



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

Breno Marques Ferreira da Silva

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NO
LITORAL DO RN**

**Natal - RN
2019**

Breno Marques Ferreira da Silva

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NO
LITORAL DO RN**

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

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto
Coorientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Natal - RN

2019

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

Silva, Breno Marques Ferreira da.
Análise probabilística de estabilidade de falésias no litoral do
RN / Breno Marques Ferreira da Silva. - 2019.
271f.: 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. Estabilidade de Taludes - Dissertação. 2. Análise
Probabilística - Dissertação. 3. Probabilidade de Ruptura -
Dissertação. 4. Método de Monte Carlo - Dissertação. 5. Recuo de
Falésias - Dissertação. I. Freitas Neto, Osvaldo de. II. Santos
Júnior, Olavo Francisco dos. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

Breno Marques Ferreira da Silva

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NO LITORAL DO RN

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Orientador UFRN

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

Prof. Dr. Maurício Ehrlich – Examinador Externo UFRJ

Prof. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo – Examinador Externo IFRN

Natal, 26 de julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Os meus mais sinceros agradecimentos vão para todas as pessoas que estiveram no meu caminho durante essa jornada, e, de alguma forma me ajudaram a continuar seguindo os meus sonhos.

Ao meu orientador, Professor Osvaldo, pelos desafios e palavras de incentivos, sempre com o objetivo de me fazer crescer tanto pessoalmente quanto profissionalmente. Obrigado professor, pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado.

Ao meu co-orientador, Professor Olavo, por toda a confiança depositada em mim desde o início dessa caminhada do aprendizado. Obrigado professor, pela sua dedicação, humildade e por todas as orientações.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil da UFRN, por todas as aulas, oportunidades de apresentações de trabalhos e trocas de conhecimento.

Agradeço ao meu irmão, Bruno Marques Ferreira da Silva, pela sua paciência em tentar ensinar algo que nem é da sua área e por todas as horas de discussão relacionadas à trabalhos científicos, estatística e processamento de imagens.

Aos meus colegas de curso, os quais promoveram um ambiente cooperativo e saudável. Em particular ao Professor Fagner França pelas conversas sobre geotecnia e todo o suporte necessário durante toda a trajetória. Não poderia deixar de esquecer o meu amigo Eduardo Eiler por toda a ajuda no início desse percurso.

Agradeço de todo o meu coração, a todos que fazem parte dessa história, e que, de alguma maneira contribuíram para que esse trabalho fosse possível.

A Minha família por todo o amor, carinho, suporte e encorajamento. Dedico este trabalho a eles.

DEDICATÓRIA

À minha mãe,

Margarida, a flor mais linda e resiliente de todos os jardins. Por todo esforço e amor incondicional.

Ao meu pai,

Francisco Ivaldo, por todo apoio, palavras de incentivo e confiança depositada em mim.

Ao meu irmão,

Bruno, por ser uma fonte de inspiração diária. Sua dedicação e convicção nas atividades me guiam para me tornar um ser humano melhor.

A minha eterna namorada,

Cristina, todos os passos ao seu lado, segurando a sua mão se tornam mais fáceis. Por todo o amor e compreensão e carinho nas horas mais difíceis.

Aos meus amigos de infância,

Os quais proporcionam mais leveza aos meus dias através da convivência diária.

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE DE FALÉSIAS NO LITORAL DO RN

Breno Marques Ferreira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

Coorientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

RESUMO

A linha costeira do Estado do Rio Grande do Norte está em constante modificação. A exuberância paisagística dessa região, constituída principalmente por praias arenosas e falésias ativas da Formação Barreiras, representa um atrativo para a ocupação humana. A urbanização potencializa a ocorrência de movimentos de massa e acelera o processo de recuo costeiro. Esse processo representa um importante conflito socioeconômico, associado a perdas de terras e riscos à população. Estudos anteriores sobre o tema analisaram a estabilidade das falésias por meio de métodos determinísticos, para avaliar o risco de ocorrência de movimentos de massa. Entretanto, a variabilidade dos parâmetros geotécnicos representa incertezas que não são levadas em consideração no cálculo tradicional. Dessa forma, o presente estudo utiliza métodos probabilísticos e determinísticos, para analisar as condições de estabilidade e entender os mecanismos de ruptura das falésias da praia de Barra de Tabatinga, no município de Nísia Floresta/RN. Foram realizadas investigações de campo, análises e retroanálises probabilísticas. As análises computacionais probabilísticas foram realizadas através do programa Rocscience - Módulo Slide versão 7.0. Foram utilizados nessa pesquisa métodos de procura por superfícies circulares e não circulares, com o intuito de buscar os tipos de rupturas observados em campo. Adicionalmente, foram aplicadas análises de sensibilidade para identificar a influência dos parâmetros geotécnicos na variação do fator de segurança. As probabilidades de ruptura obtidas são elevadas para a maioria das hipóteses avaliadas. Destaca-se também que as probabilidades de ruptura aumentam conforme ocorre a evolução da frente de umedecimento da camada de topo da falésia. Para os cenários de retroanálises, as probabilidades de ruptura variam de 42% a 99%.

Palavras-chave: Estabilidade de Taludes, Análise Probabilística, Probabilidade de Ruptura, Método de Monte Carlo, Recuo de Falésias.

PROBABILISTIC SEACLIFFS STABILITY ANALYSIS IN RIO GRANDE DO NORTE STATE, NE BRAZIL

Breno Marques Ferreira da Silva

Advisor: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto
Co-Advisor: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

ABSTRACT

The coastline of the State of Rio Grande do Norte is a dynamic region. This area, which is composed of sandy beaches and alive cliffs of Barreiras Formation, has natural beauties that motivate occupation. Urbanization increases the rate of mass movements and sea cliff retreat. This process is an important socioeconomic issue, involving loss of land and risks to the population. Previous research on this topic has performed slope stability analysis through deterministic methods of assessment of mass movements risks. However, conventional slope stability analysis does not account for uncertainty in soil properties. In light of this fact, this study performs probabilistic and deterministic methods to assess directly the state of the cliffs of Barra de Tabatinga beach, in the city of Nísia Floresta/RN. Field survey and computational analysis was carried out. The probabilistic analysis performs using the software Rocscience - Slide 7.0. This research used search methods for circular and non-circular slip surfaces to search effectively failure types identified in the area. Moreover, in order to identify the significant geotechnical parameters affecting the factor of safety was perform sensitivity analysis. The results of probability of failure are high for most of the analyzed cases. In addition, the probability of failure increases with the evolution of the front saturation of the cliff top. The back analysis results in probability of failure between 42% and 99%.

Keywords: Slope Stability, Probabilistic Analysis, Failure Probability, Monte Carlo Simulation, Cliff Retreat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma com o resumo dos capítulos 3, 4, 5 (materiais e métodos) e na sequência a apresentação dos resultados capítulo 6	06
Figura 2.1 - Método de Spencer (Gerscovich, 2012)	15
Figura 2.2 – Esforço na fatia n – método de Morgenstern e Price (Gerscovich, 2012)	17
Figura 2.3 - Distribuições para fatores de segurança com diferentes coeficientes de variação, $CV = \sigma / x$, onde σ é o desvio padrão e x a média. Traduzido de Lim et al., 2017	18
Figura 2.4 - Distribuição de probabilidades das forças mobilizantes (M) e resistentes (R), onde M' e R' , representam as médias e a área hachurada em vermelho representa as condições de ruptura	18
Figura 2.5 - Histogramas, função densidade de probabilidade e a função de densidade acumulada do ângulo de atrito (variável aleatória), utilizando as distribuições Singh-Maddala (linha cheia) e Normal (linha tracejada). Traduzido de Ozelim et al., 2015	23
Figura 2.6.a - a Índice de Confiabilidade x Fator de segurança para taludes seguros x taludes que romperam. Traduzido de El-Ramly, 2001	25
Figura 2.6.b - Probabilidade de ruptura x Fator de segurança para taludes seguros e taludes que romperam. Traduzido de El-Ramly, 2001	25
Figura 2.7 - Análise de Sensibilidade - contribuição de diferentes parâmetros para a variância do FS. Traduzido de Jahanfar et al., 2017	26
Figura 2.8 - Configuração do problema exemplificado. Traduzido de Lim et al., 2017	26
Figura 3.1 – Falésias da Praia de Barra de Tabatinga/RN.	29
Figura 3.2 - Drone DJI Mavic Pro utilizado para a fotogrametria da praia de Barra de Tabatinga/RN.	30
Figura 3.3 - Percurso percorrido pelo Drone DJI Mavic Pro. Identificação dos pontos numerados de 1 a 6 vistos de cima. Trecho em falésias de aproximadamente 1,0km localizado na praia de Tabatinga/RN (Imagem retirada do Google Maps).....	31
Figura 3.4 - Percurso percorrido pelo Drone DJI Mavic Pro. Identificação dos pontos numerados de 1 a 6, visto de frente. Trecho em falésias de aproximadamente 1,0km localizado na praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	32
Figura 3.5 - Foto de cima do início do trecho em falésias localizada no ponto 1 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	32

Figura 3.6 - Foto frontal do início do trecho em falésias localizada no ponto 1 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera)	33
Figura 3.7 - Foto de cima do trecho em falésias localizada no ponto 2 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	33
Figura 3.8 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 2 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera)	34
Figura 3.9 - Foto de cima do início do trecho em falésias localizada no ponto 2 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	34
Figura 3.10 - Foto frontal do trecho em falésias localizada entre o ponto 2 e 3 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	35
Figura 3.11 - Foto de cima do trecho em falésias localizada no ponto 3 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	35
Figura 3.12 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 3 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	36
Figura 3.13 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 3 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	37
Figura 3.14 - Foto de cima do trecho em falésias localizada no ponto 4 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	37
Figura 3.15 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 4 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	38
Figura 3.16 - Foto frontal do trecho em falésias localizada entre o ponto 4 e 5 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	38
Figura 3.17 - Foto de cima do trecho em falésias localizada entre o ponto 4 e 5 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	39
Figura 3.18 - Foto frontal do trecho em falésias localizada entre os pontos 4 e 5 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	39
Figura 3.19 - Foto de cima do trecho em falésias localizada no ponto 5 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	40
Figura 3.20 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 5 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	40
Figura 3.21 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 5 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	41
Figura 3.22 - Foto de cima do trecho em falésias localizada no ponto 6 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	41

Figura 3.23 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 6 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	42
Figura 3.24 - Foto frontal do trecho em falésias localizada no ponto 6 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	42
Figura 3.25 - Foto de cima do trecho final em falésias localizada no ponto 6 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 -Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	43
Figura 3.26 - Foto de cima do trecho final em falésias localizada no ponto 6 indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	43
Figura 3.27 - Falésia no ponto da ruptura com indicação da altura total (40m) e as alturas de cada camada constituinte - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).	44
Figura 3.28 - Formação de ravina no topo da falésia, devido a erosão pluvial. Destaque na Figura para os caminhos preferenciais das águas de chuvas até o ponto mais crítico - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).....	45
Figura 3.29 - Formação de fendas de tração nas falésia, devido a erosão pluvial. Destaque na Figura para o bloco na iminência de tombar - Praia de Tabatinga/RN (Foto aérea: Daniel Herrera; Foto do bloco: O autor).....	46
Figura 3.30 - Formação de fendas de tração nas falésia, devido a erosão pluvial. Destaque na Figura para o bloco na iminência de tombar - Praia de Tabatinga/RN (Foto aérea: Daniel Herrera; Foto do bloco: O autor).....	46
Figura 3.31 - Repetição de mecanismo de ruptura nas falésias da Formação Barreiras, por meio do desenvolvimento de fendas de tração. a) Formação de fenda de tração na parte superior da falésia localizada na Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera); b) Foto do deslocamento de bloco (Braga, 2005).....	47
Figura 3.32 - Evolução dos blocos de arenitos com cimentação ferruginosa, localizado na base das falésias da Formação Barreiras em Tabatinga/RN.	48
Figura 3.33 - Formação de incisão basal na falésia, localizado no início do trecho em falésias na praia de Tabatinga/RN (Foto principal por Daniel Herrera; Foto do destaque o autor).	49
Figura 3.34 - Formação de incisão basal na falésia, localizado no início do trecho em falésias na praia de Tabatinga/RN (Foto principal por Daniel Herrera; Foto do destaque o autor).	49
Figura 3.35 - Quedas de blocos recentes, na parte superior das falésias, conforme indicado pelas setas. Destaque para o acúmulo de material na base das falésias - Praia de Tabatinga/RN (Fotos por Daniel Herrera).....	50

Figura 3.36 - Evolução temporal da falésia que foi identificado movimento de massa de grandes proporções. a) Foto retirada em 02/02/2008 (Fonte: Acervo fotográfico pessoal - Foto por Bruno Marques Ferreira da Silva). b) Foto retirada em 22/12/2010 (Fonte: Internet - Foto retirada por Sônia Furtado).....	51
Figura 3.37 - Evolução temporal da falésia que foi identificado movimento de massa de grandes proporções - Foto retirada no dia 19/01/2019. Fonte: O autor.	51
Figura 3.38 - Visão aérea do movimento de massa de grandes proporções localizada próximo à estabelecimento comercial - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).	52
Figura 3.39 - Visão frontal do movimento de massa de grandes proporções localizada próximo ao estabelecimento comercial. - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).	52
Figura 3.40 - Visão aproximada da área atingida pelo Movimento de massa de grandes proporções localizada próximo à estabelecimento comercial. - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).....	53
Figura 3.41 - Visão frontal do movimento de massa de grandes proporções localizada próximo à estabelecimento comercial. Textura diferente exibida na face das falésias após a ruptura - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).	53
Figura 3.42 - Faixas de interdição realizada pela Defesa Civil em áreas mais próximas às bordas das falésias, situadas no interior de estabelecimentos comerciais, na praia de Tabatinga/RN. Fonte: Acervo fotográfico pessoal - Fotos da parte superior por Daniel Herrera; Fotos da parte inferior por Cristina Alexandra de Medeiros Seixas.	54
Figura 3.43 - Valores máximos e mínimos do parâmetro coesão, em ensaios na condição natural e na condição saturada.....	59
Figura 3.44 - Valores máximos e mínimos do parâmetro ângulo de atrito, em ensaios na condição natural e na condição saturada.	60
Figura 3.45 – Perfis típicos – a) Esquema geral do processo de erosão basal na falésia e movimentos de massa. Destaca-se a formação de um entalhe na base da falésia; b) Formação de fendas de tração sub-verticais, mediante a ação das chuvas. No esquema geral, ponto “c” mostra a ocorrência de movimentos de massa e acúmulo de talus na base	66
Figura 3.46 – Esquema de mecanismo de ruptura em encostas de inclinação mais amenas (sem ação do mar). Perda de sucção do material mediante o avanço da frente de umedecimento do material.....	68

Figura 3.47 - Resumo do processo de erosão costeira proporcionando movimentos de massa como quedas e tombamentos e conseqüentemente o recuo da linha de costa.....	69
Figura 4.1 - Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão, ângulo de atrito e peso específico dos solos considerados conforme “hipótese 1”.a) Método de Janbu corrigido; b) Método de Gle/Morgenstern - Price	71
Figura 4.2 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro coesão da camada do topo (Valor mínimo: 0 kN/m ² ; Valor máximo: 197,73 kN/m ²) - “Hipótese 1”.	72
Figura 4.3 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro coesão da camada do meio (Valor mínimo: 0 kN/m ² ; Valor máximo: 271,00 kN/m ²) - “Hipótese 1”.	72
Figura 4.4 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro coesão da camada da base (Valor mínimo: 0 kN/m ² ; Valor máximo: 417,5 kN/m ²) - “Hipótese 1”.	73
Figura 4.5 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro ângulo de atrito da camada do topo (Valor mínimo: 10,7°; Valor máximo: 56,9°) - “Hipótese 1”.....	73
Figura 4.6 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro ângulo de atrito da camada do meio (Valor mínimo: 18,4°; Valor máximo: 55,6°) - “Hipótese 1”.	74
Figura 4.7 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro ângulo de atrito da camada da base (Valor mínimo: 7,1°; Valor máximo: 74,3°) - “Hipótese 1”.	74
Figura 4.8 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro peso específico da camada da topo (Valor mínimo: 15kN/m ³ ; Valor máximo: 21kN/m ³) - “Hipótese 1”.	75
Figura 4.9 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro peso específico da camada da topo (Valor mínimo: 14kN/m ³ ; Valor máximo: 20kN/m ³) - “Hipótese 1”.	75
Figura 4.10 - Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro peso específico da camada da topo (Valor mínimo: 16kN/m ³ ; Valor máximo: 21,8kN/m ³) - “Hipótese 1”.	76
Figura 4.11 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão Natural, obtido através de 23 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. E = 185,3; σ = 105,8.	77
Figura 4.12 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal e os dados observados, referentes à Coesão Natural de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 23).....	78
Figura 4.13 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão Inundada, obtido através de 22 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. E = 39,2; σ = 33,75. .	79
Figura 4.14 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes à Coesão Inundada de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 22).....	80

Figura 4.15 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito natural, obtido através de 23 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 37,4$; $\sigma = 9,0$. 81	
Figura 4.16 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes ao Ângulo de atrito natural de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 23).82	82
Figura 4.17 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito inundado, obtido através de 22 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 29,3$; $\sigma = 4,8$82	82
Figura 4.18 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes ao Ângulo de atrito inundado de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 22).83	83
Figura 4.19 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito inundado, obtido através de 21 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a $12,1^\circ$. $E = 30,2$; $\sigma = 3,0$84	84
Figura 4.20 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes ao Ângulo de atrito inundado de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 21). Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a $12,1^\circ$. ..84	84
Figura 4.21 - Perfil de Falésia da Formação Barreiras, localizada em Baía Formosa/RN. Camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados (Souza Jr., 2013).....86	86
Figura 4.22 - Perfil de Falésia da Formação Barreiras, localizada em Baía Formosa/RN. Camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados, com destaque para a camada cimentada com presença de seixos (Souza Jr., 2013).....86	86
Figura 4.23 - Camada de topo - Sedimentos Pós-Barreiras, apresentando coloração avermelhada (Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018)87	87
Figura 4.24 - Camada do meio da Falésia, material Homogêneo (Severo, 2005; Severo, 2011; Sousa, 2018)88	88
Figura 4.25 - Camada da base da Falésia, material heterogêneo (Severo, 2005; Severo, 2011; Sousa, 2018)89	89
Figura 4.26 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão natural da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 94,1$; $\sigma = 80,0$96	96
Figura 4.27 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à Coesão natural da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo (N = 7).96	96

Figura 4.28 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão inundada da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 4,8$; $\sigma = 8,2$	97
Figura 4.29 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à Coesão inundada da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).	97
Figura 4.30 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão natural da camada de meio (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 199,9$; $\sigma = 23,7$	98
Figura 4.31 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em um distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à Coesão natural da camada de meio (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).	98
Figura 4.32 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão inundada da camada de meio (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 43,59$; $\sigma = 16,7$	99
Figura 4.33 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à Coesão inundada da camada de meio (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).	99
Figura 4.34 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão natural da camada de base (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 245,0$; $\sigma = 118,9$	100
Figura 4.35 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em um distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à Coesão natural da camada de base (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 9$).	100
Figura 4.36 - Histograma dos dados do parâmetro Coesão inundada da camada de base (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 65,6$; $\sigma = 33,5$	101
Figura 4.37 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à Coesão inundada da camada de base (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 9$).	101
Figura 4.38 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito natural da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 33,8$; $\sigma = 7,7$	102

Figura 4.39 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao Ângulo de atrito natural da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo (N = 7).	102
Figura 4.40 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito inundado da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 32,6$; $\sigma = 2,7$.	103
Figura 4.41 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao Ângulo de atrito inundado da camada de topo (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo (N = 7).	103
Figura 4.42 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito natural da camada de meio (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 37,0$; $\sigma = 6,2$.	104
Figura 4.43 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao Ângulo de atrito natural da camada de meio (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 7).	104
Figura 4.44 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito inundado da camada de meio (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 26,0$; $\sigma = 6,3$.	105
Figura 4.45 - Figura 3.87 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao Ângulo de atrito inundado da camada de meio (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 7).	106
Figura 4.46 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito inundado da camada de meio (Solo homogêneo), obtido através de 6 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 28,35$; $\sigma = 1,8$. Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a 12,1.	106
Figura 4.47 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao Ângulo de atrito inundado da camada de meio (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 6). Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a 12,1.	107
Figura 4.48 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito natural da camada de base (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 40,7$; $\sigma = 11,2$.	107
Figura 4.49 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao Ângulo de atrito natural da camada de base (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 9).	108

Figura 4.50 - Histograma dos dados do parâmetro Ângulo de atrito inundado da camada de base (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 29,4$; $\sigma = 2,9$	108
Figura 4.51 - Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao Ângulo de atrito inundado da camada de base (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 9$).	109
Figura 4.52 - Valor local mínimo x Valor global mínimo para uma função de uma dimensão. Traduzido de (Rocscience - Slide 7.0, 2016).	111
Figura 5.1 - Seção geométrica típica da hidroelétrica de <i>James Bay Dyke</i> (Ji, J., et al., 2017; Slide Manual, 2016)	114
Figura 5.2 - Modelos simulados com diferentes considerações de variabilidade espacial. a) Sem variabilidade espacial; b) Com variabilidade ($\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$); c) Com variabilidade ($\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$).	116
Figura 5.3 - Gráfico de convergência comprovando que os resultados das análises estão convergindo para uma resposta final estável. a) Sem variabilidade espacial; b) Com variabilidade espacial ($\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$); c) Com variabilidade espacial ($\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$).	118
Figura 5.4 - Principais resultados e superfície crítica de ruptura (Sem variabilidade espacial).	120
Figura 5.5 - Histograma do Fator de Segurança e melhor ajuste da distribuição (Sem variabilidade espacial). Em destaque os valores de Fator de Segurança menores do que 1.	120
Figura 5.6 - Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Sem variabilidade espacial). Destaque para a probabilidade acumulada até o $FS = 1$	121
Figura 5.7 - Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o ângulo de atrito do aterro (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de ângulo de atrito que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.	121
Figura 5.8 - Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o peso específico do aterro (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de peso específico que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.	122
Figura 5.9 - Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para a coesão da Argila Marinha (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de coesão que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.	122

Figura 5.10 - Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para a coesão da Argila Lacustre (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de coesão que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.	123
Figura 5.11 - Análise de Sensibilidade para todas as variáveis aleatórias (Sem Variabilidade).....	124
Figura 5.12 - Análise de Sensibilidade para a coesão da Argila Lacustre (Sem Variabilidade).....	124
Figura 5.13 - Gráfico de dispersão: Coesão da argila lacustre x Fator de segurança (Sem Variabilidade).....	125
Figura 5.14 - Principais resultados e superfície crítica de ruptura (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).	126
Figura 5.15 - Histograma do Fator de Segurança e melhor ajuste da distribuição (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$). Em destaque os valores de Fator de Segurança menores do que 1.....	126
Figura 5.16 - Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$). Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1.	127
Figura 5.17 - Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o peso específico do aterro (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$). Em destaque os valores de ângulo de atrito que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.	128
Figura 5.18 - Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o ângulo de atrito do aterro (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$). Em destaque os valores de peso específico que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.....	128
Figura 5.19 - Análise de Sensibilidade para todas as variáveis aleatórias (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).	129
Figura 5.20 - Gráfico de dispersão: Peso específico do aterro x Fator de segurança (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).	130
Figura 5.21 - Principais resultados e superfície crítica de ruptura (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$).	130
Figura 5.22 - Histograma do Fator de Segurança e melhor ajuste da distribuição (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$). Em destaque os valores de Fator de Segurança menores do que 1.....	131
Figura 5.23 - Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$). Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1.	132

Figura 5.24 Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o ângulo de atrito do aterro (Variabilidade espacial: $\bar{\delta}x = 30m$; $\bar{\delta}y = 1,5m$). Em destaque os valores de ângulo de atrito que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.	132
Figura 5.25 Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o peso específico do aterro (Variabilidade espacial : $\bar{\delta}x = 30m$; $\bar{\delta}y = 1,5m$). Em destaque os valores de peso específico que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.	133
Figura 6.1 Fluxograma: Aplicação do método Monte Carlo.	136
Figura 6.2 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 01.	140
Figura 6.3 - Gráfico de convergência (Probabilidade de Ruptura x Número de amostras). Método de GLE/Morgenstern - Price.	141
Figura 6.4 - Gráfico de convergência (Probabilidade de Ruptura x Número de amostras). Método de Janbu corrigido.	141
Figura 6.5 - Superfícies de ruptura não circular obtidas pelos métodos de GLE/Morgenstern - Price e Janbu Corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade obtidos por cada método, para a hipótese 01.	142
Figura 6.6 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição gamma.	143
Figura 6.7 - Superfícies de ruptura circular obtidas pelos métodos de GLE/Morgenstern - Price e Janbu Corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade obtidos por cada método, para a hipótese 01.	144
Figura 6.8 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição gamma.	144
Figura 6.9 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 02.	147
Figura 6.10 - Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 02.	148
Figura 6.11 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.	148

Figura 6.12 - Superfície de ruptura circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 02.	149
Figura 6.13 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.	150
Figura 6.14 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 03.	152
Figura 6.15 - Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 03.	153
Figura 6.16 - Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de topo inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram $FS < 1$ para o método de GLE/Morgenstern - Price para superfície de ruptura não circular.	154
Figura 6.17 - Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de topo inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram $FS < 1$ para o método de Spencer para superfície de ruptura não circular.	154
Figura 6.18 - Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de topo inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram $FS < 1$ para o método de Janbu corrigido para superfície de ruptura não circular.	155
Figura 6.19 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.	156
Figura 6.20 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Spencer. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição lognormal.	156
Figura 6.21 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição lognormal.	157
Figura 6.22 - Gráfico de dispersão: Coesão da camada de topo x Fator de segurança (Janbu corrigido). Em destaque valores de coesão que resultam $FS < 1$	158
Figura 6.23 - Superfície de ruptura circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 03.	159

Figura 6.24 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 04.	161
Figura 6.25 - Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 04.	162
Figura 6.26 - Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 04).	162
Figura 6.27 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal.	163
Figura 6.28 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 05.	164
Figura 6.29 - Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 05	165
Figura 6.30 - Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 05).	166
Figura 6.31 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.	166
Figura 6.32 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 06.	168
Figura 6.33 - Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 06.	169
Figura 6.34 - Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 06).	169
Figura 6.35 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.	170
Figura 6.36 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 07.	172
Figura 6.37 - Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 07.	173

Figura 6.38 - Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 07).....	173
Figura 6.39 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.	174
Figura 6.40 - Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as hipóteses 04 a 07, para uma superfície de ruptura não circular.	176
Figura 6.41 - Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as hipóteses 04 a 07, para uma superfície de ruptura circular.	176
Figura 6.42 - Resumo das probabilidades de ruptura obtidas nas hipóteses de 01 a 07 para uma superfície de ruptura não circular.	178
Figura 6.43 - Resumo das probabilidades de ruptura obtidas nas hipóteses de 01 a 07 para uma superfície de ruptura circular.	178
Figura 6.44 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a retroanálise (hipótese 08).....	180
Figura 6.45 - Gráfico de dispersão: Coesão x Ângulo de atrito da camada de meio na condição inundada (hipótese 08).....	182
Figura 6.46 - Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio, na condição inundada (hipótese 08).....	183
Figura 6.47 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 08 V00).	184
Figura 6.48 - Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Sem variabilidade espacial). Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1 (hipótese 08).	184
Figura 6.49 - Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 08).	185
Figura 6.50 - Função distribuição de probabilidade do ângulo de atrito da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 08).	185
Figura 6.51 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 08 V20).	187

