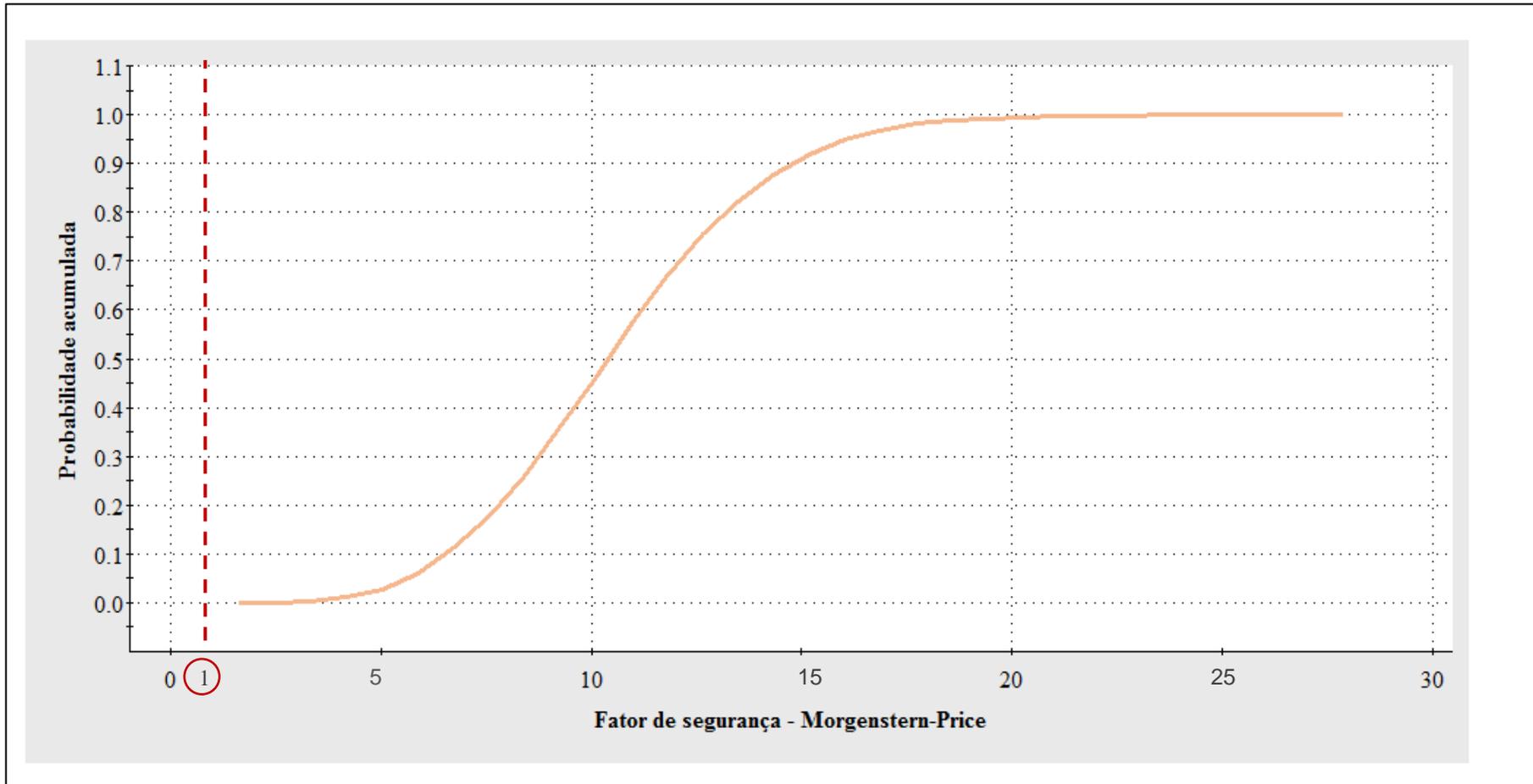


Figura 5.72 Curva de distribuição acumulada para a seção 5 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)



Para essa mesma seção, agora sob condição hipotética de completa saturação do solo, os resultados obtidos sugerem redução do FS, tanto determinístico quanto médio, da ordem de 60%. Apesar dessa considerável redução, o índice de confiabilidade se manteve praticamente igual, aproximadamente 3,00, resultado da diminuição na dispersão dos FS obtidos (desvio padrão); mantendo assim a probabilidade de desempenho insatisfatório nula.

Na Figura 5.73 é apresentado o resultado dessa análise probabilística. O gráfico da função de densidade de probabilidades e o gráfico da função de distribuição acumulada do fator de segurança podem ser visualizados nas Figuras 5.74 e 5.75.

Os resultados alcançados em ambas simulações indicam que esse trecho do Jacó, com sua geometria natural, anterior à execução do corte e da estrutura de contenção, mesmo que na condição mais desfavorável à estabilidade, onde se considerou completa saturação do solo, apresentava-se estável, com FS sempre superiores a 1,5, mínimo requerido pela NBR 11682/2009 para deslizamentos; probabilidades de falha nulas e índices de confiabilidade aceitáveis.

Figura 5.73 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 5 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

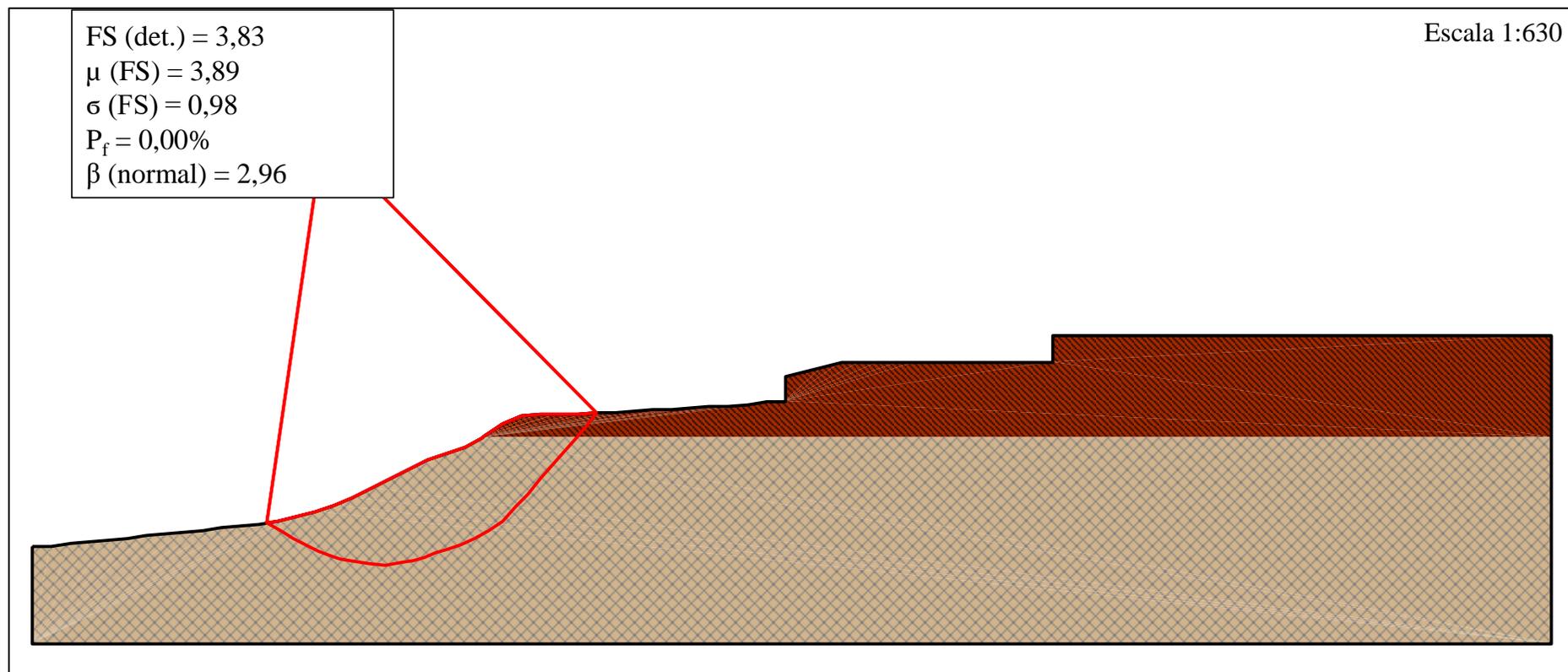


Figura 5.74 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 5 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

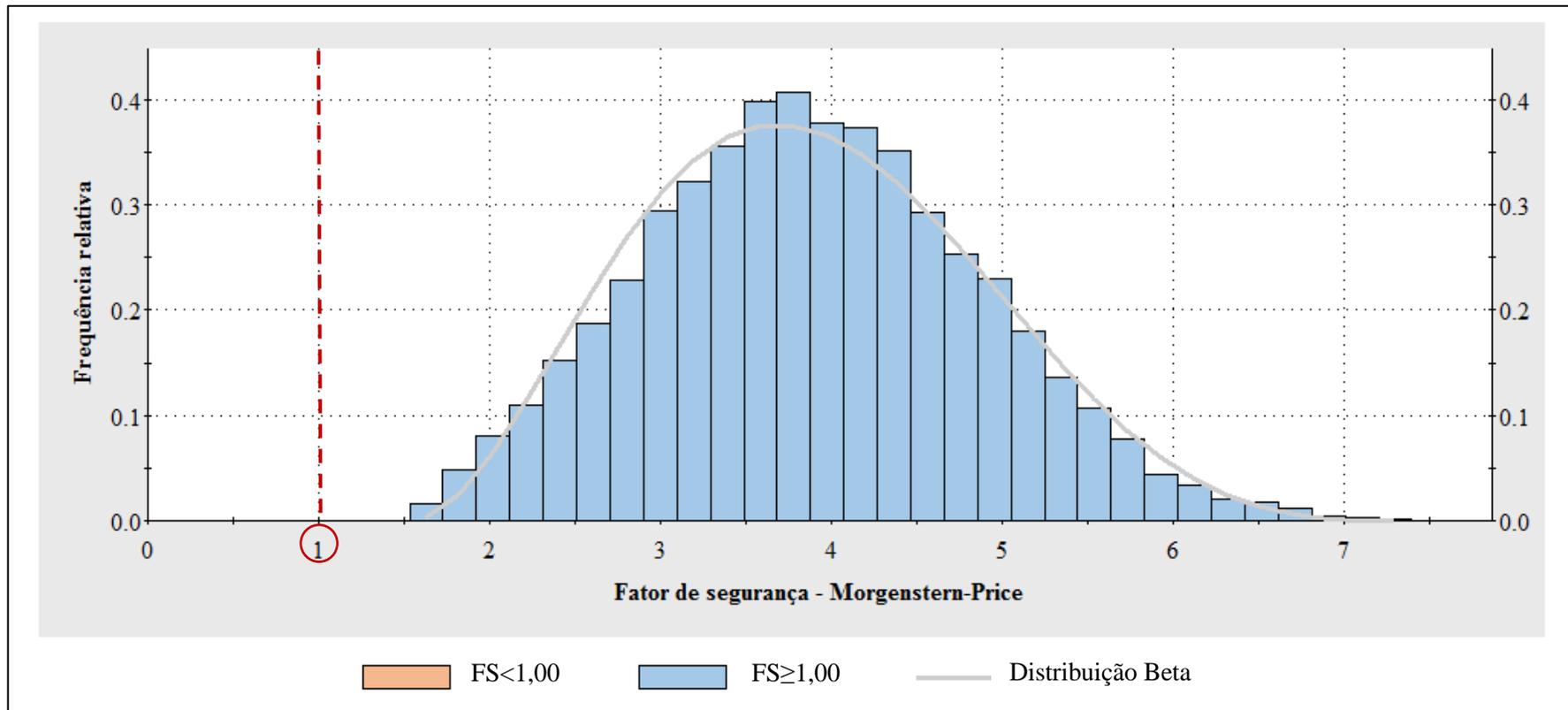


Figura 5.75 Curva de distribuição acumulada para a seção 5 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)



Ao considerar a execução de um corte vertical de aproximadamente 10 m e posterior construção de uma estrutura de contenção nesse trecho da encosta, percebe-se considerável redução da estabilidade do maciço, como pode ser constatado nos resultados descritos a seguir.

Para a seção 6 na condição natural, o FS médio, que era, antes da execução do corte, 10,54, passou para 3,41, estimado pelo método de Morgenstern e Price. A probabilidade de ruptura, anteriormente nula, aumentou para 0,04%. Essa redução de aproximadamente 70% na média dos FS demonstra o impacto negativo resultante da mudança da geometria do talude natural. Esse impacto, em termos numéricos, é praticamente equivalente à redução do fator de segurança decorrente da saturação do solo para o talude natural.

Nessa situação de simulação da encosta em condição de umidade natural após execução do corte no talude, apesar da análise de estabilidade determinística ter resultado em FS superiores a 1,5, apontando para a estabilidade da vertente, a análise probabilística forneceu um valor de probabilidade de ruptura de 0,04% (4×10^{-4}), que, mesmo pequena, encontra-se no limite da aceitabilidade para encostas urbanas ocupadas, tomando como referência as mais diversas propostas nível de risco admissível apresentadas no Item 2.4.2.1.3.

Na Figura 5.76 é apresentado o resultado dessa análise probabilística, com ênfase para a superfície potencial de ruptura encontrada, a qual engloba o topo da encosta, onde ficam localizadas as casas da Rua Desembargador Lins Bahia, e a base do corte vertical. O gráfico da função de densidade de probabilidade e o gráfico da função de distribuição acumulada do fator de segurança podem ser visualizados nas Figuras 5.77 e 5.78.

Figura 5.76 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 6 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)

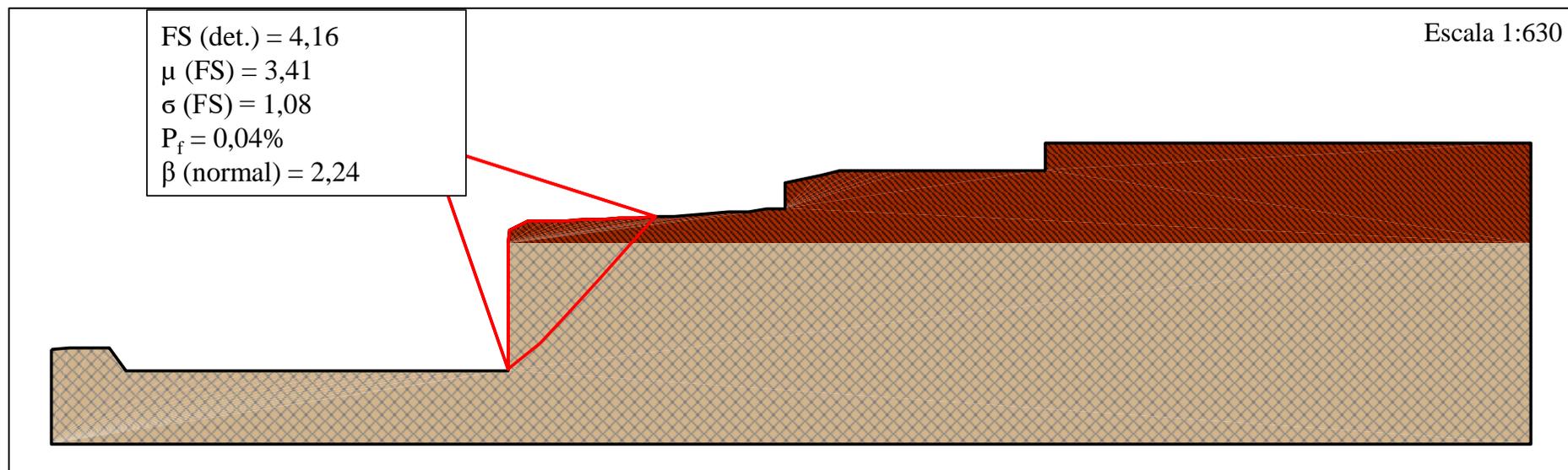


Figura 5.77 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 6 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price).

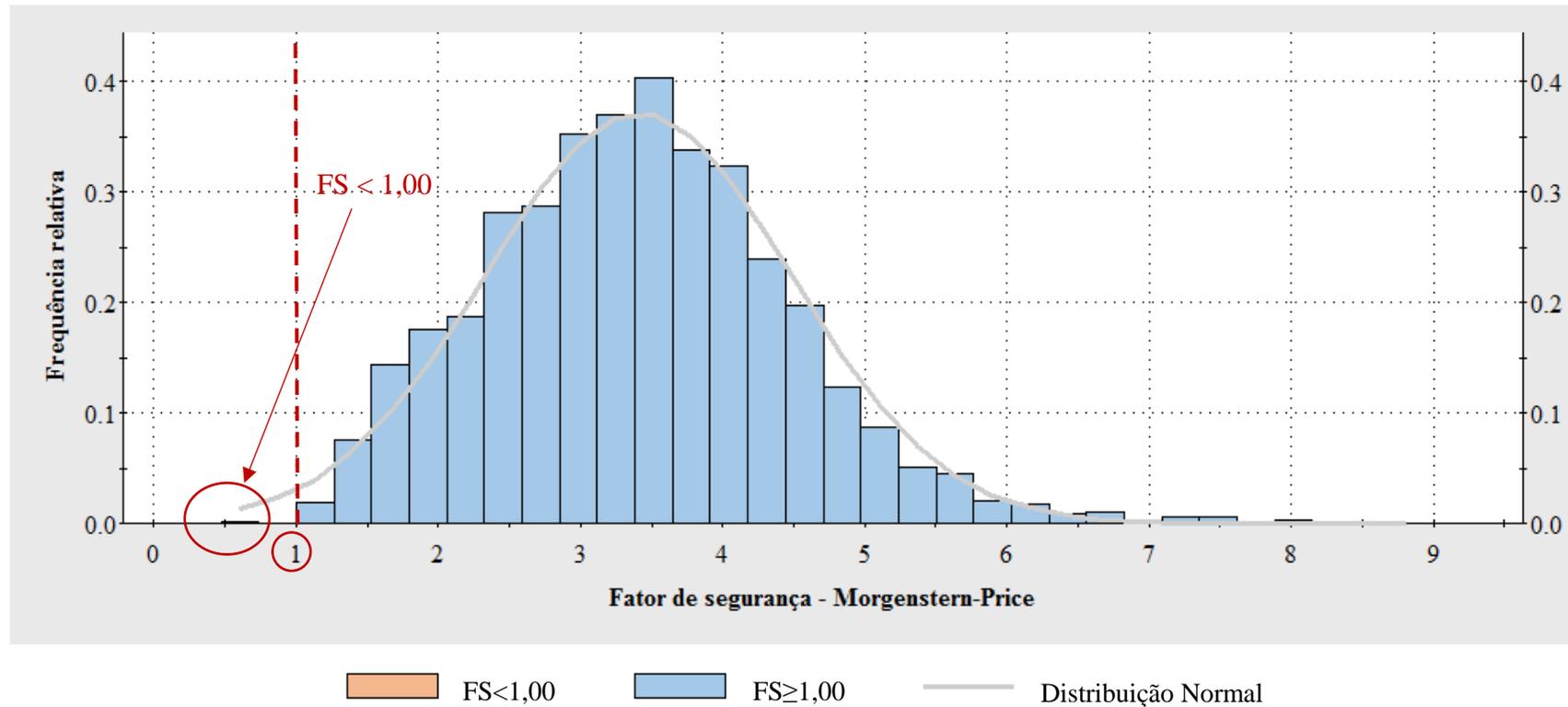


Figura 5.78 Curva de distribuição acumulada para a seção 6 com dados do solo na condição natural (Método Morgenstern e Price)



Na condição de completa saturação das duas camadas de solo para a seção 6, constata-se, como já era esperado, uma redução ainda maior nos indicadores de estabilidade desse trecho da encosta. O fator de segurança determinístico variou entre 1,22 e 1,43; o fator de segurança médio entre 0,98 e 1,46; o desvio padrão entre 0,25 e 0,30; a probabilidade de desempenho insatisfatório entre 5,56% e 49,58%; e o índice de confiabilidade entre -0,05 e 1,84.

Sob a ótica da análise estritamente determinística, os fatores de segurança obtidos não atendem ao critério estabelecido pela NBR 11682/2009 de FS mínimo de 1,5 para deslizamentos (Tabela 5.27).

Do ponto de vista da abordagem probabilística, tomando como referência o valor de nível de risco aceitável para encostas urbanas ocupadas em torno de 10^{-4} para até 10 fatalidades e o valor de confiabilidade mínimo ($\beta = 2,0$), constata-se que os resultados fornecidos por esta simulação apontam para possibilidade de instabilidade dessa seção da encosta após execução do corte e saturação do solo.

Os resultados da análise probabilística utilizando método de Morgenstern e Price, os quais englobam a superfície potencial de ruptura encontrada, o gráfico da função de densidade de probabilidade e o gráfico da função de distribuição acumulada do fator de segurança, são apresentados nas Figuras 5.79 a 5.81.

Figura 5.79 Resultado da análise de estabilidade probabilística para a seção 6 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

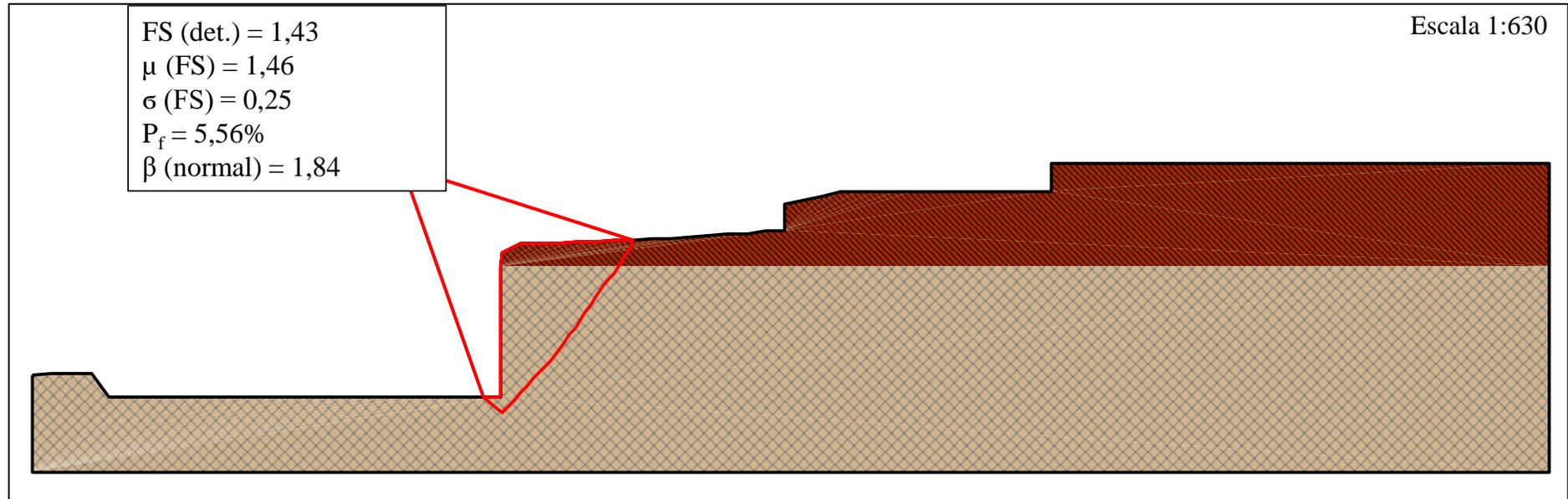


Figura 5.80 Histograma de frequência e função distribuição de probabilidade para a seção 6 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