Figura 6.52 - Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\bar{\delta}x = 20m$; $\bar{\delta}y = 20m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.....	188
Figura 6.53 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 08 V05).....	190
Figura 6.54 - Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\bar{\delta}x = 5m$; $\bar{\delta}y = 5m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.....	191
Figura 6.55 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta (hipótese 08 V02).....	193
Figura 6.56 - Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\bar{\delta}x = 2m$; $\bar{\delta}y = 2m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.....	194
Figura 6.57 - Explicação das condições para a ocorrência do cenário modelado (hipótese 09).....	196
Figura 6.58 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a retroanálise (hipótese 09).....	197
Figura 6.59 - Gráfico de dispersão: Coesão x Ângulo de atrito da camada de meio, na condição inundada (hipótese 09).....	198
Figura 6.60 - Gráfico de dispersão: Coesão x Ângulo de atrito da camada de meio, na condição natural (hipótese 09).....	199
Figura 6.61 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V00).....	200
Figura 6.62 - Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Sem variabilidade espacial). Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1 (hipótese 09 V00).....	200
Figura 6.63 - Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 09).....	201
Figura 6.64 - Função distribuição de probabilidade do ângulo de atrito da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 09).....	202

Figura 6.65 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V20).	203
Figura 6.66 - Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\bar{\delta}x = 20m$; $\bar{\delta}y = 20m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.	204
Figura 6.67 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V05).	206
Figura 6.68 - Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\bar{\delta}x = 5m$; $\bar{\delta}y = 5m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.	207
Figura 6.69 - Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V05).	208
Figura 6.70 - Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\bar{\delta}x = 2m$; $\bar{\delta}y = 2m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.	209
Figura 6.71 - Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as retroanálises da hipótese 08.	212
Figura 6.72 - Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as retroanálises da hipótese 09.	213

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos movimentos de massa (Adaptado de Varnes, 1978)	8
Tabela 2.2 – Características dos principais movimentos de encosta na dinâmica ambiental brasileira (Augusto Filho, 1992)	9
Tabela 2.3 – Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de encostas (Varnes, 1978)	10
Tabela 2.4 - Níveis toleráveis de riscos (Adaptado da Figura de Silva, Lambe e Marr, 2008)	21
Tabela 2.5 - Resultados de cálculo de probabilidade de ruptura para diferentes coeficientes de variação de resistência não drenada do material. Traduzido de Lim et al., 2017	27
Tabela 3.1 – Coordenadas geográficas das seis posições notáveis do trajeto executado pelo Drone	31
Tabela 3.2 - Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição natural e saturada, em amostras de solo proveniente da Formação Barreiras. Indicação da camada da falésia, relacionada diretamente a altura (profundidade) em que foi retirado o material (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018).....	56
Tabela 3.3 - Características iniciais do solo e resistência a compressão simples (RCS) do material do topo e base da falésia do município de Tibau do Sul/RN. (Silva, 2003).....	61
Tabela 3.4 - Características iniciais do solo e resistência a compressão simples (RCS) do material do topo, meio e base da falésia Barreira do Inferno. (Barbosa, 2017).	62
Tabela 3.5 - Coeficiente de Permeabilidade (k) em laboratório.....	63
Tabela 3.6 - Coeficiente de Permeabilidade (k) in situ.....	63
Tabela 3.7 - Peso específico, obtidos em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras. Indicação da camada da falésia, relacionada diretamente a altura/profundidade (Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017).	64
Tabela 4.1 - Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - Peso específico, obtidos em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras. (Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017).....	89

Tabela 4.2 - Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição natural. Informação da porcentagem de areia fina, média e grossa nas amostras ensaiadas. (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018). ..91	
Tabela 4.3 - Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição inundada. Informação da porcentagem de areia fina, média e grossa nas amostras ensaiadas. (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018).....93	
Tabela 4.4 – Resumo dos Resultados do tratamento estatístico dos dados de entrada das análises de estabilidade da Formação Barreiras	110
Tabela 5.1 - Dados referentes as incerteza das propriedades dos solos da hidroelétrica de James Bay Dyke (Christian et al., 1994).	115
Tabela 5.2 - Resultados das análises para diferentes distâncias de correlações, comparados com resultados encontrados na literatura.	134
Tabela 6.1 - Caracterização estatística dos dados de entrada das análises de estabilidade da Formação Barreiras.....	137
Tabela 6.2 – Resumo das hipóteses consideradas para as análises de estabilidade.	138
Tabela 6.3 – Resumo das hipóteses consideradas para as retroanálises probabilísticas.	139
Tabela 6.4 - Hipótese 01: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.	145
Tabela 6.5 - Hipótese 01: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.	145
Tabela 6.6 - Hipótese 02: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.	150
Tabela 6.7 - Hipótese 02: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.	151
Tabela 6.8 - Hipótese 03: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.	159
Tabela 6.9 - Hipótese 03: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.	160
Tabela 6.10 - Hipótese 04: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.	163

Tabela 6.11 - Hipótese 04: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.	164
Tabela 6.12 - Hipótese 05: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.	167
Tabela 6.13 - Hipótese 05: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.	167
Tabela 6.14 - Hipótese 06: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.	171
Tabela 6.15 - Hipótese 06: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.	171
Tabela 6.16 - Hipótese 07: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.	175
Tabela 6.17 - Hipótese 07: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.	175
Tabela 6.18 - Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Sem variabilidade espacial).	186
Tabela 6.19 - Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$).	189
Tabela 6.20 - Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$).	192
Tabela 6.21 - Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$).	195
Tabela 6.22 - Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Sem variabilidade).	202
Tabela 6.23 - Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$).	205
Tabela 6.24 - Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$).	208
Tabela 6.25 - Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$).	210

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações iniciais	1
1.2 – Objetivos	4
1.3 – Organização do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 – Movimentos de Massa.....	7
2.2 – Análises de Estabilidade de Taludes	11
2.3 – Métodos de Equilíbrio Limite	11
2.3.1 – Método de Fellenius (1936).....	12
2.3.2 – Método de Bishop (1955)	13
2.3.3 – Método de Spencer (1967).....	14
2.3.4 – Método de Morgenstern e Price (1965)	15
2.4 – Método Probabilístico de Monte Carlo	17
2.5 – Análises de Confiabilidade e Probabilidade de Ruína	20
2.6 – Estudos de Caso - Estabilidade de Taludes	24
CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	28
3.1 – Caracterização da Área de Estudo	28
3.1.1 – Visão geral – Litoral Oriental do RN	28
3.1.2 – Praia de Barra de Tabatinga/RN	29
3.1.3 – Climas e Ondas – Tabatinga/RN.....	54
3.2 – Propriedades Geotécnicas dos Materiais das Falésias.....	55
3.2.1 – Resistência ao Cisalhamento	55
3.2.2 – Resistência à Compressão Simples	60
3.2.3 – Permeabilidade	62
3.2.4 – Peso Específico	64

3.3 – Processos Erosivos e Movimentos de Massa.....	65
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS DADOS, TRATAMENTO ESTATÍSTICO E MODELAGEM.....	70
4.1 – Análise dos Dados e Tratamento Estatístico	70
4.1.1 – Definição das Camadas Constituintes das Falésias	85
4.1.2 – Tratamento Estatístico por Camadas	89
4.2 – Modelagem	109
CAPÍTULO 5 – AFERIÇÃO DO MODELO A PARTIR DE ESTUDOS ANTERIORES	113
5.1 – Estudo de Caso – James Bay Dyke	113
5.1.1 – Resultados – James Bay Byke	119
5.1.1.1 – Resultados – James Bay Byke (Sem Variabilidade Espacial)	119
5.1.1.2 – Resultados – James Bay Byke (Com Variabilidade Espacial δx = 30m; $\delta y = 30m$)	125
5.1.1.3 – Resultados – James Bay Byke (Com Variabilidade Espacial δx = 30m; $\delta y = 1,5m$)	129
5.1.2 – Discussão dos Resultados – James Bay Byke	133
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	136
6.1 – Análise de Estabilidade Probabilísticas – Falésias de Tabatinga	136
6.1.1 – Resultados – Hipótese 01	140
6.1.2 – Resultados – Hipótese 02	146
6.1.3 – Resultados – Hipótese 03	151
6.1.4 – Resultados – Hipótese 04 a Hipótese 07	160
6.1.4.1 – Resultados – Hipótese 04 (1m de frente de saturação no topo)	160
6.1.4.2 – Resultados – Hipótese 05 (2m de frente de saturação no topo)	164
6.1.4.3 – Resultados – Hipótese 06 (3m de frente de saturação no topo)	168

6.1.4.4 – Resultados – Hipótese 07 (4m de frente de saturação no topo)	171
6.1.5 – Síntese dos Resultados nas Análises de Estabilidade	177
6.2 – Retroanálises Probabilísticas – Falésias de Tabatinga	179
6.2.1 – Resultados – Retroanálise (Hipótese 08)	180
6.2.1.1 – Resultados – Hipótese 08, V00 (Sem Variabilidade)	181
6.2.1.2 – Resultados – Hipótese 08, V20 (Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$)	186
6.2.1.3 – Resultados – Hipótese 08, V05 (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$)	189
6.2.1.4 – Resultados – Hipótese 08, V02 (Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$)	192
6.2.2 – Resultados – Retroanálise (Hipótese 09)	195
6.2.2.1 – Resultados – Hipótese 09, V00 (Sem Variabilidade)	197
6.2.2.2 – Resultados – Hipótese 09, V20 (Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$)	203
6.2.2.3 – Resultados – Hipótese 09, V05 (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$)	205
6.2.2.4 – Resultados – Hipótese 09, V02 (Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$)	208
6.2.3 – Síntese dos Resultados Obtidos nas Retroanálises Probabilísticas	205
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	215
7.1 – Conclusões e Contribuições	215
7.2 – Recomendações	218
REFERÊNCIAS	219
Apêndice A - Análise Probabilística	226
Apêndice B - Retroanálise Probabilística	238

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O Brasil apresenta 8.698 km de extensão da linha costeira, incorporando aproximadamente 400 municípios (Amaro *et al.*, 2012). A Formação Barreiras é uma unidade geológica de natureza sedimentar que aflora em uma faixa ao longo de aproximadamente 4000 km (da Foz do Amazonas até o Rio de Janeiro) do litoral Brasileiro (Santos Jr. *et al.*, 2015). Essa área está em constante modificação, tanto da sua posição, quanto da forma. Essa dinâmica é um processo controlado por uma série de fatores, tais como as condições marinhas e climáticas da região, a geologia da área e ações antrópicas. Devido à diversidade das variáveis envolvidas, torna-se complexa a compreensão e análise do processo como um todo.

A linha costeira do Estado do Rio Grande do Norte é constituída principalmente por praias arenosas e falésias ativas da Formação Barreiras. A exuberância paisagística dessa região representa um atrativo para a ocupação das bordas das falésias, a qual está relacionada principalmente a residências e empreendimentos turísticos (e.g. pousadas, hotéis e restaurantes). Esse processo acelerado de urbanização provoca aumento da carga no topo das falésias, remoção da vegetação, aumento da erosão superficial (i.e., formação de sulcos, ravinas e voçorocas) e conseqüentemente impactos ambientais.

O principal impacto ambiental verificado em algumas regiões do litoral do Rio Grande do Norte é o processo de recuo da linha da costa em direção ao continente, devido à erosão costeira. O recuo ocorre mediante um processo natural, que pode ser acelerado por ações antrópicas e está associado a diferentes mecanismos de movimentos de massa das falésias.

Para avaliar o risco de ocorrência de movimentos de massa em uma determinada região, indica-se a realização de uma análise de estabilidade de taludes detalhada. Conforme proposto por Hungr *et al.* (2014), os movimentos de massa podem ser classificados em 6 tipos principais: quedas, tombamentos, deslizamentos, espalhamentos, escoamentos e deformações em taludes.

Geralmente, as análises de estabilidade de taludes são efetuadas por meio de simulações computacionais, com o objetivo de avaliar a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa. Essas análises podem ser realizadas por meio de uma abordagem determinística, utilizando Métodos de Equilíbrio Limite (MEL) (e.g. Bishop, Fellenius, Spencer e Morgenstern & Price), por análise de tensão x deformação, baseados nos Métodos dos Elementos Finitos (MEF), ou por meio de métodos probabilísticos. O termo fator de segurança é um parâmetro utilizado para descrever a condição de estabilidade do talude.

Em alguns casos, os dados dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises apresentam grande variabilidade. Nesses casos, apenas os valores médios determinísticos dos parâmetros envolvidos não são representativos para definir o comportamento do solo. Esse fato impulsionou o desenvolvimento de diversos métodos probabilísticos para análises de estabilidade, com a finalidade de levar em consideração as incertezas referentes aos parâmetros dos solos (Alonso, 1976; Whitman, 1984; Christian *et al.*, 1994; Chowdhury e Xu, 1995; Low *et al.*, 1998; Duncan, 2000; El-Ramly, 2001; Chowdhury e Flentje, 2003; Griffiths e Fenton, 2004; Cassidy *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2013; Shamekhi, 2014). Porém, no Brasil, tais métodos ainda não são muito utilizados, sobretudo em análises de estabilidade de taludes urbanos e costeiros.

Nas últimas décadas foram realizados diversos estudos na zona costeira do Rio Grande do Norte. Nascimento (2009) analisou a viabilidade do monitoramento e os principais processos erosivos nas falésias de Pirangi do Norte. Souza Júnior (2013) realizou análises de estabilidade em Baía Formosa com base no MEF (Método dos Elementos Finitos) e MEL (Métodos de Equilíbrio Limite). Na área do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno, Barbosa (2017) avaliou a estabilidade das falésias mediante a utilização do método proposto por Collins e Sitar (2011), enquanto Taquez (2017) considerou a condição não saturada do solo.

Em Tibau do Sul foi analisado os principais mecanismos de ruptura e recuo das falésias (Diniz, 2002; Scudelari *et al.*, 2005; Santos Jr. *et al.*, 2006; Santos Jr. *et al.*, 2011), bem como as propriedades de resistência dos sedimentos da Formação Barreiras (Severo, 2011). No tocante às análises de estabilidade das falésias da mesma área, Severo (2005) considerou diferentes geometrias e camadas de solo cimentado. Ribeiro (2015) realizou análise paramétrica e elaborou gráficos para estimar os fatores de segurança. Adicionalmente, Silva *et al.* (2016) avaliaram o comportamento da estabilidade das falésias ao passo que ocorre a progressão da extensão da incisão basal (erosão na base das

falésias). Por último, Taquez *et al.* (2016) analisaram as condições de estabilidade das falésias com a presença de fendas de tração e contemplando movimentos de massa como quedas e tombamentos. Entretanto, apesar do grande número de trabalhos com foco na estabilidade das falésias da Formação Barreiras, as análises têm sido executadas com base em métodos tradicionais determinísticos, isto é, sem considerar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Assim, este trabalho busca analisar a estabilidade das falésias sob a perspectiva probabilística, considerando fontes de incertezas, podendo resultar em interpretações mais completas e proporcionar melhor entendimento do comportamento geotécnico das falésias.

O recuo costeiro é um processo dinâmico natural que resulta em perdas de terras e mudanças nas paisagens naturais. A ocupação desordenada da linha da costa causa um importante conflito socioeconômico, o qual envolve riscos potenciais à população. Por isso, esse tema é motivo de várias pesquisas e trabalhos científicos em diferentes localizações, ao longo da Formação Barreiras no litoral do Estado do Rio Grande do Norte, em consequência, sobretudo do crescimento populacional e desenvolvimento de infraestrutura dessa região. As consequências provenientes da erosão costeira são cada vez maiores, e, portanto, demandam empenho relacionado a análises de estabilidade em diferentes localizações com a finalidade de manter o risco em níveis aceitáveis.

A área objeto de estudo localiza-se no município de Nísia Floresta, mais precisamente na praia de Barra de Tabatinga, situada no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte, a aproximadamente 30km do centro da capital Natal. Consiste em um trecho composto por falésias ativas da Formação Barreiras. Dessa forma, o presente estudo busca entender os mecanismos de ruptura e promover auxílio na política de uso e ocupação do solo, e assim, proporcionar segurança, sustentabilidade ambiental e cumprimento das legislações ambientais e urbanísticas. A avaliação da influência das incertezas inerentes das análises de estabilidade, requerem a implementação de conceitos e métodos probabilísticos. O uso de ferramentas estatísticas demonstrou ser uma boa alternativa para ajustar a variabilidade das propriedades do solo. Dentro desse contexto, uma abordagem probabilística em conjunto com métodos tradicionais proporcionará um critério mais adequado e confiável para avaliação da estabilidade nas encostas da região.

A principal contribuição dessa pesquisa é aperfeiçoar as análises de estabilidade das falésias da Formação Barreiras, através da aplicação de métodos probabilísticos de forma prática. Adicionalmente, será realizado um tratamento estatístico nos dados, referentes aos parâmetros dos solos da Formação Barreiras, utilizados nas análises

computacionais, os quais poderão ser utilizados em trabalhos futuros. Outro propósito relacionado à metodologia adotada é tentar descrever o comportamento das falésias, por meio de termos probabilísticos, como probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é analisar as condições de estabilidade das falésias da praia de Barra de Tabatinga, no município de Nísia Floresta/RN, mediante a utilização de métodos determinísticos e probabilísticos simultaneamente. Além disso, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização morfológica das falésias da área, como inclinação, altura e camadas constituintes;
- Avaliar graus de estabilidade baseado em fatores de estabilidade probabilísticos, como o índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura;
- Realizar a retroanálise probabilística da ruptura identificada, durante as investigações de campo na área de estudo.
- Indicar os parâmetros geotécnicos que mais influenciam nas análises de estabilidade das falésias, por meio de análises de sensibilidade;
- Identificar e ilustrar os principais mecanismos de ruptura das falésias de Barra de Tabatinga/RN;
- Comparar as superfícies de ruptura obtidas nas análises com as observadas em campo;

Com a conclusão dos objetivos supramencionados, será possível um melhor entendimento do processo de recuo costeiro, além de uma melhor avaliação das condições de estabilidade das falésias nas encostas da região e, assim, guiar tomadas de decisões.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho mostra uma análise de estabilidade das falésias da praia de Barra de Tabatinga, mediante a utilização de métodos determinísticos e probabilísticos. Adicionalmente, apresenta uma retroanálise probabilística de um movimento de massa ocorrido na área de estudo. A Figura 1.1 representa o fluxograma resumo dos capítulos 3, 4 e 5.

No capítulo 1 é apresentada uma breve contextualização do problema e identificação da lacuna de pesquisa. Adicionalmente é mostrado também os objetivos da pesquisa, contribuição e organização do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre movimentos de massa, métodos de análises de estabilidade de taludes, conceitos de análise de confiabilidade e probabilidade de ruína e estudos de caso.

No capítulo 3 é realizada a descrição e caracterização geral da área de estudo. Nessa etapa, foi executado reconhecimento dos trechos em falésias e processos erosivos de toda a área por meio de Drone. Além disso, são mostradas as propriedades geotécnicas dos materiais da Formação Barreiras e propostos modelos conceituais que explicam o processo de recuo da linha de costa da área estudada.

No capítulo 4 é efetuada toda a análise e tratamento estatístico dos dados, separação das camadas de solos constituintes da Formação Barreiras, definição dos parâmetros de entrada que serão considerados variáveis aleatórias das análises de estabilidade probabilísticas.

No capítulo 5 é aplicado a análise probabilística em um caso conhecido na literatura (James Bay Dyke).

No capítulo 6 são mostrados os resultados das análises de estabilidade probabilísticas e retroanálises do movimento de massa ocorrido na área de estudo, mediante diferentes configurações e premissas.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e contribuições de todo o trabalho, bem como as recomendações para o encaminhamento de trabalhos futuros.

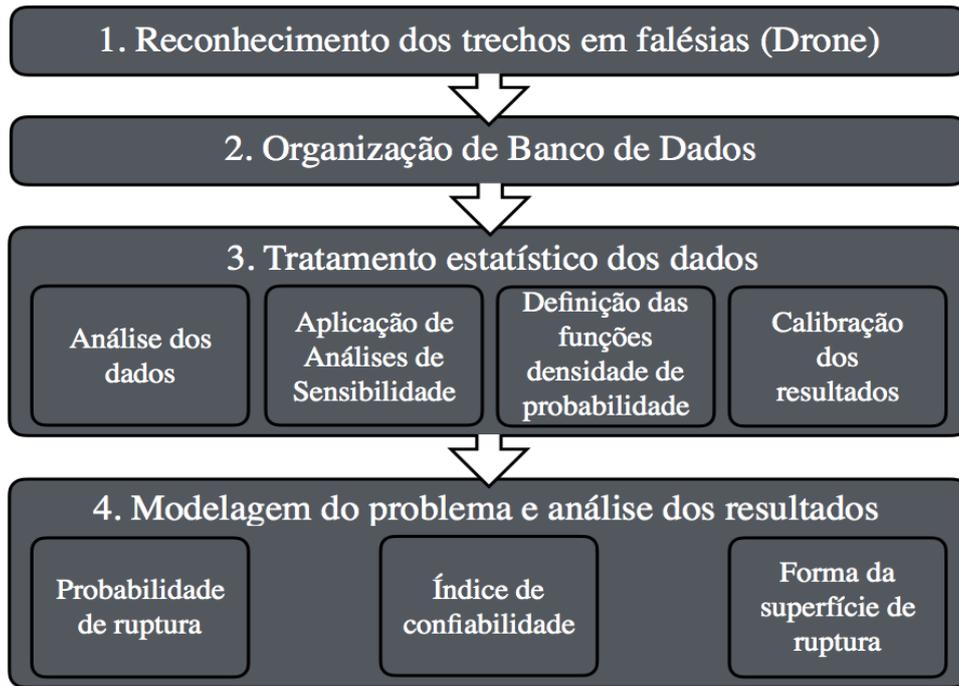


Figura 1.1 – Fluxograma com o resumo dos capítulos 3, 4, 5 (materiais e métodos) e na sequência a apresentação dos resultados capítulo 6.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1 Movimentos de Massa

Talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada que limita um maciço de solo, de rocha ou de ambos. Pode ser tanto natural, caso das encostas ou vertentes, como artificial, construído pelo homem, como por exemplo, os cortes e aterros. As falésias são taludes íngremes, geralmente relacionadas às formações litorâneas e estão sujeitas à processos erosivos costeiros naturais, como por exemplo a ação marinha.

Os movimentos de massa podem ser descritos como qualquer deslocamento de um determinado volume de solo. Esses movimentos de massa estão associados a problemas de instabilidade de encostas (Gerscovich, 2012). Na literatura existem várias propostas de sistemas de classificação, como por exemplo, de Varnes (1958), Hutchinson (1968), Varnes (1978), Guidicini e Nieble (1983), Cruden e Varnes (1996). A classificação dos movimentos de massa é de suma importância para padronizar a descrição do fenômeno e tornar a comunicação mais clara entre profissionais da área a respeito do assunto. Além disso, cada tipo de movimento de massa está associado a uma série de características típicas, tais como profundidade, velocidade, material instabilizado, potencial destrutivo, entre outros. O entendimento das características do fenômeno é fundamental para a elaboração de modelos.

A classificação de Varnes (1978) é a mais utilizada internacionalmente, onde para cada tipo de movimento de massa, indica-se o tipo de material envolvido (Tabela 2.1). Nessa classificação os movimentos considerados são as quedas (*falls*), tombamentos (*topples*), escorregamentos (*slides*), espalhamentos (*lateral spreads*), corridas (*flows*) e os movimentos complexos (*complex*). Os materiais relacionados dividem-se em rocha ou solo (predominantemente grosseiro ou predominantemente fino).

Com o objetivo de adequar a classificação dos movimentos de massa a ambientes tropicais típicos do território brasileiro, Augusto Filho (1992), revisou a proposta de classificação de Varnes (1978). Nessa classificação (Tabela 2.2), os movimentos são agrupados em quatro classes: rastejos ou fluência (*creep*), escorregamentos (*slides*),

quedas (*falls*) e corridas (*flows*) e estão associados às características, tais como materiais, velocidade, geometria mobilizada.

Tabela 2.1. Classificação dos movimentos de massa (Adaptado de Varnes, 1978)

Tipo de Movimento	Rocha	Solo Grosseiro	Solo Fino
Quedas	Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de terra
Tombamentos	Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de terra
Deslizamento Rotacional	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
Escorregamento Translacional	Escorregamento de blocos rochosos	Escorregamento de detritos	Escorregamento de terra
Espalhamento	Expansão de rocha	-	Expansão de terra
Escoamento ou Fluxos	Rastejo de rocha (profundo)	Corrida de detritos	Corrida de areia / Corrida de terra
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos de massa			

Entender os principais fatores deflagradores de movimentos de massa é de grande importância para prevê-los, evitá-los ou pelo menos diminuir as consequências. A Tabela 2.3 mostra a classificação das causas de instabilização de encostas adotada por Varnes (1978), a qual aborda os fatores deflagradores em dois grupos (responsáveis pelo aumento da solicitação e pela redução da resistência).

Augusto Filho e Virgili (1998) relacionam os principais condicionantes para a ocorrência de movimentos de massa e processos semelhantes na dinâmica ambiental brasileira, sendo eles:

- Características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico;
- Características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas/taludes, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (fraturas, xistosidade, entre outros.);
- Características geomorfológicas, com destaque para inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas (retilíneo, convexo e côncavo);
- Regime das águas de superfície;

- Características do uso e ocupação do solo, incluindo a cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial e servida, etc.

Tabela 2.2. Características dos principais movimentos de encosta na dinâmica ambiental brasileira (Augusto Filho, 1992).

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo ou Fluência	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada • Geometria indefinida
Escorregamento	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (km/h) a altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e materiais variáveis • Planares - solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza • Circulares - solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas • Em Cunha - solos e rochas com dois planos de fraqueza
Queda	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. • Rolamento de matacão • Tombamento
Corrida	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Tabela 2.3. Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de encostas (Varnes, 1978)

Ação	Fatores	Fenômenos Geológicos / Antrópicos
Aumento da Solicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	<ul style="list-style-type: none"> • Erosão; • Escorregamentos; • Cortes.
	Sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> • Peso da água de chuva; • Acúmulo natural de material (depósitos); • Peso da Vegetação; • Construções de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	<ul style="list-style-type: none"> • Terremotos, ondas, vulcões, etc; • Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões laterais	<ul style="list-style-type: none"> • Água em trincas; • Congelamento; • Material expansivo.
Redução da Resistência ao Cisalhamento	Características Inerentes ao material (geometria, estruturas, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Características geomecânicas do material, tensões iniciais
	Mudanças ou fatores variáveis	<ul style="list-style-type: none"> • Ação do intemperismo provocando alterações físico-químicas; • Redução da coesão, ângulo de atrito; • Elevação do nível d'água, variação das poropressões; • Aumento da umidade / Redução da sucção; • Variações climáticas provocando umedecimento e secagem.

Hungr *et al.* (2014) propôs a atualização da classificação desenvolvida por Varnes (1978). A principal modificação está relacionada à definição dos materiais envolvidos nos movimentos de massa, de forma a uniformizar a utilização entre geotécnicos e geólogos. Nesse trabalho foram definidos 32 tipos de movimentos de massa, comparados com 29 utilizados em Varnes (1978).

De forma geral, a principal causa dos movimentos de massa no Brasil está relacionada à saturação das encostas. As chuvas atuam diretamente no processo de instabilização das encostas, sobretudo mediante a redução da sucção, erosão pluvial, água em trincas e incidência de poropressão positiva no maciço de solo.

Ressalta-se que a ação antrópica representa um fator que acelera e aumenta os processos de instabilização de encostas.

2.2 Análises de Estabilidade de Taludes

As análises de estabilidade de taludes podem ser realizadas através de métodos determinísticos ou probabilísticos. As análises determinísticas, geralmente baseadas nos métodos de equilíbrio limite, utilizam valores médios. De forma prática, esses valores representam de forma razoável a realidade, das forças resistentes (τ_f) e mobilizantes (τ_{mob}). Porém, a utilização de valores médios mostra que na realidade, existe uma variação associada a essas forças (ABNT – NBR 11682, 2009). Nesse contexto, os métodos probabilísticos resultam em interpretações mais confiáveis, considerando a variabilidade de parâmetros envolvidos no cálculo.

O termo "fator de estabilidade" é o resultado de uma análise de estabilidade, o qual descreve as condições de estabilidade de um talude. Esse fator pode ser definido de diferentes formas, sendo os mais utilizados o Fator de Segurança (equilíbrio limite), índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura (Shamekhi, 2014). A seguir serão apresentados, de forma resumida, os principais conceitos de alguns métodos de equilíbrio limite, limitações dos métodos e como aplicá-los. Além disso, o método de Monte Carlo também é especificado e ilustrado por meio de estudos de caso.