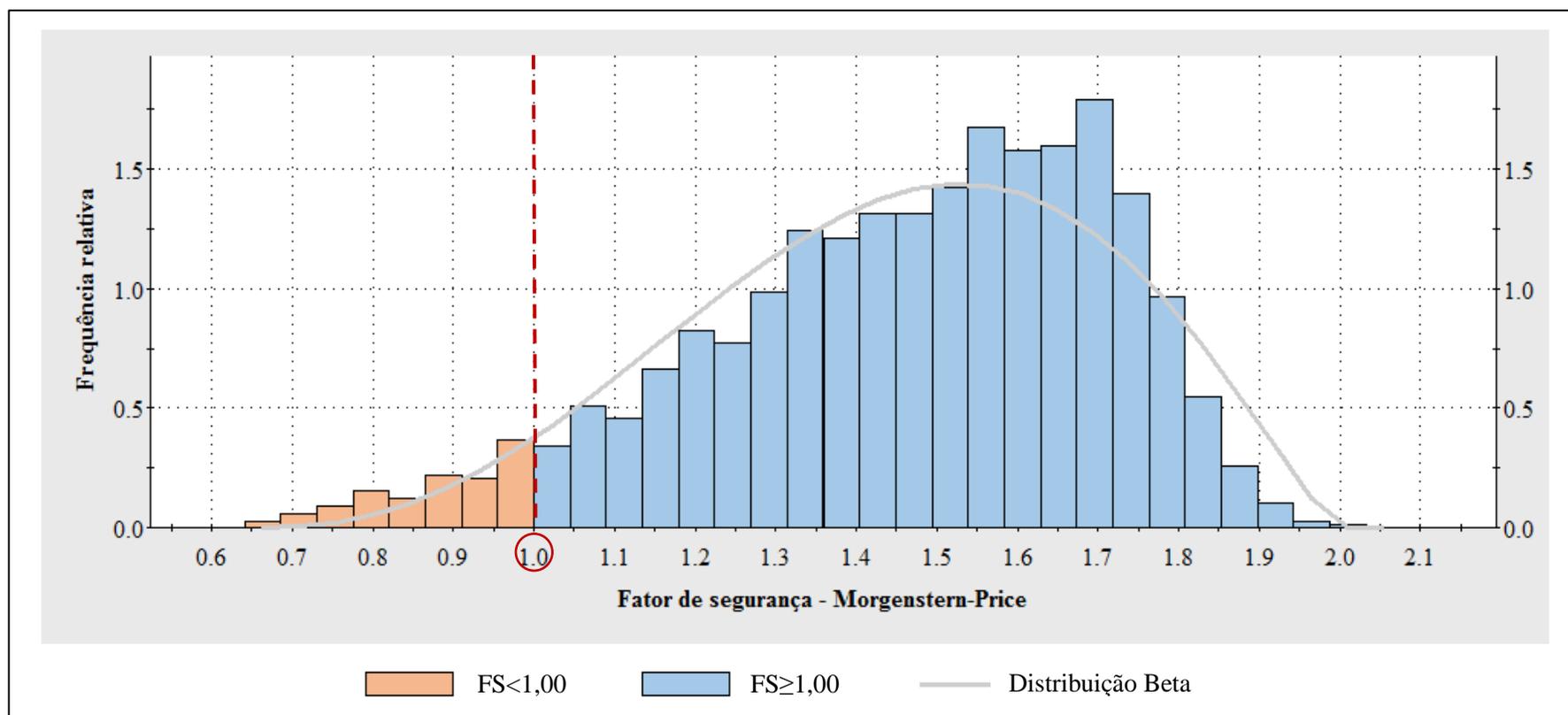
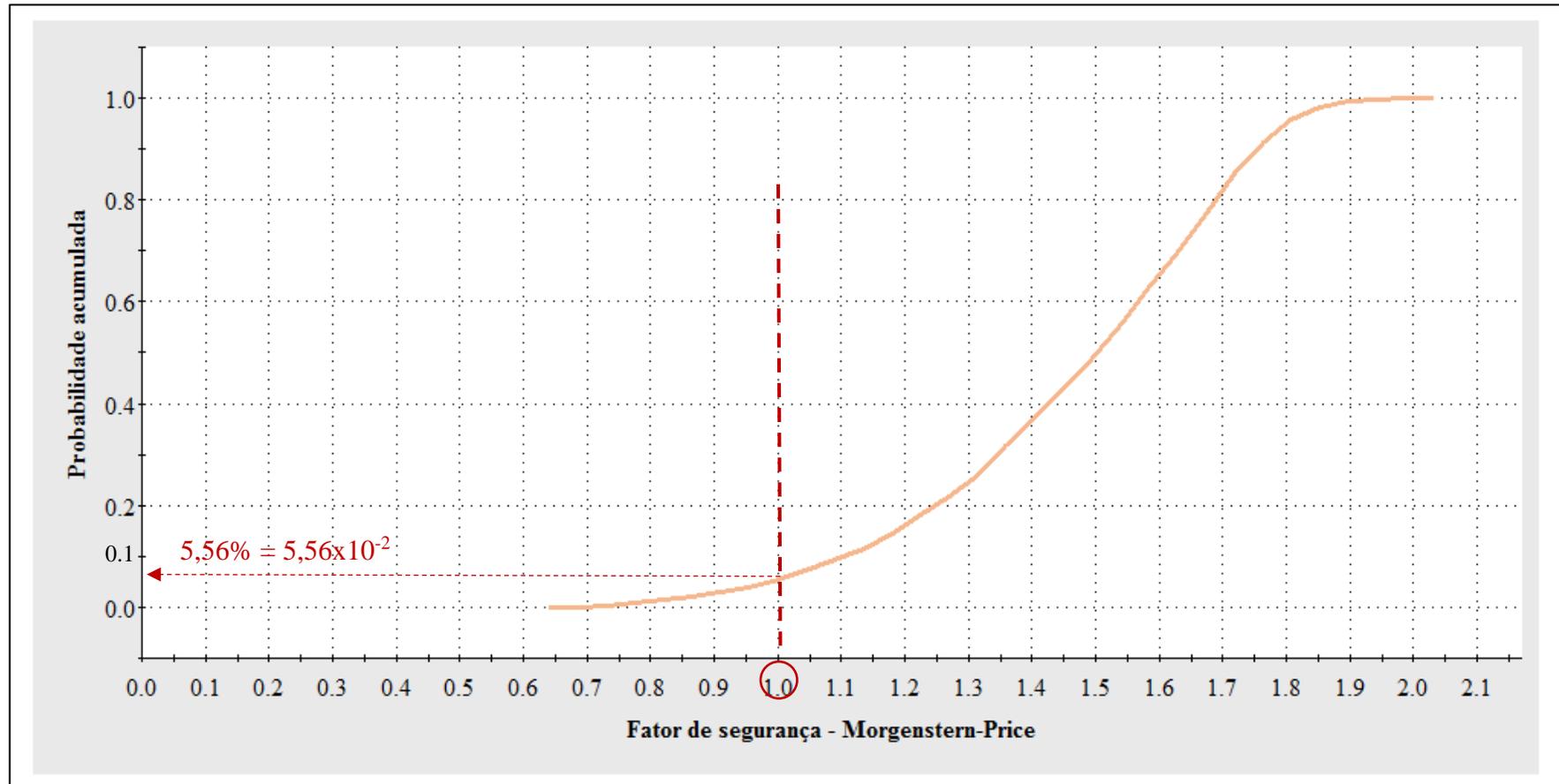


Figura 5.81 Curva de distribuição acumulada para a seção 6 com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)



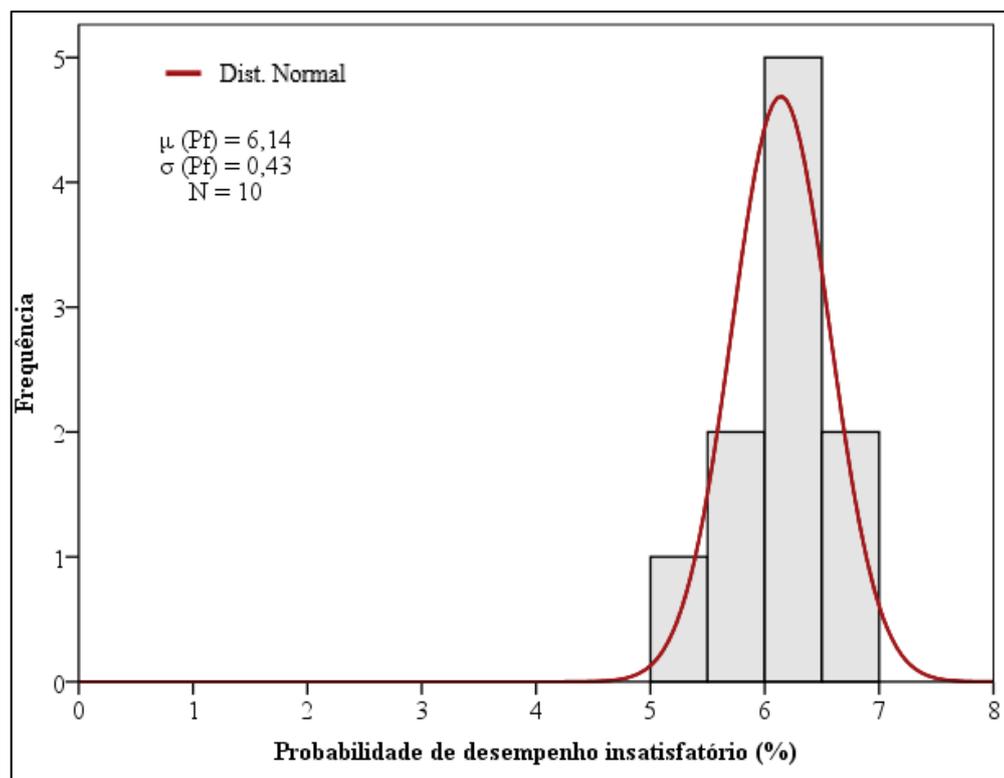
Como na seção 06 sob condição saturada a probabilidade de desempenho insatisfatório foi superior a 0,00%, a simulação numérica foi repetida 10 vezes com o objetivo de observar a estabilização nos valores de probabilidade e índice de confiabilidade fornecidos na análise probabilística, além de permitir avaliar a consistência nos resultados alcançados, conforme recomenda El-Ramly, Morgenstern e Cruden (2002). O resultado das simulações é apresentado na Tabela 5.34.

Tabela 5.34 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para a seção 6 da encosta analisada com dados do solo na condição saturada (Método Morgenstern e Price)

Variável	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_f (%)	5,56	5,48	6,14	6,00	6,50	6,31	5,91	6,24	6,37	6,89
β	1,84	1,80	1,75	1,77	1,77	1,78	1,82	1,77	1,78	1,75

Após 10 simulações, a probabilidade de desempenho insatisfatório média foi 6,14% ($6,14 \times 10^{-2}$) e o desvio padrão 0,43%. Para um nível de confiança de 95%, a probabilidade de falha deve estar compreendida entre 5,28% e 7,00%. A Figura 5.82 mostra o histograma de performance da probabilidade de desempenho insatisfatório.

Figura 5.82 Histograma de frequência da probabilidade de desempenho insatisfatório para a seção 6 saturada após 10 simulações



Nas Figuras 5.83 e 5.84 são apresentados os histogramas de frequência dos valores de coesão e ângulo de atrito para a camada composta por sedimentos heterogêneos do Grupo Barreiras, litologia com maior influência sobre o FS dessa seção, conforme explicita a análise de sensibilidade realizada.

Figura 5.83 Histograma de frequência da coesão efetiva do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price).

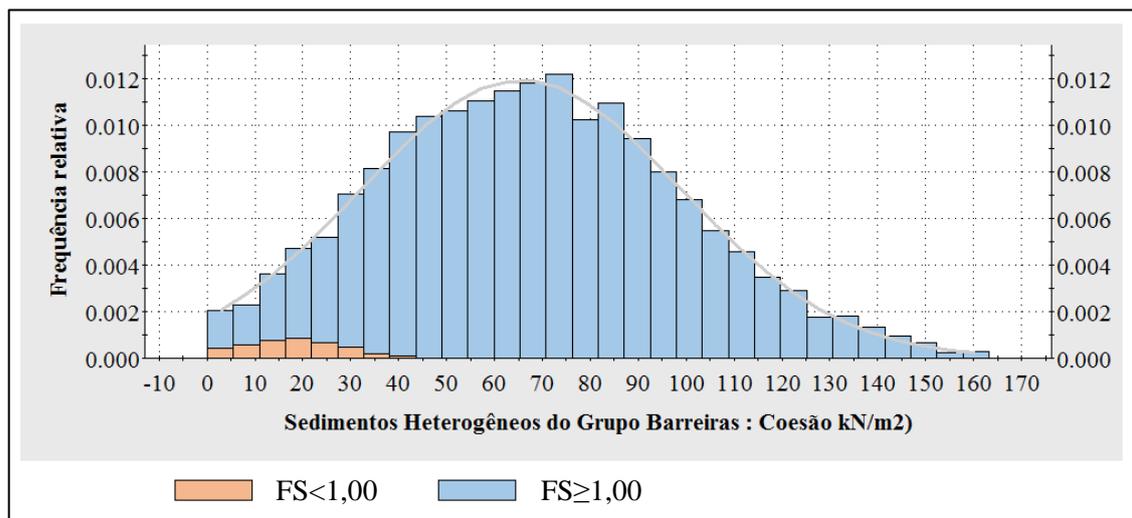
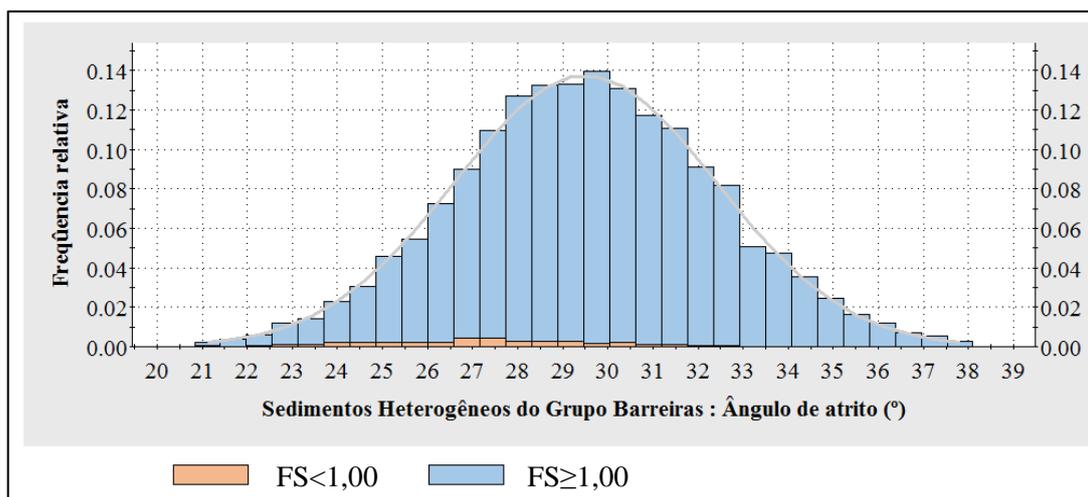


Figura 5.84 Histograma de frequência do ângulo de atrito efetivo do solo na condição saturada versus fator de segurança (Método Morgenstern e Price)

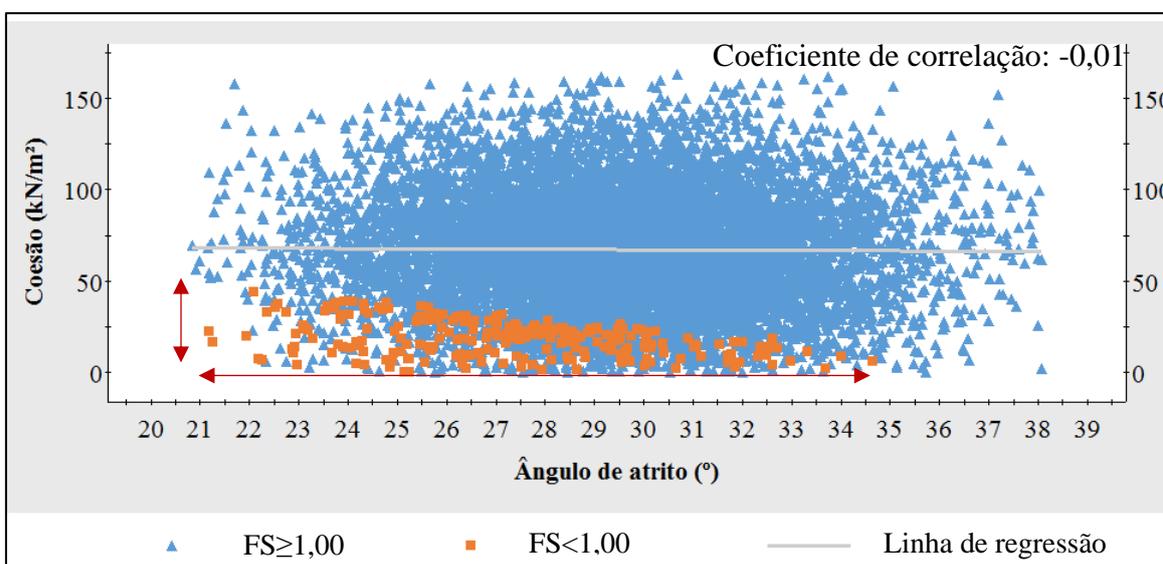


Da análise das Figuras 5.83 e 5.84, constata-se que as superfícies potenciais de ruptura com $FS < 1,00$ foram encontradas para valores de coesão da litologia de sedimentos heterogêneos do Grupo Barreiras inferiores a 40 kPa. Quanto ao comportamento do ângulo de atrito, não foi possível determinar um padrão para essa variável, assim como para a seção

03, devido a grande dispersão nos valores de ângulo responsáveis pela geração de superfície de ruptura com FS inferiores à unidade (entre 23° e 33°.

Os valores de coesão e ângulo de atrito responsáveis pela geração de superfície de ruptura com fatores de segurança inferiores à unidade ficam evidenciados no Gráfico de Correlação, na Figura 5.85. Esse gráfico nos fornece coeficiente de correlação entre o ângulo de atrito e a coesão de -0,01, indicando pouca ou nenhuma correlação entre as duas variáveis aleatórias.

Figura 5.85 Gráfico de dispersão das variáveis aleatórias coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo da camada de sedimentos heterogêneos do Grupo Barreiras



5.4.6. Resumo dos Resultados

A Tabela 5.35 traz uma comparação entre os resultados das simulações para os diferentes métodos de análise utilizados e para todas as seções sob os dois cenários de umidade do solo.

Tabela 5.35 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para todas as seções analisadas, com dados do solo na condição natural e saturada e superfície de ruptura não-circular.

Seção de análise	Cenário	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Seção 1	Natural	FS	9,36	9,81	9,57
		μ (FS)	9,71	10,23	9,99
		σ (FS)	3,21	3,06	2,96
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	2,71	3,02	3,04
	Saturado	FS	3,36	3,51	3,49
		μ (FS)	3,43	3,59	3,56
		σ (FS)	0,86	0,94	0,92
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	2,82	2,76	2,79
Seção 2	Natural	FS	5,78	6,21	5,99
		μ (FS)	6,00	6,44	6,19
		σ (FS)	0,79	0,73	0,78
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	6,31	7,47	6,66
	Saturado	FS	1,62	1,64	1,63
		μ (FS)	1,87	1,89	1,87
		σ (FS)	0,39	0,39	0,39
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	2,21	2,25	2,23
Seção 3	Natural	FS	6,05	6,46	6,23
		μ (FS)	6,24	6,58	6,35
		σ (FS)	0,83	0,76	0,76
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	6,31	7,33	7,01
	Saturado	FS	1,01	1,36	1,05
		μ (FS)	1,20	1,31	1,23
		σ (FS)	0,31	0,18	0,30
		P_f (%)	29,9	2,25	25,58
		β	0,65	1,76	0,77

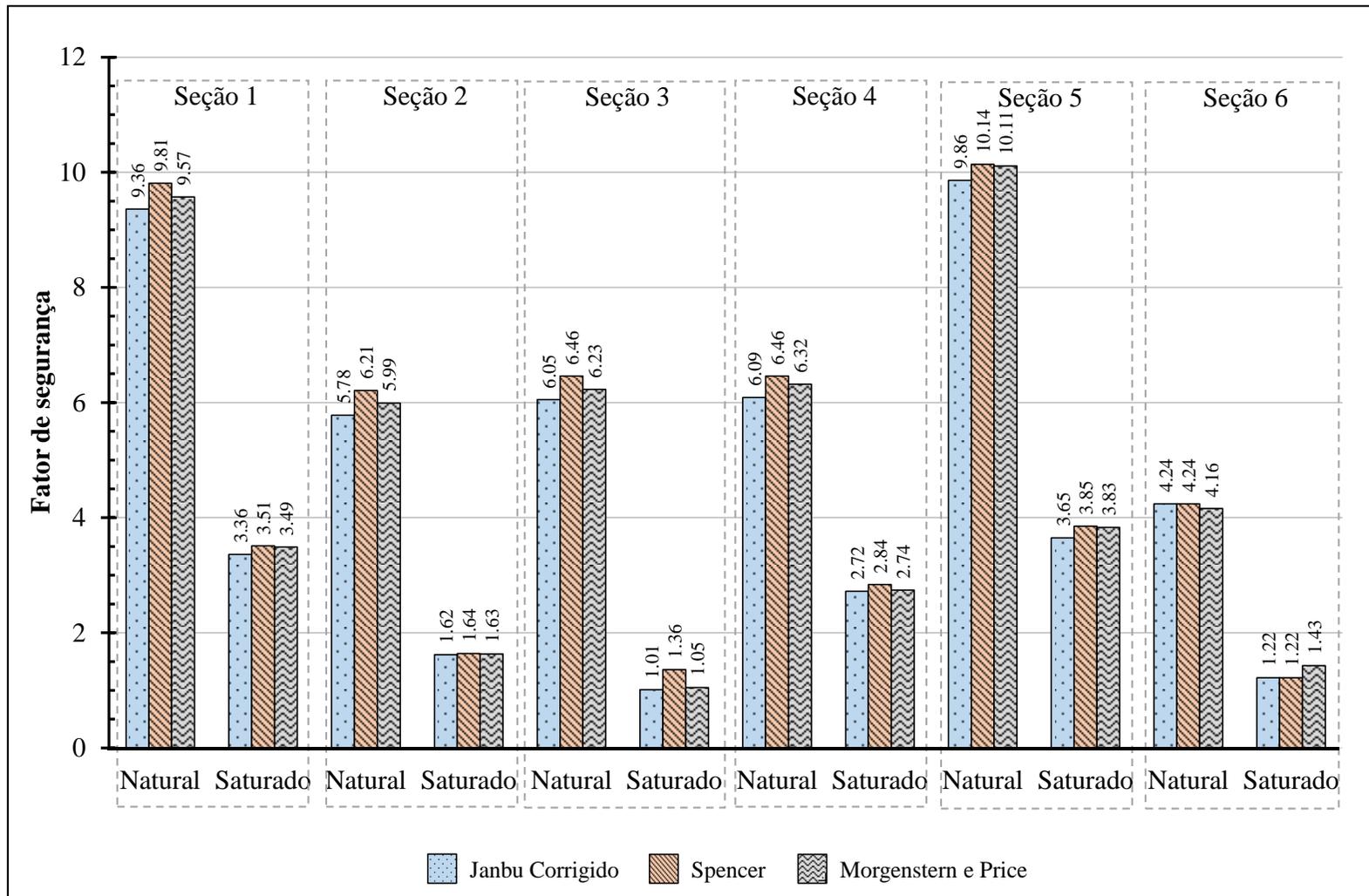
(continua)

Tabela 5.35 Resumo dos resultados da análise de estabilidade probabilística para todas as seções analisadas, com dados do solo na condição natural e saturada e superfície de ruptura não-circular (continuação)

Seção de análise	Cenário	Variável	Janbu corrigido	Spencer	Morgenstern e Price
Seção 4	Natural	FS	6,09	6,46	6,32
		μ (FS)	6,34	6,72	6,57
		$\bar{\sigma}$ (FS)	1,70	1,81	1,78
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	3,14	3,15	3,14
	Saturado	FS	2,72	2,84	2,74
		μ (FS)	2,75	2,88	2,77
		$\bar{\sigma}$ (FS)	0,40	0,42	0,41
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	4,41	4,46	4,32
Seção 5	Natural	FS	9,86	10,14	10,11
		μ (FS)	9,27	10,52	10,54
		$\bar{\sigma}$ (FS)	3,03	3,22	3,21
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	3,13	3,02	3,04
	Saturado	FS	3,65	3,85	3,83
		μ (FS)	3,70	3,91	3,89
		$\bar{\sigma}$ (FS)	0,87	0,97	0,98
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00
		β	3,09	2,99	2,96
Seção 6	Natural	FS	4,24	4,24	4,16
		μ (FS)	3,89	3,09	3,41
		$\bar{\sigma}$ (FS)	1,37	0,97	1,08
		P_f (%)	0,29	0,40	0,04
		β	2,11	2,15	2,24
	Saturado	FS	1,22	1,22	1,43
		μ (FS)	1,07	0,98	1,46
		$\bar{\sigma}$ (FS)	0,25	0,30	0,25
		P_f (%)	37,03	49,58	5,56
		β	0,28	-0,05	1,84

Partindo inicialmente para avaliação geral dos resultados determinísticos obtidos, percebe-se que os três métodos utilizados na análise (Janbu Corrigido, Spencer e Morgenstern e Price) apresentaram superfícies de ruptura semelhantes e pouca diferença na magnitude do fator de segurança, como pode ser notado na Figura 5.86.

Figura 5.86 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade determinística para todas as seções, com dados do solo na condição natural e saturada e superfícies de ruptura circular e não-circular



Fredlund, Krahn e Pufahl (1981) constataram que, de modo geral, não há diferença quantitativa substancial no fator de segurança determinístico fornecido entre os vários métodos do equilíbrio limite disponíveis para análise de estabilidade, com ressalva para o método de Fellenius que pode diferir em até 60% dos demais.

Corroborando com os resultados obtidos para a encosta da Comunidade São José do Jacó, Tonus (2009) realizou uma comparação entre os métodos de Fellenius, Janbu, Bishop, Morgenstern e Price e Spencer, aplicados a um caso real de um talude da Serra do Mar paranaense, no município de Guaratuba.

Segundo Tonus (2009), para análises que não envolvam muitas variáveis, ou seja, análises em solos homogêneos sem intervenção de nível d'água ou de qualquer dispositivo de contenção, o resultado de todos os métodos utilizados seria muito semelhante.

No entanto, na medida em que são consideradas as peculiaridades do solo e a interferência do nível d'água no problema, verifica-se que métodos mais simplificados, como Janbu e Fellenius, apresentam resultados mais distantes aos de métodos mais rigorosos, como Morgenstern e Price e Spencer (TONUS, 2009).

É importante comentar que os resultados obtidos nas análises não são influenciados apenas pela escolha do método utilizado. Duncan, Navin e Wolff (2003) obteve fatores de segurança consideravelmente menores ao empregar em suas simulações numéricas superfícies de ruptura não-circulares, demonstrando que a escolha do tipo de superfície (circular ou não-circular) afeta significativamente os resultados das simulações.

Nesse sentido, com o objetivo de observar a influência da escolha do tipo de superfície sobre os resultados determinísticos e probabilísticos deste trabalho, as análises de estabilidade foram repetidas para a seção 3 (seção com $P_f > 0\%$) empregando-se superfície potencial de ruptura do tipo circular. Os resultados dessas análises são apresentados na Tabela 5.36 e nas Figuras 5.87 e 5.88.

Os resultados apresentados atestam que o efeito do tipo de superfície de ruptura é significativo. Ao avaliarmos o gráfico da Figura 5.88, observa-se que caso a análise de estabilidade tivesse sido procedida apenas com a superfície potencial de ruptura do tipo circular, a seção 3 na condição saturada encontrava-se no limiar da aceitabilidade, tomando como base o valor de 1,5 estabelecido pela NBR 11682/2009.

Tabela 5.36 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade para a seção 3, com dados do solo na condição natural e saturada e superfícies de ruptura circular e não-circular

Seção	Cenário	Variável	Superfície não-circular			Superfície circular		
			J	S	MP	J	S	MP
Seção 3	Natural	FS	6,05	6,46	6,23	6,45	6,53	6,50
		μ (FS)	6,24	6,58	6,35	6,72	6,71	6,64
		$\bar{\sigma}$ (FS)	0,83	0,76	0,76	1,02	0,84	0,81
		P_f (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		β	6,31	7,33	7,01	5,61	6,82	6,95
	Saturado	FS	1,01	1,36	1,05	1,43	1,47	1,47
		μ (FS)	1,20	1,31	1,23	1,70	1,79	1,79
		$\bar{\sigma}$ (FS)	0,31	0,18	0,30	0,44	0,50	0,50
		P_f (%)	29,9	2,25	25,58	1,54	1,55	1,55
		β	0,65	1,76	0,77	1,61	1,58	1,58

Figura 5.87 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade determinística com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição de umidade natural

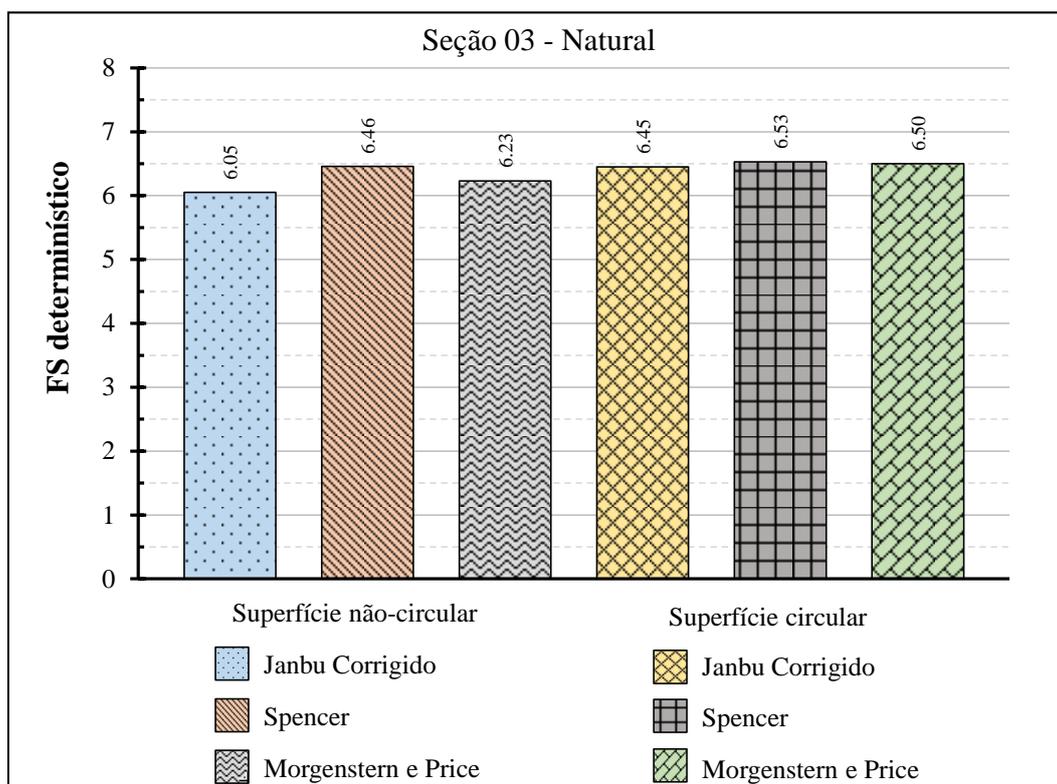
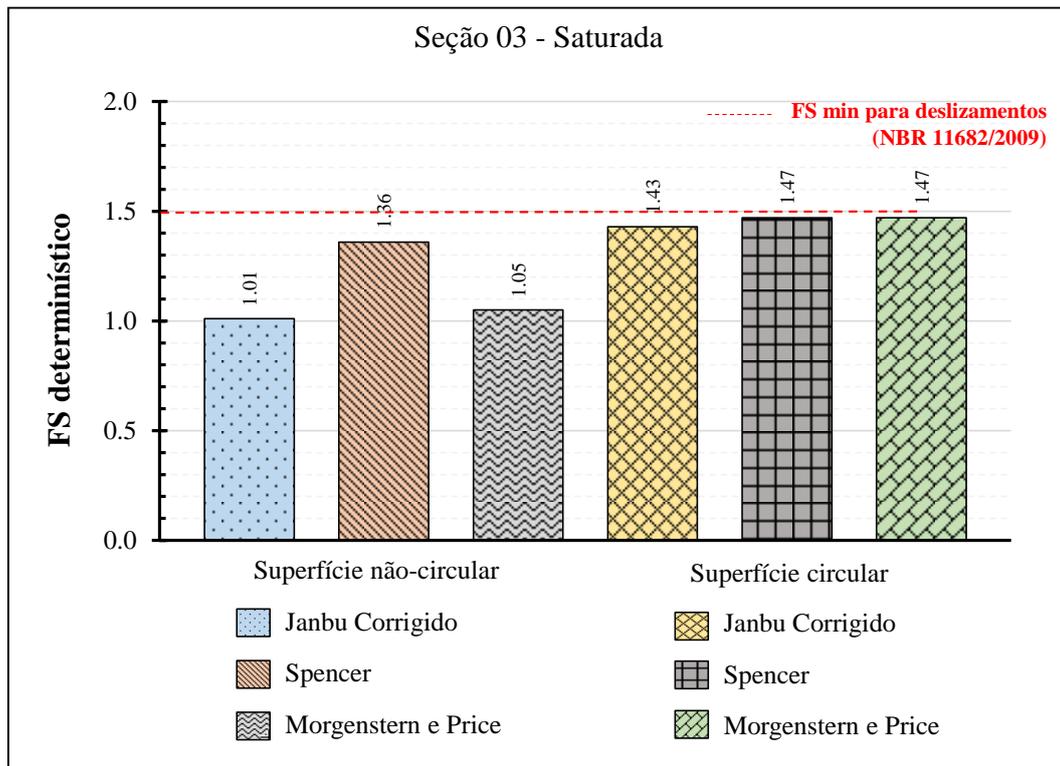


Figura 5.88 Comparação entre os resultados da análise de estabilidade determinística com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição saturada



Todavia, ao realizar a análise utilizando superfície potencial de ruptura do tipo não-circular, procedimento adotado nesta pesquisa, os fatores de segurança reduziram consideravelmente, aproximando-se do FS limite (1,0), o que indica alta possibilidade de ruptura dessa seção. Assim, verifica-se que dependendo do tipo de superfície adotada na simulação numérica, a seção 3 pode ser classificada como segura ou instável.

Apesar das conclusões de Duncan, Navin e Wolff (2003) limitarem-se aos fatores de segurança determinísticos, da interpretação das Figuras 5.89 e 5.90, percebe-se que o tipo de superfície adotada na análise também afeta o fator de segurança médio, a probabilidade de desempenho insatisfatório e o índice de confiabilidade. Para a seção 03 na condição saturada, por exemplo, a P_f reduziu de aproximadamente 30% para 1,5% e o β elevou-se, com a redução da probabilidade, de 0,7 para 1,6, aproximando-se mais do valor de confiabilidade mínimo proposto por Whitman (1984).

Figura 5.89 Comparação entre os resultados da probabilidade de desempenho insatisfatório com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição saturada

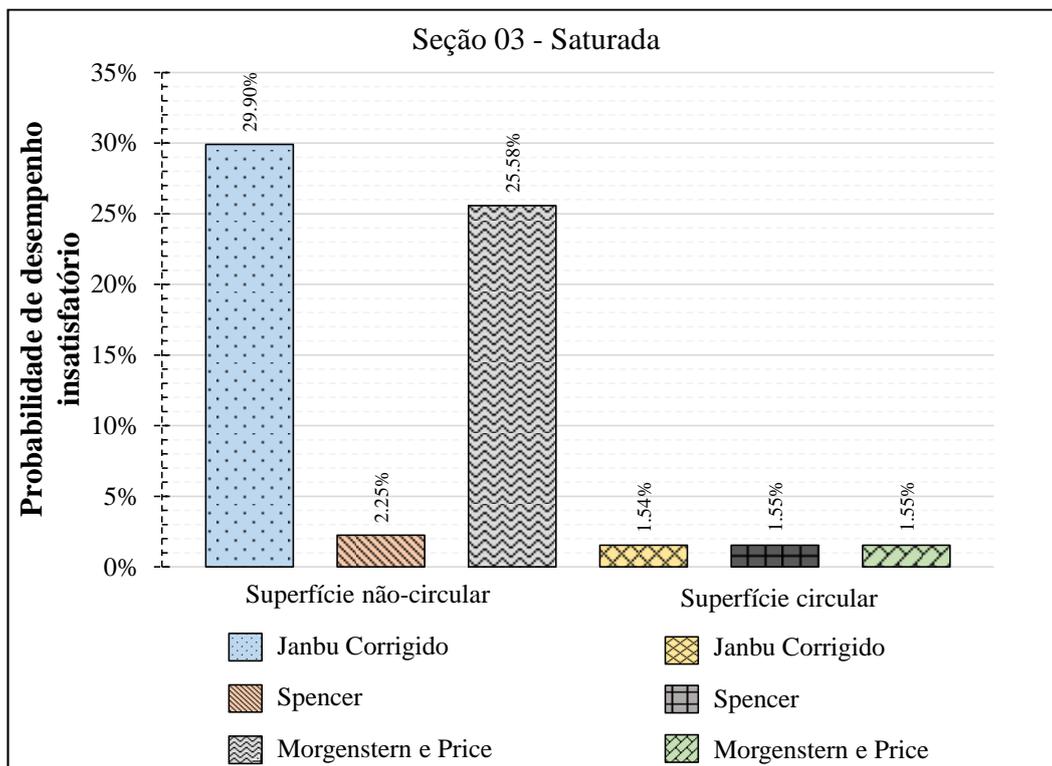
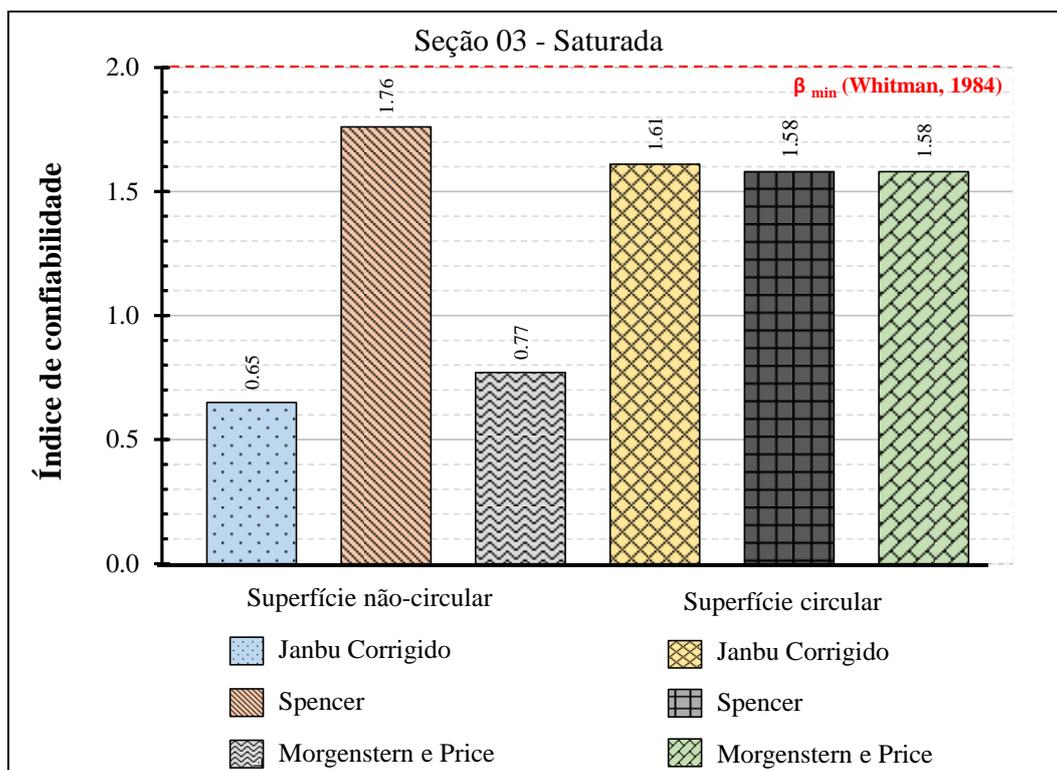


Figura 5.90 Comparação entre os resultados do índice de confiabilidade com superfície de ruptura circular e não-circular para a seção 3 na condição saturada



Retornando à avaliação dos resultados determinísticos obtidos para a superfície de ruptura não-circular, observa-se que, utilizando os dados apresentados, todas as seções analisadas sob condição de umidade natural geraram fatores de segurança bem superiores ao limite mínimo de 1,5 estabelecido pela NBR 11682/2009 para deslizamentos (Tabela 5.27).

Contudo, na situação de simulação com solo hipoteticamente saturado, houve considerável redução do FS determinístico em todas as seções, sobretudo na 03 e 06, cujos FS encontrados foram inferiores à referência, indicando possibilidade de instabilização desses trechos da encosta.

Destaca-se que os FS determinísticos encontrados, na realidade, representam uma estimativa da estabilidade de um talude em determinadas condições de carregamento e de configuração do solo por meio de um número. Este FS pode variar com o tempo, em função das intervenções sofridas pela encosta, sejam elas favoráveis ou desfavoráveis à estabilidade.

Para as análises de risco a movimentos de massa, apesar dos fatores de segurança determinísticos não fornecerem a probabilidade de ruptura da área analisada, utilizada no cálculo do risco geotécnico, podem servir como uma ferramenta quantitativa de monitoramento da estabilidade da encosta, uma vez que nos informam o quão próximo da ruptura o talude em análise se encontra, e ainda mais, a área potencialmente afetada por esta ruptura, permitindo assim implementar ações preventivas para a segurança da população que habita o seu entorno.

Da Tabela 5.35, verifica-se ainda, assim como concluído por Costa (2005), que os fatores de segurança determinísticos encontrados possuem magnitude próxima e ligeiramente superior à dos fatores de segurança médios probabilísticos. Corroborando com os resultados desta pesquisa, de acordo com Rockscience (2018), em geral o fator de segurança médio deve ser próximo do valor do FS determinístico, chegando a igualar-se para um número suficientemente grande de amostras (n).

Com relação aos resultados probabilísticos alcançados, constata-se pouca variação entre os fatores de segurança médios pelos três métodos de análise de estabilidade. Entretanto, ao avaliar a probabilidade de desempenho insatisfatório das seções que apresentaram probabilidade superior a 0,00%, ou seja, as seções 3 e 6 sob condição de completa saturação, verifica-se maior dispersão entre os resultados obtidos.

Essa divergência nos valores de P_f entre Janbu Corrigido, Spencer e Morgenstern e Price pode ter derivado da diferença entre as superfícies de ruptura determinísticas encontradas em cada método, tendo em vista que a análise probabilística é realizada de forma independente para a superfície mínima global fornecida por cada método de análise.

No que se refere à função densidade de probabilidade da variável dependente, percebe-se que o *Slide 7.0* forneceu como função com melhor adequabilidade ao histograma de frequência do fator de segurança a função beta em 8 das 12 curvas, e as funções normal e gamma em 2 das 12 curvas cada.

Há uma grande discussão em torno dessa temática. Duncan (2000) assume a distribuição lognormal para os valores do fator de segurança. Ele afirma não haver provas de que o FS segue a distribuição lognormal, mas que acredita ser uma aproximação razoável.

No entanto, Cherubini *et al.* (2001), em um artigo de discussão dos resultados obtidos por Duncan (2000) questionam a utilização da distribuição de probabilidade lognormal para aplicações geotécnicas de modo geral.

Segundo Cherubini *et al.* (2001), essa distribuição possui como limites o zero à esquerda e o infinito positivo, à direita, fazendo com que ela seja sempre assimétrica para esquerda. Do conceito gráfico de probabilidade de falha, sabe-se que área de falha será aquela limitada pelos fatores de segurança menores ou iguais a 1,00, na calda esquerda da curva. Todavia, por causa da assimetria à esquerda característica dessa distribuição, projetos tenderão a ser mais conservadores, apresentando maiores valores de probabilidade de desempenho insatisfatório.

Nesse sentido, Cherubini *et al.* (2001) sugerem a utilização da distribuição de probabilidade beta, encontrada em 75% das análises probabilísticas desta pesquisa, para descrever o comportamento do fator de segurança. Ao contrário da normal, que é um caso particular da beta, com limites no infinito negativo e positivo e forma sempre simétrica, a distribuição beta pode apresentar assimetria e seus limites (domínio) podem ser fixados em valores específicos, adequados à realidade da variável em análise.

Da comparação entre os resultados determinísticos e probabilísticos é interessante observar ainda que os métodos que apresentaram FS determinísticos e médios mais altos não necessariamente resultaram em probabilidades de desempenho insatisfatório menores.

Como já ilustrado na Figura 2.10 do Item 2.4.2.1.2, essa relação inversamente proporcional entre o FS e a P_f não é sempre satisfeita dado que a probabilidade de ruptura deve considerar o desvio padrão dos resultados, o qual está relacionado com a incerteza dos parâmetros envolvidos na simulação, evidenciando a importância de utilizar análises probabilísticas aliadas aos fatores de segurança para avaliação da segurança de estruturas e/ou taludes.

Acerca da interpretação do significado físico da probabilidade de desempenho insatisfatório, El Ramly (2001) alerta que nem sempre a obtenção de uma P_f diferente de

zero significa necessariamente que haverá ruptura. El Ramly (2001) afirma ser mais coerente fisicamente compreender a probabilidade de falha como a probabilidade de que as forças desestabilizadoras sobre o talude ou estrutura em análise excedam sua capacidade, ou seja, as forças resistentes.

Duncan (2000) exemplifica o conceito de probabilidade de desempenho insatisfatório aplicado à uma estrutura de contenção para demonstrar que probabilidade de falha/ruptura não necessariamente implica em uma ruptura catastrófica, assim como defendido por El Ramly (2001). De acordo com Duncan (2000), episódios de repetidos pequenos deslocamentos “*sliding*” em um muro de contenção poderia constituir um desempenho insatisfatório da estrutura, mas não uma falha catastrófica.

Duncan (2000) comenta ainda que, em respeito à essa importante distinção entre falha catastrófica e problemas de desempenho menos significativos, U. S. Army Corps of Engineers (1995) recomenda a utilização do termo “probabilidade de desempenho insatisfatório”, o qual foi empregado neste trabalho em substituição à “probabilidade de ruptura ou falha”.

El Ramly (2001) complementa dizendo que é importante ter em mente que a probabilidade de desempenho insatisfatório é um indicativo de se a encosta tem um desempenho satisfatório ou não para as considerações de carregamento, nível freático e demais condições de contorno adotadas no problema, sem levar em conta o efeito do tempo.

Logo, caso ocorram mudanças nas forças solicitantes ou resistentes, ou qualquer alteração no nível freático e, por conseguinte, na poropressão, ao longo da vida útil daquela estrutura, o impacto dessas modificações sobre sua estabilidade só poderá ser contabilizado através de uma nova análise probabilística.

Um fator que pode ser crucial em uma possível deflagração de movimentos de massa na área do Jacó, e que não foi incorporado às análises de estabilidade, é a deficiência nas redes de abastecimento de água, drenagem de águas pluviais e esgotamento sanitário.

Em períodos de alta pluviosidade, o expressivo aumento no volume de águas na rede de drenagem de águas pluviais das moradias, inúmeras vezes interligada indevidamente à rede de esgotamento sanitário, pode provocar a ocorrência de vazamentos em tubulações por sobrecarga do sistema. Essa concentração de água subsuperficial no ponto de ruptura da tubulação pode desencadear um processo de erosão interna no solo (*piping*), deflagrando movimentos de massa. Situação semelhante à descrita acima levou à ocorrência de uma corrida de areia em Mãe Luiza, em junho de 2014.

Os resultados probabilísticos obtidos em todas as análises foram aplicados na Equação 3 para viabilizar a avaliação do risco através de uma metodologia diferente da proposta por Faria (2011). De modo geral, dessa análise constatou-se que dentre todas as seções estudadas, a 3 na condição saturada e a 6, tanto natural quanto saturada, não atenderam aos valores de referência de probabilidade de ruptura compatível à um nível de risco aceitável para encostas urbanas ocupadas, em torno de 10^{-4} para até 10 fatalidades.

O índice de confiabilidade também foi utilizado como indicador da segurança dos trechos da encosta simulados. Para tanto, comparou-se os β obtidos ao valor de confiabilidade mínimo ($\beta = 2,0$), proposto por Whitman (1984) como admissível na engenharia geotécnica; e aos valores de referência propostos por U. S. Army Corps of Engineers (1995) (Tabela 2.17).

Essa análise ratificou o desempenho perigoso previsto para as seções 3 e 6 do talude sob condição saturada, apontando para possibilidade de instabilidade. Para as demais seções, obteve-se nível de desempenho satisfatório.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou avaliar e mapear o risco de ocorrência de movimentos em uma encosta urbana ocupada no município de Natal-RN, por meio da aplicação da metodologia qualiquantitativa de análise de risco proposta por Faria (2011); além de analisar a estabilidade das encostas adjacentes a área por meio da utilização da abordagem probabilística.

A consulta aos especialistas para definição dos pesos atribuídos aos indicadores de risco sugeriu um nível de consistência aceitável nas comparações realizadas e coerência na ordem de importância obtida para os atributos e suas subclasses, ao comparar os dados da pesquisa com as informações extraídas das visitas de campo.

Dessa análise, os especialistas definiram que os condicionantes geomorfológicos, geológicos e geotécnicos não são de grande influência para espacialização do risco e que a maior contribuição para ocorrência de movimentos de massa na área é dada pela forma de interferência antrópica sobre a encosta e pela influência do parâmetro representativo da exposição da população ao risco.

O mapa de risco produzido pela aplicação da metodologia de Faria (2011) mostrou que a área de estudo apresenta grau de risco alto em aproximadamente metade da Comunidade São José do Jacó, o que representa cerca 600 pessoas submetidas ao risco de ocorrência de movimentos de massa, sobretudo escorregamentos.