2.3 Métodos de Equilíbrio Limite (A partir de Gerscovich, 2012)

Para a aplicação das análises determinísticas (MEL), define-se um Fator de Segurança (FS) como a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e a resultante das forças solicitantes ou favoráveis ao movimento, conforme a equação 2.1:

$$F_s = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças solicitantes}} = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (2.1)$$

Dessa forma, o talude encontra-se em equilíbrio para valores de FS maiores do que 1, ao passo que para valores de FS menores do que 1 significa ruptura. A ruptura é definida como o deslizamento de uma massa de solo ao longo de uma superfície bem definida. Essa ruptura pode ocorrer através de diversos mecanismos e modos diferentes (e.g. quedas de blocos, deslizamentos, tombamentos, corridas).

Os métodos de equilíbrio limite utilizados nas análises de estabilidade de taludes baseiam-se na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, tomada como corpo rígido, na iminência de entrar em processo de movimento de massa. Esse processo pode

ser delimitado por uma superfície de ruptura circular, poligonal, ou de outra geometria qualquer.

De forma geral, os métodos de equilíbrio limite fundamentam-se, no método das fatias, isto é, divide-se a região de solo delimitada pela superfície de ruptura em diversas fatias verticais e se aplica as equações de equilíbrio para cada fatia isoladamente. Ao se analisar as equações da estática e de resistência ao cisalhamento disponíveis, observa-se que o problema é estaticamente indeterminado, ou seja, o número de incógnitas é maior do que o número de equações. Para resolver esse problema, foram propostas algumas hipóteses simplificadoras para reduzir o número de incógnitas, as quais são basicamente as principais diferenças entre o métodos de análise de estabilidade por MEL.

2.3.1 Método de Fellenius (1936)

O método de Fellenius (1936), também conhecido como método sueco, estabelece o equilíbrio de forças em cada fatia, nas direções normal e tangencial a superfície de ruptura. É aplicado em superfícies circulares de ruptura e satisfaz apenas o equilíbrio de momentos em torno da superfície. Trata-se de uma formulação simples pois estabelece uma relação linear, não sendo necessário qualquer processo iterativo para obter o fator de segurança. Esse método negligencia as forças nas laterais das fatias. Assim, o FS é definido como:

$$FS = \frac{\sum(c' l + (W \cos \alpha - ul)tg\phi')}{\sum W_i \text{ sen } \alpha} \quad (2.2)$$

Onde:

c' e ϕ' = coesão e ângulo de atrito para o centro da base da fatia;

W = peso da fatia;

α = inclinação da base da fatia;

u = poropressão no centro da base da fatia;

l = comprimento da base da fatia;

O método de Fellenius é considerado conservador. Em outras palavras, fornece baixos valores de FS, diferindo-se em média 20% dos valores de fatores calculados por métodos mais rigorosos. Em casos extremos, como alta poropressão, esse percentual

tende a ser ainda mais alto. Entretanto, quando o ângulo de atrito é igual a zero, o método produz FS com valores próximos aos métodos mais rigorosos.

2.3.2 Método de Bishop (1955)

O método de Bishop (1955) é admitido somente para superfícies circulares, de forma análoga ao método de Fellenius apresentado anteriormente. No cálculo do fator de segurança é considerado o equilíbrio de forças e os momentos entre as fatias. O equilíbrio de forças em cada fatia é feito nas direções vertical e horizontal. Com relação às forças interlamelares (E, X), o método propõe a eliminação do termo que envolve X, o que equivale a desprezar as parcelas relativas às componentes tangencias dos esforços entre fatias. Nesse método não se introduz qualquer consideração quanto às componentes horizontais das forças interlamelares (E). Assim, chega-se a equação para o cálculo do FS:

$$FS = \frac{1}{\sum W_i \operatorname{sen} \alpha} \sum ([c' b + (W - ub) \operatorname{tg} \phi'] \frac{1}{m_\alpha}) \quad (2.3)$$

Onde:

$$m_\alpha = \cos \alpha \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \phi' \operatorname{tg} \alpha}{FS} \right];$$

c' e ϕ' = coesão e ângulo de atrito para o centro da base da fatia;

W = peso da fatia;

α = inclinação da base da fatia;

u = poropressão no centro da base da fatia;

b = espessura da fatia;

l = comprimento da base da fatia.

A solução é obtida através de iteração nesse método, tendo em vista que o FS aparece em ambos os lados da equação. A convergência do processo é considerada relativamente rápida, por isso o cálculo pode ser feito de forma manual. É um método muito utilizado na prática e a sua forma simplificada é recomendada para projetos simples.

O método de Bishop também é conservador e sua aplicação é imprecisa em solos estratificados. Se comparado com os fatores de segurança calculados pelo método de Fellenius os resultados tendem a apresentar a seguinte relação:

$$\text{Tensões Efetivas} \rightarrow FS_{\text{Bishop}} \cong 1,25 FS_{\text{Fellenius}}$$

$$\text{Tensões Totais} \rightarrow FS_{\text{Bishop}} \cong 1,1FS_{\text{Fellenius}}$$

2.3.3 Método de Spencer (1967)

O método de Spencer (1967) é considerado rigoroso, pois se propõe a satisfazer todas as equações de equilíbrio, além de não desprezar as forças interlamelares. Portanto, os valores do FS são mais realísticos. Originalmente esse método admitia somente superfície circular e posteriormente foi adaptado para superfícies não circulares. Assume-se que as forças interlamelares têm uma inclinação constante:

$$tg\theta = \frac{X_n}{E_n} \quad (2.4)$$

A partir das equações de equilíbrio de forças nas direções paralelas e normais à base da fatia, calcula-se a equação da resultante Q. Essa resultante depende das características geométricas e parâmetros geotécnicos de cada fatia, assim como do valor adotado para a inclinação das forças interlamelares (θ). A resultante Q é obtida a partir da seguinte equação:

$$Q = \gamma H b \left(\frac{\frac{c'}{FS\gamma H} + \frac{1}{2} \frac{h}{H} \frac{tg\phi'}{FS} (1 - 2r_u + 2\cos\alpha) - \frac{1}{2} \frac{h}{H} \text{sen}2\alpha}{\cos\alpha \cos(\alpha - \theta) \left(1 + \frac{tg\phi'}{FS} tg(\alpha - \theta) \right)} \right) \quad (2.5)$$

Onde:

Q = Soma das resultantes das forças interlamelares;

θ = Inclinação das forças interlamelares;

c' e ϕ' = Coesão e ângulo de atrito para o centro da base da fatia;

h = Altura da fatia;

H = Altura do talude;

α = inclinação da base da fatia;

r_u = razão de poropressão assumida constante em todo o talude.

Analogamente ao método de Bishop, é necessário utilizar um processo iterativo para o cálculo do FS final. Observa-se que o FS calculado é pouco sensível ao valor de θ . Percebe-se que quando a inclinação da resultante das forças interlamelares é nula ($\theta = 0$), o método resulta em valores de FS idênticos ao obtido pelo método de Bishop. A Figura 2.1 apresenta os esforços na fatia para o método de Spencer.

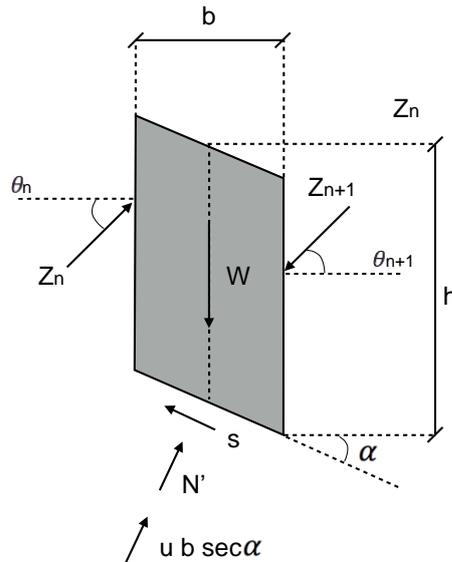


Figura 2.1 - Método de Spencer (Gerscovich, 2012).

2.3.4 Método de Morgenstern e Price (1965)

Morgenstern e Price (1965) desenvolveram o método mais geral de equilíbrio limite, pois satisfaz todas as equações de equilíbrio e admite uma superfície de ruptura qualquer. Para tornar o problema estaticamente determinado, ao contrário dos demais métodos rigorosos, que estabelecem uma relação constante entre as forças e as fatias, o método assume que a inclinação (θ) varia, segundo a função:

$$T = \lambda f(x)E \quad (2.6)$$

ou,

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{T}{E} = \lambda f(x) \quad (2.7)$$

Em que λ é um parâmetro escalar determinado a partir da solução de cálculo do fator de segurança e $f(x)$ requer um julgamento prévio de como a inclinação das forças entre fatias varia no talude. O equilíbrio de forças na direção tangencial e normal à base da fatia.

Considerando a equação anterior, temos a equação para o cálculo da força $E(x)$ entre fatias:

$$E(x) = \frac{1}{L + K_X} \left(E_i L + \frac{N_X^2}{2} + P_X \right) \quad (2.8)$$

Onde:

$$K = \lambda k \left(\frac{\text{tg}\phi'}{\text{FS}} + A \right) \quad (2.9)$$

$$L = 1 - \frac{A\text{tg}\phi'}{\text{FS}} + \lambda m \left(\frac{\text{tg}\phi'}{\text{FS}} + A \right) \quad (2.10)$$

$$N = \frac{\text{tg}\phi'}{\text{FS}} (2AW_w + p - r(1 + A^2)) + (-2W_w + pA) \quad (2.11)$$

$$p = \frac{1}{\text{FS}} \{ (c - \text{stg}\phi')(1 + A^2) + V_w A \text{tg}\phi' + q \text{tg}\phi' \} + (qA - V_w) \quad (2.12)$$

Para o equilíbrio de momentos tem-se:

$$M(x) = E(y_t - y) = M_{eW}(x) + \int_{x_0}^x \left(\lambda f - \frac{dy}{dx} \right) E dx \quad (2.13)$$

$$M_{eW}(x) = \int_{x_0}^x \left(-P_w \frac{dy}{dx} \right) dx + (P_w(y - h)) \quad (2.14)$$

O método é solucionado iterativamente, definindo-se previamente a função de distribuição de forças entre fatias, assumindo-se valores para FS e λ e calculando-se $E(x)$ e $M(x)$ para cada fatia. O processo iterativo é repetido até que as condições de contorno sejam satisfeitas. A Figura 2.2 apresenta os esforços na fatia para o método de Morgenstern e Price.

É importante perceber que quando se utiliza $f(x) = 0$, a solução para o FS torna-se idêntica à determinada pelo método de Bishop, e quando $f(x) = \text{constante}$, o resultado torna-se idêntico ao método de Spencer.

Onde:

dW = Peso da fatia;

P_w = Poropressão no contorno entre fatias;

dP_b = Resultante da poropressão na base da fatia

E e T = Esforços entre fatias atuando em $(y - y_t)$;

ds = Resistência da base.

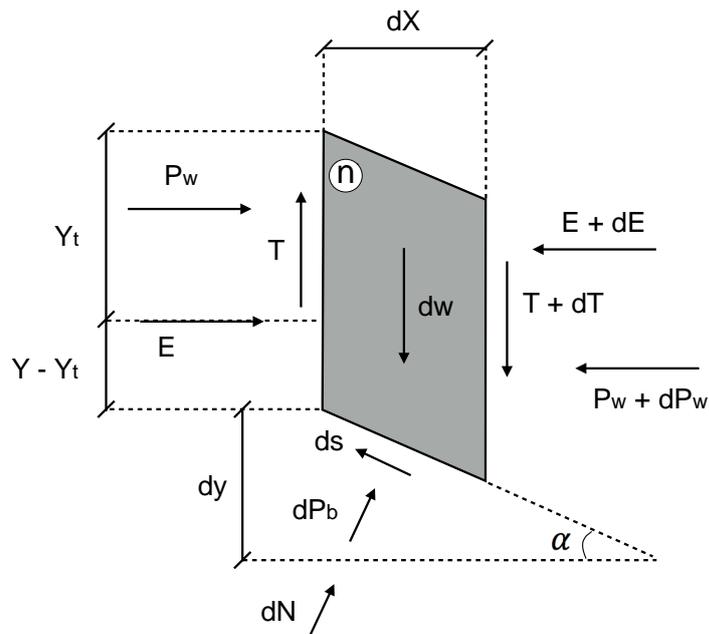


Figura 2.2 - Esforços na fatia n - método de Morgenstern e Price (Gerscovich, 2012).

2.4 Método Probabilístico de Monte Carlo

A análise probabilística considera as incertezas inerentes nos parâmetros dos solos, os quais são tratados como variáveis aleatórias. Para isso, as distribuições de probabilidade de cada parâmetro considerado variável aleatória serão incorporadas na análise de estabilidade.

Análise de estabilidade de taludes é um assunto dominado pelas incertezas, mais especificamente, nas propriedades do solo, configuração geológica, condições ambientais, carregamentos e modelos utilizados (El-Ramly, 2001). Dessa forma, o risco associado é difícil de ser avaliado. Um estudo de rupturas em aterros sanitários no Reino Unido apresentou um número significativo de ocorrência de movimentos de massa nos últimos anos (Jones e Dixon 2003). Através de dados do *Highway slope manual Hong Kong: Hong Kong SAR Government, 2000*, afirma-se que aproximadamente 5% dos taludes analisados com base na abordagem clássica, eventualmente romperiam (Liu e Cheng, 2016). Esse fato indica que análises de estabilidade baseadas apenas no Fator de Segurança não traduzem o estado do talude de forma confiável e segura e são largamente dependentes de empirismo e experiência profissional.

É importante notar que diferentes taludes com o mesmo valor de FS poderão apresentar diferentes riscos, a depender do coeficiente de variação (CV) dos parâmetros do solo, conforme exemplo mostrado na Figura 2.3 (Liang *et al.*, 1999).

A Figura 2.4 mostra a distribuição de probabilidade das forças R (Resistentes - τ_f) e M (Mobilizantes - τ_{mob}), onde se observa que as distribuições de R e M em parte se sobrepõem. Através da Figura 2.4, percebe-se a diferença entre as duas abordagens de cálculo de estabilidade de taludes, onde o cálculo do FS pode ser realizado por meio da média das distribuições R' e M' (determinística), ou considerando toda a variação (incerteza) das duas distribuições (probabilística). A área hachurada representa a probabilidade de as forças mobilizantes serem maiores do que as forças resistentes, isto é, condição de ruptura (FS menores do que a unidade).

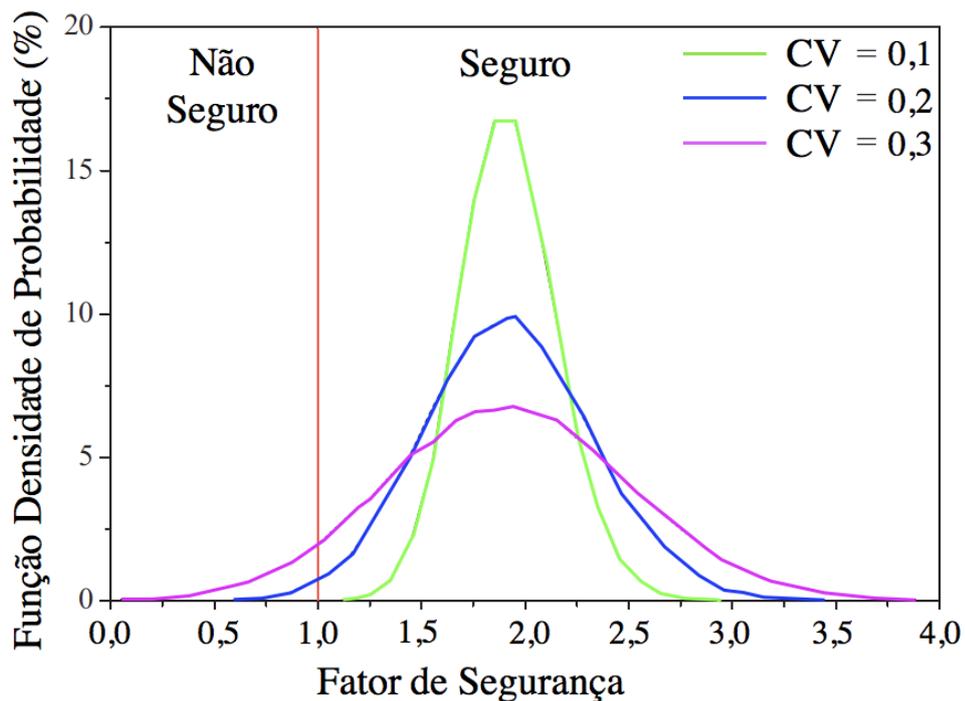


Figura 2.3 - Distribuições para fatores de segurança com diferentes coeficientes de variação, $CV = \sigma / x$, onde σ é o desvio padrão e x a média. Traduzido de Lim *et al.*, 2017.

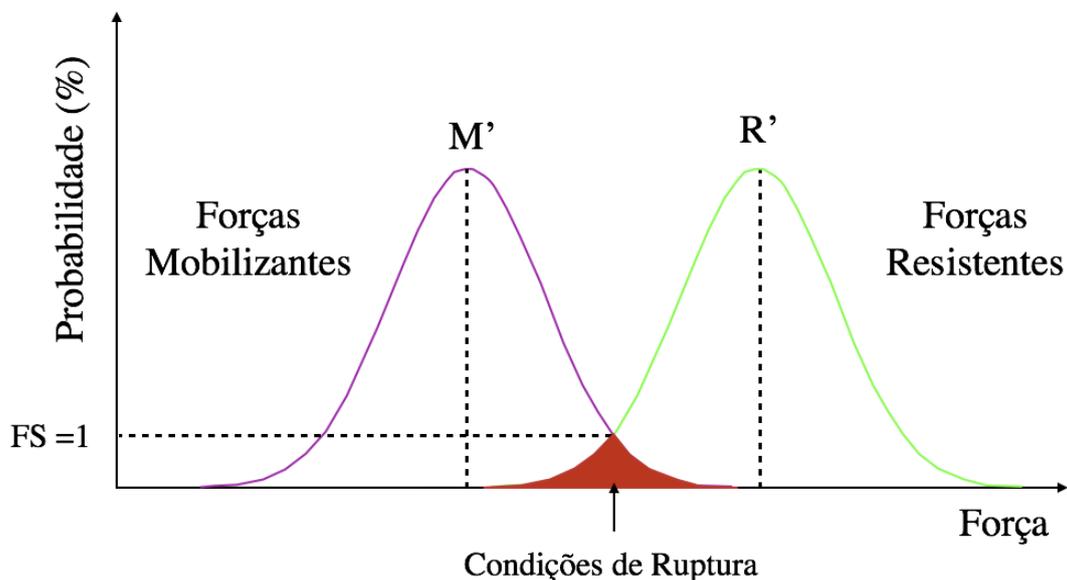


Figura 2.4 - Distribuição de probabilidades das forças mobilizantes (M) e resistentes (R), onde M' e R', representam as médias e a área hachurada em vermelho representa as condições de ruptura.

Como resultado da análise probabilística, além do valor de probabilidade de ruptura (P_f) e do índice de confiabilidade (β), define-se a distribuição de probabilidade do FS (Ver Figura 2.3).

Estudos realizados nas últimas décadas proporcionaram importantes contribuições relacionadas à análise da confiabilidade em estabilidade de taludes (Li e Lumb, 1987; Hassan e Wolff, 1999; Low, 2005; Jimenez-Rodriguez *et al.*, 2006; Cho, 2010; Low *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2011; Wang, 2013; Xu *et al.*, 2014; Gong *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2015). Além disso, esses trabalhos indicam que o método Monte Carlo é o mais utilizado devido a simplicidade conceitual e resultados imparciais no cálculo da confiabilidade (Lim *et al.* 2017).

Para a aplicação do método Monte Carlo é necessário definir as funções densidade de probabilidade relacionada aos parâmetros geotécnicos (variáveis aleatórias), tais como: coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e resistência não drenada do material (c_u). Também é necessário determinar média e desvio-padrão dessas distribuições. Cada variável aleatória poderá assumir qualquer valor dentro de um intervalo determinado.

A probabilidade de ruptura (P_f), também chamada de probabilidade de desempenho insatisfatório, é a probabilidade de ocorrer um FS menor do que a unidade. Esse valor pode ser estimado utilizando o método Monte Carlo a partir da equação 2.15 a seguir (Li *et al.* 2013):

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I \left[\min_{i=1,2,\dots,n} FS_i(x) \leq 1 \right] \quad (2.15)$$

Onde N é o número total de eventos simulados pelo método Monte Carlo; I é uma função indicadora que retornará o valor unitário caso $\min_{i=1,2,\dots,n} FS_i(x) \leq 1$, indicando a ruptura. Caso contrário, a função retornará zero apontando estabilidade no evento i ; P_f será dado pela razão entre o número de eventos em que ocorre a ruptura e o número total de eventos. Caso o cálculo de probabilidade de ruptura seja igual à zero ($P_f = 0$), por exemplo, significa que não existe probabilidade de ruptura desse talude.

O cálculo da probabilidade de ruptura (P_f) envolve repetidas avaliações do FS, utilizando um método determinístico (e.g. MEL, MEF) pré-definido. Portanto, a precisão do cálculo da P_f está diretamente associada ao número total de eventos simulados (N). Após realizadas todas as simulações necessárias é gerado um histograma representando a

função densidade de probabilidade (FDP) do FS, o qual será um importante dado para a análise de confiabilidade.

A segurança, também pode ser apresentada em termos de índice de confiabilidade (β), o qual é definido como a distância entre o valor médio do fator de segurança e o valor limite para a ocorrência da ruptura ($FS < 1$), expresso em unidades de desvio padrão do fator de segurança, conforme a equação a seguir:

$$\beta = \frac{E[FS]-1}{\sigma[FS]} \quad (2.16)$$

Onde, $E[FS]$ e $\sigma[FS]$ são a média e desvio padrão do FS, respectivamente (assumindo que FS é normalmente distribuído).

Os valores de probabilidade de ruptura, a variação do fator de segurança e o índice de confiabilidade (β) são valores utilizados para a análise de confiabilidade, a qual proporciona critérios mais completos para tomadas de decisões (El-Ramly, 2001).

2.5 Análises de Confiabilidade e Probabilidade de Ruína

Apesar de vários estudos e desenvolvimento de vários métodos recentes relacionados a análises probabilísticas de estabilidade de taludes utilizando o método Monte Carlo, na prática profissional essa abordagem ainda não é adotada em projetos geotécnicos, principalmente em problemas tradicionais como taludes (Griffiths *et al.*, 2009). As normas brasileiras vigentes utilizam somente a abordagem determinística, por meio da adoção de valores bases de FS. Portanto, para utilizar adequadamente os resultados de análises probabilísticas é essencial entender o significado dos valores calculados de probabilidade de ruptura (P_f) e índice de confiabilidade (β).

Uma situação de alto risco pode decorrer de alto valor de probabilidade de ruptura, ou de consequências catastróficas com a ruptura, ou os dois juntos (El-Ramly, 2001).

É importante perceber que o termo ruptura, traduzido do inglês “*probability of failure*”, sugere que o colapso total do talude é a única preocupação, e isso não é necessariamente o caso. Outros problemas como erosão superficial, surgimento de fissuras, alto fluxo de água, também estão incluídos. O termo probabilidade de desempenho insatisfatório pode ser abordado para diminuir esse efeito.

É importante perceber que mudanças temporais nos parâmetros de entrada não são levadas em consideração no cálculo da probabilidade de ruptura (El-Ramly, 2002).

A Tabela 2.4 indica os limites de risco admissíveis propostos por Whitman (1984), associados às perdas de vidas e prejuízo financeiro em dólares. Para taludes de barragens, tem-se um valor de probabilidade de ruptura aceitável da ordem de 10^{-4} ($P_f < 1 \times 10^{-4}$), enquanto que o determinado para taludes de mineração é $P_f < 1 \times 10^{-1}$. De forma análoga, o *US Corps of Engineers* (1997) recomenda de forma geral, valores de probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade, para um "bom" desempenho, de 3×10^{-5} e 4,0 respectivamente. Para desempenhos "acima da média" tem-se $P_f = 1 \times 10^{-3}$ e $\beta = 3$. El-Ramly (2001) definiu os valores de probabilidade de ruptura igual a 2×10^{-2} e confiabilidade igual a 2 como aceitáveis.

Tabela 2.4 Níveis toleráveis de riscos (Adaptado da Figura de Silva, Lambe, e Marr, 2008)

Tipo de Obra de Engenharia	Valores Aceitáveis de P_f	Perdas de Vidas	Prejuízo em Dólares (\$)
Talude de Mineração	1×10^{-1}	1×10^{-1}	1×10^4 a 1×10^5
Fundações	1×10^{-2} a 1×10^{-3}	1×10^0	1×10^5 a 1×10^6
Plataformas fixas de Petróleo	1×10^{-3}	1×10^1	1×10^6 a 1×10^7
Barragens	1×10^{-4} a 1×10^{-5}	1×10^2	1×10^7 a 1×10^8

Apesar de existir na literatura vários exemplos de aplicações e estudos de casos reais de análises probabilísticas em estabilidade de taludes, o valor de probabilidade de ruptura é difícil de ser estimado de forma genérica, isto é, normalizar valores para casos gerais. Porém, esse fato não representa motivo suficiente para não tratar a análise de estabilidade de taludes com uma abordagem probabilística. Análises desse tipo já provou ser uma ferramenta muito útil para computar incertezas e quantificar a confiabilidade.

Depois de calcular a probabilidade de ruptura, o próximo passo é estimar qual valor seria aceitável para o caso. Esse valor pode ser ajustado através de comparações com valores propostos na literatura (e.g. Whitman, 1984; *US Corps of Engineers*, 1997; El-Ramly, 2001). Essas comparações dependerão das condições do problema envolvido, o tipo de talude, consequências e riscos envolvidos e principalmente as incertezas inerentes aos parâmetros de resistência utilizados nas análises.

Pequenos valores de coeficiente de variação (CV) representam baixos valores de probabilidade de ruptura, isto é, uma baixa variação nas propriedades do solo proporciona alta confiabilidade. Dessa forma, FS adotados convencionalmente ($FS = 1,5$) em um talude que possui coeficiente de variação alto (e.g. $CV = 0,4$) apresentará alta probabilidade de ruptura. Esse fato mostra que soluções baseadas no método determinístico são inapropriadas para situações de alto risco, ou seja, que exigem baixos valores de probabilidade de ruptura. Portanto, é necessária maior investigação dos parâmetros dos solos, para obter menores coeficientes de variação (Lim *et al.* 2017).

Para a aplicação do método Monte Carlo, é possível escolher apenas alguns parâmetros para tratá-los como variáveis aleatórias. Essa decisão depende da variação desses valores e a influência dos mesmos no resultado da probabilidade de ruptura. Isso pode ser verificado através de uma análise de sensibilidade.

Para empregar o método Monte Carlo, é necessário definir as funções densidade de probabilidade (FDP) relacionada às variáveis aleatórias (os parâmetros de entrada), assim como determinar média e desvio-padrão dessas distribuições. As distribuições mais utilizadas para esse propósito são a do tipo normal (e.g. Jahanfar *et al.*, 2017; Xu e Low, 2006; Christian *et al.*, 1994;) e a do tipo lognormal (e.g. Jiang *et al.*, 2014; Li *et al.* 2015; Li *et al.* 2016; Li, Wang e Cao 2014; Griffiths *et al.*, 2009). Outra alternativa é assumir que a variabilidade dos parâmetros de entrada assumirá uma função densidade de probabilidade do tipo triangular, em que os valores de mínimo, máximo e da média serão estimados baseados na consideração de um especialista (El-Ramly, 2002). Ao especificar uma FDP, é necessário garantir que a distribuição preserve os limites físicos do parâmetro modelado (apenas valores positivos). Dessa forma, geralmente a função lognormal é adotada, pois não permite valores negativos. Outra solução comumente adotada é o truncamento da função normal.