A metodologia adotada para construção do mapa de risco, através da sobreposição dos mapas de suscetibilidade, perigo e vulnerabilidade (exposição), mostrou-se extremamente importante na avaliação da influência de cada indicador na espacialização do risco na área em estudo.

A comparação realizada entre os quatro trabalhos já desenvolvidos na região de estudo indicou a existência de uma situação crítica de risco para a população residente da área, principalmente relacionada a possibilidade de ocorrência do movimento de massa do tipo escorregamento, com possíveis danos econômicos, ambientais, e, principalmente, sociais.

Além disso, a observação de consistentes semelhanças existentes entre todos os mapeamentos nos permitiu validar a aceitabilidade dos resultados alcançados pela aplicação do modelo qualiquantitativo de Faria (2011), possibilitando a extensão da utilização do método para as demais encostas urbanas ocupadas no município de Natal/RN ou em outras

regiões que apresentem características físicas e sociais análogas aquelas observadas na área de estudo.

No que se refere às análises de estabilidade de taludes determinísticas, constatou-se que os três métodos utilizados resultaram em superfícies de ruptura semelhantes e pouca diferença na magnitude do fator de segurança; e que a escolha do tipo de superfície potencial de ruptura adotada na análise tem efeito significativo sobre os resultados das simulações.

Com relação aos resultados probabilísticos alcançados, assim como observado nas análises convencionais, houve pouca variação entre os fatores de segurança médios (μ (FS)), probabilidades de desempenho insatisfatório (P_f) e índices de confiabilidade (β) pelos três métodos de análise de estabilidade, com exceção das seções 3 e 6 sob condição de completa saturação do solo, nas quais constatou-se maior dispersão entre os resultados obtidos.

Uma importante conclusão desta pesquisa, derivada da comparação entre os resultados probabilísticos e determinísticos das simulações numéricas, é que os métodos que apresentaram FS determinísticos e médios mais altos não necessariamente resultaram em probabilidades de desempenho insatisfatório menores, demonstrando que essa relação inversamente proporcional entre o FS e a P_f não é sempre satisfeita, dado que a probabilidade de falha leva em consideração, para sua obtenção, a incerteza dos parâmetros envolvidos na simulação.

A utilização da abordagem probabilística nas simulações numéricas desenvolvidas nesta pesquisa demonstrou que a teoria da confiabilidade pode ser aplicada na engenharia geotécnica através de procedimentos simples, e que com um esforço adicional relativamente pequeno para realizar essas simulações, o valor das análises pode ser aumentado consideravelmente.

O trabalho abordou ainda a validade das análises determinísticas e probabilísticas, esclarecendo que todos os parâmetros de saída obtidos (FS determinístico, FS médio, desvio-padrão, probabilidade de falha e índice de confiabilidade) só são válidos para as considerações de carregamento, nível freático e demais condições de contorno adotadas no problema. De modo que se houverem mudanças ao longo da vida útil daquela estrutura, o impacto dessas modificações sobre sua estabilidade só poderá ser contabilizado através de uma nova análise.

A avaliação do risco através dos resultados probabilísticos das análises de estabilidade ratificou o desempenho perigoso previsto para as seções 3 e 6 do talude sob condição saturada, apontando para possibilidade de instabilidade nesses trechos da encosta.

Por fim, defende-se que probabilidade de falha não seja vista como um substituto para o fator de segurança, mas como um complemento. Análises probabilísticas podem fornecer um subsídio lógico para escolha de fatores de segurança que sejam mais apropriados ao grau de incerteza nas variáveis de entrada e às consequências de uma possível ruptura.

Como recomendações para trabalhos futuros, destaca-se:

- a) Realização de ensaios laboratoriais e de campo para caracterização do solo da área estudada, permitindo a redução das incertezas oriundas dos parâmetros de entrada;
- b) Consideração da existência de variabilidade espacial do solo nas simulações numéricas;
- c) Definição de uma relação entre chuvas e movimentos de massa para o município de Natal/RN, através da avaliação de registros de precipitação correlacionados com a ocorrência de eventos de movimentação de massa.
- d) Revisão do critério de classificação de risco proposto por Faria (2011);
- e) Desenvolvimento de um critério de aceitabilidade de risco consistente para as encostas urbanas brasileiras, que levam em consideração probabilidade de desempenho insatisfatório, índice de confiabilidade e consequências, assim como proposto por U. S. Army Corps of Engineers (1995);

7. REFERÊNCIAS

ABELLA, E. A. C.; VAN WESTEN, C. J. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. **Landslides**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.311-325, 19 set. 2007. Springer Nature.

AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão - SP**. 2005. 364p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-06102006-090547/>>. Acesso em: 2016-05-10.

ALHEIROS, M. M. *et al.* **Manual de Ocupação dos Morros da Região Metropolitana do Recife**. Recife: Ensol, 2003. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/index.php/component/content/article?id=1854:manual-de-ocupacao-de-morros-na-regiao-metropolitana-de-recife>>. Acesso em: 2016-05-10.

ALHEIROS, M.M. **Riscos de Escorregamentos na Região Metropolitana do Recife**.1998. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.

ANAZAWA, T. M.; FEITOSA, F. F.; MONTEIRO, A. M. V.. VULNERABILIDADE SOCIOECOLÓGICA NO LITORAL NORTE DE SÃO PAULO: MEDIDAS, SUPERFÍCIES E PERFIS DE ATIVOS. **Geografia**, Rio Claro, v. 38, n. 1, p. 189,208, 2013.

ANGELIM, L. A. A.; CAMOZZATO, E.; WANDERLEY, A. A. Folha SB.25 Natal. In: CPRM. Carta geológica do Brasil ao milionésimo: sistema de informações geográficas (SIG): folha SB.25 Natal / folha SC.25 Recife. Brasília: CPRM, 2004a. 41 CD-ROM. Programa Geologia do Brasil.

ASSIS, A.P., ESPÓSITO, T.J., GARDONI, M.G., SILVA, P.D.E.A., MAIA, J.A. (2012). Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia. Publicação G.AP-002/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 278 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 33 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9 p.

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

AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY. Landslide risk management concepts and guidelines. **Australian Geomechanics**, Vol. 35, N. 1, Mars 2002: p. 49-92. Disponível em: <<https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=809857183323774;res=IELENG>>. Acesso em: 07 maio 2019.

BAECHER, Gregory B.; CHRISTIAN, John T.. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. Chichester: John Wiley e Sons, 2003. 618 p. ISBN: 978-0-471-49833-9.

BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe –PE**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5797>>. Acesso em: 01 jan. 2016.

BARBOSA, Nathalia Marinho. **Estabilidade das falésias da Barreira do Inferno - RN**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BARBOSA, J. A.; LIMA FILHO, M. F. Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: observações em dados de poços. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 287-306, 2006. Disponível em: https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:eX9owmlduE8J:scholar.google.com/&hl=pt-BR&as_sdt=0,5. Acesso em: 12 jun. 2019.

BEZERRA, Láddyly Thuanny Vital. **Mapeamento de risco/perigo de movimentos de massa e avaliação da estabilidade das encostas na comunidade São José do Jacó, em Natal/RN**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

BHATT, Bharat Prashad *et al.* Using Geographic Information System and Analytical Hierarchy Process in Landslide Hazard Zonation. **Applied Ecology And Environmental Sciences**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.14-22, 23 abr. 2013. Science and Education Publishing Co., Ltda. <http://dx.doi.org/10.12691/aees-1-2-1>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281182228_Using_Geographic_Information_System_and_Analytical_Hierarchy_Process_in_Landslide_Hazard_Zonation>. Acesso em: 12 out. 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (orgs.). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007. 176 p. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoErradicacao/Livro_Mapeamento_Enconstas_Margens.pdf>. Acesso em -06-21.

CHERUBINI, Claudio *et al.* Factor of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 127, n. 8, p.700-721, ago. 2001. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:8\(700\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:8(700)).

COSTA, Eli Antônio da. **AVALIAÇÃO DE AMEAÇAS E RISCO GEOTÉCNICO APLICADOS À ESTABILIDADE DE TALUDES**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (rs), 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6150/000481611.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

CRUDEN, D. M.. A simple definition of a landslide. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, [s.l.], v. 43, n. 1, p.27-29, abr. 1991. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02590167>.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A.K.; SCHUSTER, R.L. (eds). **Landslides investigation and mitigation**. Special Report 247. Washington DC: Transportation Research Board, 1996, Chapter 3, p. 36–75.

DONASSOLLO, Alan. **Classificação de perigo de movimentos de massa em rodovias utilizando o método analytic hierarchy process (AHP). Estudo de caso: Rodovia RS-115, Taquara - Gramado, RS**. 2017. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Escola de Minas, Nucleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <<https://www.nugeo.ufop.br/download-tese/192/classificacao-de-perigo-de-movimentos-de-massa-em-rodovias-utilizando-o-metodo-analytic-hierarchy-process-ahp-estudo-de-caso-rodovia-rs-115-taquara-gramado-rs>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

DUNCAN, J. M.; NAVIN, M.; WOLFF, T. F.. Discussion of “Probabilistic slope stability analysis for practice”. **Canadian Geotechnical Journal**, [s.l.], v. 40, n. 4, p.848-850, ago. 2003. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t03-030>.

DUNCAN, J. Michael. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 126, n. 4, p.307-316, abr. 2000. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2000\)126:4\(307\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:4(307)).

EFFGEN, Julia Frederica; MARCHIORO, Eberval. MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA NO MUNICÍPIO DE VILA VELHA-ES, COM O USO DE ANÁLISE DE PROCESSOS HIERARQUIZADOS (AHP). **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 4, p.731-742, 2017. Disponível em:

<https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/36/volume36_4_files/36-4-artigo-09.pdf>. Acesso em: 03 out. 2018.

EINSTEIN, H.H. **Landslide risk assessment procedure**. Keynote lecture. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, 1988, Lausanne, Switzerland, vol. 2, 1075-1090. Balkema, Rotterdam.

EL-RAMLY, Hassan. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. 2001. 420 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotechnical Engineering, Department Of Civil And Environmental Engeeniring, University Of Alberta, Edmonton, 2001. Disponível em: <<https://era.library.ualberta.ca>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

EL-RAMLY, H; MORGENSTERN, N R; CRUDEN, D M. Probabilistic slope stability analysis for practice. **Canadian Geotechnical Journal**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.665-683, jun. 2002. Canadian Science Publishing.

EL-RAMLY, H.; MORGENSTERN, N. R.; CRUDEN, D. M. Probabilistic assessment of stability of a cut slope in residual soil. **Géotechnique**, [s.l.], v. 55, n. 1, p.77-84, fev. 2005. Thomas Telford Ltda.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO RIO GRANDE DO NORTE. Monitoramento Pluviométrico. 2018. Disponível em: <<http://189.124.130.5:8181/monitoramento/monitoramento.php>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

ESRI. **Función de curvatura**. 2019. Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/data/imagery/curvature-function.htm>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

LEONE, F.; ASTE, J.P.; LEROI, E. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. In: SENNESET, K. (ed.). **Landslides**, v. 1, p. 263–269, 1996. Rotterdam: A.A. Balkema, 1996.

FARIA, D. G. M. **Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP)**. 2011. 194p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-08122011-110908/>>. Acesso em: 2015-10-18.

FARIA, D. G. M.; AUGUSTO FILHO, O. Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no Mapeamento de Perigo de Escorregamentos em Áreas Urbanas. *Revista Instituto Geológico: São Paulo*, v.34, n.1, p. 23-44, junho 2013. Disponível em: <<http://ppege.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8945/0>>. Acesso em: 2016-05-09.

FLORES, Emerson Alex Figueroa. Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=12093@1>. Acesso em: 15 mar. 2018.

FRANEK, J; KRESTA, A. Judgment Scales and Consistency Measure in AHP. **Procedia Economics and Finance**, [s.l.], v. 12, p.164-173, 2014. Elsevier BV. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212567114003323>>. Acesso em: 2017-11-10.

FREDLUND, D.G.; KRAHN, J.; PUF AHL, D.E.. RELATIONSHIP BETWEEN LIMIT EQUILIBRIUM SLOPE STABILITY METHODS. In: **Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 3, 1981, p. 409-416.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de Taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: Edgard Blücher, 1984, 194p.

GUSMÃO FILHO, J. A. Desempenho de obras geotécnicas. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2006. 523 p.

GUSMÃO FILHO, J. A. *et. al.* Estudo das Encostas de Jaboatão dos Guararapes – PE. In: 1º Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, 1, 1992, Rio de Janeiro.

GUZZETTI, Fausto et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, [s.l.], v. 31, n. 1-4, p.181-216, dez. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x\(99\)00078-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x(99)00078-1). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X99000781>>. Acesso em: 2017-11-10.

HENRIQUE, Hugo Manoel. **Mapa de risco a deslizamento e erosão do bairro de Rurópolis, município do Ipojuca-PE.**2014. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/14235>>. Acesso em: 16 out. 2018.

HIDALGO MONTOYA, C. A.; PACHECO DE ASSIS, A.. Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: Aplicación. **Rev. Ing. Univ. Medellín**, Medellín, v. 10, n. 18, p. 79-86, jan. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242011000100009&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 2017-11-13.

HUNGR, O. *et al.* A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental & Engineering Geoscience**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.221-238, 1 ago. 2001. GeoScienceWorld. <http://dx.doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>.

HUNGR, Oldrich; LEROUÉIL, Serge; PICARELLI, Luciano. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.167-194, 30 nov. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.

HUTCHINSON, J.N. (1968) Mass movement. In: FAIRBRIDGE. R. W. (ed). **Encyclopedia of geomorphology**. New York: Reinhold Publishers, 1997, p. 688–695.

HUTCHINSON, J.N.. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, [s.l.], v. 26, n. 2, p.3-35, 1989. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em:

https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default_resultados_universo.shtm. Acesso em: 21 abril. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Indicadores de desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. 443 p

INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES. **World Disasters Report 2010: Focus on urban risk**. 2010. Disponível em: < <https://www.ifrc.org/en/publications-and-reports/world-disasters-report/wdr2010//>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES. Quantitative risk assessment for slopes and landslides—the state of the art. In: CRUDEN, D. M.; FELL, R. (eds.). **Landslide Risk Assessment**. Rotterdam/Brookfield: A. A. Balkema, 1997, p. 3-12.

JOHNSON, Chris *et al.* **An Introduction to Geology**. Salt Lake City: Salt Lake Community College, 2017. Disponível em: <<http://opengeology.org/textbook/>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

JABOYEDOFF, M. *et al.* Human-Induced Landslides: Toward the analysis of anthropogenic changes of the slope environment. **Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice**, p.217-232, 6 jun. 2016. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/b21520-20>.

KAUR, A.; SHARMA, R. K. Slope Stability Analysis Techniques: A Review. **International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology**. Delhi, v. 1, n. 4, p.52-57, fev. 2016. Disponível em: <<http://www.ijeast.com>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

KOBIYAMA, M. *et al.* Prevenção de Desastres Naturais: conceitos básicos. Florianópolis: Editora Organic Trading, 2006.

KOKUTSE, Nomessi Kuma; TEMGOUA, André Guy Tranquille; KAVAZOVIĆ, Zanin. Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 86, p.146-153, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.005>.

KOMAC, Marko. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. **Geomorphology**, [s.l.], v. 74, n. 1-4, p.17-28, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.005>.

KOZCIAK, Simone. **Análise determinística da estabilidade de vertentes na Bacia do Rio Marumbi - Serra do Mar - Paraná.** 2005. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/3877>>. Acesso em: 10 out. 2018.

LACASSE, Suzanne. Hazard, Reliability and Risk Assessment: Research and Practice for Increased Safety. In: **NORDIC GEOTECHNICAL MEETING**, 17., 2016, Reykjavik. Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting. [s. l.]: ISSMGE, 2018. p. 17 - 42. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11250/2465332>>. Acesso em: 09 dez. 2018.

LOBATO, Rodrigo Batista; SILVA, Luiz Felipe Coutinho Ferreira da; VOLOTÃO, Carlos Frederico de Sá. IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS AO PROCESSO DE MOVIMENTO DE MASSA SEM A VISITA DE CAMPO E OBTIDA POR ANÁLISE MULTICRITÉRIO. **Caderno de Estudos Geoambientais: CADEGEO**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p.30-44, 2016. Disponível em: <<http://www.cadegeo.uff.br/index.php/cadegeo/article/view/32/26>>. Acesso em: 10 out. 2018.

LOPES, E. S. S. **Modelagem espacial dinâmica em Sistema de Informação Geográfica – uma aplicação ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista.** 2006. 276p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/102962/lopes_ess_dr_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 maio. 2019.

MAIA, J.A.C; ASSIS, A.P. **Etapas para Estudos Probabilísticos Aplicados a Geotecnia.** In: 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311903786_Etapas_para_estudos_probabilisticos_aplicados_a_Geotecnia>. Acesso em: 21 mar. 2018.

MATSUO, M.; KURODA, K. Probabilistic Approach to Design of Embankments. **Soils and Foundations**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.1-17, 1974. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.3208/sandf1972.14.2_1.

MENDES, L.T.G. **Análise Probabilística de Comportamento de Túneis em Rochas.** 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2017, 149 p. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/24195>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

MOREIRA, Melquisedec Medeiros *et al.* **Caracterização Geotécnica dos Materiais Inconsolidados do Município de Natal – RN: Suscetibilidade e Risco Potencial de Deslizamentos e Inundações.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19, 2018, Salvador. Download de trabalhos aprovados. Disponível em: <https://www.dropbox.com/sh/j61zq5sk5zq079o/AAD2TtSaFbJN3X2ND0coGWk1a/Analise%20e%20gerenciamento%20de%20riscos?dl=0&subfolder_nav_tracking=1>. Acesso em: 05 nov. 2018.

NOGUEIRA, F. R. **Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos: contribuição às políticas públicas municipais para áreas de ocupação subnormal.** Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2002. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/102945>>. Acesso em: 2016-05-09.

NOGUEIRA, F. R. Gestão dos Riscos nos Municípios. In: BRASIL. CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. (orgs.). **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais.** Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006, p. 26-45.

NUNES, L. S. **Dinâmica costeira entre as praias de Areia Preta e do Forte, Natal/RN.** 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18922>>. Acesso em: 09 maio 2016.

UNITED NATIONS. Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives. Geneva: Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), 2004, 152 p. Disponível em: <https://www.unisdr.org/files/657_lwr1.pdf>. Acesso em: 07 maio 2019.

PANTOJA, L. R. C. **Parâmetros urbanísticos para habitação de interesse social: Uma análise crítica para as Rocas em Natal/RN.** 2006. Dissertação (Mestrado em Conforto no Ambiente Construído; Forma Urbana e Habitação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/18294>>. Acesso em: 2016-05-09.

PARIZZI, Maria Giovana et al. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. **Geografias: Revista do Departamento de Geografia/Programa de Pós-graduação em Geografia**, Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, UFMG, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, p.49-68, jul./dez. 2010. Semestral. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/view/514/385>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

PIMENTA JUNIOR, I. **Caracterização Geotécnica e Análise de Estabilidade de Taludes de Mineração em Solos da Mina de Capão Xavier.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Disponível em: <<http://repositorio.ufv.br/handle/123456789/3708>>. Acesso em: 2016-05-09.

PIMENTEL, K.C.A.; SOUZA, T. C.; CAMPELLO, I. C.; SILVA, P. H. A. Avaliação dos Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes de Barragens. In: XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2017, Belo Horizonte. XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2017. p. 1-20.

PINTO, Roberto Carlos. **Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa através de avaliação multicritério em sistema de informações geográficas: análise conceitual e uma proposta metodológica.** 2015. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/40138>>. Acesso em: 11 out. 2018.

PINTO, Roberto Carlos; PASSOS, Everton; CANEPARO, Sony Cortese. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS CONDICIONANTES UTILIZADOS EM PESQUISAS ENVOLVENDO MOVIMENTOS DE MASSA. **Revista do Programa de Pós-graduação em Geografia**, Maringá, v. 5, n. 1, p.102-124, 2013.

PINTO, Roberto; PASSOS, Everton; CANEPARO, Sony. Mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada. **Caderno de Geografia**, [s.l.], v. 25, n. 43, p.116-143, 13 fev. 2015. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2015v25n43p116>. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/8276>>. Acesso em: 03 out. 2018.

NATAL. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB). **Plano Municipal de Gerenciamento de Riscos: Relatório final – Volume 1**. Natal: Acquatoool Consultoria, 2008.

RIBEIRO, Rômulo Castello Henriques. **Aplicações de Probabilidade e Estatística em Análises Geotécnicas**. 2008. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

RIFFEL, Eduardo Samuel; GUASSELLI, Laurindo Antônio; BRESSANI, Luiz Antônio. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 36, n. 2, p.101-285, maio/jul. 2016. Disponível em: <<http://www.revistas.ufg.br>>. Acesso em: 13 mar. 2018.

ROCSCIENCE – SLIDE V.7.0 TUTORIAL MANUAL. Toronto, Ontário, Canadá. Disponível em: https://www.rocscience.com/help/slide/webhelp7/tutorials/Slide_Tutorials.htm. Acesso em: 09 maio 2019.

SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**: San Francisco, v. 15, n. 3, p.234-281, 1977.

SAATY, T.L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw Hill, 1980.

SAATY, R.W.. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, [s.l.], v. 9, n. 3-5, p.161-176, 1987. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

SAATY, Thomas L.. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, [s.l.], v. 48, n. 1, p.9-26, set. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i).

SAATY, Thomas L. **Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process**. 2. ed. Pittsburgh: Rws Publications, 370 p, 2001.

SAATY, Thomas L.. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.83-98, 2008. Inderscience Publishers. <http://dx.doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>.

SANTOS JÚNIOR, Olavo Francisco dos; SEVERO, Ricardo Nascimento Flores; FREITAS NETO, Osvaldo de. **Lauda Técnico: Ruptura de Estrutura de Contenção localizada na Comunidade do Jacó – Natal/RN**. Natal, 2014.

SEVERO, R. N. F. **Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa-RN**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SEVERO, R. N. F. **Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul-RN, considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5373>>. Acesso em: 2016-05-09.

SILVA JUNIOR, Celso *et al.* MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE NATURAL A MOVIMENTOS DE MASSA PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ANIL, SÃO LUÍS – MA. **Green Lifestyle Becoming The Men's New Way Of Life**, [s.l.], p.118-122, 23 jul. 2014. Science and Education Research Council (COPEC). <http://dx.doi.org/10.14684/shewc.14.2014.118-122>. Disponível em: <<http://proceedings.copec.eu/index.php/shewc/article/view/2374/0#.W7U4EmhKjIU>>. Acesso em: 03 out. 2018.

SILVA, Breno Marques Ferreira da. **Análise Probabilística De Estabilidade De Falésias No Litoral Do RN**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SILVA, C. R. da; RAMOS, M. A. B.; PEDREIRA, A. J.; DANTAS, M. E. Começo de tudo. In: SILVA, C. R. da (Ed.). **Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 264 p.

SILVA, Clíscia Cerceau da. **Análise de estabilidade de um talude da cava de Alegria utilizando abordagem probabilística**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia Aplicada à Mineração, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SILVA, Elza Edimara Soares da; ALMEIDA, Lutiane Queiroz de; MACEDO, Yuri Marques. Uso de metodologia analítica para mapeamento de exposição ao risco de deslizamento na comunidade de São José do Jacó Natal – RN. **Revista de Geociências do Nordeste: REGNE**, Natal, v. 1, n. 2, p.58-73, 2015. Semestral. Disponível em: <<https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/9559>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

SILVA, M. M. **Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no Município de Camaragibe-PE**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5310>>. Acesso em: 2016-05-10.

SILVA, W. de S. **Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

SOARES, Fábio Lopes; RAMOS FILHO, Geraldo Moura. **CORRELAÇÕES ENTRE MOVIMENTOS DE MASSA E PLUVIOSIDADE NAS ENCOSTAS DE JOÃO PESSOA – PB**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17, 2014, Goiânia. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 2014. p. 1-7. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/anais-cobramsegsbmrgeojovem/>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. Slope instability Recognition, analyses, and zonation. In: Turner, A.K.; Schuster, R.L.. **Landslides investigation e mitigation**. Washington, D.C: National Academy Press, 1996, p. 129-177.

SOUSA, Ray de Araujo. **Resistência e compressibilidade de solos da Formação Barreiras da região de Natal/RN**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/25168>>. Acesso em: 09 maio 2019.

SOUZA JÚNIOR, Carlos de. **Análise de estabilidade de falésias na zona costeira de Baía Formosa - RN**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/19368>>. Acesso em: 09 maio 2019.

TANG, W. H.; YUCEMEN, M. S.; ANG, A. H.. Probability-based short term design of soil slopes. **Canadian Geotechnical Journal**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.201-215, ago. 1976. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t76-024>.

TAQUEZ, David Esteban Diaz. **Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: estudo de caso no centro de lançamentos da barreira do inferno - Brasil**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

TATIZANA, C.; OGURA, A.T.; CERRI, L.E.DA S.; ROCHA, M.C.M. Análise da correlação entre chuvas e escorregamentos aplicados às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABGE, 1987, p.225-236.

TEKNOMO, K. Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial. 2006. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/7e27/b5a124c2e6829e1ff0d3e1279c2dbc9ebe2a.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 2007. 220p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18102007-155204/>>. Acesso em: 2015-10-18.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de Taludes: Avaliação dos Métodos de Equilíbrio Limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense**. 2009. 149p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do Paraná Curitiba, 2009. Disponível em: < <http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0116.pdf>>. Acesso em: 2016-05-10.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering**. Washington DC: Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, 1995. Disponível em: < <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a403281.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2014**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2016. 230 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 126 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Reliability Analysis and Risk Assessment for Seepage and Slope Stability Failure Modes for Embankment Dams”. Washington DC: **US Army Corps of Engineers**, 2006, 128 p.

VAN WESTEN, C. J. et al. Prediction of the occurrence of slope instability phenomenal through GIS-based hazard zonation. **Geologische Rundschau**, [s.l.], v. 86, n. 2, p.404-414, 28 ago. 1997. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s005310050149>.

VAN WESTEN, C.J.; VAN ASCH, T.W.J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [s.l.], v. 65, n. 2, p.167-184, 15 dez. 2005. Springer Nature.

VARNES, D. J. Landslides hazard zonation: a review of principles and practice. Paris: **Natural Hazards**, 1984.

VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. In: Eckel, E. B. (ed.). **Landslides and Engineering Practice**. (HRB, Special Rept. 29, 1958, p. 20-47. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr29/29-003.pdf>>. Acesso em 07 maio 2019.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: Schuster, R. L.; Krizek, R. **Landslides: Analysis and Control**. Washington D. C: National Academy of Science, 1978, p. 11-33. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>>. Acesso em 07 maio 2019.

VARNES, D. J.. The principles and practice of landslide hazard zonation. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.13-14, jun. 1981. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02594720>.

WANG, Yu; CAO, Zijun; AU, Siu-kui. Efficient Monte Carlo Simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis. **Computers and Geotechnics**, [s.l.], v. 37, n. 7-8, p.1015-1022, nov. 2010. Elsevier BV.

WHITMAN, Robert V. Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering. **Journal of Geotechnical Engineering**, [s.l.], v. 110, n. 2, p.143-188, fev. 1984. American Society of Civil Engineers (ASCE).

WHITMAN, Robert V.. Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 126, n. 7, p.583-593, jul. 2000. American Society of Civil Engineers (ASCE).

WIGGERS, M. M. **Zoneamento das áreas de risco a movimentos de massa no perímetro urbano do município de Caxias do Sul (RS)**. 2013. Porto Alegre: Instituto De Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/75687>>. Acesso em: 2016-05-10.

WIND, Y.; SAATY, T. L.. Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, [s.l.], v. 26, n. 7, p.641-658, Jul. 1980. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.26.7.641>.

APÊNDICE A - MODELO DE FORMULÁRIO AHP

1. O Processo de Análise Hierárquica (AHP)

O Processo de Análise Hierárquica é uma das ferramentas de tomada de decisão de múltiplos critérios mais amplamente utilizada ao redor do mundo. Foi desenvolvido por Saaty, na década de 70, que propôs um método que pudesse representar o processo de tomada de decisão humano e ajudar a alcançar melhores julgamentos baseados em uma hierarquia e comparações em pares (FRANEK; KRESTA, 2017).

O método inclui três etapas principais: a) modelização ou estruturação, b) valorização, c) priorização e síntese. A primeira etapa do processo envolve a decomposição do problema em uma estrutura hierárquica na qual são representados os critérios a serem avaliados e suas alternativas consideradas relevantes no processo de decisão, tais como atores, cenários, fatores climáticos e outros elementos que podem ser dados pela experiência e a intuição.

A estrutura é organizada por níveis, formando uma árvore invertida, onde no topo, encontra-se a meta (objetivo) da resolução do problema, no caso deste trabalho será a obtenção do risco de ocorrência de movimentos de massa, em seguida, no nível imediatamente inferior, os critérios dos quais os elementos subsequentes dependem, ou seja, aqueles a serem avaliados e que serão determinados pelos especialistas segundo as necessidades e, por último, nos níveis mais baixos, os subcritérios e alternativas a serem avaliadas para cada critério (SAATY, 1990).

Na segunda etapa, aqui nomeada de valoração, ocorre a comparação paritária (par a par) entre os critérios e alternativas. Por meio desta comparação são determinadas as importâncias relativas (pesos) de cada critério.

Para fazer essas comparações par-à-par, precisa-se de uma escala de números que indiquem quantas vezes mais importante ou dominante um elemento é sobre outro, com relação ao critério ou propriedade com o qual eles foram comparados (SAATY, 2008).

A escala recomendada por Saaty (1991), denominada de Escala Fundamental de Saaty, mostrada na Tabela 1, vai de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre esses níveis 1 e 9.

Tabela 1 – Escala de julgamento de importância no Método AHP.

Valores numéricos	Termos verbais	Explicação
1	Igual importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação a outra
5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação a outra
7	Muito fortemente mais importante	Alternativa fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extremamente mais importante	A evidência favorece uma alternativa em relação a outra, com grau de certeza mais elevado
2,4,6,8	Valores importantes intermediários	Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

O julgamento ou comparação reflete as respostas as seguintes perguntas: quando consideramos dois elementos, *i* no lado esquerdo da matriz e *j* no topo, qual entre eles satisfaz mais o critério, ou seja, qual é considerado mais importante sob este critério, e, com que intensidade (usando a Escala Fundamental de Saaty apresentada na Tabela 1) (SAATY, 2008).

Na última etapa, denominada priorização e síntese, o AHP calcula todos os pesos dos diferentes níveis hierárquicos (critérios e alternativas) dentro da matriz criada.

2. Estruturação da planilha de análise de risco de movimentos de massa com o AHP

Os seguintes indicadores de risco foram, preliminarmente, definidos para realização da análise de risco por meio da aplicação da metodologia AHP. **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes dos indicadores, por favor fazer sugestão.**

Altura/amplitude: Este trabalho seguirá a recomendação de Faria (2011) a qual adota, para as encostas naturais, três classes de amplitude divididas a cada 10 metros. Já para os taludes de corte e aterro, a amplitude variará de 2 a 10 metros de altura.

Tabela 2 – Divisão de classes para o indicador amplitude/altura da encosta.

ENCOSTA/TALUDE	AMPLITUDE/ALTURA
NATURAL	(A1) ≤10m 10 m< (A2) ≤20m (A3) >20m

Inclinação: De acordo com Carvalho; Macedo; Ogura (2007), a inclinação traduz o ângulo médio da encosta com relação ao eixo horizontal medido, geralmente, a partir de sua base.

$$I = \text{ARCTAN} (H/L)$$

Existem valores de referência para este parâmetro acima dos quais a deflagração do processo movimento de massa é iminente. Segundo Fernandez e Amaral (2003), pesquisas anteriores apontam que a maior frequência de movimentos de massa ocorre nas vertentes com declividade entre 21° e 25°, isto porque admite-se que nas encostas mais íngremes o solo já haveria sido removido por movimentos anteriores. Essa mesma faixa de valor para declividade tem ocasionado os deslizamentos na Serra do Mar no litoral paulista (Carvalho; Macedo; Ogura, 2007).

Diante do exposto, para os casos de encosta natural, a inclinação máxima adotada foi de 20°. **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de inclinação para cada tipo de encosta, por favor fazer sugestão.**

Tabela 3 – Divisão de classes para o indicador inclinação da encosta.

ENCOSTA/TALUDE	INCLINAÇÃO
NATURAL	(I1) ≤10° 10°< (I2) ≤20° (I3) >20°

Morfologia da encosta: A morfologia da encosta será considerada neste trabalho tanto em planta quanto em perfil. Para o caso da análise da morfologia em planta, considerou-se a existência de 3 classes principais: convexa, retilínea e côncava. Fernandez e Amaral (2003) apontam que as encostas que apresentam forma côncava em planta favorecem o surgimento de uma zona de convergência do fluxo d'água e de sedimentos, contrário do que acontece

nas encostas convexas. Com relação à morfologia em perfil, assim como no caso anterior, o indicador foi dividido nas classes côncava, retilínea e convexa. **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de morfologia em planta e em perfil da encosta, por favor fazer sugestão.**

Tabela 4 – Divisão de classes para os indicadores morfologia em planta e em perfil.

ENCOSTA/ TALUDE	MORFOLOGIA EM PLANTA			MORFOLOGIA EM PERFIL		
NATURAL	 Convexa (M1)	 Retilínea (M2)	 Côncava (M3)	 Convexa (MP1)	 Retilínea (MP2)	 Côncava (MP3)

Uso/Cobertura do solo: Para este indicador propõe-se a adoção de 4 classes, conforme Faria (2011), são elas: arbórea (mata pouco degradada com vegetação arbórea de médio a alto porte); campo/cultura (abrange setores com vegetação rasteira (gramíneas) e/ou áreas de plantio, principalmente bananeiras); cobertura urbana (corresponde a áreas impermeabilizadas por meio de ocupação urbana densa, podendo contribuir de forma desfavorável à estabilidade da encosta, devido à imposição de sobrecarga nos taludes/encosta); solo exposto. **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de uso/cobertura do solo, por favor fazer sugestão.**

Tabela 5 – Divisão de classes para o indicador uso/cobertura do solo.

ENCOSTA/TALUDE	USO/COBERTURA DO SOLO
NATURAL	(U1) - ARBÓREA (U2) -CAMPO/CULTURA (U3) - COBERTURA URBANA (U4) - SOLO EXPOSTO

Presença de água superficial: Neste indicador de risco são levados em consideração os fatores antrópicos que poderiam ser responsáveis pelo surgimento de água superficial sobre a encosta, tais como a presença de vazamentos por tubulações ou imperfeições em sistemas de drenagem e abastecimento. Esse critério foi dividido em 04 classes, seguindo a proposta de Faria (2011):

- Concentração baixa: presença de vazamentos pouco significantes; presença de sistema de drenagem superficial;

- Concentração média: presença de vazamentos significativos em tubulações de abastecimento ou mesmo em tubulações de esgotamento sanitário;
- Concentração alta/Linha de drenagem: existência de muitos pontos de vazamentos em tubulações de abastecimento ou esgotamento ou ausência de sistemas de drenagem, com tubulações lançando águas pluviais e servidas diretamente no talude; presença de fossas sépticas e sumidouros; **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de presença de água superficial sobre a encosta, por favor fazer sugestão.**

Tabela 6 – Divisão de classes para o indicador presença de água superficial.

ENCOSTA/TALUDE	PRESENÇA DE ÁGUA SUPERFICIAL
NATURAL	(NA1) – CONCENTRAÇÃO BAIXA (NA2) – CONCENTRAÇÃO MÉDIA (NA3) - CONCENTRAÇÃO ALTA

Surgência de água no perfil da encosta: Este indicador refere-se à possibilidade de surgência de água proveniente do lençol freático, de vazamento de tubulações danificadas, assim como em decorrência da existência de fossa séptica e sumidouro na encosta. As classes para surgência de água no perfil da encosta assumem comportamento booleano, conforme propõe Taquez (2017), sendo elas: Não Observado ou Surgência, dependendo se existe ou não afloramento de água no corpo do talude. **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de nível de água, por favor fazer sugestão.**

Tabela 7 – Divisão de classes para o indicador surgência de água no perfil da encosta.

ENCOSTA/TALUDE	SURGÊNCIA DE ÁGUA
NATURAL	(N1) – NÃO OBSERVADO (N2) – SURGÊNCIA

Feições de instabilidade: Presença de feições de instabilidade é considerado um indicador chave para a classificação de riscos, dado que além de fornecer indícios da ocorrência ou da iminência de movimentos de massa na encosta, podem atuar como condicionantes nesses processos de instabilização, acelerando o desenvolvimento de movimentos futuros. As principais feições de instabilidade apontadas são fendas de tração na superfície dos terrenos ou aumento de fendas preexistentes; curvamento de estruturas de contenção; inclinação de estruturas rígidas, como postes e árvores; surgimento de degraus de abatimento; trincas no

terreno e nas moradias; ou ainda feições na superfície da encosta, dentre elas ravinamento, voçoroca, erosão, fendas e cicatrizes. As classes para este indicador de risco assumem, assim como no caso anterior, comportamento booleano, sendo elas: Não Observado ou Observado.

Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de feições de instabilidade, por favor fazer sugestão.

Tabela 8 – Divisão de classes para o indicador feições de instabilidade.

ENCOSTA/TALUDE	FEIÇÕES DE INSTABILIDADE
NATURAL	(F1) – NÃO OBSERVADO (F2) – OBSERVADO

Tipo de material que compõe o substrato das encostas/taludes: Neste indicador serão avaliadas cinco classes de unidades geológicas que são encontradas na área do município de Natal. Isso foi feito com o intuito de poder expandir a aplicabilidade da metodologia AHP à toda encosta urbana da região de Natal, não a restringindo à área da Comunidade São José do Jacó. As classes consideradas são descritas a seguir, e foram retiradas da Carte Geológica do Rio Grande do Norte, realizada pelo CPRM – Serviço Geológico Brasileiro, no ano de 2012.

- Depósitos eólicos litorâneos vegetados: composto por areias quartzosas bem selecionadas de coloração avermelhada a amarronzadas com formas de dunas residuais ou lençóis arenosos.
- Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados: formados por areias quartzosas finas a médias de coloração esbranquiçada, com formas de dunas diversas, podendo ser transicionar a dunas vegetadas.
- Depósitos arenosos e areno-argilosos: coberturas arenosas a areno-argilosas inconsolidadas de granulometria média a grossa.
- Depósitos flúvio-marinhas: areias finas, siltes e argilas finamente laminadas ricos em carbonatos e matéria orgânica. Incluem os depósitos de mangue e de planícies de maré.
- Grupo Barreiras: Conglomerados a arenitos conglomeráticos. Possuem coloração avermelhada. Podem apresentar horizontes e/ou colunas em que assumem cores variegadas (branca, vermelha e roxa). **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de material que compõe o substrato, por favor fazer sugestão.**

Tabela 9 – Divisão de classes para o indicador material do substrato da encosta.

ENCOSTA/TALUDE	MATERIAL DO SUBSTRATO
NATURAL	(MS1) – DEPÓSITOS EÓLICOS LITORÂNEOS VEGETADOS (MS2) – DEPÓSITOS EÓLICOS LITORÂNEOS NÃO-VEGETADOS (MS3) – DEPÓSITOS ARENOSOS E ARENO-ARGILOSOS (MS4) – DEPÓSITOS FLÚVIO-MARINHOS (MS5) – GRUPO BARREIRAS

Estrutura geológica: A Tabela 10 mostra as classes do indicador de risco estrutura geológica para as encostas naturais e os taludes de corte. São três classes para este indicador: favorável à estabilidade, desfavorável à estabilidade e não observado. A classe da estrutura geológica definida como “não observada” representa casos em que não é possível observar a presença de fraturas ou outras características em função, por exemplo, do solo não se encontrar exposto visualmente. **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes de estrutura geológica, por favor fazer sugestão.**

Tabela 10 – Divisão de classes para o indicador estrutura geológica.

ENCOSTA/TALUDE	ESTRUTURA GEOLÓGICA
NATURAL	(E1) – FAVORÁVEL À ESTABILIDADE (E2) – DESFAVORÁVEL À ESTABILIDADE (E3) – NÃO OBSERVADO

Densidade demográfica: A presença de uma população cujas características demográficas ou socioeconômicas possam colocar seus membros em maior risco de danos antes, durante e após um desastre é, provavelmente, a principal informação no cálculo do risco, por ser um critério de avaliação da vulnerabilidade da área. Além disso, é importante ferramenta no processo de planejamento urbano. Para este indicador propõe-se a divisão em 4 classes que estão apresentadas na Tabela 11. Essas classes foram definidas em função da densidade demográfica encontrada na área de estudo. **Caso os especialistas tenham alguma outra proposta para divisão das classes da densidade demográfica, por favor fazer sugestão.**

Tabela 11 – Divisão de classes para o indicador densidade demográfica.

ENCOSTA/TALUDE	DENSIDADE DEMOGRÁFICA
NATURAL	$0 \text{ hab/ha} < (\text{DEN1}) \leq 50 \text{ hab/ha}$ $50 \text{ hab/ha} < (\text{DEN2}) \leq 300 \text{ hab/ha}$ $(\text{DEN3}) > 300 \text{ hab/ha}$ (DEN4) LOCAL INABITADO (NÃO EXISTE RISCO)

Guia para preenchimento do formulário:

Em anexo segue o formulário em Excel no qual os especialistas deverão fazer a comparação entre os indicadores de risco anteriormente apresentados e suas respectivas classes; assim como a Escala de julgamento de importância que será utilizada no Método AHP (Escala Fundamental de Saaty).

Para este trabalho o especialista deve avaliar e escolher qual critério é mais importante para a geração de riscos de ocorrência de movimentos de massa na área de estudo.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO EM EXCEL

Vídeo introdutório:

Ola! Seja bem-vindo. Por favor clique sobre "**Assistir vídeo sobre AHP**" para assistir um breve vídeo explicativo acerca do Método AHP. Em seguida, pressione o botão "**Continuar**" para realizar o preenchimento do Formulário.

[Assistir vídeo sobre AHP](#) [Continuar](#)

Parte 1:

Parte 1 - Por favor, informe seus dados pessoais, pressione Salvar e em seguida pressione a tecla Continuar.

PEC **PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**
UFRN

Qual o seu nome?

Por favor, informe seu e-mail.

Qual a sua formação?

Em qual instituição você trabalha?

Parte 2:

Indicadores de risco		Amplitude	Inclinação	Morfologia em planta	Morfologia em perfil	Uso/cobertura do solo	Presença de água superficial	Surgência de água no perfil da encosta	Feições de instabilidade	Material do substrato	Estrutura geológica	Densidade demográfica
Amplitude	Critérios igualmente importantes											
Inclinação		Critérios igualmente importantes										
Morfologia em planta			Critérios igualmente importantes									
Morfologia em perfil				Critérios igualmente importantes								
Uso/cobertura do solo					Critérios igualmente importantes							
Presença de água superficial						Critérios igualmente importantes						
Surgência de água no perfil da encosta							Critérios igualmente importantes					
Feições de instabilidade								Critérios igualmente importantes				
Material do substrato									Critérios igualmente importantes			
Estrutura geológica										Critérios igualmente importantes		
Densidade demográfica											Critérios igualmente importantes	

  PEC UFRN PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.	
Amplitude	$A < 10 \text{ m}$	$10 \text{ m} < A < 20 \text{ m}$	$A \geq 20 \text{ m}$
$A \leq 10 \text{ m}$	Critérios igualmente importantes		
$10 \text{ m} < A < 20 \text{ m}$		Critérios igualmente importantes	
$A \geq 20 \text{ m}$			Critérios igualmente importantes
< Voltar		Continuar >	

  PEC UFRN PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.	
Inclinação	$D \leq 10^\circ$	$10^\circ < D < 20^\circ$	$D \geq 20^\circ$
$D \leq 10^\circ$	Critérios igualmente importantes		
$10^\circ < D < 20^\circ$		Critérios igualmente importantes	
$D \geq 20^\circ$			Critérios igualmente importantes
< Voltar		Continuar >	

  PEC UFRN PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.	
Morfologia em planta da encosta	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa 	Critérios igualmente importantes		
Retilínea 		Critérios igualmente importantes	
Côncava 			Critérios igualmente importantes
< Voltar		Continuar >	

 		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.		
Morfologia em perfil da encosta	Convexa	Retilínea	Côncava	
Convexa 	Critérios igualmente importantes			
Retilínea 		Critérios igualmente importantes		
Côncava 			Critérios igualmente importantes	
< Voltar		Continuar >		

 		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.		
Uso/Cobertura do solo	Arbórea	Campo/Cultura	Cobertura urbana	Solo exposto
Arbórea	Critérios igualmente importantes			
Campo/Cultura		Critérios igualmente importantes		
Cobertura urbana			Critérios igualmente importantes	
Solo exposto				Critérios igualmente importantes
< Voltar		Continuar >		

		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.	
Presença de água superficial	Concentração baixa	Concentração média	Concentração alta
Concentração baixa	Critérios igualmente importantes		
Concentração média		Critérios igualmente importantes	
Concentração alta (Existência de Linha de Drenagem)			Critérios igualmente importantes
< Voltar		Continuar >	

		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.	
Surgência de água no perfil da encosta	Observado	Não Observado	
Observado	Critérios igualmente importantes		
Não Observado		Critérios igualmente importantes	
< Voltar		Continuar >	

 Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.							
Feições de Instabilidade	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Observado</th> <th>Não Observado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Critérios igualmente importantes</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Critérios igualmente importantes</td> </tr> </tbody> </table>	Observado	Não Observado	Critérios igualmente importantes			Critérios igualmente importantes
Observado	Não Observado						
Critérios igualmente importantes							
	Critérios igualmente importantes						
<p>< Voltar Continuar ></p>							

 Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.			
Estrutura Geológica	Favorável à estabilidade	Desfavorável à estabilidade	Não Observado
Favorável à estabilidade	Critérios igualmente importantes		
Desfavorável à estabilidade		Critérios igualmente importantes	
Não Visualizado			Critérios igualmente importantes
<p>< Voltar Continuar ></p>			

		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.			
Material do substrato	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Depósitos flúvio-marinhos	Grupo Barreiras
Depósitos eólicos litorâneos vegetados	Critérios igualmente importantes				
Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	Depósitos eólicos vegetados	Critérios igualmente importantes			
Depósitos arenosos e areno-argilosos	Depósitos eólicos vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Critérios igualmente importantes		
Depósitos flúvio-marinhos	Depósitos eólicos vegetados	Depósitos eólicos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Critérios igualmente importantes	
Grupo Barreiras	Depósitos eólicos vegetados	Depósitos eólicos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argiloso	Depósitos flúvio-marinhos	Critérios igualmente importantes

< [Voltar](#)

[Continuar](#) >

		Parte 2 - Por favor, preencha a Tabela a seguir. Para isso, clique sobre as células destacadas em azul. Nessas células aparecerá um texto explicativo.		
Densidade Demográfica	(DEN1) Local inabitado (não existe risco)	0 hab/ha < (DEN2) ≤ 50 hab/hectare	50 hab/ha < (DEN3) ≤ 300 hab/hectare	(DEN4) > 300 hab/hectare
(DEN1) Local inabitado (não existe risco)	Critérios igualmente importantes			
0 hab/ha < (DEN2) ≤ 50 hab/hectare		Critérios igualmente importantes		
50 hab/ha < (DEN3) ≤ 300 hab/hectare			Critérios igualmente importantes	
(DEN4) > 300 hab/hectare				Critérios igualmente importantes

< [Voltar](#)

APÊNDICE B - CHECKLIST APLICADO EM CAMPO

NOME DOS ALUNOS:

DATA: __/__/__

1º etapa: Dados da moradia

NUMERO DA RESIDÊNCIA:	
COORDENADAS:	
NOME DO MORADOR:	

2º etapa:

PRESENÇA DE AGUA NA SUPERFÍCIE DA ENCOSTA	
CONCENTRAÇÃO BAIXA (presença de vazamentos pouco significantes; presença de sistema de drenagem superficial)	
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (presença de vazamentos significativos em tubulações de abastecimento ou mesmo em tubulações de esgotamento sanitário)	
CONCENTRAÇÃO ALTA/LINHA DE DRENAGEM (tubulações lançando águas pluviais e servidas diretamente no talude; presença de fossas sépticas e sumidouros; ausência de sistemas de drenagem)	

3º etapa:

<p>SURGENCIA DE AGUA NA ENCOSTA</p> <p><input type="checkbox"/> NÃO OBSERVADO <input type="checkbox"/> SURGÊNCIA</p>
--

4º etapa:

<p>PRESENÇA DE FEIÇÕES DE INSTABILIDADE NA ENCOSTA</p> <p><input type="checkbox"/> NÃO OBSERVADO <input type="checkbox"/> OBSERVADO</p> <p>Caso seja observado presença de feições de instabilidade, cite quais.</p>
--

5º etapa:

<p>ESTRUTURA GEOLÓGICA</p> <p><input type="checkbox"/> FAVORÁVEL À ESTABILIDADE</p> <p><input type="checkbox"/> DESFAVORÁVEL À ESTABILIDADE</p> <p><input type="checkbox"/> NÃO OBSERVADO</p>
--