Ozelim *et al.* (2015) realizaram um estudo estatístico por meio de um conjunto de dados de porosidades de um material granular, com o objetivo de encontrar a distribuição que melhor se ajusta a esses dados. Sete distribuições estatísticas bem conhecidas (e.g. Singh-Maddala, Normal, Logística, Cauchy, T de Student, Dagum e Log-logística) foram analisadas e ajustadas, por meio do software *Mathematica 9*, para melhorar caracterizar a porosidade como variável aleatória. É importante ressaltar que dentre essas distribuições somente Singh-Maddala, Dagum e Log-logística preservam os limites dos parâmetros geotécnicos. Depois disso, utilizando relações empíricas entre a porosidade e o ângulo de atrito de materiais granulares, a distribuição do ângulo de atrito foi determinada. A Figura

2.5 apresenta os histogramas, a FDP e a função de densidade acumulada do ângulo de atrito, utilizando as distribuições Singh-Maddala e Normal.

Como principais conclusões, esse estudo estabeleceu que dentre todas as distribuições analisadas, a distribuição Normal não é a melhor forma de modelar dados desse tipo, devido à simetria sobre a média. Para os dados utilizados, as distribuições com melhor ajuste foram a Singh-Maddala, seguida de Dagum, as quais são raramente aplicadas em situações de engenharia. Nos casos em que não existem muitas informações a respeito sobre as variáveis aleatórias, a distribuição Normal será a única forma de conduzir uma avaliação probabilística de risco, ou em casos em que os dados são simétricos em relação à média. Portanto, apesar de não representar a melhor FDP, o uso da distribuição Normal não deve ser descartado para modelar problemas da engenharia geotécnica. Deve-se entender quando essa consideração é válida e a favor da segurança.

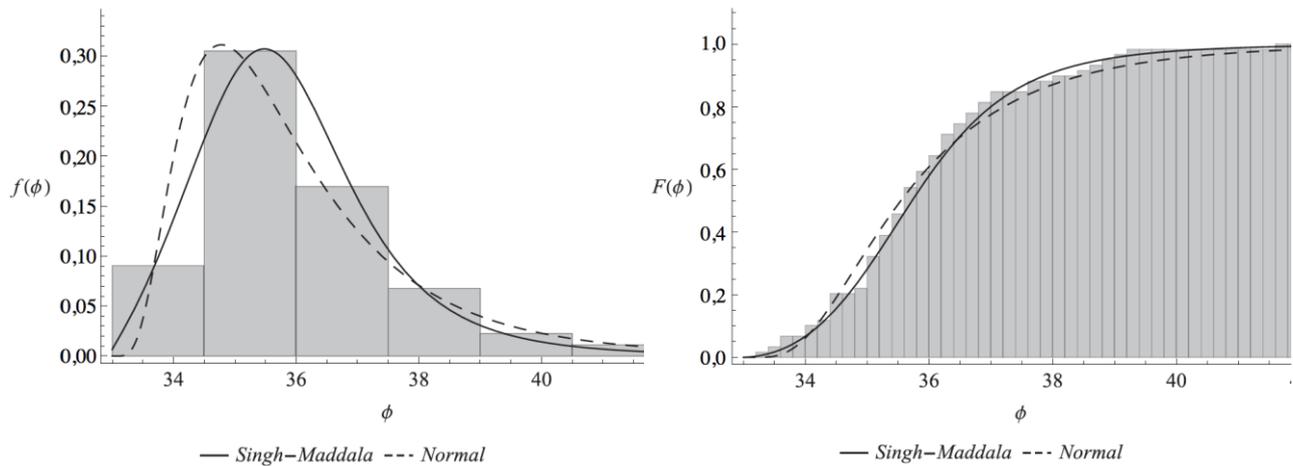


Figura 2.5 - Histogramas, função densidade de probabilidade e a função de densidade acumulada do ângulo de atrito (variável aleatória), utilizando as distribuições Singh-Maddala (linha cheia) e Normal (linha tracejada). Traduzido de Ozelim *et al.*, 2015.

Nenhuma consideração foi feita a respeito da FDP lognormal, a qual demonstrou ser uma distribuição muito utilizada para problemas dessa natureza (Ozelim *et al.*, 2015).

O método MC quando comparado com outros métodos, tais como: *First Order Second Moment* (FOSM), *First Order Reliability Method* (FORM), *Response Surface Method* (RSM), *Second Order Reliability Method* (SORM), possui algumas vantagens. Primeiramente é um método robusto e conceitualmente simples (Li *et al.*, 2015). Como resultado, o método Monte Carlo fornece a forma da distribuição de probabilidade do fator de segurança e a complexidade das análises não aumenta proporcionalmente ao número de parâmetros de entrada (El-Ramly, 2001). Porém o método Monte Carlo possui baixa

eficiência em níveis de baixas probabilidades, o que é de interesse particular na prática de engenharia de taludes (Jiang *et al.*, 2014). Na literatura vários métodos baseados no método Monte Carlo foram propostos (e.g. Li *et al.* 2014; Li *et al.* 2017; Jiang *et al.* 2014; Li e Chu, 2016; Li, Wang e Cao 2014). O número mínimo recomendado de iterações para gerar as amostras aleatórias varia de 10^3 a 10^6 , a depender do nível de incertezas, do caso e do método. Como a probabilidade de ruptura é obtida através da frequência do $FS < 1$, quanto maior o número de iterações, melhor será a acurácia do valor estimado (Lim *et al.*, 2017), porém menor a eficiência e rapidez na resolução do problema.

2.6 Estudos de Caso - Estabilidade de Taludes

El-Ramly (2001) propôs, um método de análise probabilística de estabilidade de taludes baseado em simulações de Monte Carlo de forma prática. Nesse estudo, os métodos determinísticos utilizados foram Bishop e Spencer. Com o objetivo de fornecer uma orientação relacionada à probabilidade de ruptura e o desempenho de taludes, os resultados do método proposto foram calibrados e comparados com 13 estudos de caso conhecidos na literatura. Esses casos haviam sido calculados anteriormente, somente por métodos determinísticos combinado com o discernimento do projetista. Os resultados para todos os casos analisados nesse estudo estão resumidos nas Figuras 2.6.a e 2.6.b. É possível identificar os taludes com baixo desempenho, ou comprometidos, e os taludes seguros. A Figura 2.6.a mostra o gráfico $FS \times$ Índice de confiabilidade (β) para todos os casos analisados. Observa-se que os taludes com baixo desempenho apresentam índices de confiabilidade menores do que 0,8 ($\beta < 0,8$), enquanto que os taludes seguros possuem índice de confiabilidade mínimo de 1,8 e na maioria dos casos maiores do que 2,0. Através desse gráfico, nota-se também que quanto maior o índice de confiabilidade, menores serão os valores de probabilidade de ruptura. Assim, o valor mínimo de índice de confiabilidade igual a 2,0 representa um critério razoável para os casos estudados.

Através da Figura 2.6.b (gráfico $FS \times P_f$), constata-se que a probabilidade de ruptura dos taludes considerados seguros é menor do que 2×10^{-2} (i.e. $P_f < 2\%$). Conforme o FS apresenta valores menores do que 1,3, a probabilidade de ruptura aumenta bruscamente. Portanto, para os casos estudados o valor de $P_f < 2\%$ marca o limite aceitável em termos de desempenho em estabilidade de taludes.

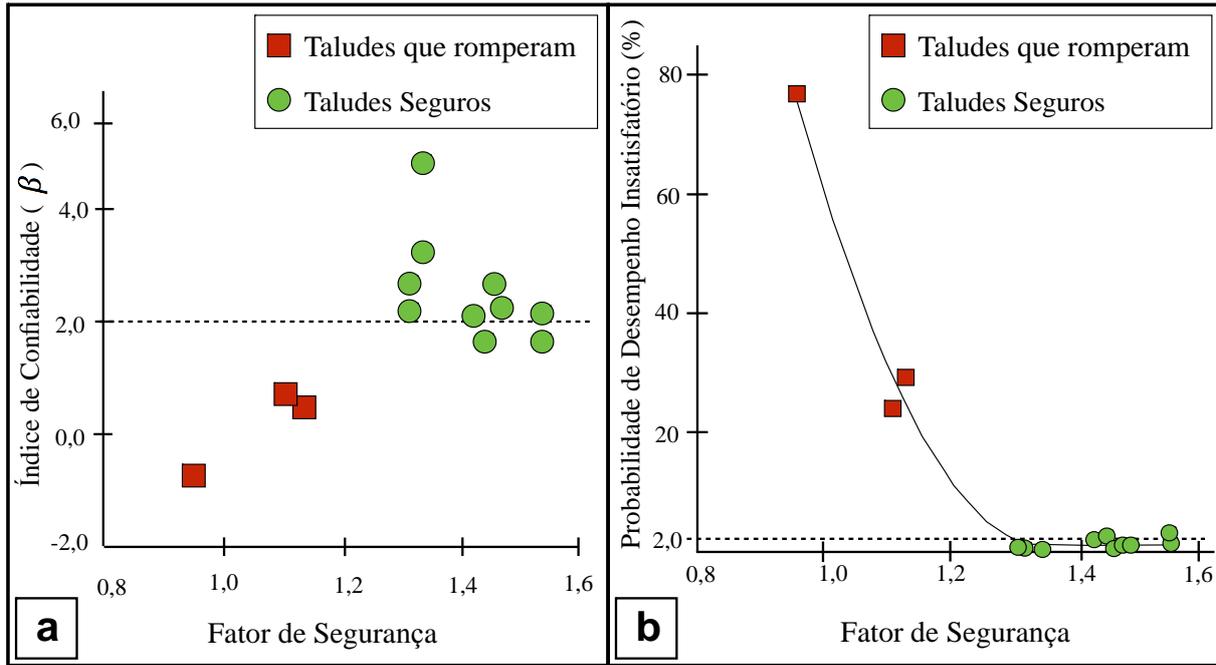


Figura 2.6.a) Índice de Confiabilidade x Fator de segurança para taludes seguros x taludes que romperam; b) Probabilidade de ruptura x Fator de segurança para taludes seguros e taludes que romperam (Traduzido de El-Ramly, 2001).

Jahanfar *et al.* (2017) apresentaram uma abordagem probabilística de análise de estabilidade de taludes, através da retroanálise de 4 casos de rupturas bem documentadas em aterros sanitários e lixões (Sarajevo 1977, Istambul 1993, Rumpke 1996 e Durban 1997). Vale ressaltar que para aterros sanitários e lixões, os parâmetros geotécnicos dependem diretamente da composição do lixo e às práticas de compactação desse material. O parâmetro R_u , descrito como a razão de poropressão de água pela pressão normal total também foi analisado, pois trata-se de um dado importante para caracterização. Para cada caso estudado foi atribuído uma classe de lixo, isto é, classes I, II, III e IV, baseado no efeito da compactação e composição dos parâmetros geotécnicos.

Jahanfar *et al.* (2017) utilizaram simulações de Monte Carlo, associadas ao método de Morgenstern-Price, por meio do programa *SLOPE/W*. Foram atribuídas distribuições probabilísticas aos parâmetros de entrada (peso específico, coesão e ângulo de atrito) e como resultado obteve-se a distribuição de probabilidade do FS. A Figura 2.7 mostra a análise de sensibilidade, isto é, a porcentagem relativa à contribuição dos parâmetros geotécnicos na variação do FS para os quatro casos estudados. Concluiu-se que a contribuição do parâmetro R_u é grande na variação do FS para os casos de Rumpke, Sarajevo e Durban. No tocante à coesão e ângulo de atrito, nas rupturas de Rumpke e Sarajevo, o parâmetro que mais contribuiu para a variação do FS foi o ângulo de atrito. No

caso de Durban e Istambul foi a coesão. Isso pode ter ocorrido, pois o material com alto teor de material fibroso (Rumpke e Sarajevo) se comporta como solo arenoso, ao passo que materiais com matéria orgânica são coesivos. A distribuição normal foi a que melhor se adaptou à coesão e ângulo de atrito, para os aterros considerando todos os quatro tipos de classes de material.

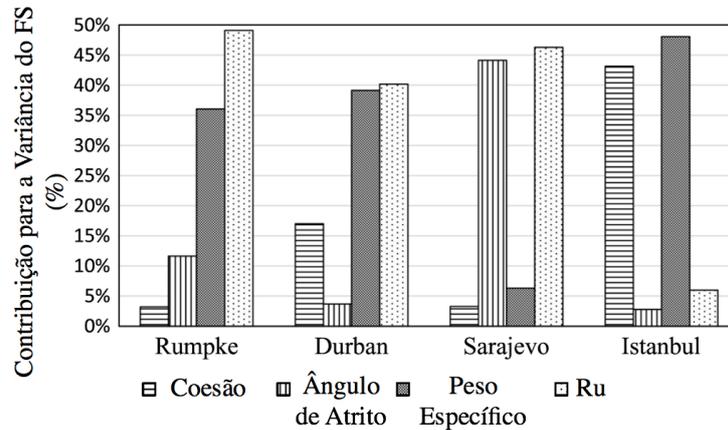


Figura 2.7 – Análise de Sensibilidade - contribuição de diferentes parâmetros para a variância do FS. Traduzido de Jahanfar *et al.*, 2017

O exemplo de aplicação demonstrado conforme Lim *et al.* (2017), ilustra bem o fator de segurança associado à probabilidade de ruptura. Nesse caso foram adotados os parâmetros: $\alpha = 30^\circ$, Altura $H = 5\text{m}$, peso específico médio $\gamma = 18\text{ kN/m}^3$, $d/H = 2$, resistência não drenada média $c_{u1} = 50\text{ kN/m}^2$ e razão $c_{u1}/c_{u2} = 4$ (Figura 2.8).

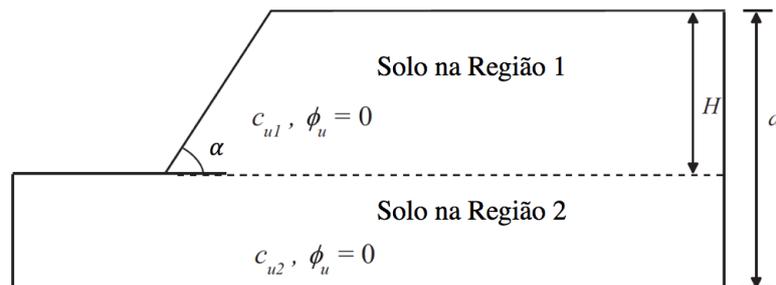


Figura 2.8 - Configuração do problema exemplificado. Traduzido de Lim *et al.*, 2017.

Os valores de FS foram calculados com base numa $P_f = 0,0001$ (valor normalmente adotado para barragens de terra). Nota-se que para um $CV = 0,1$ adotado para ambos, c_{u1} e c_{u2} , tem-se uma probabilidade de ruptura de 5 em 1.000 ($P_f = 0,005$). Percebe-se ainda que uma probabilidade de ruptura de 2 em 10 pode ser obtida se c_{u1} e c_{u2} apresentarem $CV = 0,2$ e $CV = 0,4$ respectivamente. Isso mostra que um talude com um $FS = 1,2$, poderá representar uma alta probabilidade de ruptura a depender do grau de

incerteza das propriedades do solo. A Tabela 2.5 mostra as probabilidades de ruptura calculadas para diferentes coeficientes de variação da resistência não drenada dos materiais. Uma maior investigação das propriedades de resistência do solo resultará em menores CV e conseqüentemente menores riscos e maiores benefícios. Esse fato pode ser verificado com a variação da altura máxima do projeto do talude (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 Resultados de cálculo de probabilidade de ruptura para diferentes coeficientes de variação de resistência não drenada do material (c_u). Traduzido de Lim *et al.*, 2017.

c_{u1} CV	c_{u2} CV	P_f (baseado em $F = 1,2$)	FS (baseado em $P_f = 0,0001$)	H (Permitido)
0,1	0,1	0,005	1,4	4,4
	0,2	0,08	1,6	3,8
	0,3	0,1	1,7	3,6
	0,4	0,18	1,8	3,4
0,2	0,1	0,01	1,4	4,4
	0,2	0,1	2	3,1
	0,3	0,18	2,4	2,5
	0,4	0,23	2,7	2,3

CAPÍTULO 3

Descrição e Caracterização Geral da Área de Estudo

3.1 Caracterização da Área de Estudo

3.1.1 Visão geral - Litoral Oriental do RN

A diversidade das características de uma determinada região, sobretudo referentes à geologia da área e as propriedades de resistência dos materiais, exercem influência direta no entendimento dos processos erosivos e movimentos de massa.

O litoral oriental do RN apresenta direção Norte-Sul, limitando-se ao sul pelo Rio Sagi (município de Baía Formosa) e ao norte pelo Cabo Calcanhar, no município de Touros (Muehe, 2006; Amaro *et al.*, 2012). Este setor possui 166 km de extensão total, distribuídos em 101 km (61%) de praias arenosas planas e estreitas e 65 km (39%) de falésias ativas da Formação Barreiras (Muehe, 2006).

Por todo o litoral oriental do RN, os elementos de relevo predominantes são as planícies, os campos de dunas e os tabuleiros costeiros. Além disso, observa-se também a presença de linhas de recifes de arenitos (*beachrocks*), aproximadamente paralelas a linha de costa, que alteram o padrão de arrebentação das ondas (Muehe, 2006). Os Tabuleiros Costeiros (Chapadões), compostos pela Formação Barreiras, produzem falésias de até 60m de altura. A superfície desses Tabuleiros Costeiros foi formada da deposição sedimentar da Formação Barreiras, a partir do período Mioceno, até o Plioceno. A Formação Barreiras é composta principalmente por arenitos finos a médios, ou conglomeráticos, avermelhados, com intercalações sílticas, argilosa e caulíníticas; por vezes síltico-argilosos e argilitos depositados em ambiente aluvial (Diniz, 2002; Piérri, 2008).

Diferentes trechos foram estudados ao longo do litoral oriental do RN, destacando-se as áreas com ocupação humana, Tibau do Sul (Scudelari *et al.*, 2005; Santos Jr. *et al.*, 2006; Severo, 2005; Severo 2011; Ribeiro, 2015; Silva *et al.*, 2016; Taquez *et al.*, 2016), Baía Formosa (Souza Júnior, 2013), Pirangi do Norte (Nascimento, 2009), bem como a

Barreira do Inferno (Barbosa, 2017; Taquez, 2017) a qual apresenta-se livre de interferências antrópicas. A Figura 3.1 mostra a localização do litoral oriental do RN, com destaque para as principais regiões estudadas na porção sul e a área foco do presente estudo (praia de Barra de Tabatinga).

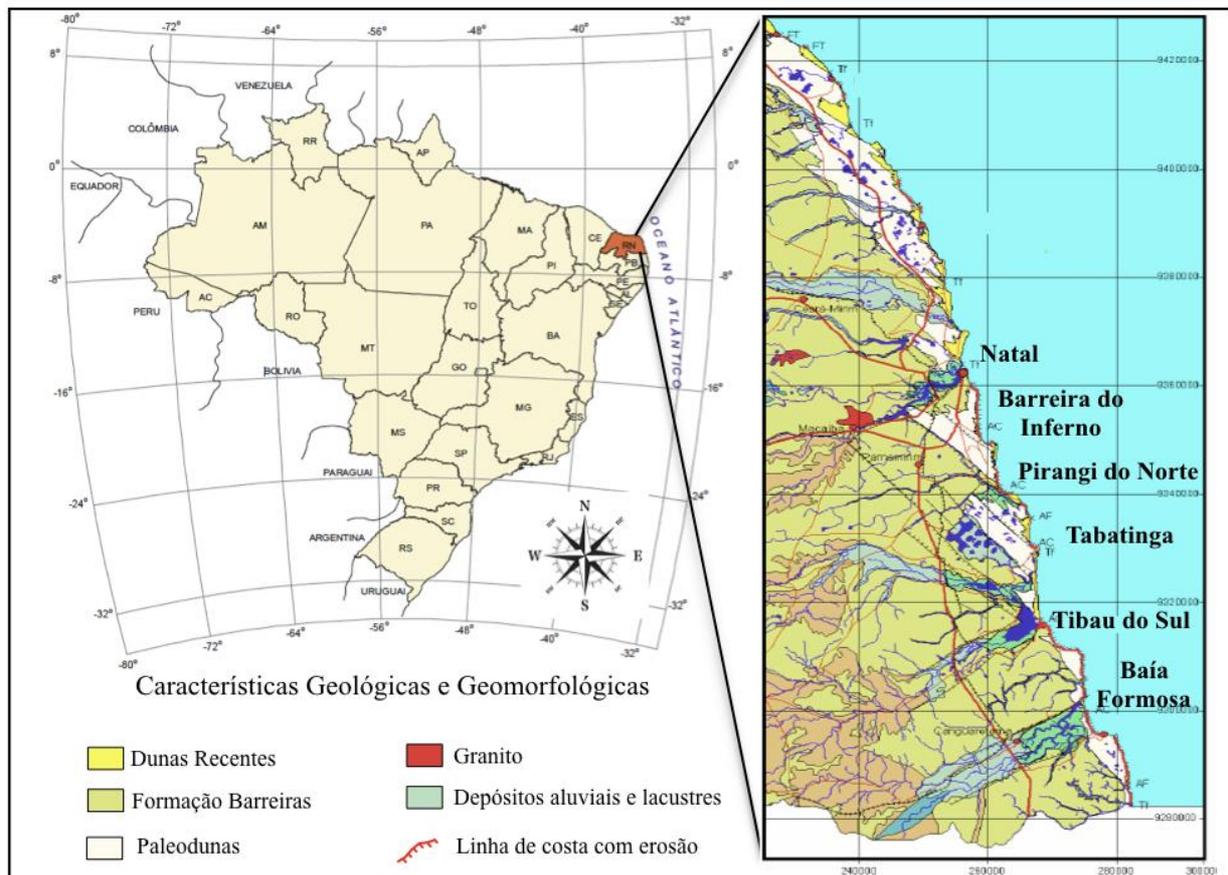


Figura 3.1 – Falésias da Praia de Barra de Tabatinga/RN (Adaptado de Diniz, 2002).

3.1.2 Praia de Barra de Tabatinga/RN

A praia de Barra de Tabatinga, área de estudo desta pesquisa, está situada no município de Nísia Floresta a aproximadamente 30 km de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte. A área é composta predominantemente por praias e falésias ativas (em contato direto com o mar) da Formação Barreiras.

Um dos principais motivos para a escolha da área de trabalho foi a identificação de ocorrência de movimentos de massa nas falésias. Inclusive, foi constatada uma ruptura de grandes proporções no trecho estudado. Dessa forma, foram realizadas análises de estabilidade das falésias, mediante diferentes premissas. Adicionalmente, foram executadas retroanálises para avaliar as condições sob as quais ocorreu essa ruptura de grandes proporções nas falésias.

Inicialmente, toda a área foi percorrida para o reconhecimento geral da linha de costa. O trecho em falésias estende-se por uma faixa de aproximadamente 1,0km ao longo da praia de Tabatinga. Em seguida, realizou-se um levantamento fotográfico aéreo através de drone do tipo *DJI Mavic Pro* (Figura 3.2). Com o objetivo de identificar melhor a ocupação do solo e áreas vegetadas, parte das fotos realizadas foi obtida de cima das falésias, a aproximadamente 160m acima do nível do mar. Além disso, informações como altura média das falésias, perfis típicos e críticos, morfologia, estratigrafia da formação e reconhecimento dos processos erosivos foram adquiridos por meio de imagens frontais às falésias (10m a 80m de altura acima do nível do mar). Ressalta-se que o drone utilizado possui instrumentos de precisão para medição da altura do voo (barômetro) e distância percorrida (GPS).



Figura 3.2 – Drone DJI Mavic Pro utilizado para a fotogrametria da praia de Barra de Tabatinga/RN.

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram de forma esquemática o trecho percorrido pelo drone. O trajeto foi executado do ponto um ao ponto seis (Figura 3.3 e 3.4). O trecho foi dividido em seis posições diferentes, com o intuito de identificar melhor espacialmente as imagens. Para conclusão dessa etapa foi necessário à realização de três voos de reconhecimento de aproximadamente vinte minutos cada. As coordenadas aproximadas das seis posições (latitude e longitude) estão apresentadas na Tabela 3.1 seguir.

Tabela 3.1. Coordenadas geográficas das seis posições notáveis do trajeto executado pelo drone.

Pontos (Posições)	Latitude	Longitude
1	6°02'59.3"S	35°06'34.3"W
2	6°03'11.3"S	35°06'26.9"W
3	6°03'16.0"S	35°06'19.2"W
4	6°03'20.9"S	35°06'14.0"W
5	6°03'24.4"S	35°06'05.8"W
6	6°03'20.4"S	35°06'00.1"W

De forma geral, as Figuras 3.5 a 3.26 evidenciam uma ocupação do solo relacionada, sobretudo a residências, estabelecimentos comerciais e empreendimentos turísticos como restaurantes e pousadas, muitas vezes localizadas próximas do limite das falésias. A densidade da vegetação varia ao longo de todo o trecho.

Nas Figuras 3.5 e 3.6 se observa o início do trecho (ponto 1), onde é possível perceber as dunas do lado direito da imagem e a vegetação rasteira com a presença de coqueiros no topo das falésias.



Figura 3.3 – Percurso percorrido pelo Drone DJI Mavic Pro. Identificação dos pontos numerados de 1 a 6 vistos de cima. Trecho em falésias de aproximadamente 1,0km localizado na praia de Tabatinga/RN (Imagem retirada do Google Maps).

A Figura 3.7 mostra que a via de acesso às praias do litoral sul (RN-063), se encontra próxima à borda das falésias. Essa característica se estende por cerca de 600m.



Figura 3.4 – Percurso percorrido pelo Drone *DJI Mavic Pro*. Identificação dos pontos numerados de 1 a 6, visto de frente. Trecho em falésias de aproximadamente 1,0km localizado na praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

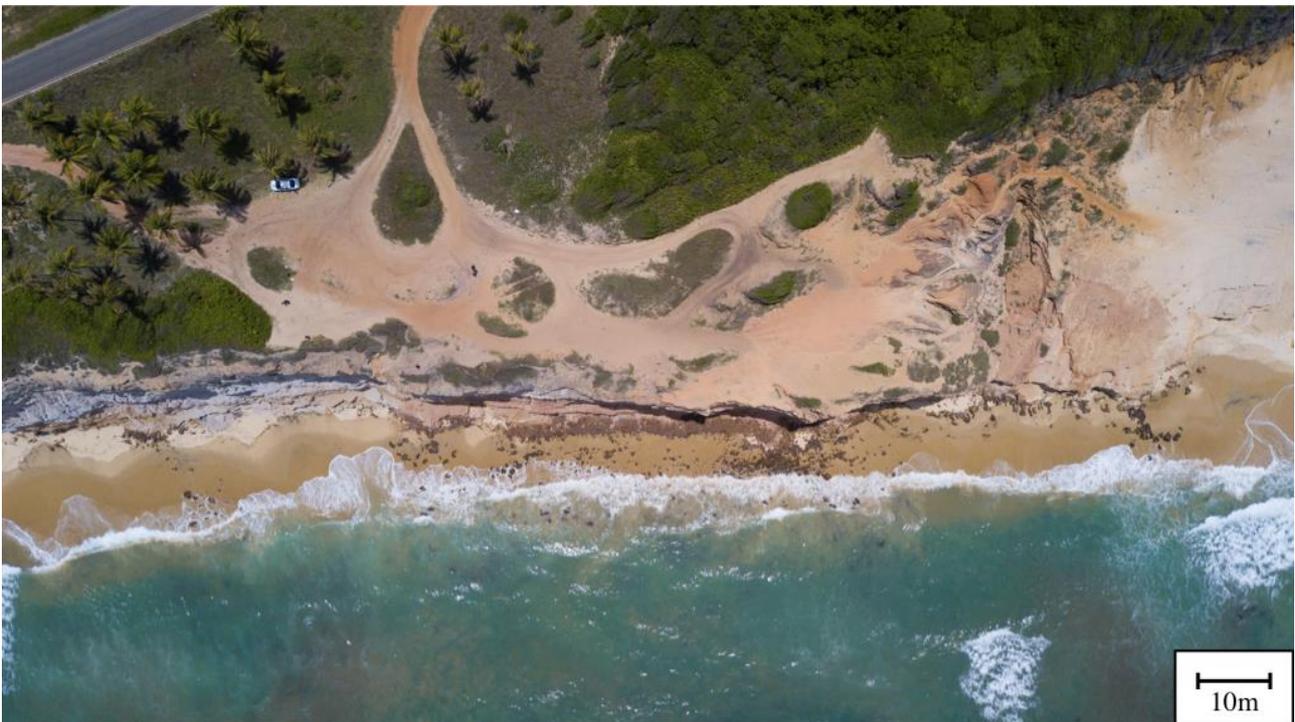


Figura 3.5 – Foto de cima do início do trecho em falésias localizada no **PONTO 1** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.6 – Foto frontal do início do trecho em falésias localizada no **PONTO 1** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

A Figura 3.8 evidencia o perfil típico da área de estudo, cuja inclinação é de aproximadamente 90° , três camadas diferentes e sedimentos de arenitos com cimentação ferruginosa na base atuando como proteção do talude. Essa proteção natural é resultante principalmente dos movimentos de massa anteriores ocorridos no material da Formação Barreiras.



Figura 3.7 – Foto de cima do trecho em falésias localizada no **PONTO 2** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.8 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 2** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

A Figura 3.9 expõe a continuação da via de acesso próxima ao limite das falésias.

A Figura 3.10 revela a ocorrência de um movimento de massa de grandes proporções, próxima a um estabelecimento comercial.



Figura 3.9 – Foto de cima do início do trecho em falésias localizada no **PONTO 2** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.10 – Foto frontal do trecho em falésias localizada entre o **PONTO 2 E 3** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

As Figuras 3.11 e 3.12 mostram a distância do estabelecimento comercial até a borda da falésia. Percebe-se ainda, a coloração diferente da falésia na área da ruptura.



Figura 3.11 – Foto de cima do trecho em falésias localizada no **PONTO 3** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.12 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 3** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

Percebe-se que a ruptura de grandes proporções ocorreu no ponto 3 (Figura 3.4). Esse movimento de massa foi analisado através de retroanálises probabilísticas, com o objetivo de avaliar as condições geotécnicas, sob as quais a ruptura ocorreu.

A Figura 3.13 aponta o movimento de massa de outro ângulo, nesse trecho crítico. Observa-se o remanescente de uma escada de acesso à praia, provavelmente atingida por outros movimentos de massa no local.

A Figura 3.14 explicita mais um trecho crítico. Constata-se, do lado esquerdo da imagem, a presença de estabelecimentos comerciais situados no extremo limite das falésias. As Figuras 3.15 e 3.16 mostram o trecho crítico visto de frente.



Figura 3.13 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 3** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

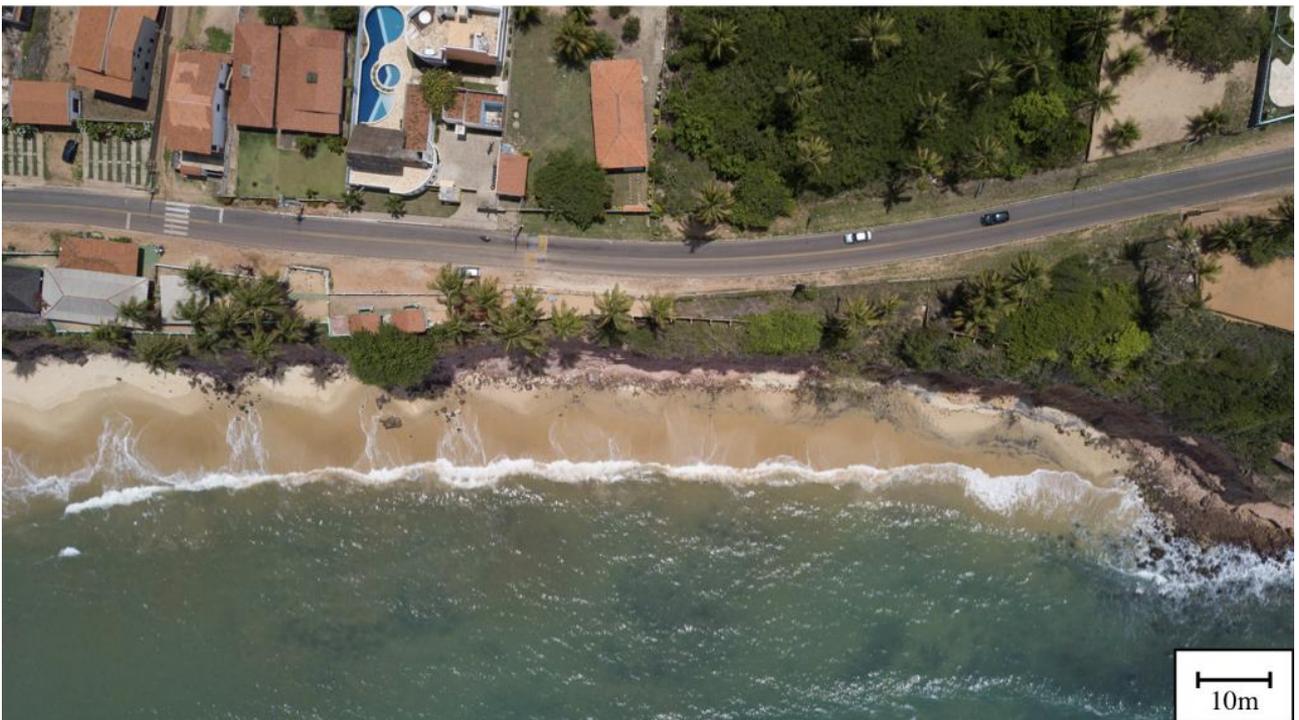


Figura 3.14 – Foto de cima do trecho em falésias localizada no **PONTO 4** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.15 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 4** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.16 – Foto frontal do trecho em falésias localizada entre o **PONTO 4 E 5** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

A Figura 3.17 representa o final do trecho em que a RN-063 se encontra próxima à borda das falésias. A Figura 3.18 exhibe as falésias de frente nessa mesma posição, entre o ponto 4 e 5 (Figuras 3.3 e 3.4).



Figura 3.17 – Foto de cima do trecho em falésias localizada entre o **PONTO 4 E 5** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.18 – Foto frontal do trecho em falésias localizada entre os **PONTOS 4 E 5** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

A partir desse ponto (Figura 3.19), o acesso é realizado por meio de uma rua de barro, a qual se encontra próxima a borda da falésia numa extensão de aproximadamente 160m. Percebe-se áreas mais vegetadas (Figura 3.20) e menor intervenção humana na borda das falésias.

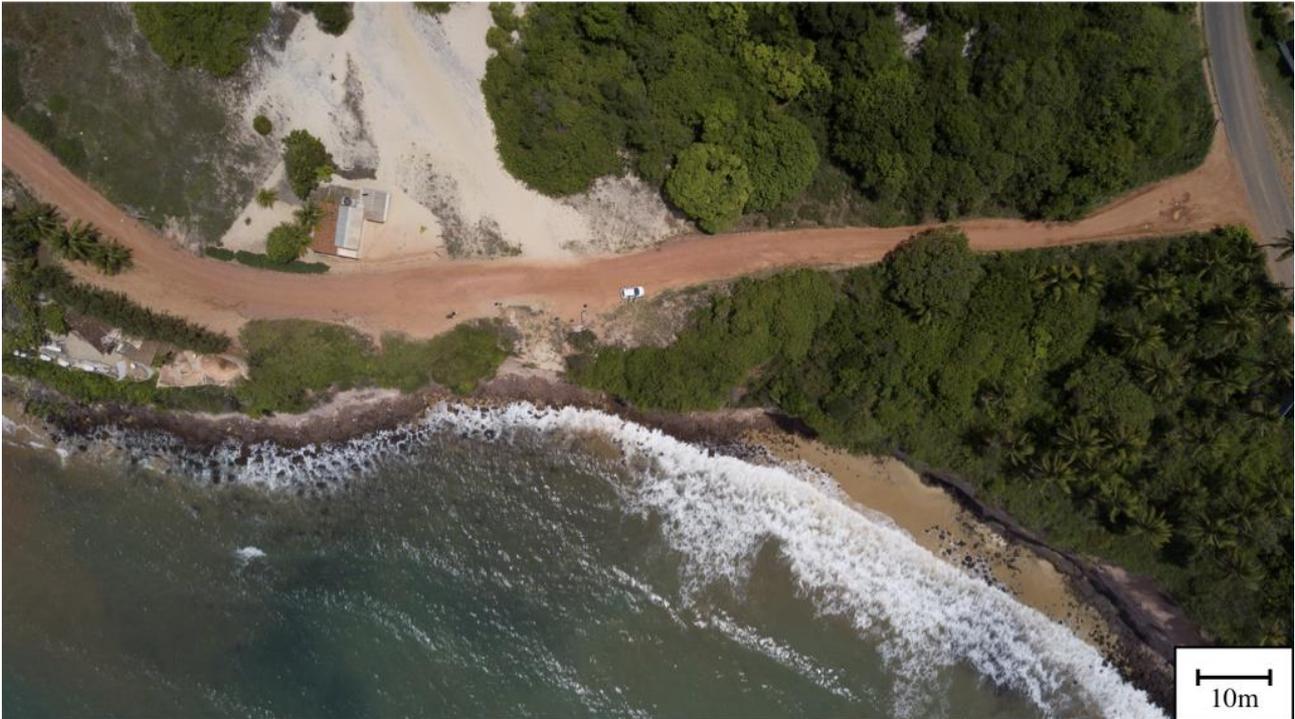


Figura 3.19 – Foto de cima do trecho em falésias localizada no **PONTO 5** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.20 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 5** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

Nas Figuras 3.21 e 3.22, percebem-se algumas casas abandonadas no topo das falésias. É possível notar também a continuação da via de acesso distante do limite das falésias.



Figura 3.21 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 5** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

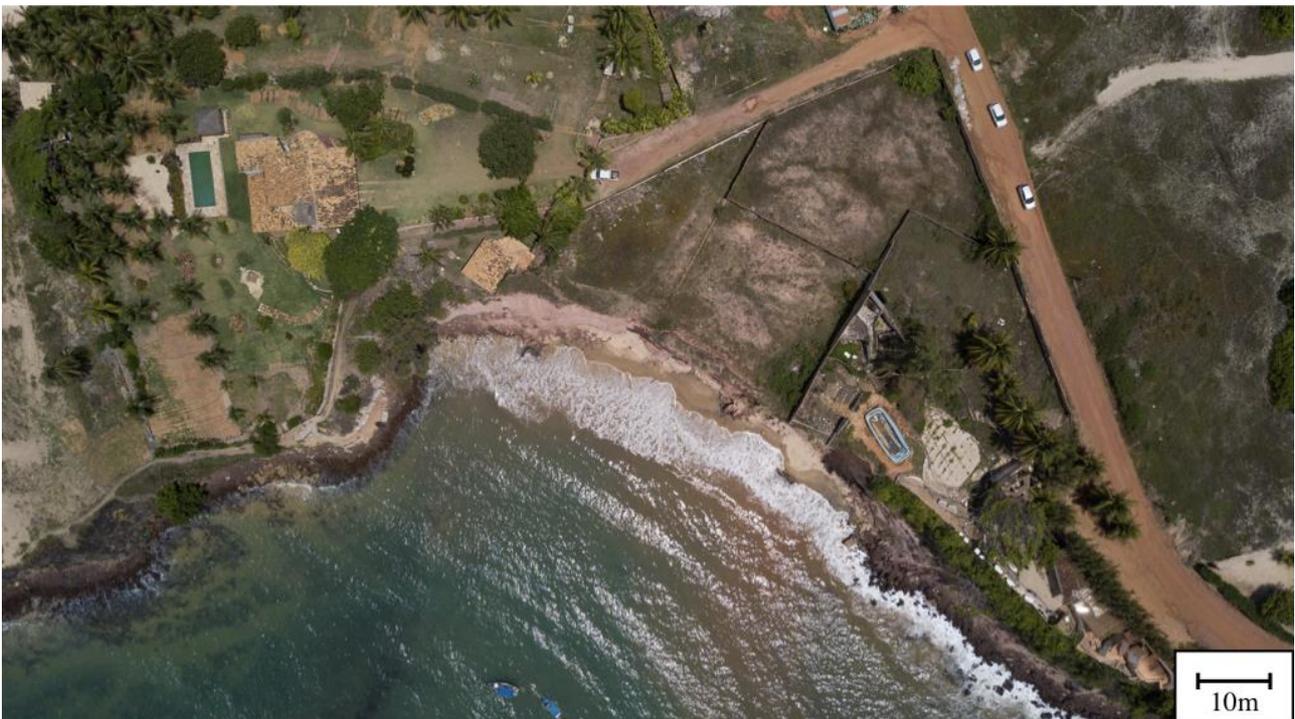


Figura 3.22 – Foto de cima do trecho em falésias localizada no **PONTO 6** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

Nas Figuras 3.23 e 3.24, reaparece a ação antrópica, através principalmente de residências.



Figura 3.23 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 6** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

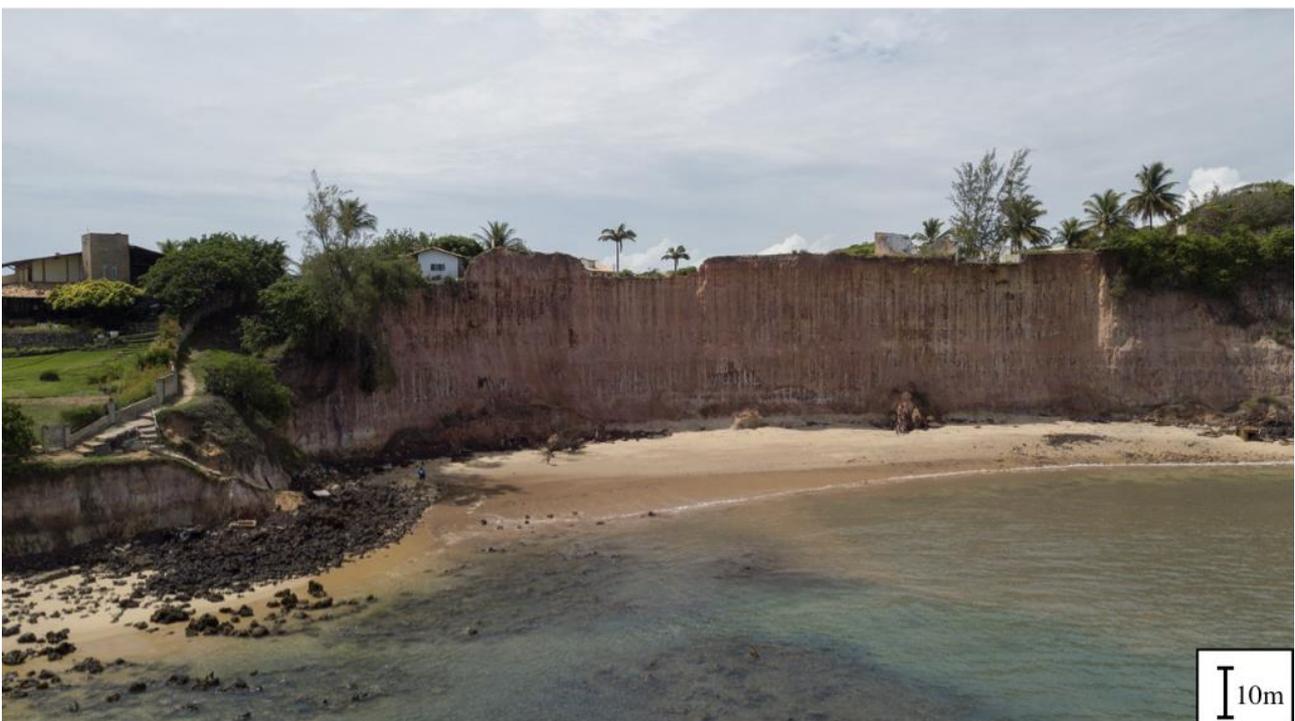


Figura 3.24 – Foto frontal do trecho em falésias localizada no **PONTO 6** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

No final do trecho em falésias (Figuras 3.25 e 3.26), verifica-se acúmulo de sedimentos de arenitos ferruginosos retrabalhados pelas ondas (Severo, 2011) e um número considerável de residências.



Figura 3.25 – Foto de cima do trecho final em falésias localizada no **PONTO 6** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 -Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).



Figura 3.26 – Foto de cima do trecho final em falésias localizada no **PONTO 6** indicado nas Figuras 3.3 e 3.4 -Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

Através do barômetro interno do Drone e do aplicativo de celular (*Barometer*), obteve-se a altura média das falésias da área estudada. A Figura 3.27 mostra as alturas aproximadas de cada camada constituinte da falésia, na posição em que foi observado o movimento de massa de maiores proporções (Figuras 3.10, a 3.13), baseado nos dados obtidos no barômetro. Vale salientar que essas dimensões por camada foram

extrapoladas a partir da análise da imagem. Esse tipo de extrapolação somente é possível devido a inclinação característica das falésias (90°), a qual resulta numa distância horizontal fixa, da lente da câmera até a falésia. Essa investigação auxiliou na definição do perfil das análises de estabilidade probabilísticas. Portanto, esses dados serão tomados como base para a modelagem da análise de estabilidade probabilística das falésias, bem como para a retroanálise dessa ruptura.

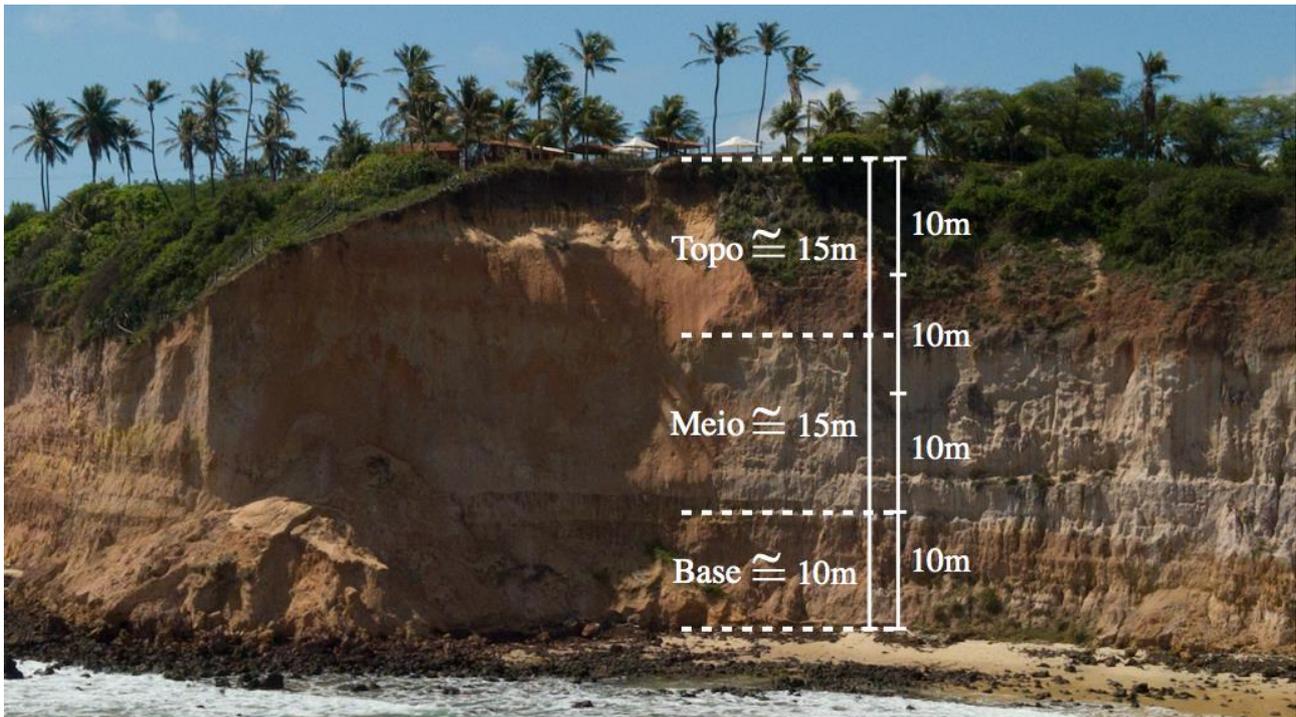


Figura 3.27 – Falésia no ponto da ruptura com indicação da altura total (40m) e as alturas de cada camada constituinte - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

Em geral, as falésias da praia de Barra de Tabatinga/RN se encontram em processo de recuo. Os movimentos de massa observados na área estão diretamente associados à ocorrência de fortes chuvas. As chuvas exercem influência induzindo o aumento do grau de saturação do maciço e conseqüentemente a redução da resistência ao cisalhamento. O aumento do grau de saturação do solo causa a diminuição do intercepto de coesão do solo (parcela referente a sucção matricial), e, portanto, a resistência ao cisalhamento diminui bruscamente (Santos Jr. et al., 2011).

Nas investigações de campo observou-se a formação de sulcos, ravinas e voçorocas, no topo das falésias, por meio da erosão pluvial, sobretudo nas regiões desprovidas de cobertura vegetal. A Figura 3.28 exhibe a formação dessa feição erosiva em campo, vista de cima. Percebe-se a formação de caminhos preferenciais das águas de chuvas (lado esquerdo da indicação na Figura) até chegar ao seu ponto final.



Figura 3.28 – Formação de ravina no topo da falésia, devido a erosão pluvial. Destaque na Figura para os caminhos preferenciais das águas de chuvas até o ponto mais crítico - Praia de Tabatinga/RN (Foto: Daniel Herrera).

Além dessa particularidade, as falésias apresentam fendas de tração, as quais potencializam a ocorrência de movimentos de massa e quedas de blocos. Em episódios de chuvas intensas, essas fendas podem provocar quedas de blocos e tombamentos, principalmente se estiverem preenchidas com água. As Figuras 3.29 e 3.30 mostram blocos na iminência da ruptura. Essas observações são confirmadas segundo as análises realizadas em Taquez *et al.* (2016) e Taquez (2017).

Ressalta-se que o desenvolvimento de fendas de tração é comum tanto na área da pesquisa, quanto em outras áreas em que a Formação Barreiras encontra-se presente. A Figura 3.31 compara a forma de um bloco na iminência de romper na praia de Tabatinga/RN (Figura 3.31.a), com um evento de movimento de massa ocorrido em Tibau do Sul/RN, mais especificamente na praia do Curral (Figura 3.31.b). Provavelmente isso ocorre pelo mesmo padrão de fraturamento dos blocos.

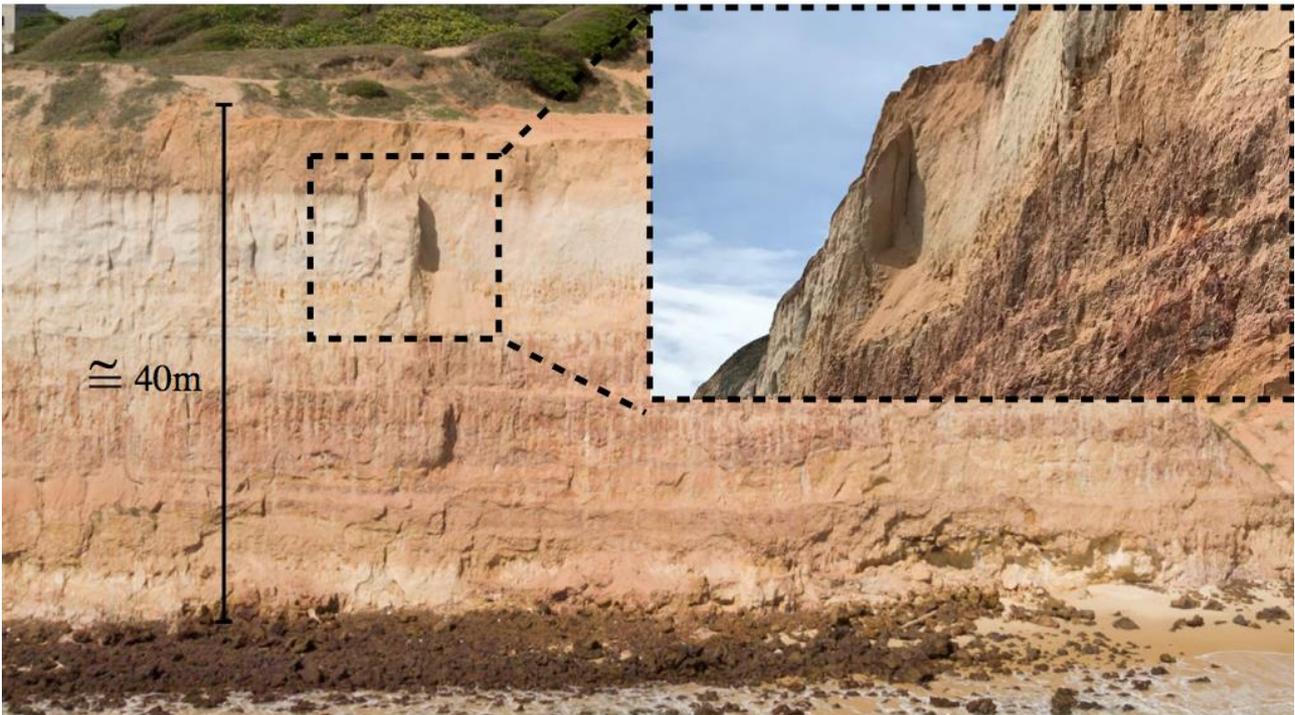


Figura 3.29 – Formação de fendas de tração nas falésia, devido a erosão pluvial. Destaque na Figura para o bloco na iminência de tombar - Praia de Tabatinga/RN (Foto aérea: Daniel Herrera; Foto do bloco: O autor).

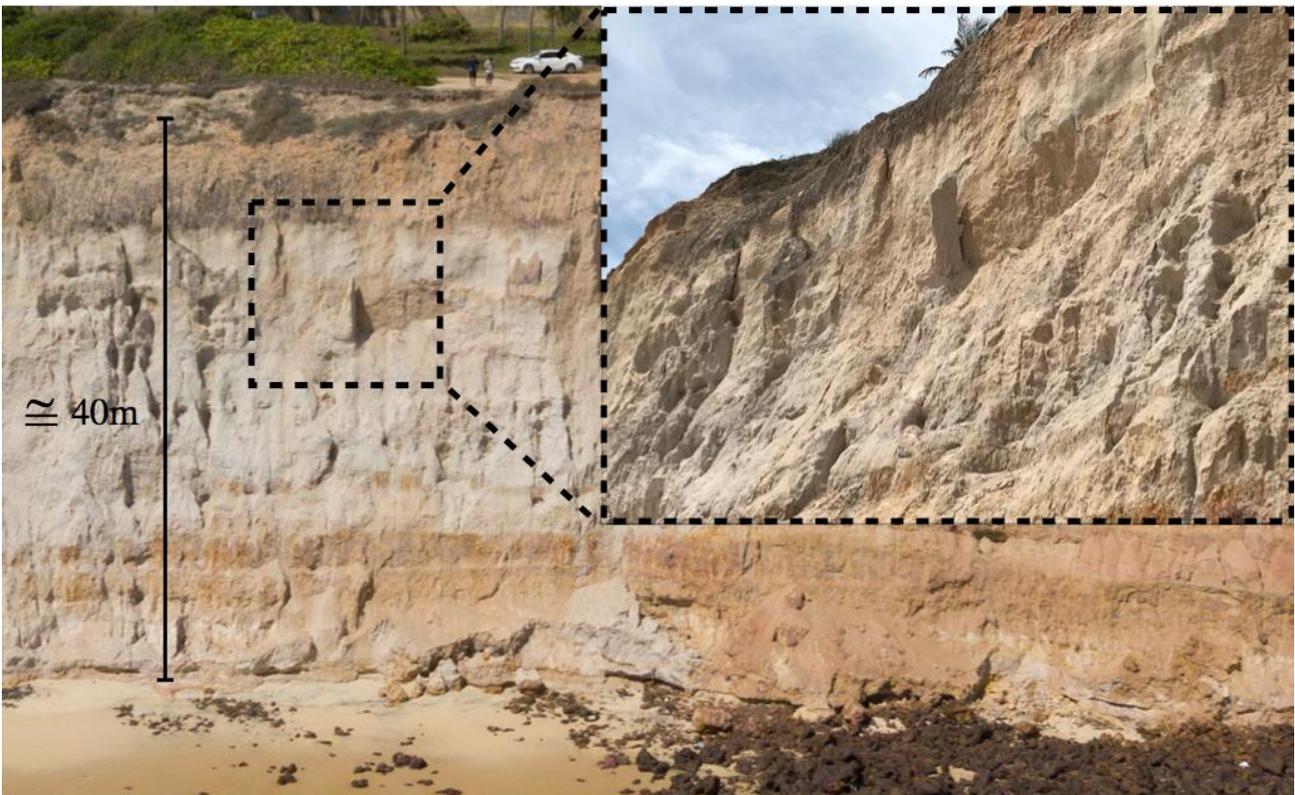


Figura 3.30 – Formação de fendas de tração nas falésia, devido a erosão pluvial. Destaque na Figura para o bloco na iminência de tombar - Praia de Tabatinga/RN (Foto aérea: Daniel Herrera; Foto do bloco: O autor).