APÊNDICE C - RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS

ESPECIALISTA 1: ENGENHEIRO CIVIL

Crítérios	Amplitude	Inclinação	Morfologia em Planta	Morfologia em Perfil	Uso do solo	Presença de água	Surgência de água	Feições de instabilidade	Material substrato	Estrutura geológica	Densidade demográfica
Amplitude	1	1/3	7	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/7	1/5	1
Inclinação	3	1	7	5	5	3	1/5	1/5	1/5	1	1/3
Morfologia em Planta	1/7	1/7	1	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3
Morfologia em Perfil	3	1/5	5	1	1/3	3	1/7	1/5	3	1/5	3
Uso/cobertura do solo	3	1/5	3	3	1	5	1/5	1/5	3	1/5	1/3
Presença de água	3	1/3	1	1/3	1/5	1	1/5	1/5	1/5	1/7	1/5
Surgência de água	7	5	7	7	5	5	1	5	5	1/3	1
Feições de instabilidade	5	5	5	5	5	5	1/5	1	5	1	1
Material do substrato	7	5	7	1/3	1/3	5	1/5	1/5	1	5	1/3
Estrutura geológica	5	1	5	5	5	7	3	1	5	1	1/3
Densidade demográfica	1	3	3	1/3	3	5	1	1	3	3	1

Amplitude	$A \leq 10$ m	10 m < $A < 20$ m	$A \geq 20$ m
$A \leq 10$ m	1	1/5	1/7
10 m < $A < 20$ m	5	1	1/3
$A \geq 20$ m	7	3	1

Inclinação	$D \leq 10^\circ$	$10^\circ < D < 20^\circ$	$D \geq 20^\circ$
$D \leq 10^\circ$	1	1/5	1/9
$10^\circ < D < 20^\circ$	5	1	1/5
$D \geq 20^\circ$	9	5	1

Morfologia em planta	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	5	5
Retilínea	1/5	1	3
Côncava	1/5	1/3	1

Morfologia em perfil	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	5	5
Retilínea	1/5	1	1/5
Côncava	1/5	5	1

Uso/cobertura do solo	Arbórea	Campo/cultura	Cobertura urbana	Solo exposto
Arbórea	1	1/5	1/7	1/9
Campo/cultura	5	1	1/5	1/7
Cobertura urbana	7	5	1	1/5
Solo exposto	9	7	5	1

Presença de água superficial	Concentração baixa	Concentração média	Concentração alta
Concentração baixa	1	1/5	1/7
Concentração média	5	1	1/5
Concentração alta/Linha de drenagem	7	5	1

Surgência	Observado	Não Observado
Observado	1	1/9
Não Observado	9	1

Feições de instabilidade	Observado	Não Observado
Observado	1	9
Não Observado	1/9	1

Material do Substrato	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Depósitos flúvio-marinhos	Grupo Barreiras
Depósitos eólicos litorâneos vegetados	1	1/3	1/3	1/9	1/3
Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	3	1	3	1/9	1/3
Depósitos arenosos e areno-argilosos	3	1/3	1	1/7	1/3
Depósitos flúvio-marinhos	9	9	7	1	7
Grupo Barreiras	3	3	3	1/7	1

Estrutura geológica	Favorável à estabilidade	Desfavorável	Não observado
Favorável à estabilidade	1	1/7	1/3
Desfavorável	7	1	5
Não observado	3	1/5	1

Densidade demográfica (hab/ha)	0 < (DEN1) ≤ 50	50 < (DEN2) ≤ 300	(DEN3) > 300	(DEN4) Local inabitado
0 < (DEN1) ≤ 50	1	1/3	1/3	1/9
50 < (DEN2) ≤ 300	3	1	1/3	9
(DEN3) > 300	3	3	1	9
(DEN4) Local inabitado	9	1/9	1/9	1

ESPECIALISTA 2: ENGENHEIRO CIVIL

Crêterios	Amplitude	Inclina�o	Morfologia em Planta	Morfologia em Perfil	Uso do solo	Presença de �gua	Surgência de �gua	Fei�o�es de instabilidade	Material substrato	Estrutura geológica	Densidade demográfica
Amplitude	1	1/5	3	1/5	1/9	1/7	1/9	1/7	1/7	1/7	1
Inclina�o	5	1	5	1	1/9	1/7	1/9	1/7	1/7	1	1
Morfologia em Planta	1/3	1/5	1	1/5	1/7	1/7	1/9	1/7	1/7	1/5	1/5
Morfologia em Perfil	5	1	5	1	1/7	1/3	1/9	1/3	3	3	1
Uso/cobertura do solo	9	9	7	7	1	7	1/9	3	5	5	5
Presença de �gua	7	7	7	3	1/7	1	1/9	1/5	1/5	1/5	1/3
Surgência de �gua	9	9	9	9	9	9	1	9	9	9	9
Fei�o�es de instabilidade	7	7	7	3	1/3	5	1/9	1	5	1/3	3
Material do substrato	7	7	7	1/3	1/5	5	1/9	1/5	1	1	5
Estrutura geológica	7	1	5	1/3	1/5	5	1/9	1/3	1	1	3
Densidade demográfica	1	1	5	1	1/5	3	1/9	1/3	1/5	1/3	1

Amplitude	$A \leq 10$ m	10 m < A < 20 m	$A \geq 20$ m
$A \leq 10$ m	1	1	1
10 m < A < 20 m	1	1	1/3
$A \geq 20$ m	1	3	1

Inclinação	$D \leq 10^\circ$	$10^\circ < D < 20^\circ$	$D \geq 20^\circ$
$D \leq 10^\circ$	1	3	1
$10^\circ < D < 20^\circ$	1/3	1	1/3
$D \geq 20^\circ$	1	3	1

Morfologia em planta	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	3	1/5
Retilínea	1/3	1	1/5
Côncava	5	5	1

Morfologia em perfil	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	3	1/7
Retilínea	1/3	1	1/7
Côncava	7	7	1

Uso/cobertura do solo	Arbórea	Campo/cultura	Cobertura urbana	Solo exposto
Arbórea	1	7	1	3
Campo/cultura	1/7	1	1	1/3
Cobertura urbana	1	1	1	1
Solo exposto	1/3	3	1	1

Surgência	Observado	Não observado
Observado	1	7
Não observado	1/7	1

Feições de instabilidade	Observado	Não observado
Observado	1	7
Não observado	1/7	1

Material do Substrato	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Depósitos flúvio-marinhos	Grupo Barreiras
Depósitos eólicos litorâneos vegetados	1	1/3	1	1	1/3
Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	3	1	3	3	3
Depósitos arenosos e areno-argilosos	1	1/3	1	1/3	3
Depósitos flúvio-marinhos	1	1/3	3	1	1/3
Grupo Barreiras	3	1/3	1/3	3	1

Estrutura geológica	Favorável à estabilidade	Desfavorável	Não observado
Favorável à estabilidade	1	1/9	1
Desfavorável	9	1	9
Não observado	1	1/9	1

Densidade demográfica (hab/ha)	0 < (DEN1) ≤ 50	50 < (DEN2) ≤ 300	(DEN3) > 300	(DEN4) Local inabitado
0 < (DEN1) ≤ 50	1	3	1/7	1/5
50 < (DEN2) ≤ 300	1/3	1	1/7	1/5
(DEN3) > 300	7	7	1	7
(DEN4) Local inabitado	5	5	1/7	1

Amplitude	$A \leq 10$ m	10 m $< A < 20$ m	$A \geq 20$ m
$A \leq 10$ m	1	1/3	1/5
10 m $< A < 20$ m	3	1	1/5
$A \geq 20$ m	5	5	1

Inclinação	$D \leq 10^\circ$	$10^\circ < D < 20^\circ$	$D \geq 20^\circ$
$D \leq 10^\circ$	1	1/3	1/5
$10^\circ < D < 20^\circ$	3	1	1/5
$D \geq 20^\circ$	5	5	1

Morfologia em planta	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	3	1
Retilínea	1/3	1	1/3
Côncava	1	3	1

Morfologia em perfil	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	3	1
Retilínea	1/3	1	1/3
Côncava	1	3	1

Uso/cobertura do solo	Arbórea	Campo/cultura	Cobertura urbana	Solo exposto
Arbórea	1	1/3	1/5	1/7
Campo/cultura	3	1	3	1/5
Cobertura urbana	5	1/3	1	1/3
Solo exposto	7	5	3	1

Presença de água superficial	Concentração baixa	Concentração média	Concentração alta
Concentração baixa	1	1/3	1/5
Concentração média	3	1	1/3
Concentração alta/Linha de drenagem	5	3	1

Surgência	Observado	Não observado
Observado	1	5
Não observado	1/5	1

Feições de instabilidade	Observado	Não observado
Observado	1	7
Não observado	1/7	1

Material do Substrato	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Depósitos flúvio-marinhos	Grupo Barreiras
Depósitos eólicos litorâneos vegetados	1	1/7	1/3	1/3	1/3
Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	7	1	5	5	5
Depósitos arenosos e areno-argilosos	3	1/5	1	3	3
Depósitos flúvio-marinhos	3	1/5	1/3	1	3
Grupo Barreiras	3	1/5	1/3	1/3	1

Estrutura geológica	Favorável à estabilidade	Desfavorável	Não observado
Favorável à estabilidade	1	1/5	1
Desfavorável	5	1	3
Não observado	1	1/3	1

Densidade demográfica (hab/ha)	0 < (DEN1) ≤ 50	50 < (DEN2) ≤ 300	(DEN3) > 300	(DEN4) Local inabitado
0 < (DEN1) ≤ 50	1	3	1/7	1/5
50 < (DEN2) ≤ 300	1/3	1	1/7	1/5
(DEN3) > 300	7	7	1	7
(DEN4) Local inabitado	5	5	1/7	1

ESPECIALISTA 5: GEÓGRAFO

Crítérios	Amplitude	Inclinação	Morfologia em Planta	Morfologia em Perfil	Uso do solo	Presença de água	Surgência de água	Feições de instabilidade	Material substrato	Estrutura geológica	Densidade demográfica
Amplitude	1	1/3	1/3	3	1/7	1/7	1/9	1/9	1/5	1/5	1/3
Inclinação	3	1	7	7	5	1/5	1/7	1/9	3	3	9
Morfologia em Planta	3	1/7	1	1/3	1/5	1/5	1/7	1/9	1/5	1/5	1/3
Morfologia em Perfil	1/3	1/7	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	1/3	3	1/3
Uso/cobertura do solo	7	1/5	5	3	1	1/5	1/7	1/9	1/3	1/3	3
Presença de água	7	5	5	5	5	1	1/7	1/9	1/3	3	3
Surgência de água	9	7	7	7	7	7	1	1/9	5	5	7
Feições de instabilidade	9	9	9	9	9	9	9	1	9	1/9	9
Material do substrato	5	1/3	5	3	3	3	1/5	1/9	1	1/3	5
Estrutura geológica	5	1/3	5	1/3	3	1/3	1/5	1/9	1/3	1	5
Densidade demográfica	3	1/9	3	3	1/3	1/3	1/7	1/9	1/5	1/5	1

Amplitude	$A \leq 10 \text{ m}$	$10 \text{ m} < A < 20 \text{ m}$	$A \geq 20 \text{ m}$
$A \leq 10 \text{ m}$	1	1/3	1/3
$10 \text{ m} < A < 20 \text{ m}$	3	1	1/5
$A \geq 20 \text{ m}$	3	5	1

Inclinação	$D \leq 10^\circ$	$10^\circ < D < 20^\circ$	$D \geq 20^\circ$
$D \leq 10^\circ$	1	1/7	1/9
$10^\circ < D < 20^\circ$	7	1	1/9
$D \geq 20^\circ$	9	9	1

Morfologia em planta	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	7	9
Retilínea	1/7	1	1/5
Côncava	1/9	5	1

Morfologia em perfil	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	7	9
Retilínea	1/7	1	3
Côncava	1/9	1/3	1

Uso/cobertura do solo	Arbórea	Campo/cultura	Cobertura urbana	Solo exposto
Arbórea	1	1/5	1/5	3
Campo/cultura	5	1	1/5	1/5
Cobertura urbana	5	5	1	1/5
Solo exposto	1/3	5	5	1

Presença de água superficial	Concentração baixa	Concentração média	Concentração alta
Concentração baixa	1	1/3	1/5
Concentração média	3	1	1/5
Concentração alta/Linha de drenagem	5	5	1

Surgência	Observado	Não observado
Observado	1	7
Não observado	1/7	1

Feições de instabilidade	Observado	Não observado
Observado	1	7
Não observado	1/7	1

Material do Substrato	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Depósitos flúvio-marinhos	Grupo Barreiras
Depósitos eólicos litorâneos vegetados	1	1/3	1/3	5	3
Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	3	1	1/3	5	3
Depósitos arenosos e areno-argilosos	3	3	1	5	3
Depósitos flúvio-marinhos	1/5	1/5	1/5	1	1/3
Grupo Barreiras	1/3	1/3	1/3	3	1

Estrutura geológica	Favorável à estabilidade	Desfavorável	Não observado
Favorável à estabilidade	1	1/9	1/3
Desfavorável	9	1	9
Não observado	3	1/9	1

Densidade demográfica (hab/ha)	0 < (DEN1) ≤ 50	50 < (DEN2) ≤ 300	(DEN3) > 300	(DEN4) Local inabitado
0 < (DEN1) ≤ 50	1	1/3	1/3	3
50 < (DEN2) ≤ 300	3	1	1/3	5
(DEN3) > 300	3	3	1	5
(DEN4) Local inabitado	1/3	1/5	1/5	1

ESPECIALISTAS 6,7 e 8: ENGENHEIROS CIVIS

Crêterios	Amplitude	Inclina�o	Morfologia em Planta	Morfologia em Perfil	Uso do solo	Presença de �gua	Surgência de �gua	Fei�o�es de instabilidade	Material substrato	Estrutura geológica	Densidade demográfica
Amplitude	1	1/3	5	5	1/7	1	1	1/7	1/5	1/5	1/7
Inclina�o	3	1	5	5	1/7	3	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7
Morfologia em Planta	1/5	1/5	1	1	1/5	3	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7
Morfologia em Perfil	1/5	1/5	1	1	1/5	3	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7
Uso/cobertura do solo	7	7	5	5	1	5	1	1	1/3	1/3	1
Presença de �gua	1	1/3	1/3	1/3	1/5	1	1/7	1/7	1/5	1/5	1/7
Surgência de �gua	1	5	5	5	1	7	1	1/3	1	1	1/3
Fei�o�es de instabilidade	7	7	7	7	1	7	3	1	3	1/3	1
Material do substrato	5	5	5	5	3	5	1	1/3	1	1	1/3
Estrutura geológica	5	5	5	5	3	5	1	1/3	1	1	1/3
Densidade demográfica	7	7	7	7	1	7	3	1	3	3	1

Amplitude	$A \leq 10$ m	10 m < A < 20 m	$A \geq 20$ m
$A \leq 10$ m	1	1/5	1/7
10 m < A < 20 m	5	1	1/5
$A \geq 20$ m	7	5	1

Inclinação	$D \leq 10^\circ$	$10^\circ < D < 20^\circ$	$D \geq 20^\circ$
$D \leq 10^\circ$	1	1/5	1/7
$10^\circ < D < 20^\circ$	5	1	1/5
$D \geq 20^\circ$	7	5	1

Morfologia em planta	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	1/5	1/7
Retilínea	5	1	1/5
Côncava	7	5	1

Morfologia em perfil	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	3	1/3
Retilínea	1/3	1	1/3
Côncava	3	3	1

Uso/cobertura do solo	Arbórea	Campo/cultura	Cobertura urbana	Solo exposto
Arbórea	1	1	1/7	1/7
Campo/cultura	1	1	1/5	1/7
Cobertura urbana	7	5	1	3
Solo exposto	7	7	1/3	1

Presença de água superficial	Concentração baixa	Concentração média	Concentração alta
Concentração baixa	1	1/5	1/7
Concentração média	5	1	1/5
Concentração alta/Linha de drenagem	7	5	1

Surgência	Observado	Não observado
Observado	1	9
Não observado	1/9	1

Feições de instabilidade	Observado	Não observado
Observado	1	9
Não observado	1/9	1

Estrutura geológica	Favorável à estabilidade	Desfavorável	Não observado
Favorável à estabilidade	1	1/7	1/5
Desfavorável	7	1	3
Não observado	5	1/3	1

Densidade demográfica (hab/ha)	$0 < (DEN1) \leq 50$	$50 < (DEN2) \leq 300$	$(DEN3) > 300$	$(DEN4)$ Local inabitado
$0 < (DEN1) \leq 50$	1	1/5	1/7	1/9
$50 < (DEN2) \leq 300$	5	1	1/5	1/7
$(DEN3) > 300$	7	5	1	1/7
$(DEN4)$ Local inabitado	9	7	7	1

MATRIZ AHP FINAL

Crêterios	Amplitude	Inclina�o	Morfologia em Planta	Morfologia em Perfil	Uso do solo	Presença de �gua	Surgência de �gua	Fei�o�es de instabilidade	Material substrato	Estrutura geológica	Densidade demográfica
Amplitude	1	1/3	3	3	1/5	1	1/5	1/7	1/5	1/5	1/5
Inclina�o	3	1	5	5	1	3	1/5	1/7	1/3	1/5	1/5
Morfologia em Planta	1/3	1/5	1	1	1/3	1	1/7	1/7	1/5	1/5	1/7
Morfologia em Perfil	1/3	1/5	1	1	1/3	1	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7
Uso/cobertura do solo	5	1	3	3	1	5	1	1/3	1/3	1/3	1
Presença de �gua	1	1/3	1	1	1/5	1	1/7	1/7	1/5	1/5	1/7
Surgência de �gua	5	5	7	5	1	7	1	1/3	1	1	1/3
Fei�o�es de instabilidade	7	7	7	7	3	7	3	1	3	1/3	1
Material do substrato	5	3	5	5	3	5	1	1/3	1	1	1/3
Estrutura geológica	5	5	5	5	3	5	1	1/3	1	1	1/3
Densidade demográfica	5	5	7	7	1	7	3	1	3	3	1

Amplitude	$A \leq 10$ m	10 m $< A < 20$ m	$A \geq 20$ m
$A \leq 10$ m	1	1/3	1/7
10 m $< A < 20$ m	3	1	1/3
$A \geq 20$ m	7	3	1

Inclinação	$D \leq 10^\circ$	$10^\circ < D < 20^\circ$	$D \geq 20^\circ$
$D \leq 10^\circ$	1	1/3	1/7
$10^\circ < D < 20^\circ$	3	1	1/5
$D \geq 20^\circ$	7	5	1

Morfologia em planta	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	1	1/7
Retilínea	1	1	1/5
Côncava	7	5	1

Morfologia em perfil	Convexa	Retilínea	Côncava
Convexa	1	1	1/3
Retilínea	1	1	1/3
Côncava	3	3	1

Uso/cobertura do solo	Arbórea	Campo/cultura	Cobertura urbana	Solo exposto
Arbórea	1	1	1/7	1/7
Campo/cultura	1	1	1/5	1/7
Cobertura urbana	7	5	1	1/3
Solo exposto	7	7	3	1

Presença de água superficial	Concentração baixa	Concentração média	Concentração alta
Concentração baixa	1	1/3	1/5
Concentração média	3	1	1/3
Concentração alta/Linha de drenagem	5	3	1

Surgência	Observado	Não observado
Observado	1	7
Não observado	1/7	1

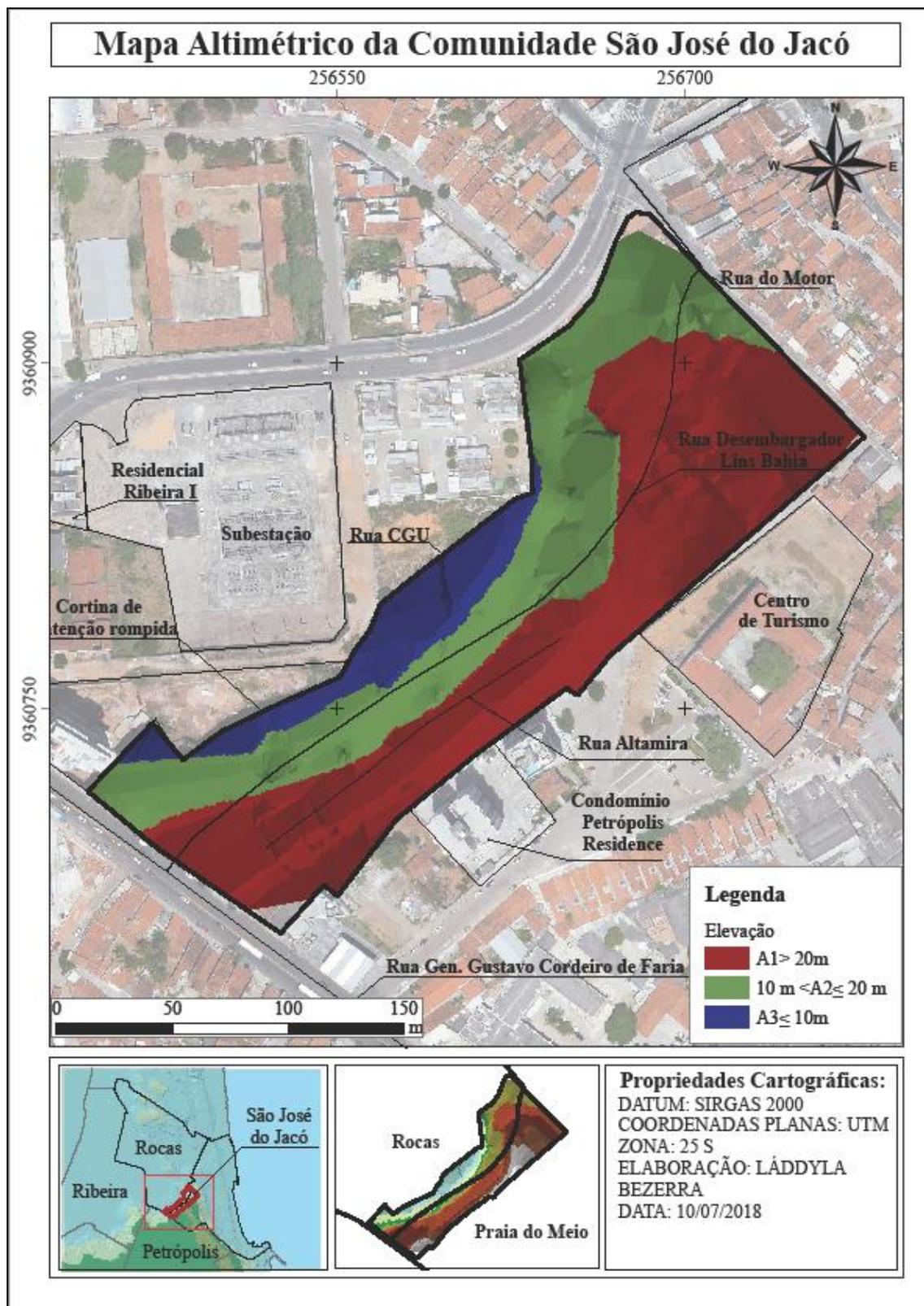
Feições de instabilidade	Observado	Não observado
Observado	1	7
Não observado	1/7	1