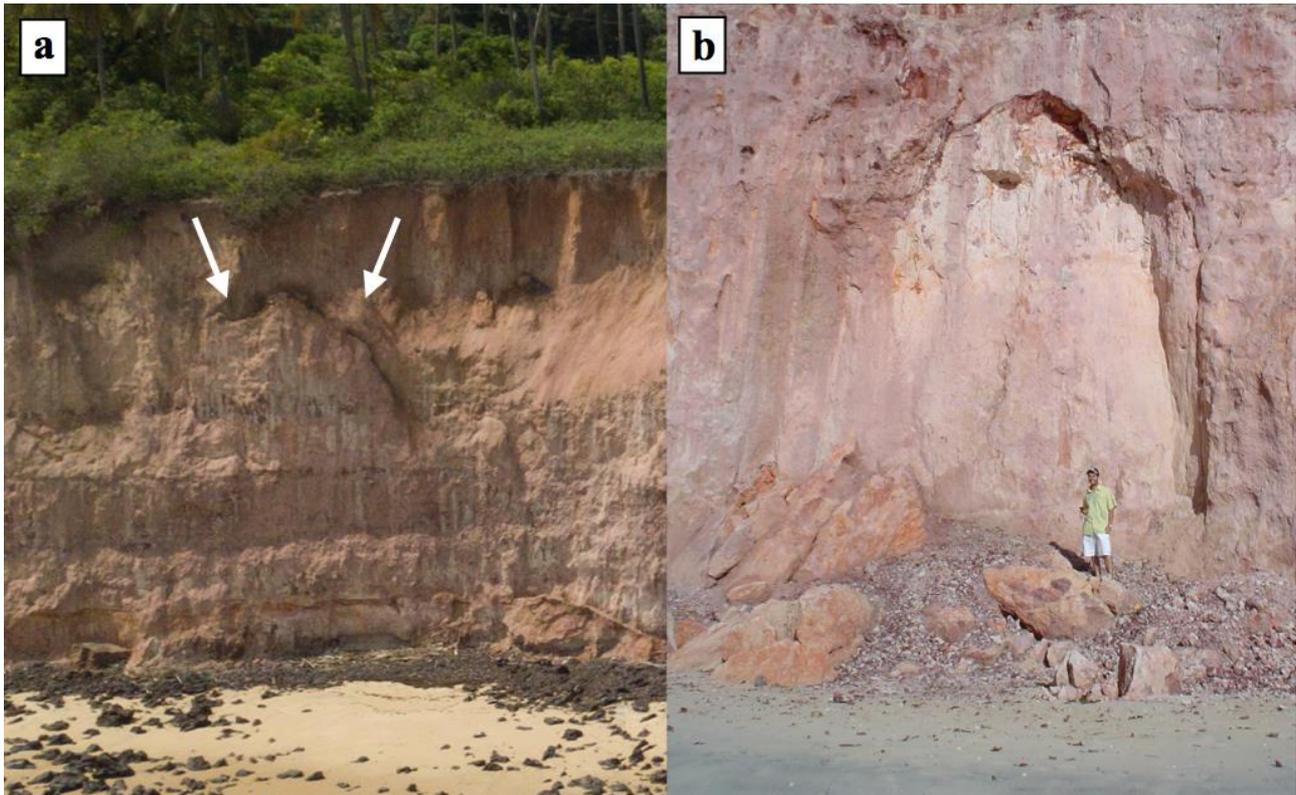


Figura 3.31 – Repetição de mecanismo de ruptura nas falésias da Formação Barreiras, por meio do desenvolvimento de fendas de tração. a) Formação de fenda de tração na parte superior da falésia localizada na Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera); b) Foto do deslocamento de bloco (Braga, 2005).

As áreas com maiores faixas de praia atuam como proteção contra a ação das ondas. Além disso, a concentração de blocos de arenitos com cimentação ferruginosa ao longo da base das falésias atua como fator de controle e proteção (retardador) contra ação direta das ondas. A Figura 3.32 mostra o modelo de evolução desse acúmulo de *talus* na base das falésias, evidenciando, sobretudo, que a proteção natural é resultante principalmente de quedas e tombamentos de material da Formação Barreiras. Conforme ocorre o recuo costeiro natural, a faixa de proteção contra a ação das ondas aumenta (Figura 3.32.a e 3.32.b).

Outro fator que influencia no processo de instabilização em alguns setores é a erosão basal, caracterizada pela remoção de material do pé das falésias, devido à ação das ondas. Nos trechos em que o mar alcança as falésias e o pé da encosta não é protegido por blocos de arenitos, o impacto das ondas incide diretamente na base das falésias, formando incisões basais e pontos de instabilidade. Essas incisões, normalmente causam a queda de blocos e tombamentos, tanto na parte do topo das falésias, como na zona diretamente acima da incisão.

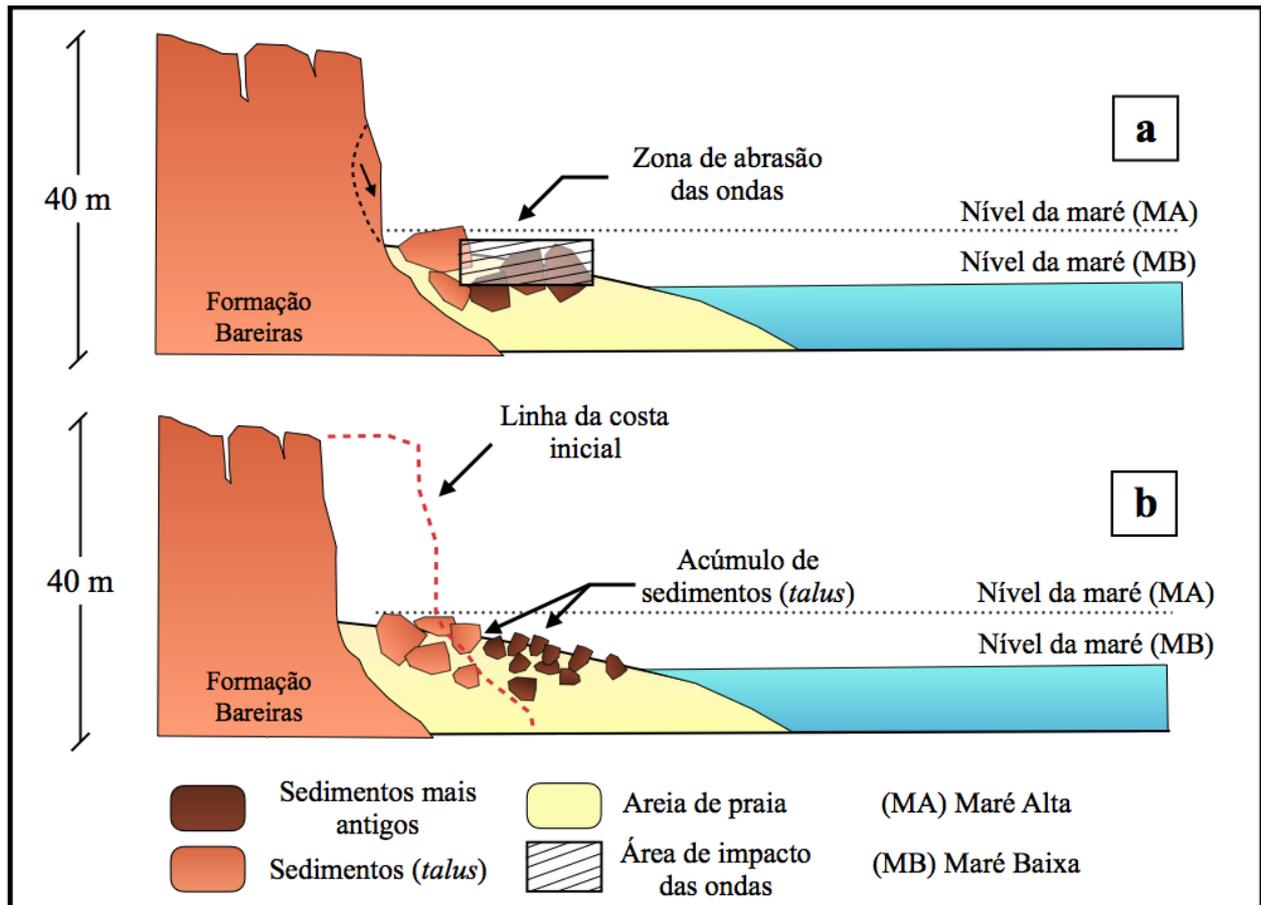


Figura 3.32 – Evolução dos blocos de arenitos com cimentação ferruginosa, localizado na base das falésias da Formação Barreiras em Tabatinga/RN.

De acordo com as análises de tensão x deformação realizadas em Silva *et al.* (2016), à medida que a incisão basal progride percebe-se um aumento da inclinação da falésia e uma mudança nas tensões do solo na região adjacente à incisão, destacando-se o surgimento de esforços de tração. Considerando uma frente de umedecimento no maciço, notam-se valores mais expressivos de tensões de compressão e tração. Os resultados obtidos em Taquez (2017) seguem a mesma linha de entendimento. Dessa forma, os resultados indicam que as encostas se tornam mais instáveis com o aumento da extensão da incisão basal. Além disso, conforme a frente de umedecimento do maciço avança, a extensão máxima estável do entalhe formado pelo corte das ondas na base das falésias diminui. Esse comportamento é evidenciado por quedas de blocos, tombamentos e deslizamentos em áreas próximas às incisões basais, bem como pela maior ocorrência registrada nos períodos de chuvas. As Figuras 3.33 e 3.34 apresentam as incisões basais encontradas nas investigações de campo na praia de Tabatinga/RN.

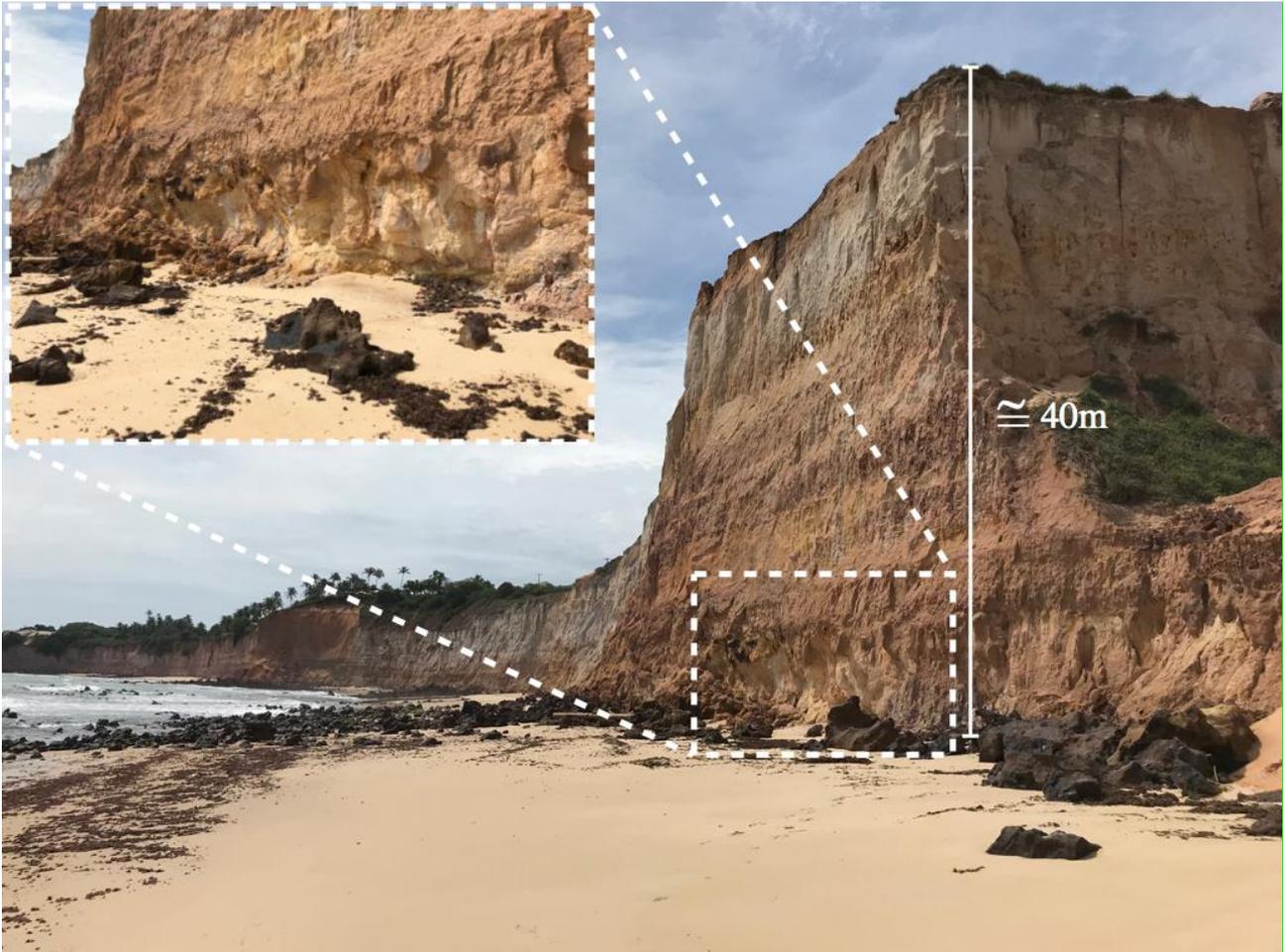


Figura 3.33 – Formação de incisão basal na falésia, localizado no início do trecho em falésias na praia de Tabatinga/RN (Foto principal por Daniel Herrera; Foto do destaque o autor).

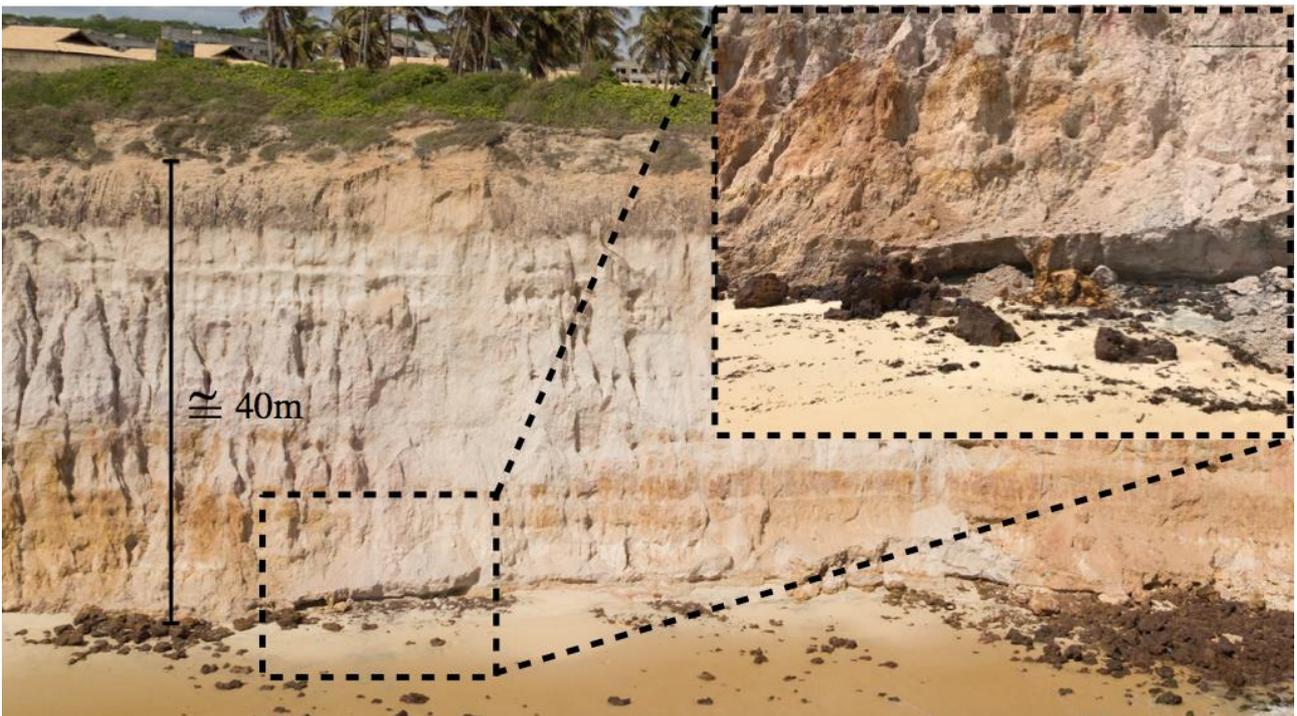


Figura 3.34 – Formação de incisão basal na falésia, localizado no início do trecho em falésias na praia de Tabatinga/RN (Foto principal por Daniel Herrera; Foto do destaque o autor).

A Figura 3.35 exibe a ocorrência de quedas de blocos recentes, no topo das falésias. É importante enfatizar o acúmulo de material no pé das falésias (talus), o qual futuramente funcionará como proteção contra a ação das ondas e a erosão basal. Observa-se do lado esquerdo da Figura 3.35 uma quantidade maior de blocos de arenitos com cimentação ferruginosa.



Figura 3.35 – Quedas de blocos recentes, na parte superior das falésias, conforme indicado pelas setas. Destaque para o acúmulo de material na base das falésias - Praia de Tabatinga/RN (Fotos por Daniel Herrera).

Durante as investigações de campo foi identificada uma ruptura de grandes proporções, situada próxima a um estabelecimento comercial da área. Essa ruptura provavelmente ocorreu durante as chuvas, entre dezembro de 2018 e janeiro de 2019. Como perto da área atingida existe um mirante para apreciação das belezas naturais, foi possível obter imagens antigas do local (Figura 3.36) e compará-las com fotos mais recentes da mesma área (Figura 3.37). Essa área se encontra no ponto em que a linha costeira se desloca em direção ao mar (promontório), ou seja, trata-se de uma região mais atingida pelas ondas.

As Figuras 3.38 a 3.41 apresentam o local atingido em detalhes. Percebe-se uma camada de solo arenoso no topo da falésia. É nítida a mudança de textura exibida na face das falésias após a ruptura, resultando em um aspecto menos rugoso. Em comparação com as fotos mais antigas do local (Figura 3.36), nota-se menor quantidade de vegetação no topo. Também é possível constatar a presença das raízes da vegetação atingida.

Dessa forma, conclui-se que a superfície de ruptura englobou parte da vegetação anteriormente existente no topo dessa falésia.

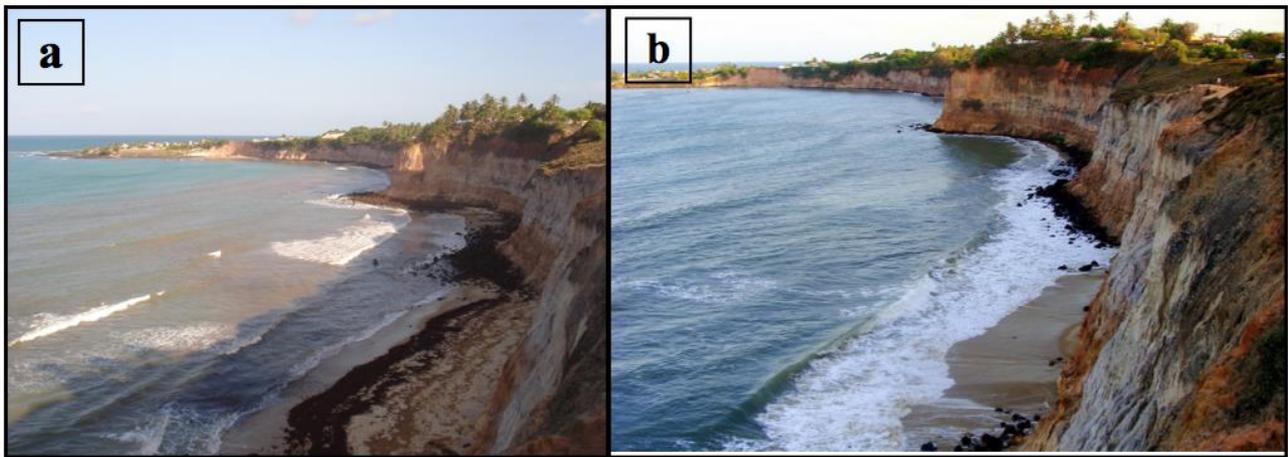


Figura 3.36 – Evolução temporal da falésia que foi identificado movimento de massa de grandes proporções. a) Foto retirada em 02/02/2008 (Fonte: Acervo fotográfico pessoal - Foto por Bruno Marques Ferreira da Silva). b) Foto retirada em 22/12/2010 (Fonte: Internet - Foto retirada por Sônia Furtado).



Figura 3.37 – Evolução temporal da falésia que foi identificado movimento de massa de grandes proporções - Foto retirada no dia 19/01/2019. Fonte: O autor.



Figura 3.38 – Visão aérea do movimento de massa de grandes proporções localizada próximo a estabelecimento comercial - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).

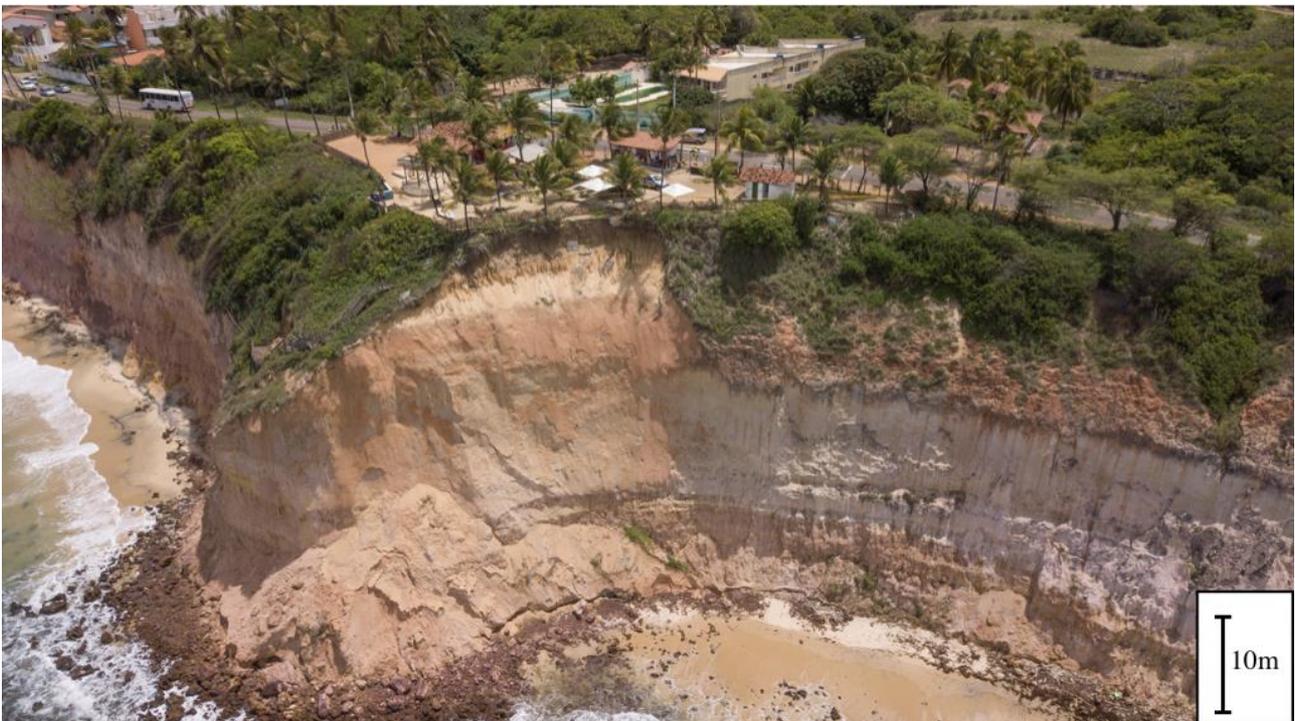


Figura 3.39 – Visão frontal do movimento de massa de grandes proporções localizada próximo ao estabelecimento comercial. - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).

Por meio da análise das Figuras 3.39 e 3.41 demonstra-se que a superfície de ruptura alcançou somente as camadas de topo e de meio, mantendo a camada da base

intacta. Observa-se na base, apenas o acúmulo de material decorrente da porção mais alta da falésia.



Figura 3.40 – Visão aproximada da área atingida pelo Movimento de massa de grandes proporções localizada próximo a estabelecimento comercial. - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).



Figura 3.41 – Visão frontal do movimento de massa de grandes proporções localizada próximo a estabelecimento comercial. Textura diferente exibida na face das falésias após a ruptura - Praia de Tabatinga/RN (Foto por Daniel Herrera).

Após o evento do movimento de massa relatado, foi necessária a intervenção da defesa civil, com a interdição das áreas mais próximas das bordas das falésias (Figura 3.42). Apesar da interdição da Defesa Civil, os estabelecimentos continuam sendo utilizados.



Figura 3.42 – Faixas de interdição realizada pela Defesa Civil em áreas mais próximas às bordas das falésias, situadas no interior de estabelecimentos comerciais, na praia de Tabatinga/RN. Fonte: Acervo fotográfico pessoal - Fotos da parte superior por Daniel Herrera; Fotos da parte inferior por Cristina Alexandra de Medeiros Seixas.

3.1.3 Clima e Ondas - Tabatinga/RN

As características referentes ao clima e direção das ondas, também apresentam influência importante nos processos erosivos costeiros e ocorrência de movimentos de massa. Barra de Tabatinga possui de forma geral, características semelhantes ao restante do litoral oriental do RN. Apresenta clima tropical chuvoso quente, com temperatura média anual de 25,7 °C e umidade relativa média anual variando de 74% a 80%. A estação chuvosa está compreendida entre os meses de fevereiro a agosto, quando os totais mensais (média) variam de 90 a 230 mm e precipitações anuais de aproximadamente 1261 mm (Severo, 2005; Severo 2011; Souza Júnior, 2013; Diniz, 2002; Nascimento, 2009; Barbosa, 2017).

Na área de estudo, destaca-se o domínio das ondas de sudeste, as quais são responsáveis por uma deriva litorânea no sentido Sul-Norte, atuando praticamente durante todo o ano. Ao longo do trecho estudado, registra-se uma baía em forma de zeta, forma comum por todo o litoral do RN. Essa peculiaridade lhe confere uma assinatura característica diferenciada, com relação ao restante da costa brasileira (Diniz, 2002). A altura máxima das marés varia de 2,5m a 3,3m, respectivamente durante marés de quadratura e sizígia (Vital *et al.*, 2008).

3.2 Propriedades Geotécnicas dos Materiais das Falésias

Os dados disponíveis de trabalhos anteriores (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018) foram reanalisados, com o propósito de realizar um tratamento estatístico e relacionar os principais resultados referentes, sobretudo à resistência dos materiais da Formação Barreiras, bem como associar essas características aos principais processos erosivos e movimentos de massa observados na região de Tabatinga/RN.