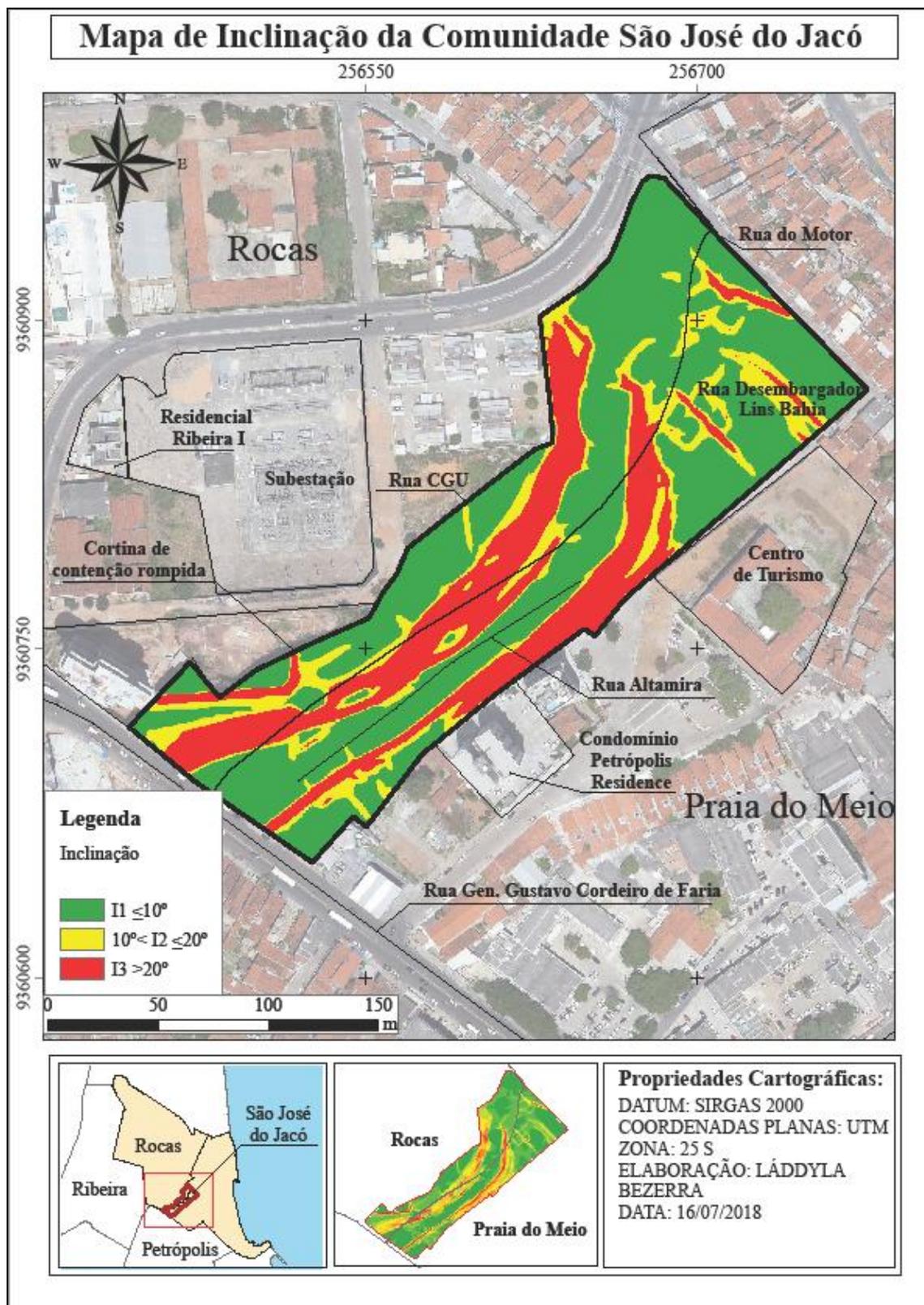
Material do Substrato	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	Depósitos arenosos e areno-argilosos	Depósitos flúvio-marinhos	Grupo Barreiras
Depósitos eólicos litorâneos vegetados	1	1/3	1/3	1/3	1/3
Depósitos eólicos litorâneos não-vegetados	3	1	3	5	5
Depósitos arenosos e areno-argilosos	3	1/3	1	1	3
Depósitos flúvio-marinhos	3	1/5	1	1	1
Grupo Barreiras	3	1/5	1/3	1	1

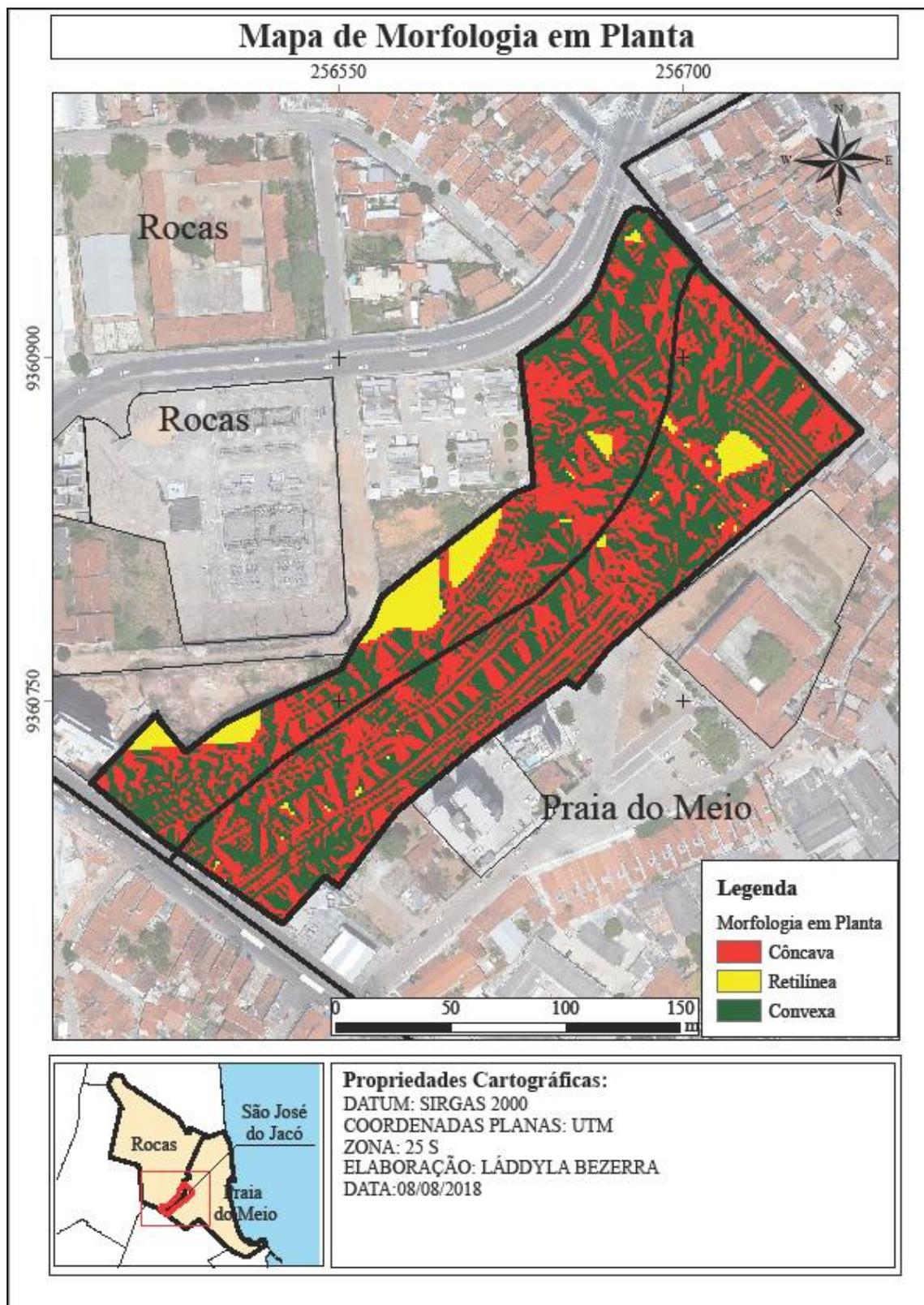
Estrutura geológica	Favorável à estabilidade	Desfavorável	Não observado
Favorável à estabilidade	1	1/7	1/3
Desfavorável	7	1	3
Não observado	3	1/3	1

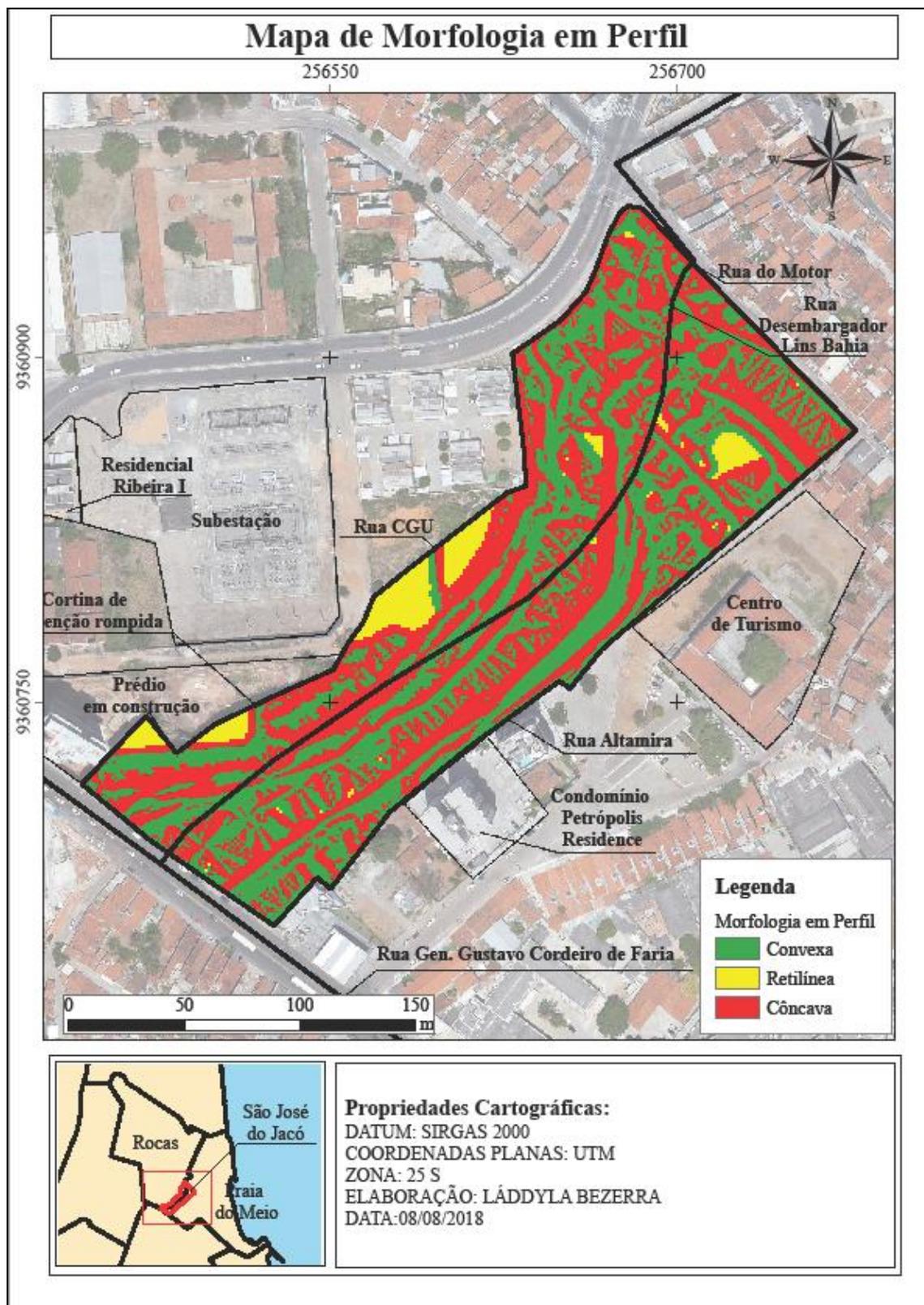
Densidade demográfica (hab/ha)	0 < (DEN1) ≤ 50	50 < (DEN2) ≤ 300	(DEN3) > 300	(DEN4) Local inabitado
0 < (DEN1) ≤ 50	1	1/3	1/5	5
50 < (DEN2) ≤ 300	3	1	1/3	7
(DEN3) > 300	5	3	1	9
(DEN4) Local inabitado	1/5	1/7	1/9	1

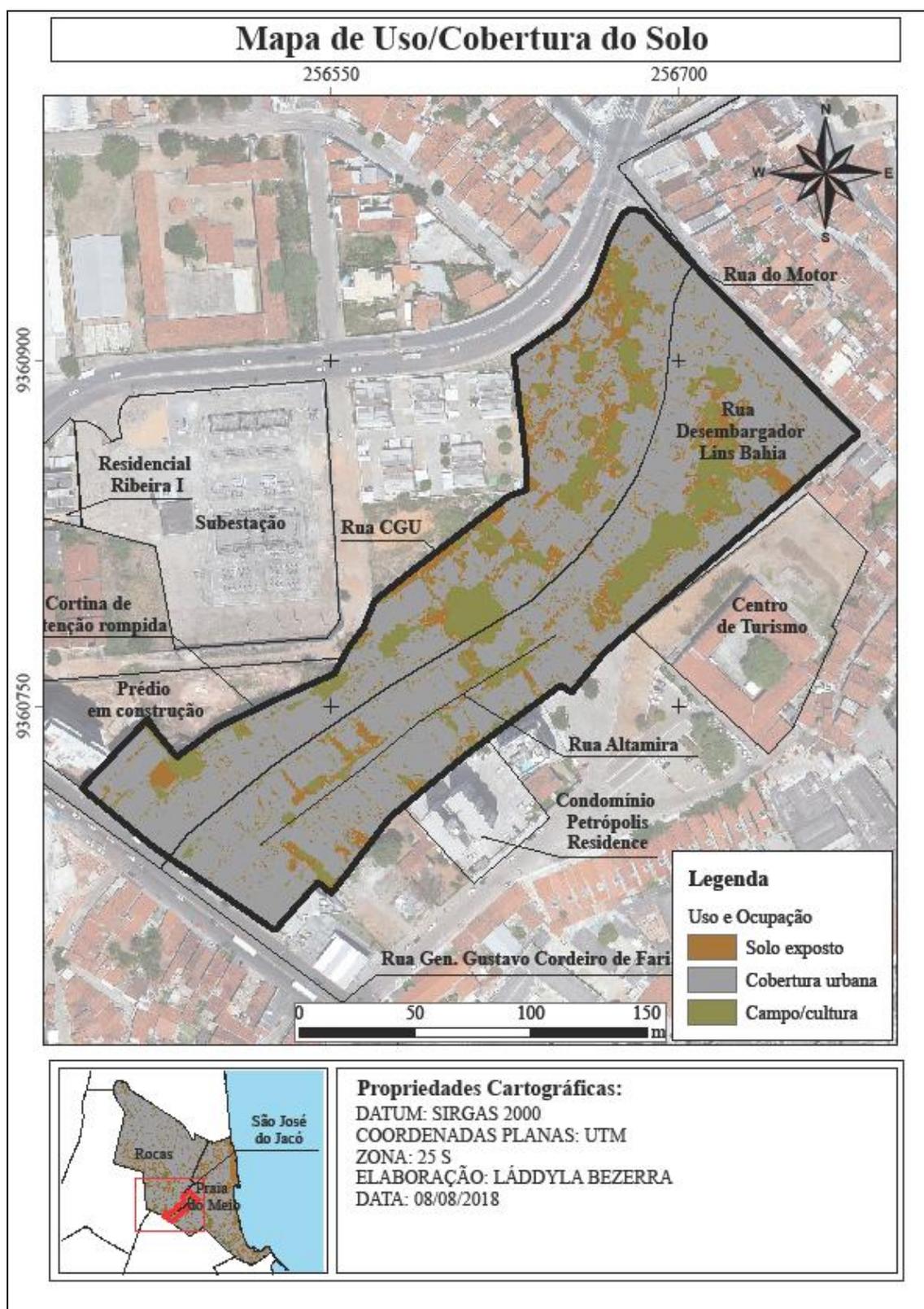
APÊNDICE D - MAPAS TEMÁTICOS

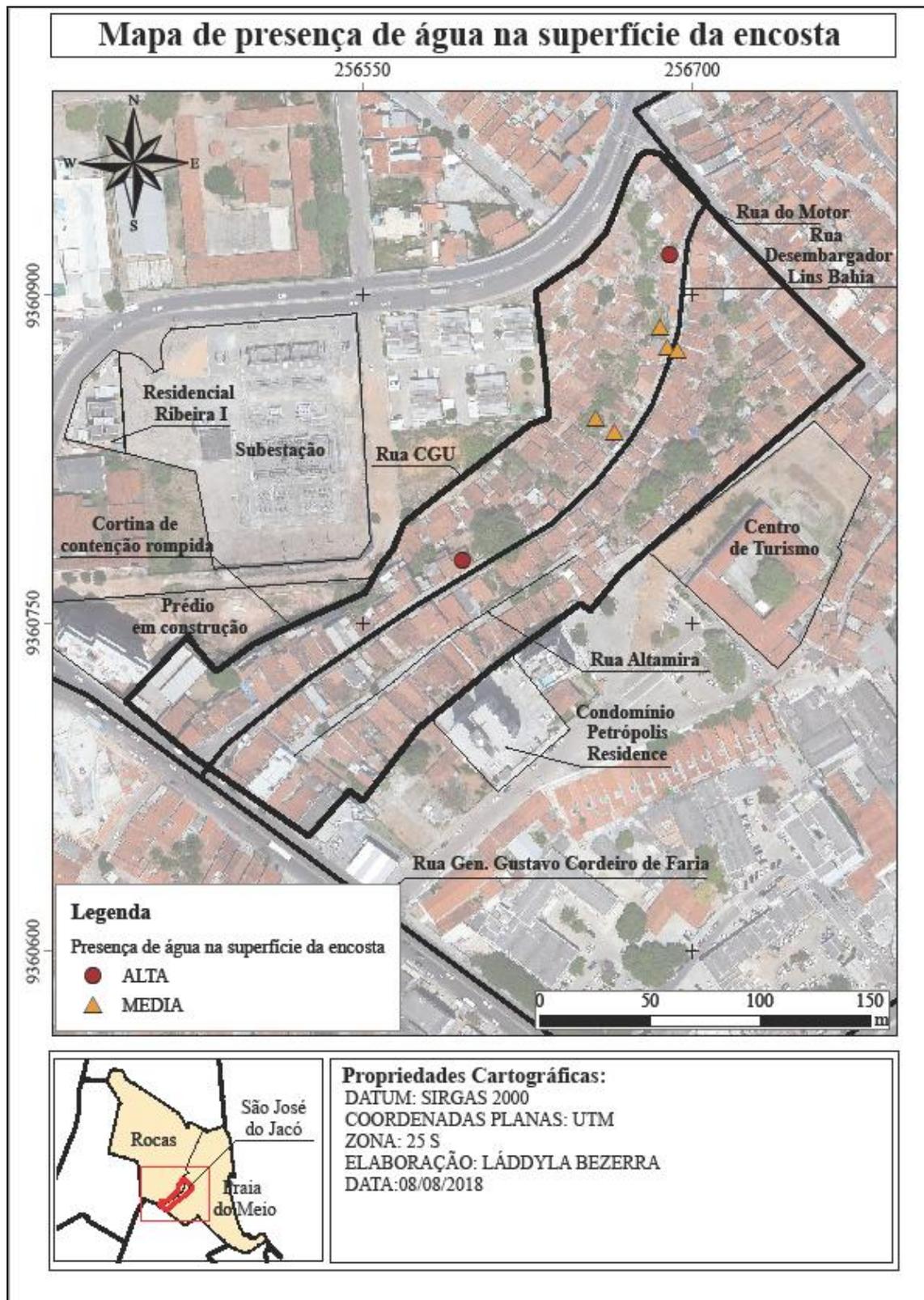


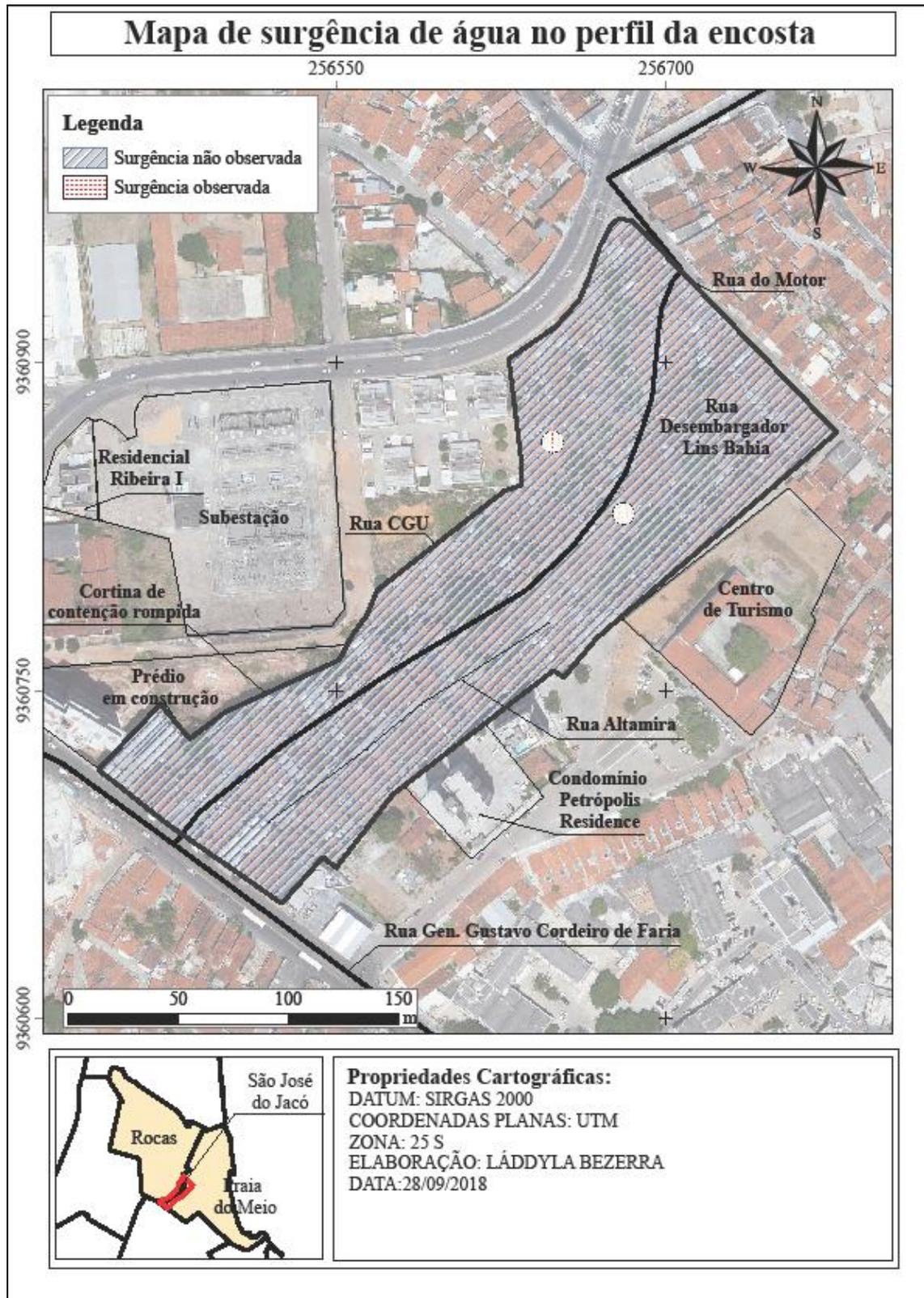


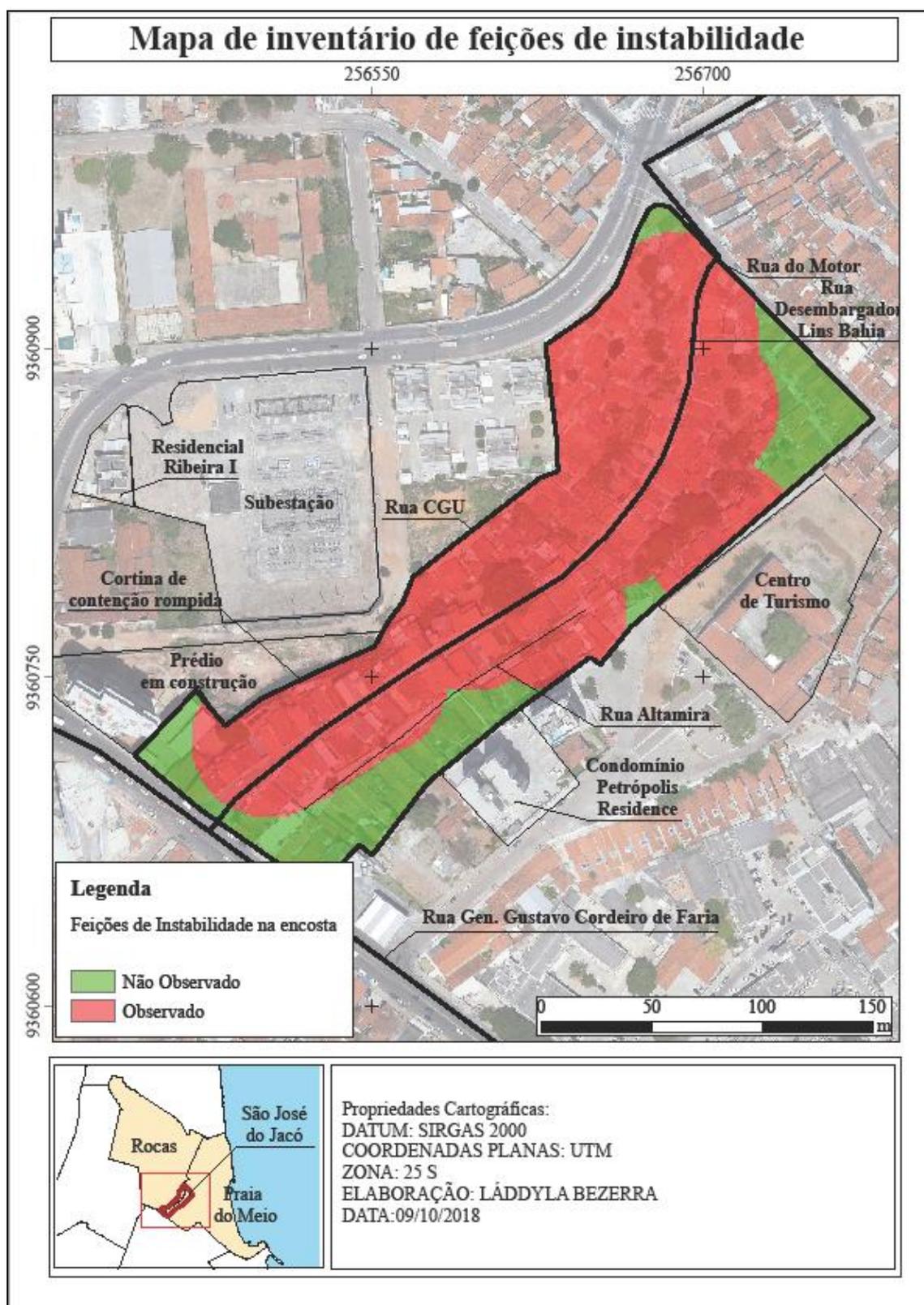


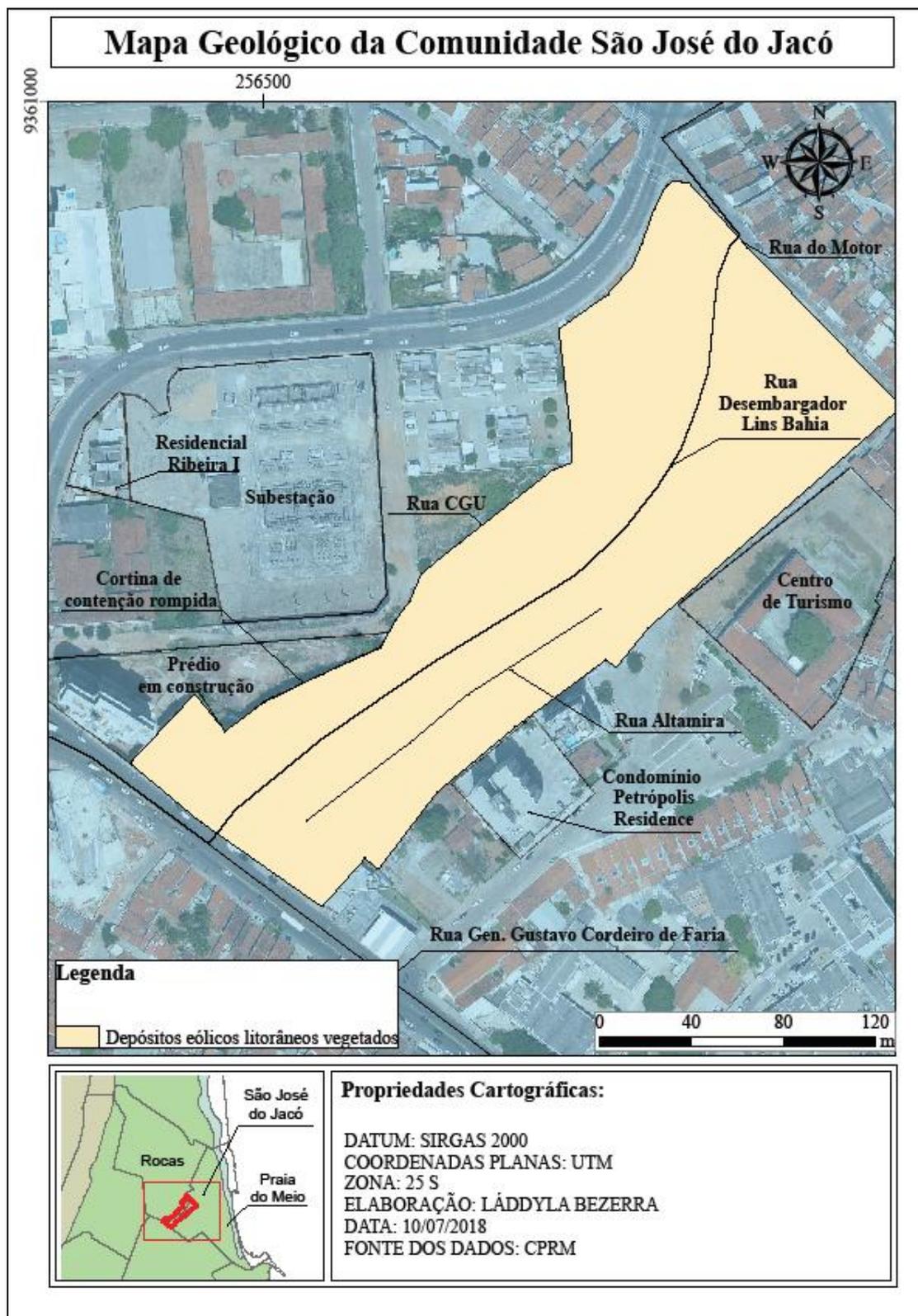




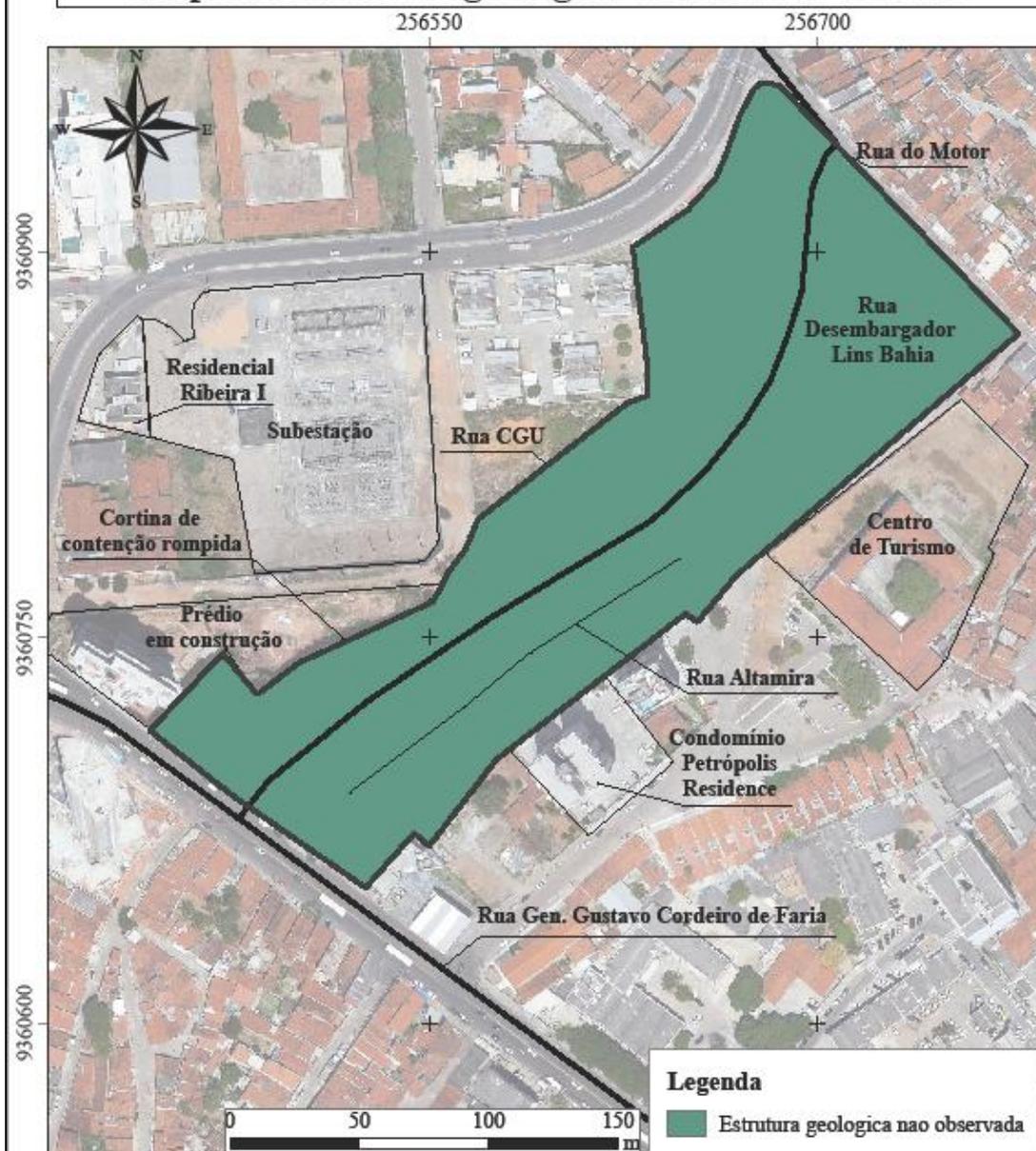




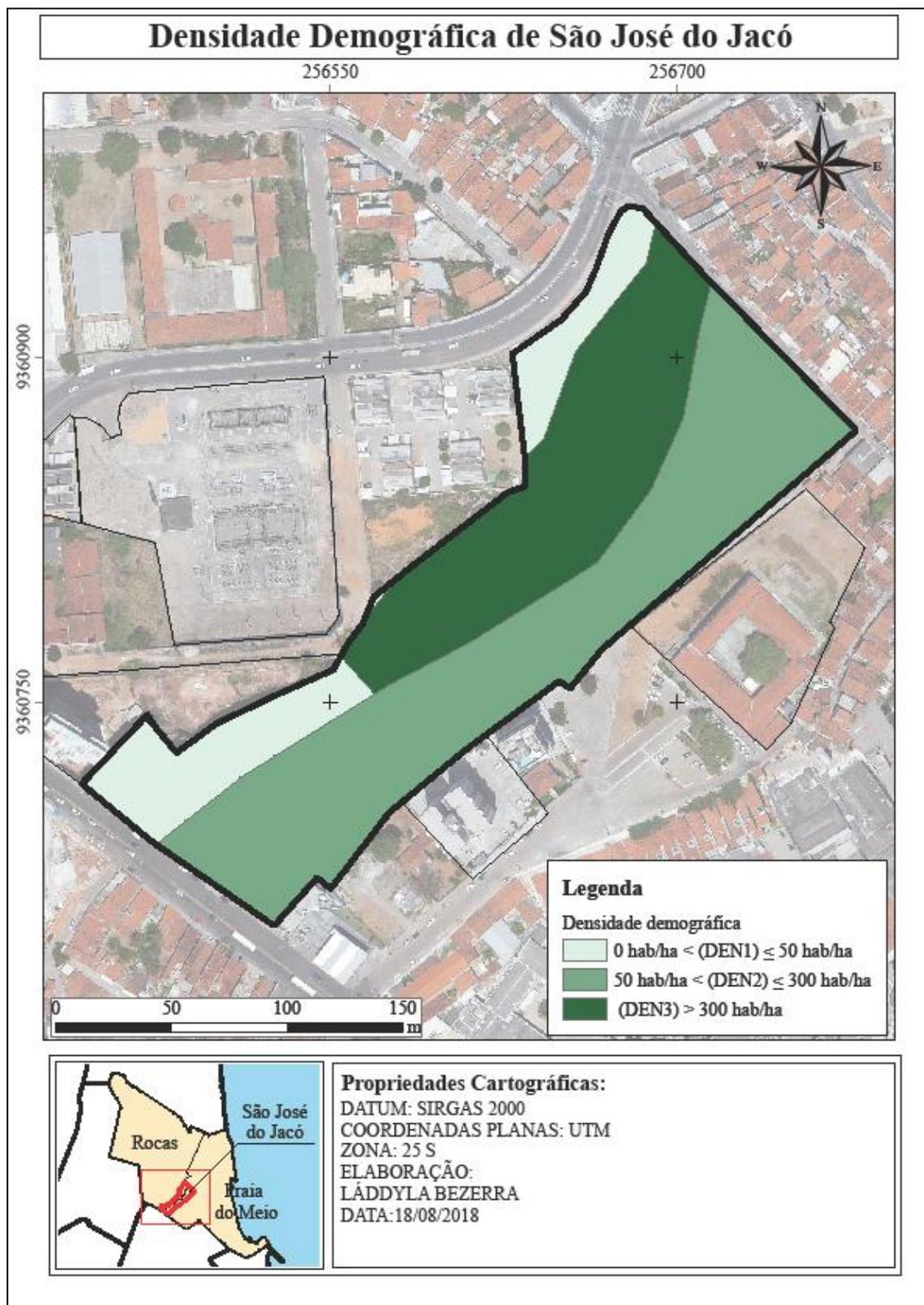




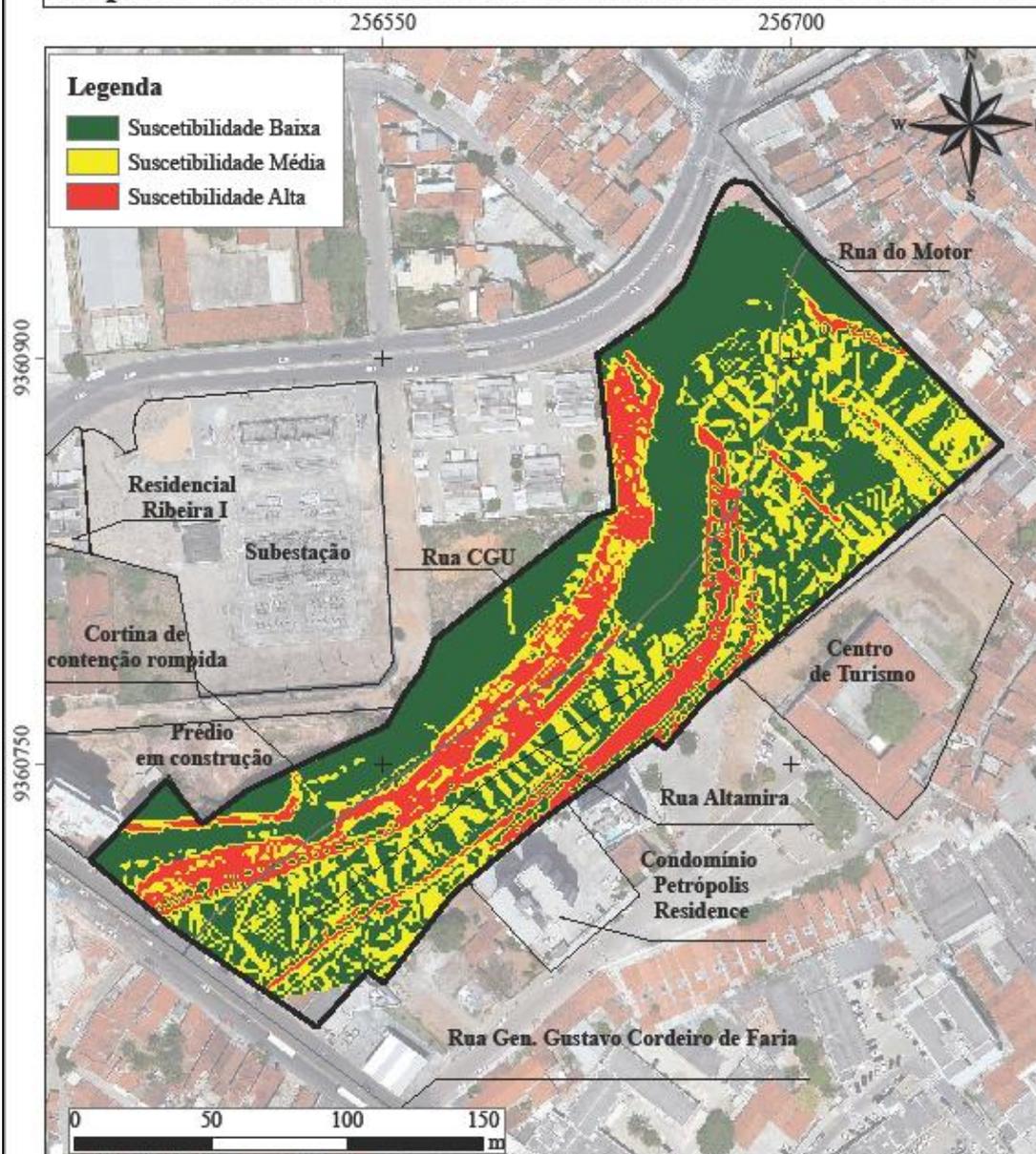
Mapa de estrutura geológica de São José do Jacó



Propriedades Cartográficas:
 DATUM: SIRGAS 2000
 COORDENADAS PLANAS: UTM
 ZONA: 25 S
 ELABORAÇÃO: LÁDDYLA BEZERRA
 DATA: 28/09/2018

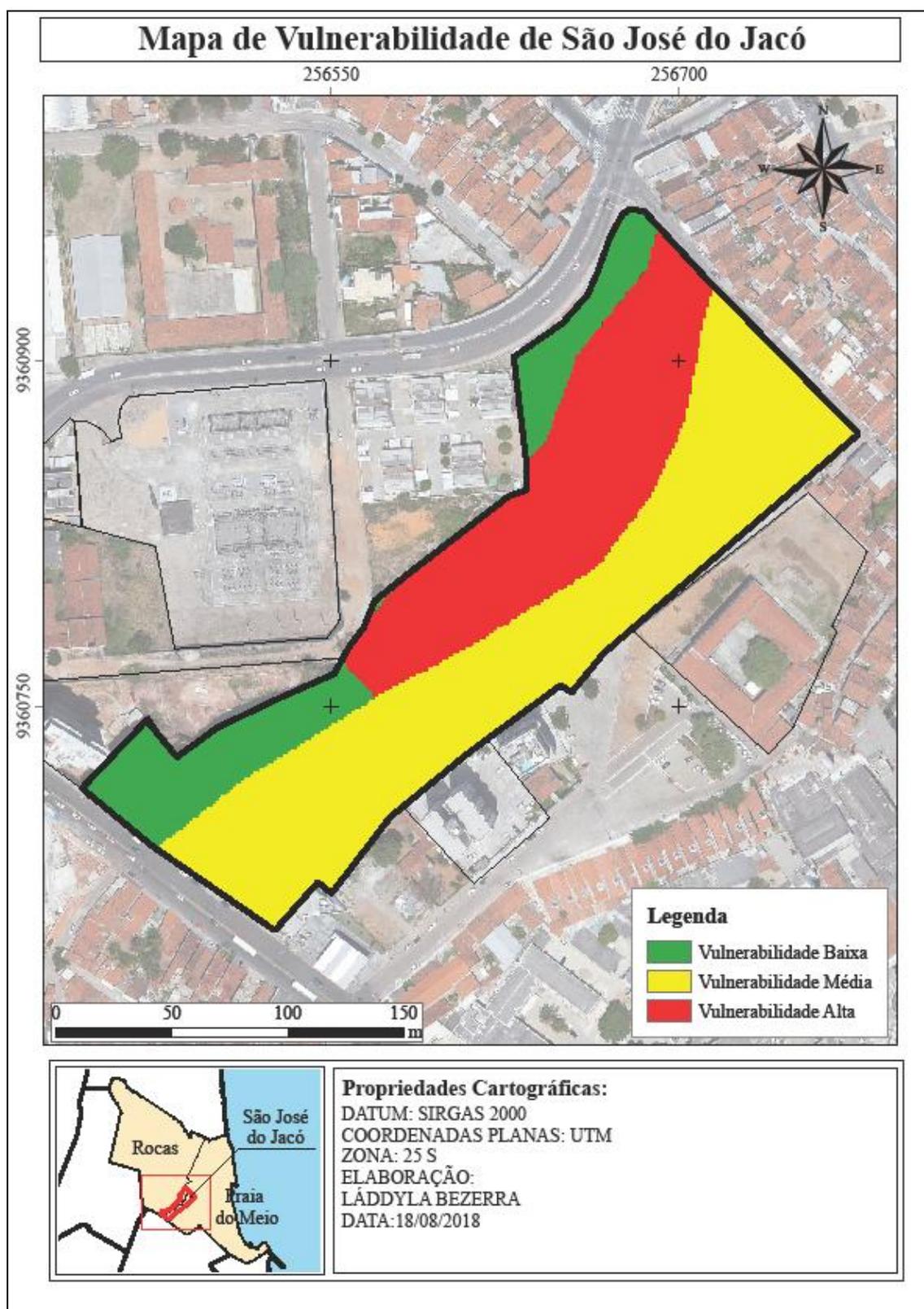


Mapa de Suscetibilidade da Comunidade São José do Jacó

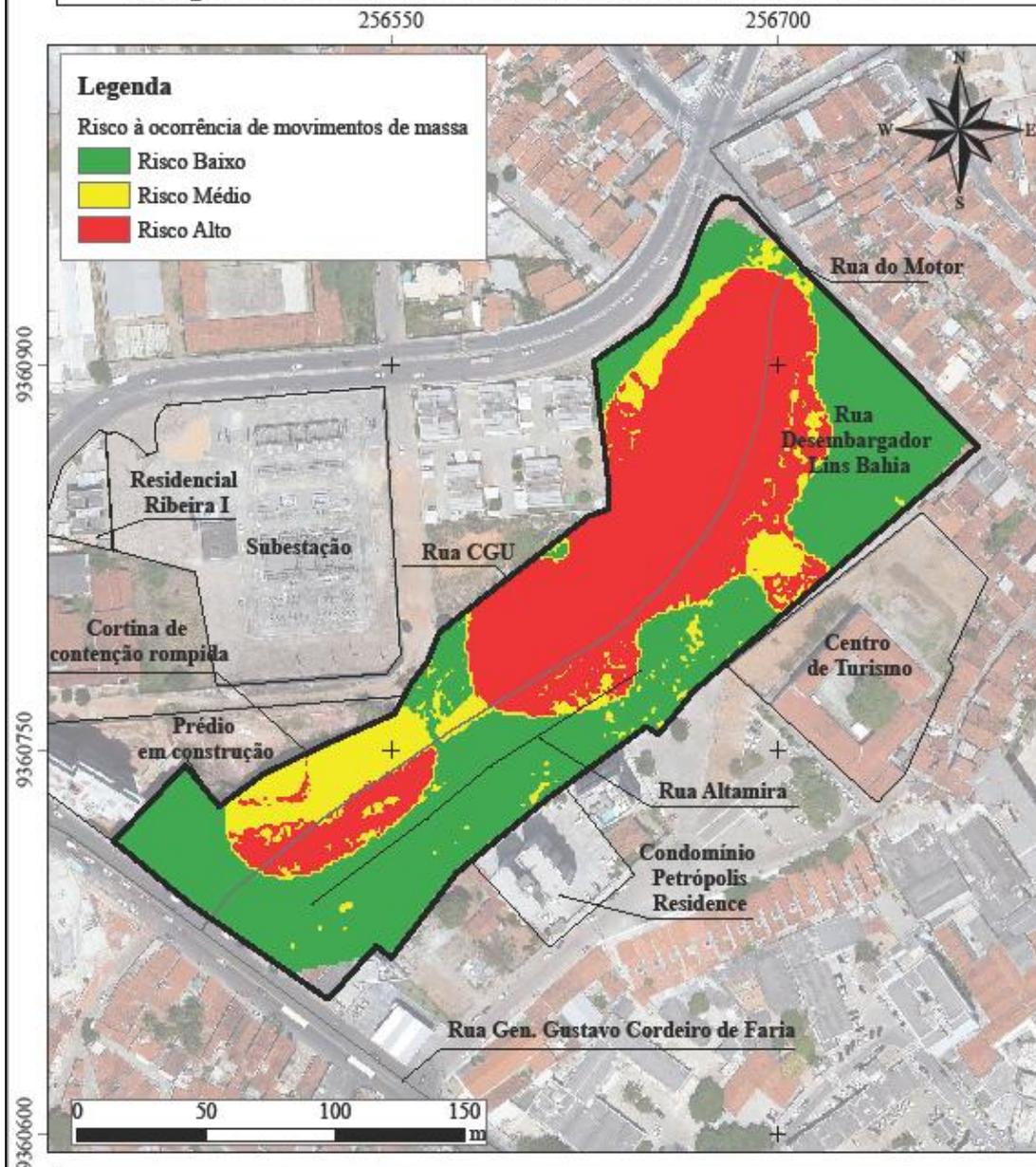


Propriedades Cartográficas:

DATUM: SIRGAS 2000
 COORDENADAS PLANAS: UTM
 ZONA: 25 S
 ELABORAÇÃO: LÁDDYLA BEZERRA
 DATA: 05/10/2018



Mapa de Risco da Comunidade São José do Jacó



Propriedades Cartográficas:

DATUM: SIRGAS 2000
COORDENADAS PLANAS: UTM
ZONA: 25 S
ELABORAÇÃO: LÁDDYLA BEZERRA
DATA: 05/10/2018