3.2.1 Resistência ao cisalhamento

A Tabela 3.2 mostra os valores dos parâmetros de resistência de pico (coesão e ângulo de atrito), obtidos em ensaios triaxiais e cisalhamento direto realizados em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras, na condição natural e inundada. Através dos dados, é possível perceber que existe uma variabilidade muito grande no que diz respeito à coesão do material (0 kPa a 396,6 kPa). O parâmetro coesão corresponde à parcela importante da resistência ao cisalhamento das falésias. A variação desse parâmetro evidencia o argumento de realizar análises de estabilidade com o auxílio de ferramentas estatísticas, com o objetivo de utilizar valores mais adequados nas análises de estabilidade. Nos solos estruturados da Formação Barreiras, a coesão resultante da cimentação entre as partículas corresponde à maior parcela da resistência do material. O efeito da cimentação do solo pode ser notado nos altos valores de intercepto de coesão.

Tabela 3.2. Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição natural e saturada, em amostras de solo proveniente da Formação Barreiras. Indicação da camada da falésia, relacionada diretamente a altura (profundidade) em que foi retirado o material (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018).

Localização	Tipo de ensaio	Camada da Falésia	Condição da Amostra	c (kPa)	ϕ (°)	Referência
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Topo	Natural	193,0	45,0	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Topo	Natural	232,0	43,0	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Topo	Inundado	48,0	27,0	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Topo	Inundado	53,0	29,0	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Base	Natural	318,0	52,0	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Base	Inundado	45,0	27,0	Silva (2003)
Ponta do Pirambu/RN	Cisalhamento Direto	Topo	Natural	233,0	27,7	Severo (2005)
Ponta do Pirambu/RN	Cisalhamento Direto	Topo	Inundado	50,6	27,5	Severo (2005)
Ponta do Pirambu/RN	Cisalhamento Direto	Base	Natural	384,1	28,4	Severo (2005)
Ponta do Pirambu/RN	Cisalhamento Direto	Base	Inundado	45,4	26,8	Severo (2005)
Piau (RN 003), Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	396,6	31,9	Severo (2005)
Piau (RN 003), Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	95,5	29,6	Severo (2005)
BR 101 (km 131), Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	259,3	48,3	Severo (2005)
BR 101 (km 131), Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	109,7	26,4	Severo (2005)
Ponta do Pirambu/RN	Triaxial (CD)	Topo	Compactada	8,3	28,4	Severo (2011)
Ponta do Pirambu/RN	Triaxial (CD)	Topo	Indeformadas / Natural	6,5	29,4	Severo (2011)

Tabela 3.2. Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição natural e saturada, em amostras de solo proveniente da Formação Barreiras. Indicação da camada da falésia, relacionada diretamente a altura (profundidade) em que foi retirado o material (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018). **[CONTINUAÇÃO]**

Ponta do Pirambu/RN	Triaxial (CD)	Base	Indeformadas / Natural	62,7	32,0	Severo (2011)
Ponta do Pirambu/RN	Triaxial (CD)	Meio	Indeformadas / Natural	110,5	33,0	Severo (2011)
Baía Formosa/RN	Cisalhamento Direto	Topo	Inundado	16,9	29,5	Souza Jr. (2013)
Baía Formosa/RN	Cisalhamento Direto	Base	Inundado	59,9	33,6	Souza Jr. (2013)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	Topo	Natural	97,6	35,9	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	Meio	Natural	174,4	30,8	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	Base	Natural	192,1	36,4	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	Topo	Saturado	16,7	28,9	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	Meio	Saturado	53,3	12,1	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	Base	Saturado	60,6	27,6	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	0,5	43,0	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	0,0	33,7	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	134,4	19,5	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	0,0	33,3	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	206,2	39,9	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	0,0	32,9	Sousa (2018)

Tabela 3.2. Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição natural e saturada, em amostras de solo proveniente da Formação Barreiras. Indicação da camada da falésia, relacionada diretamente a altura (profundidade) em que foi retirado o material (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018). **[CONTINUAÇÃO]**

Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	167,7	36,1	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	0,0	36,9	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	46,0	32,6	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	0,0	32,9	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	196,7	38,7	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	22,0	27,2	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	148,6	58,1	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	106,7	30,2	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	178,0	37,6	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	17,5	31,7	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	218,0	42,3	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	38,2	28,4	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Natural	306,8	46,3	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	-	Inundado	24,2	33,6	Sousa (2018)

Os valores máximos e mínimos do parâmetro coesão, obtidos em ensaios na condição saturada e natural em amostras de solo provenientes da Formação Barreiras, são evidenciados na Figura 3.43. Observa-se a perda significativa no valor do intercepto de coesão quando ocorre a saturação do material. Esse fato ocorre, pois a maior parte do

valor de coesão é derivada da sucção do material nas amostras na condição natural (valores em preto e cinza no gráfico). Observa-se que a sucção exerce forte influência no comportamento resistente do material. A parcela restante do intercepto de coesão (valores em tons de azul no gráfico) é a coesão verdadeira, a qual é independente da condição de saturação do solo. Assim, quando ocorre a saturação do material, essa parcela de coesão advinda da sucção é eliminada e diminui a capacidade resistente do maciço de solo.

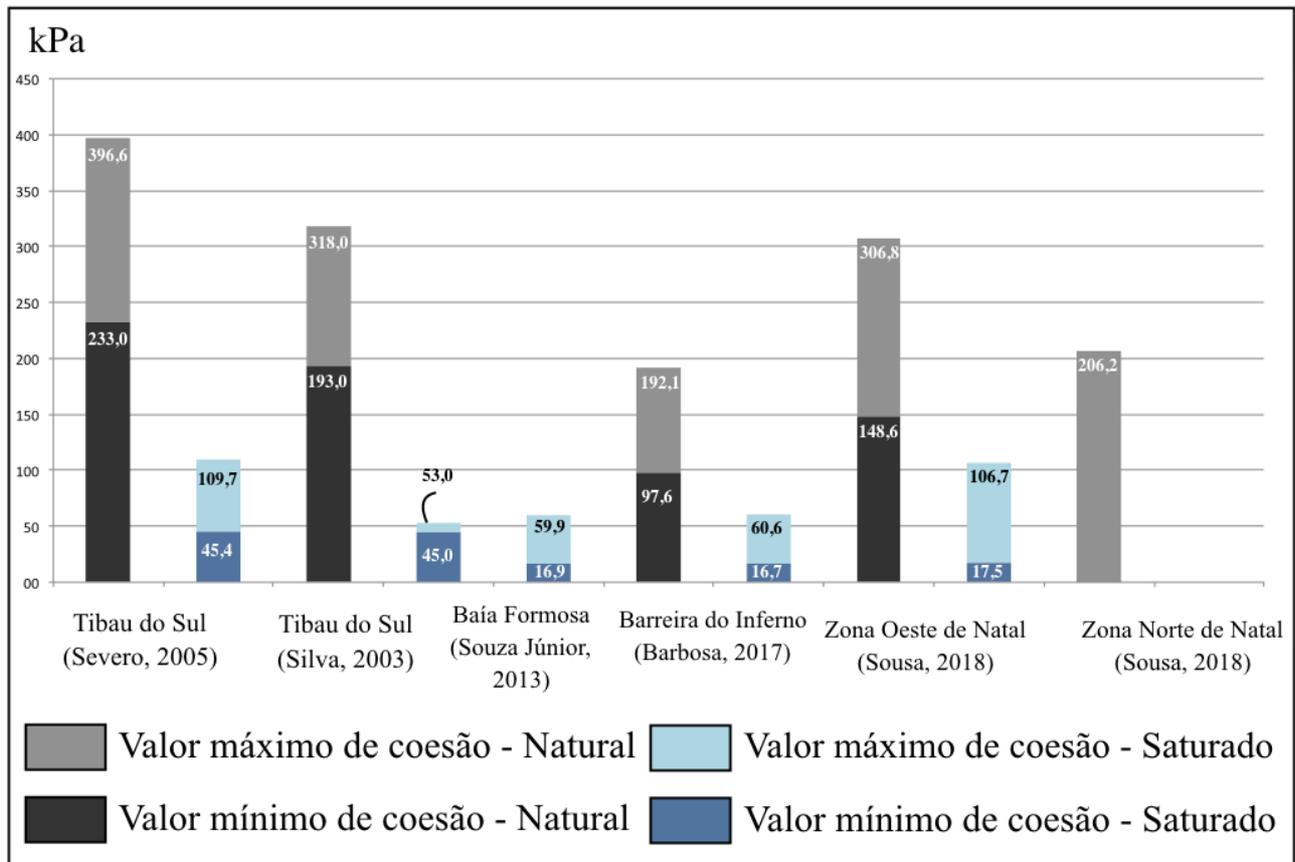


Fig. 3.43 – Valores máximos e mínimos do parâmetro coesão, em ensaios na condição natural e na condição saturada.

O ângulo de atrito também apresenta variação quando comparado os valores obtidos em ensaios na condição natural e inundada. A maior variação ocorre nos dados obtidos na Zona Oeste de Natal (Sousa, 2018), onde os valores de ângulo de atrito variam de 19,1°, com o material na condição saturada, a 58,1° na condição natural (Figura 3.44). Dentre todos os dados o menor valor encontrado de ângulo de atrito é 12,1°. Entretanto, esse valor de ângulo de atrito é incompatível com a expectativa para os solos da Formação Barreiras.

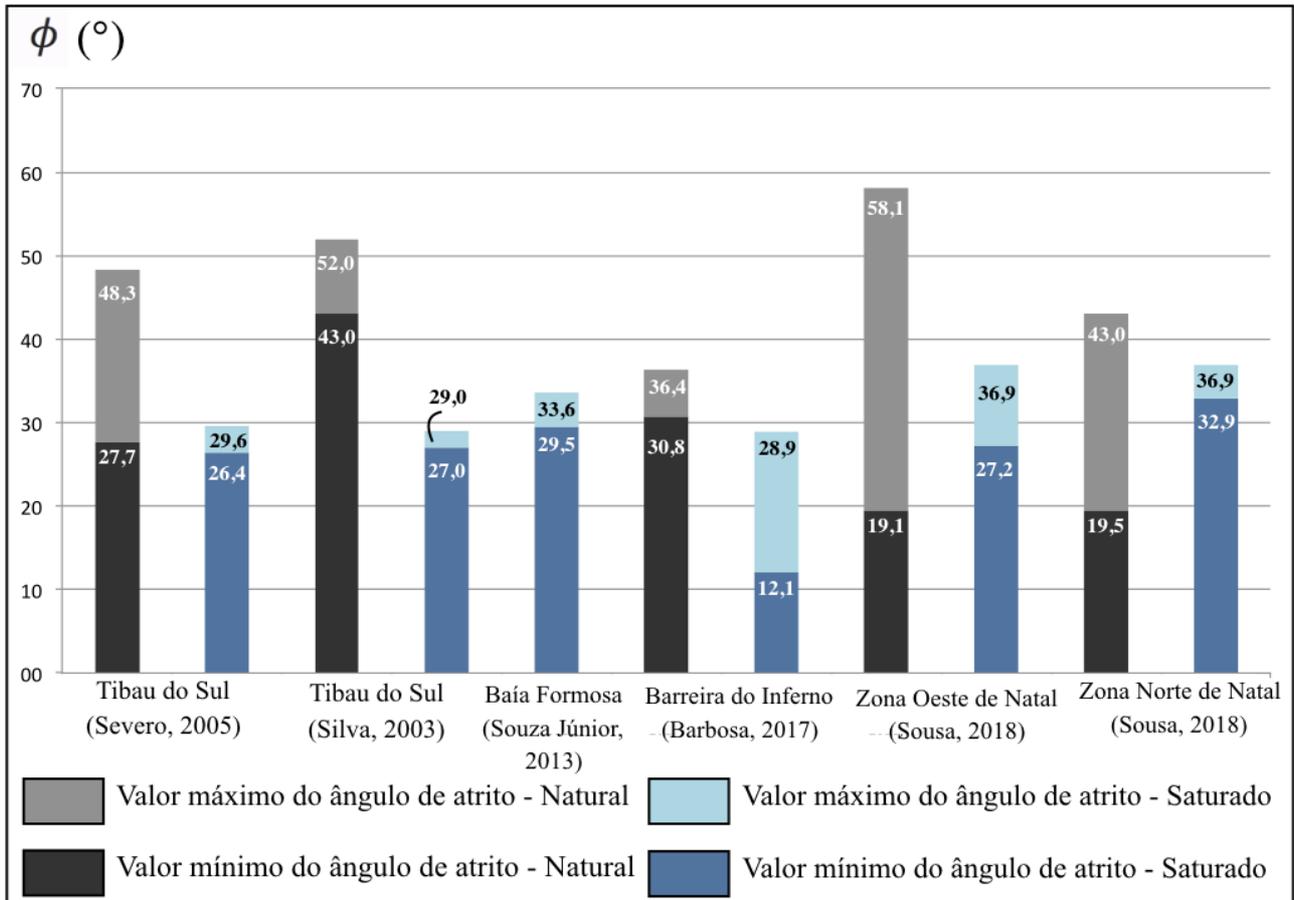


Fig. 3.44 – Valores máximos e mínimos do parâmetro ângulo de atrito, em ensaios na condição natural e na condição saturada.

3.2.2 Resistência à compressão simples

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples realizados por Silva (2003) e Barbosa (2017), para o material presente na base, meio e topo da falésia, estão apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4. Os dados mostram que, apesar de parecer homogêneo visivelmente, o material do topo apresenta uma variabilidade considerável com relação à resistência a compressão simples, com mínimo de 294,1 kPa, máximo de 808 kPa e valor médio de 479,1 kPa. Essa característica pode ser atribuída, sobretudo aos diferentes graus de cimentação entre as partículas. O material da base apresenta valores mais altos de resistência variando de 484,2 kPa a 936 kPa (valor médio de 628,9 kPa).

O índice de vazios varia de, 0,35 a 0,55 para os solos da base da falésia. Essa variação equivale à 36,4% que em virtude da heterogeneidade dos solos das falésias pode ser considerada pequena. Além disso, verifica-se para os resultados analisados que não existe uma relação direta entre o índice de vazios e a resistência. Comparando as amostras 6 e 7, nota-se que o índice de vazios apresenta o mesmo valor

(0,68), enquanto que o valor de resistência a compressão varia de 808 kPa para 336 kPa. Nas amostras 8 e 17, observa-se o comportamento inverso, onde existe grande variação no índice de vazios e pequena variação no valor da resistência. Entretanto, o material da base evidencia os menores valores de índice de vazios relacionados com maiores valores de resistência a compressão simples (amostra 16).

De acordo com a classificação proposta por Collins e Sitar (2009), constata-se que o material do topo das falésias de Tibau do Sul e Barreira do Inferno apresentam-se divididos entre moderadamente cimentado ($100 \text{ kPa} < \text{RCS} < 400 \text{ kPa}$) e fortemente cimentada ($\text{RCS} > 400 \text{ kPa}$). O material da base e do meio podem ser classificados como fortemente cimentados.

Tabela 3.3. Características iniciais do solo e resistência a compressão simples (RCS) do material do topo e base da falésia do município de Tibau do Sul/RN. (Silva, 2003).

Amostra	Localização da Amostra	γ (kN/m ³)	e	Sr (%)	RCS (kPa)
1	Topo	15,62	0,72	4,72	393
2	Topo	16,03	0,67	5,02	314
3	Topo	15,97	0,68	4,97	380
4	Topo	15,94	0,68	4,95	393
5	Topo	16,23	0,65	5,18	550
6	Topo	16,01	0,68	5,01	336
7	Topo	15,98	0,68	4,98	808
8	Topo	16,16	0,66	5,13	619
9	Topo	16,22	0,65	5,17	610
10	Topo	15,80	0,70	4,85	494
11	Topo	15,57	0,72	4,48	380
12	Topo	15,81	0,70	5,09	520
13	Topo	16,92	0,59	5,85	617
14	Base	19,40	0,38	5,47	605
15	Base	19,00	0,40	4,54	610
16	Base	19,78	0,35	6,55	936
17	Base	19,20	0,39	5,38	611

De forma geral, os corpos de prova retirados em Tibau do Sul apresentaram planos de ruptura bem definidos, os quais se iniciam nas extremidades e percorrem os corpos de

prova longitudinalmente. Porém, nos casos em que a tensão de ruptura aplicada foi acima da média (amostras 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13 e 16), a amostra rompeu de forma brusca, dividindo-se em vários fragmentos.

Tabela 3.4. Características iniciais do solo e resistência a compressão simples (RCS) do material do topo, meio e base da falésia Barreira do Inferno. (Barbosa, 2017).

Amostra	Localização da Amostra	γ (kN/m ³)	e	w (%)	RCS (kPa)
1	Topo	17,20	0,54	1,97	294,1
2	Meio	17,30	0,53	1,41	440,7
3	Meio	17,70	0,49	1,41	496,7
4	Base	17,70	0,55	3,84	484,2
5	Base	18,10	0,51	3,84	527,4

3.2.3 Permeabilidade

Os dados referentes à permeabilidade em laboratório com amostra indeformada foram obtidos mediante os ensaios realizados por Santos Jr. *et al.* (2008) e Santos Jr. *et al.* (2015). Os ensaios foram executados com carga constante e variável, porém devido à baixa permeabilidade do material, apenas os ensaios com carga variável foram considerados. A realização dos ensaios seguiu conforme a NBR 13292/1995 e NBR 14545/2000. A Tabela 3.5 mostra os resultados obtidos, com destaque para a localização da amostra, o coeficiente de permeabilidade, índice de plasticidade e classificação SUCS do material ensaiado.

Tabela 3.5 Coeficiente de Permeabilidade (k) em laboratório.

Item	Localização	k (m/s)	IP (%)	Classificação SUCS	% de Argila	Referência
1	Tibau do Sul (Topo)	$6,3 \times 10^{-6}$	7,30	CL	44,00	Santos Jr. <i>et al.</i> (2008)
2	Tibau do Sul (Base)	$8,2 \times 10^{-9}$	16,30	CL	34,50	Santos Jr. <i>et al.</i> (2008)
3	Piau - RN 003	$6,5 \times 10^{-5}$	6,30	CL	61,80	Santos Jr. <i>et al.</i> (2008)
4	BR 101 - km 131	$1,5 \times 10^{-8}$	18,60	CL	40,00	Santos Jr. <i>et al.</i> (2008)
5	Tibau do Sul (Topo)	$2,3 \times 10^{-7}$	21,40	MH	-	Santos Jr. <i>et al.</i> (2015)
6	Tibau do Sul (Meio)	$1,3 \times 10^{-7}$	16,60	SC	-	Santos Jr. <i>et al.</i> (2015)
7	Tibau do Sul (Base)	$1,0 \times 10^{-7}$	36,60	SC	-	Santos Jr. <i>et al.</i> (2015)

Por se tratar de solo argiloso, com percentual de 61,80% de argila, a amostra 3 (Piau - RN 003) apresentou resultado atípico, ou seja, esse coeficiente de permeabilidade ($6,5 \times 10^{-5}$ m/s) é considerado alto para argilas (Santos Jr. *et al.*, 2015). Esse comportamento pode ser explicado pela existência de microfissuras no interior da amostra.

Além dos ensaios realizados em laboratório, Severo (2005) realizou ensaios de permeabilidade *in situ* com solos da Formação Barreiras, mais precisamente no topo das falésias de Pipa (Tibau do Sul/RN). Os solos ensaiados se encontravam no seu estado natural e foram classificados como CL e SM. As amostras apresentavam coloração avermelhada e acinzentada, respectivamente. A Tabela 3.6, apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade *in situ*. Esses ensaios de permeabilidade em campo foram realizados conforme o procedimento estabelecido no Boletim 04, de junho de 1996, da ABGE.

Tabela 3.6 Coeficiente de Permeabilidade (k) *in situ*.

Amostra	Localização	k (m/s)	Classificação SUCS	Referência
1	Tibau do Sul (Topo)	$6,6 \times 10^{-8}$	CL	Severo (2005)
2	Tibau do Sul (Topo)	$1,75 \times 10^{-6}$	SM	Severo (2005)

Como os materiais de topo são mais permeáveis, estes favorecem o processo de saturação, sobretudo mediante infiltração de águas pluviais e formação de trincas no topo das falésias.

3.2.4 Peso específico

A Tabela 3.7 mostra os valores do peso específico aparente, obtidos em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras, na condição natural, seca e saturada. É possível perceber que existe variabilidade nos dados relacionados ao parâmetro. O peso específico no estado natural varia de 15,3 kN/m³ a 21,6 kN/m³, enquanto que no estado saturado, esse valor varia de 18,7 kN/m³ a 21,7 kN/m³.

Tabela 3.7 Peso específico, obtidos em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras. Indicação da camada da falésia, relacionada diretamente a altura/profundidade (Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017).

Localização	Camada da Falésia	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	Referência
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Topo	15,3	15,2	19,5	Severo (2005)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Topo	15,6	15,3	19,5	Severo (2005)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Base	18,8	18,4	-	Severo (2005)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Base	19,4	19,1	-	Severo (2005)
Piau (RN 003), Tibau do Sul/RN	-	16,2	15,7	19,8	Severo (2005)
Piau (RN 003), Tibau do Sul/RN	-	15,9	15,6	19,7	Severo (2005)
BR 101 (km 131), Tibau do Sul/RN	-	16,9	16,7	20,4	Severo (2005)
BR 101 (km 131), Tibau do Sul/RN	-	17,3	16,8	20,4	Severo (2005)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Topo	19,5	17,2	20,7	Severo (2011)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Base	21,6	18,8	21,7	Severo (2011)

Tabela 3.7 Peso específico, obtidos em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras. Indicação da camada da falésia, relacionada diretamente a altura/profundidade (Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017). **[CONTINUAÇÃO]**

Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Meio	21,2	18,4	21,5	Severo (2011)
Baía Formosa/RN	Topo	16,3	15,7	19,7	Souza Jr. (2013)
Baía Formosa/RN	Base	19,3	17,7	21,1	Souza Jr. (2013)
Barreira do Inferno/RN	Topo	16,4	16,1	18,7	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Meio	17,6	17,4	20,3	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Base	18,1	17,4	20,3	Barbosa (2017); Taquez (2017)

Apesar de se tratar de um parâmetro importante no cálculo da análise de estabilidade de taludes, geralmente o peso específico não influencia na variação dos resultados de fator de segurança em análises probabilísticas. Teoricamente, os parâmetros que exercem maior influência nessa variação, são coesão e ângulo de atrito. Para confirmar esse fato aplicado ao caso objeto desse estudo, análises de sensibilidade foram realizadas e são apresentadas a seguir.

3.3 Processos Erosivos e Movimentos De Massa

Os dados disponíveis desse estudo e trabalhos anteriores, tanto relacionados à caracterização geotécnica dos materiais como às análises de estabilidade, representam uma importante base para determinar os principais mecanismos, modos de ruptura e também condições limites para a ocorrência de movimentos de massa.

De forma geral, as falésias de toda a área estudada possuem características típicas, bem como processos erosivos similares às áreas estudadas anteriormente, dependendo principalmente das condições ambientais e antrópicas. Nos setores em que o mar alcança as falésias e o pé da encosta não é protegido por blocos de arenitos, o impacto das ondas incide diretamente na base das falésias, formando incisões basais e pontos de instabilidade (Figura 3.45.a). Essas incisões, normalmente causam a queda de

blocos e tombamentos, tanto na parte do topo das falésias, como na zona diretamente acima da incisão. Esse processo dinâmico e contínuo resulta no recuo costeiro.

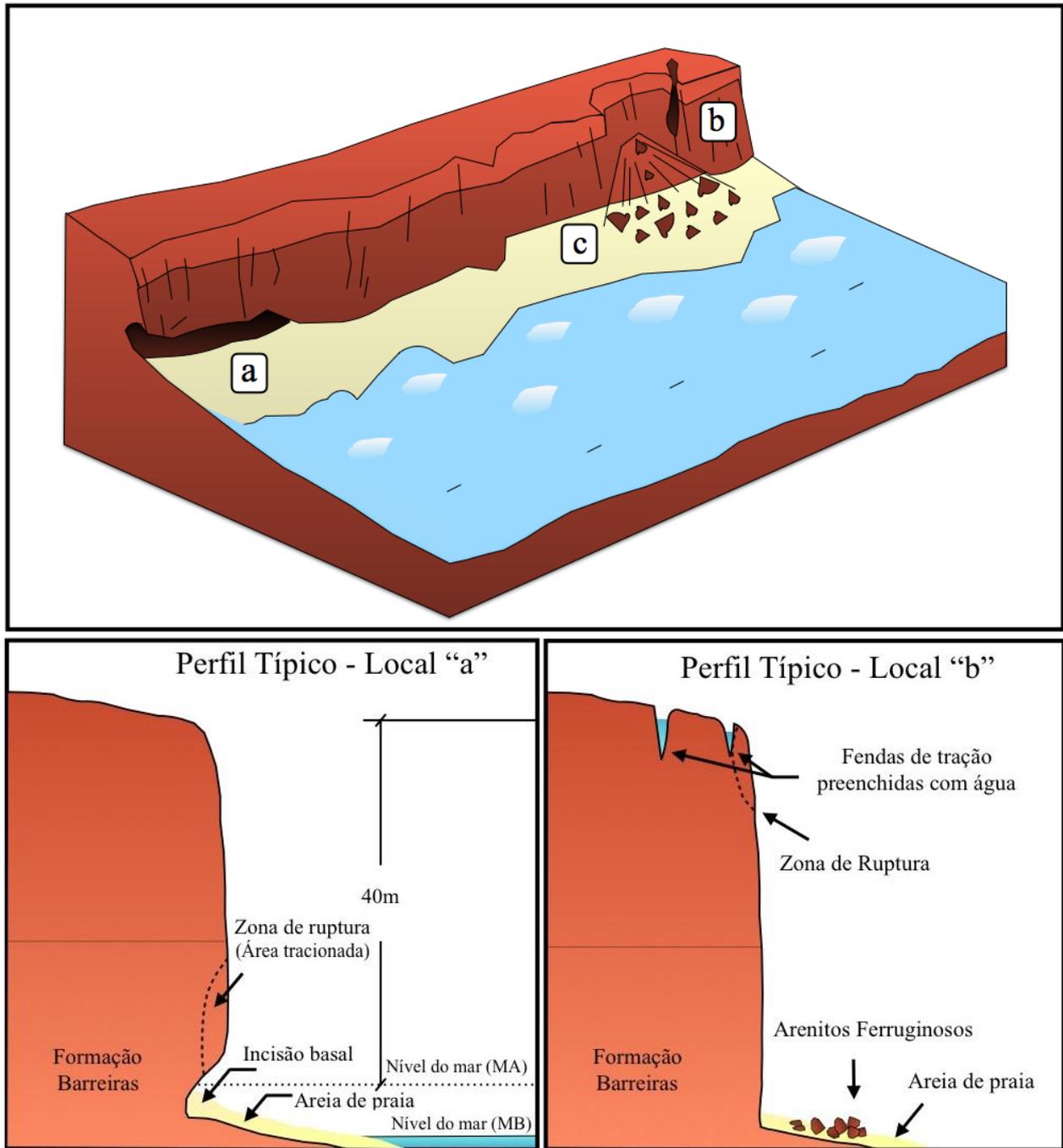


Figura 3.45 - Perfis típicos - a) Esquema geral do processo de erosão basal na falésia e movimentos de massa. Destaca-se a formação de um entalhe na base da falésia; b) Formação de fendas de tração sub-verticais, mediante a ação das chuvas. No esquema geral, ponto "c" mostra a ocorrência de movimentos de massa e acúmulo de talus na base.

Os blocos que caem na praia se desintegram e podem ser incorporados à dinâmica costeira e serem transportados pelas correntes da deriva litorânea. Eventualmente, quando os blocos são mais resistentes, não se desintegram e a água não tem energia

suficiente para transportá-los. Assim, permanecem do local da queda e passam a proteger a base da falésia contra a ação das ondas (Figuras 3.45.b e 3.32).

De acordo com as análises de tensão x deformação realizadas em Silva *et al.* (2016), à medida que a incisão basal progride percebe-se um aumento da inclinação da falésia e uma mudança nas tensões na região adjacente à incisão. Nessas condições, surgem esforços de tração na parte imediatamente acima da incisão e na face da falésia. Quando os esforços de tração impostos à falésia pela formação da incisão na sua base se igualam aos valores de resistência à tração do material ocorre a ruptura na forma de destacamento de blocos e lascas do material das falésias. Esse quadro se agrava no período de chuvas, uma vez que o umedecimento do material provoca o aumento das tensões atuantes e a diminuição da resistência.

Os resultados obtidos em Taquez (2017) ratificam essas observações. As encostas se tornam mais instáveis com o aumento da extensão da incisão basal. Além disso, à medida que a frente de umedecimento do maciço avança, a extensão máxima estável do entalhe formado pelo corte das ondas na base das falésias diminui. Esse comportamento é evidenciado por quedas de blocos, tombamentos e deslizamentos em áreas próximas às incisões basais, bem como pela maior ocorrência registrada nos períodos de chuvas.

Nas áreas com maiores faixas de praia o mar não atinge a base das falésias. Assim, os sedimentos praias atuam como proteção contra a ação das ondas. Outro fator de controle e proteção (retardador) contra ação direta das ondas é a ocorrência dos blocos de arenitos com cimentação ferruginosa (sedimentos) ao longo da base das falésias, provenientes da Formação Barreiras.

Os taludes presentes nas áreas onde o mar não atinge as falésias apresentam menores inclinações que àqueles onde há a ação do mar na sua base. Em geral ocorrem ângulos de 40° a 60° e resultam do equilíbrio do talude frente aos processos continentais a que estão submetidos. Nesse sentido, destaca-se a ação da água de chuva que pode provocar erosão na face do talude ou deslizamentos devido à infiltração (Figura 3.46). Ressalta-se que esse tipo de perfil não é encontrado na área objeto desse estudo.

Outra característica importante observada nas investigações de campo é a formação de sulcos, ravinas e voçorocas, no topo das falésias, por meio da erosão pluvial, sobretudo nas regiões desprovidas de cobertura vegetal (Figura 3.28). Além dessa particularidade, as falésias apresentam fendas de tração, as quais potencializam a ocorrência de movimentos de massa e quedas de blocos (3.29 e 3.30). Em episódios de

chuvas intensas, essas fendas podem provocar quedas de blocos e tombamentos, principalmente se estiverem preenchidas com água (Figura 3.45.b). Essas observações são confirmadas segundo as análises realizadas em Taquez *et al.* (2016) e Taquez (2017).

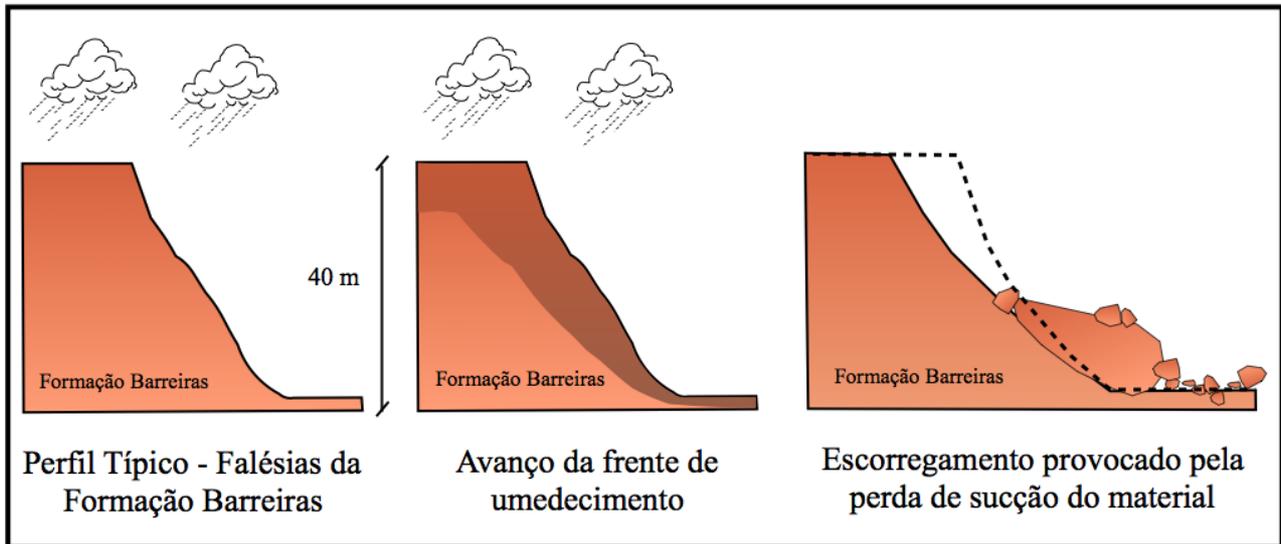


Figura 3.46 - Esquema de mecanismo de ruptura em encostas de inclinação mais amenas (sem ação do mar). Perda de sucção do material mediante o avanço da frente de umedecimento do material.

As chuvas também exercem influência induzindo o aumento do grau de saturação do maciço e conseqüentemente a redução da resistência ao cisalhamento. O aumento do grau de saturação do material causa a diminuição do intercepto de coesão do solo (parcela referente a sucção matricial), e, portanto, a resistência ao cisalhamento diminui bruscamente (Santos Jr. *et al.*, 2011). Segundo os resultados obtidos em Taquez (2017), nessas condições as falésias apresentam-se instáveis, ocasionando movimentos de massa.

Considera-se que as falésias estão submetidas a processos marinhos e continentais. Em termos de processo marinho destaca-se a ação das águas na base das falésias. Os processos continentais estão relacionados a ação do escoamento superficial e da infiltração de águas de chuva no talude. Esses processos induzem movimentos de massas que resultam no recuo costeiro.

Alguns outros componentes atuam no sentido de acelerar ou de retardar os processos. No sentido de acelerar o recuo destacam-se a abertura de fendas de tração na parte superior das falésias e a ocorrência de fraturas nos arenitos que compartimentam o maciço e favorecem as quedas de blocos e tombamentos. Em termos de retardar os processos erosivos destacam-se a presença de camadas enrijecidas de

arenito com cimentação ferruginosa no corpo do maciço ou blocos desses arenitos na base da falésia, assim como a existência de praia com sedimentos arenosos protegendo o sopé da encosta.

A Figura 3.47 mostra o resumo desse ciclo com os principais processos marinhos e fatores de controle. A esses processos devem ser adicionados os processos continentais associados às chuvas que provocam erosão pluvial, deslizamentos e queda / tombamentos de blocos.

A ação antrópica também pode alterar essa dinâmica natural. As alterações decorrem principalmente das intervenções que modificam a drenagem natural das águas de chuva e concentram o fluxo em determinados pontos. Esses aspectos promovem a concentração de energia das águas que facilitam a ocorrência de processos erosivos. Construções próximas à crista das falésias também induzem aumento das tensões cisalhantes no maciço e podem provocar a ruptura dos taludes.

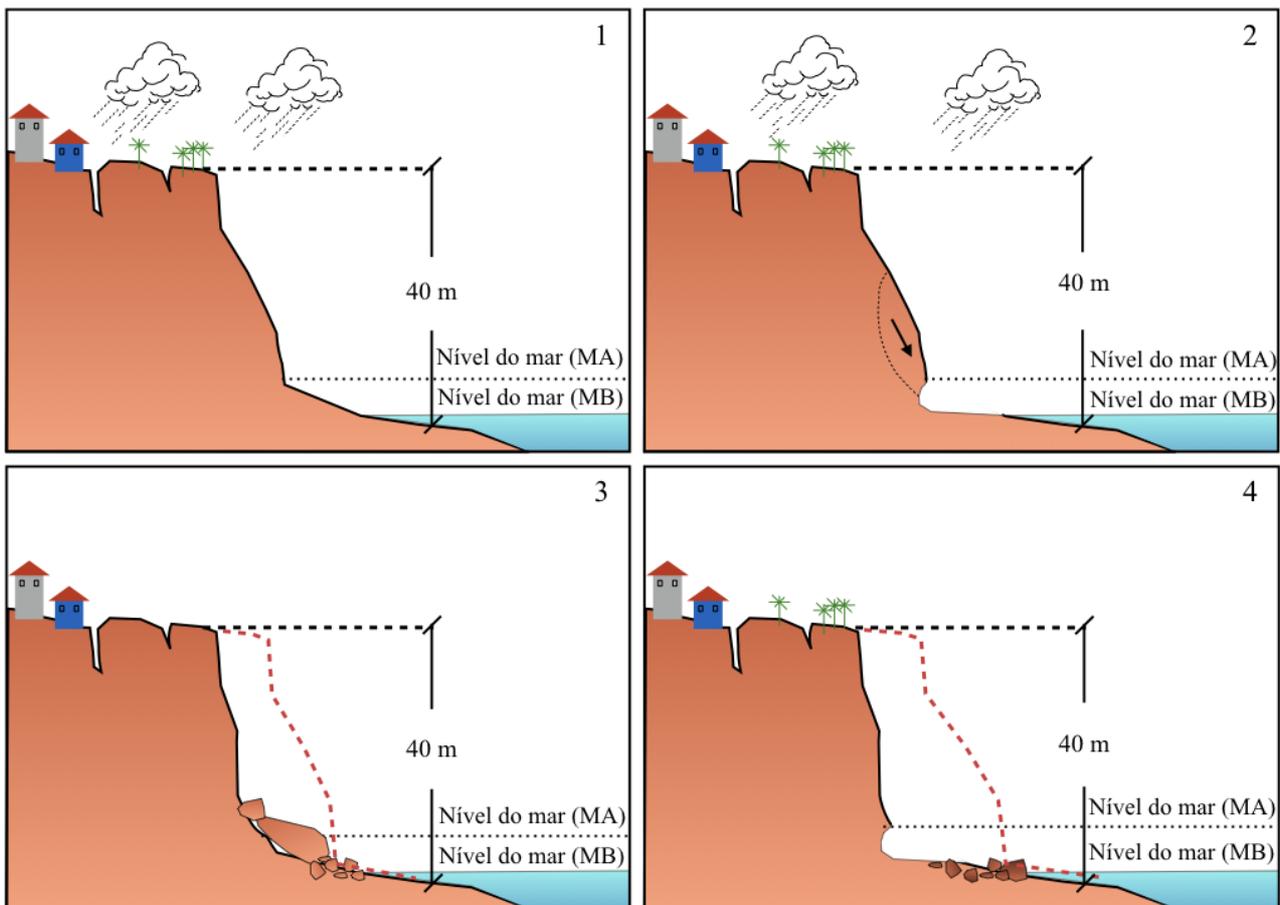


Figura 3.47 - Resumo do processo de erosão costeira proporcionando movimentos de massa como quedas e tombamentos e conseqüentemente o recuo da linha de costa.

CAPÍTULO 4

Análise dos Dados, Tratamento Estatístico e Modelagem

4.1 Análises dos dados e Tratamento Estatístico

Antes da realização do tratamento estatístico dos dados disponíveis, é necessário definir quais parâmetros serão tratados como variáveis aleatórias nas análises de estabilidade probabilísticas. Para isso, a "hipótese 1", detalhada mais adiante no capítulo resultados, foi avaliada por meio de análises de sensibilidade. Essa análise resulta em um gráfico de Fator de Segurança x "Parâmetro de Entrada" (por exemplo, coesão). O gráfico permite analisar os parâmetros que mais influenciam na variação do valor de Fator de Segurança. Um gráfico com uma curva mais íngreme indica que o Fator de Segurança é mais sensível à variação do valor do parâmetro analisado. Ao passo que, uma curva de menor inclinação, mostra que o Fator de Segurança não é sensível à variação do valor desse parâmetro. Em outras palavras, o gráfico indica a sensibilidade do Fator de Segurança relacionado às mudanças no parâmetro de entrada em questão (Rocscience Slide V.7.0, 2016).

A Figura 4.1 a seguir apresenta o resultado das análises de sensibilidade. O melhor resultado foi obtido através do método de Janbu corrigido (Figura 4.1.a). O gráfico obtido mediante o método de GLE/Morgenstern – Price também é apresentado (Figura 4.1.b). É importante perceber que para o gráfico de análise de sensibilidade com múltiplas variáveis aleatórias, o eixo "x" do gráfico é representado em termos de porcentagem de variação. Porcentagem de variação igual a zero representa o valor mínimo de cada variável e porcentagem de variação igual a 100 se refere ao valor máximo.

Conforme se pode observar no gráfico, o Fator de Segurança é mais sensível aos parâmetros coesão de topo, seguido da coesão da base e do meio. A variável aleatória que menos influencia nos valores de Fator de Segurança é o peso específico da base, por ser uma curva quase sem inclinação. Além disso, o peso específico exerce influência inversamente proporcional, ou seja, conforme o valor aumenta, o Fator de Segurança

diminui. Além disso, a dispersão dos dados de peso específico é inferior, quando comparadas às variabilidades do ângulo de atrito e coesão. Por esses motivos, o parâmetro peso específico não foi considerado variável aleatória do problema nesse estudo.

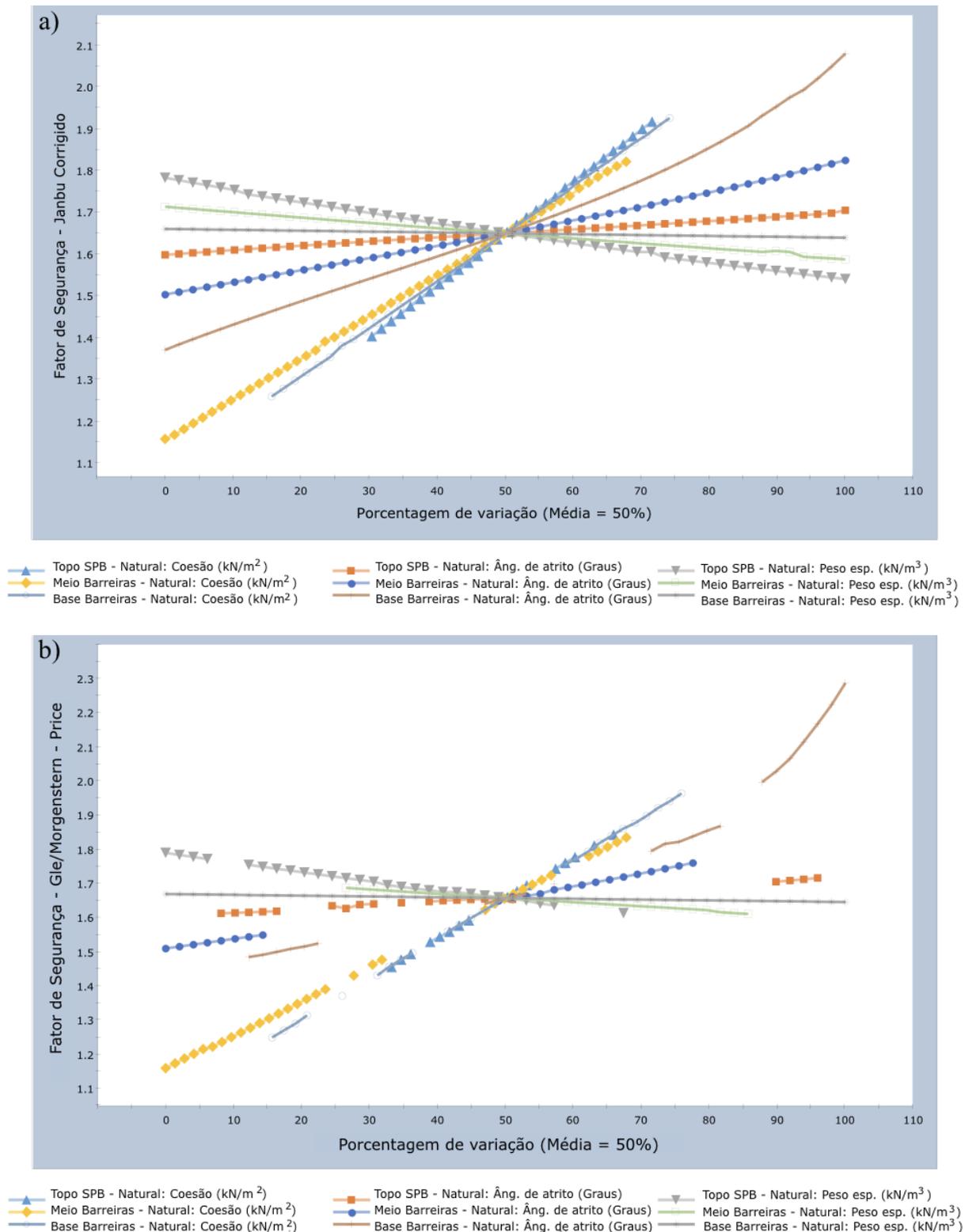


Figura 4.1 – Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão, ângulo de atrito e peso específico dos solos conforme “hipótese 1”. a) Método de Janbu corrigido; b) Método de Gle/Morgenstern – Price.

As Figuras 4.2 a 4.10 mostram as análises de sensibilidade de cada parâmetro de forma isolada, ou seja, o eixo x está em termos de valores relacionados à unidade de medida do parâmetro.

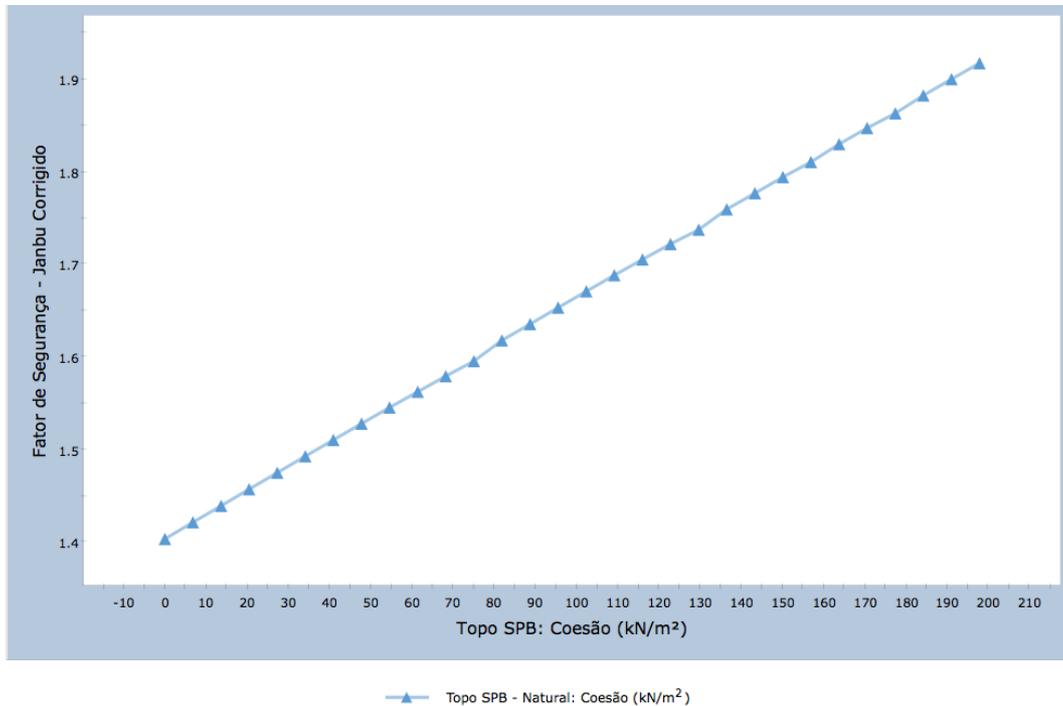


Figura 4.2 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro coesão da camada do topo (Valor mínimo: 0 kN/m²; Valor máximo: 197,73 kN/m²) - “Hipótese 1”.

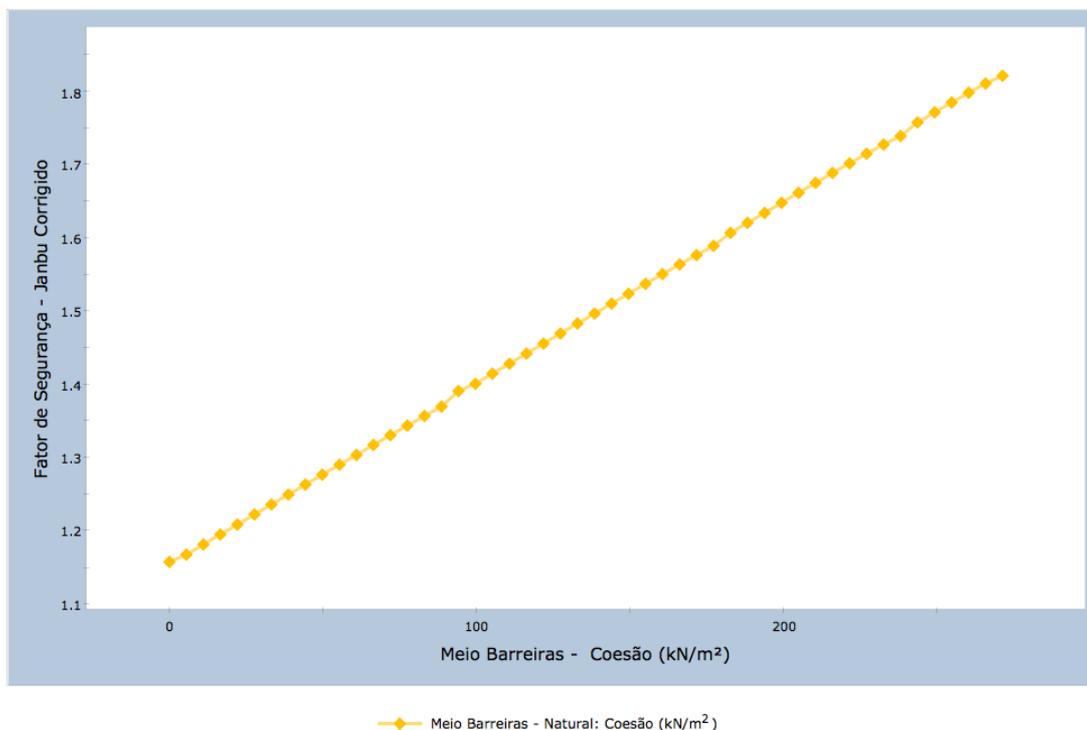


Figura 4.3 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro coesão da camada do meio (Valor mínimo: 0 kN/m²; Valor máximo: 271,00 kN/m²) - “Hipótese 1”.

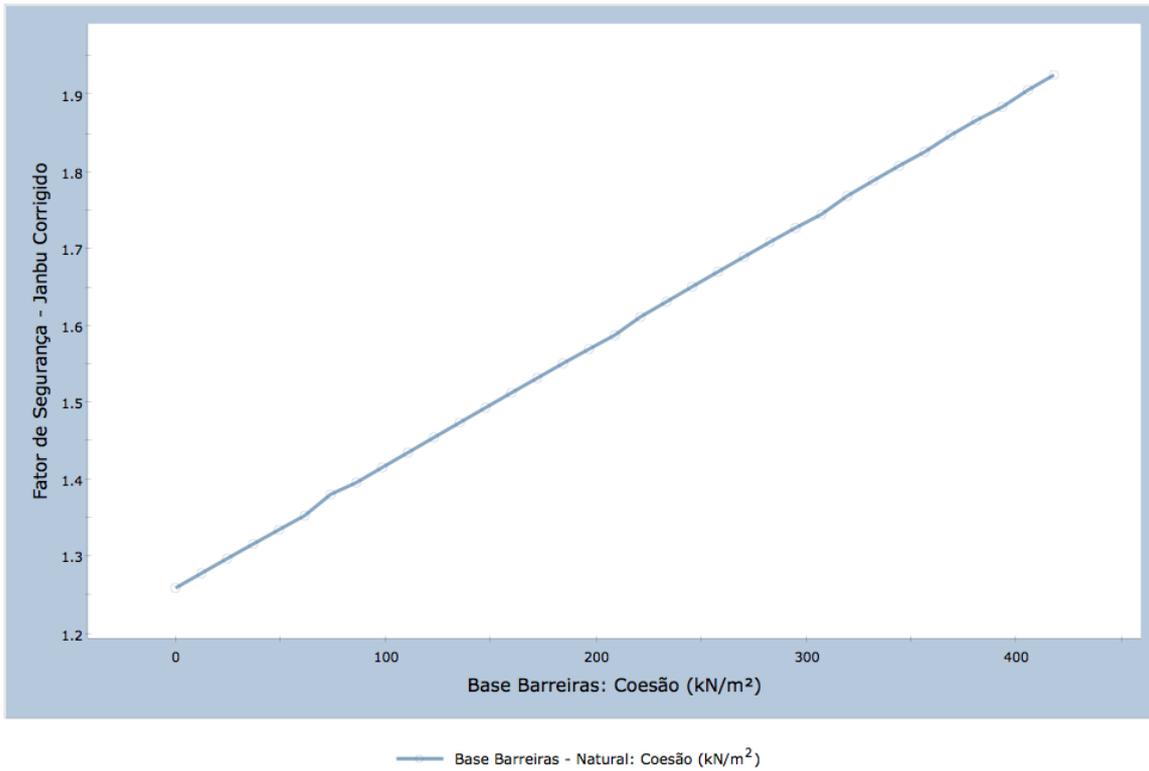


Figura 4.4 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro coesão da camada da base (Valor mínimo: 0 kN/m²; Valor máximo: 417,5 kN/m²) - “Hipótese 1”.

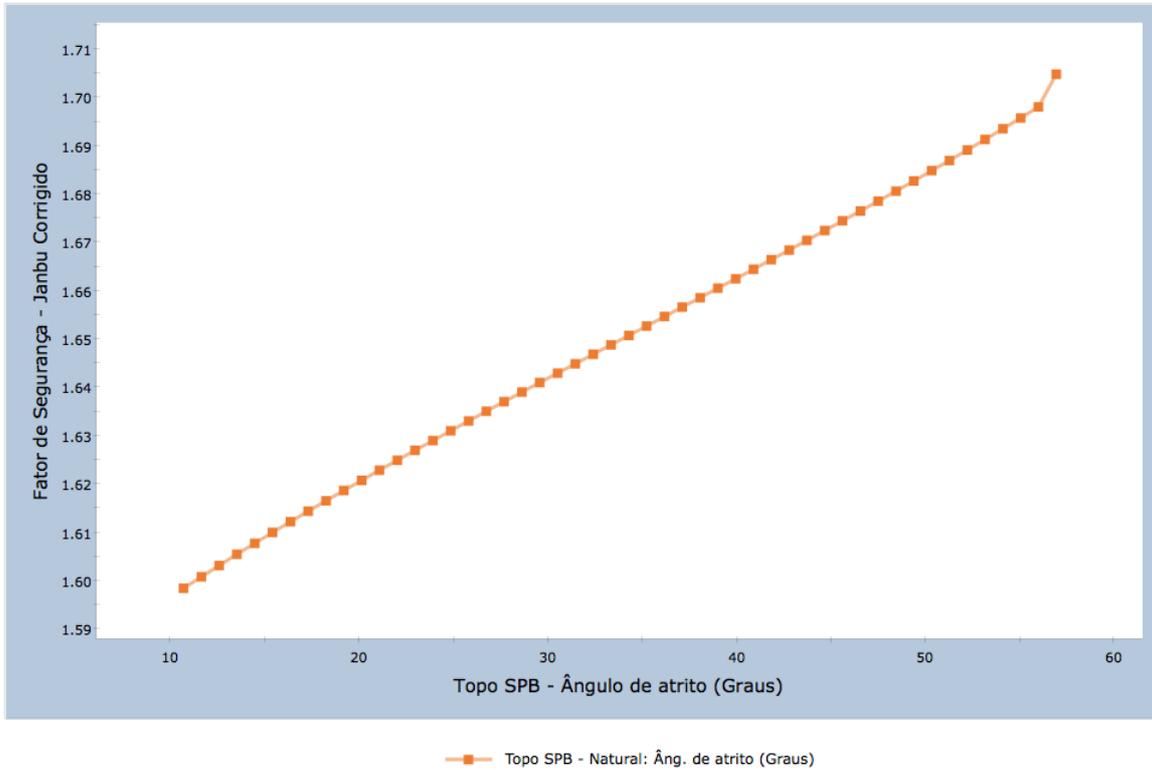


Figura 4.5 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro ângulo de atrito da camada do topo (Valor mínimo: 10,7°; Valor máximo: 56,9°) - “Hipótese 1”.

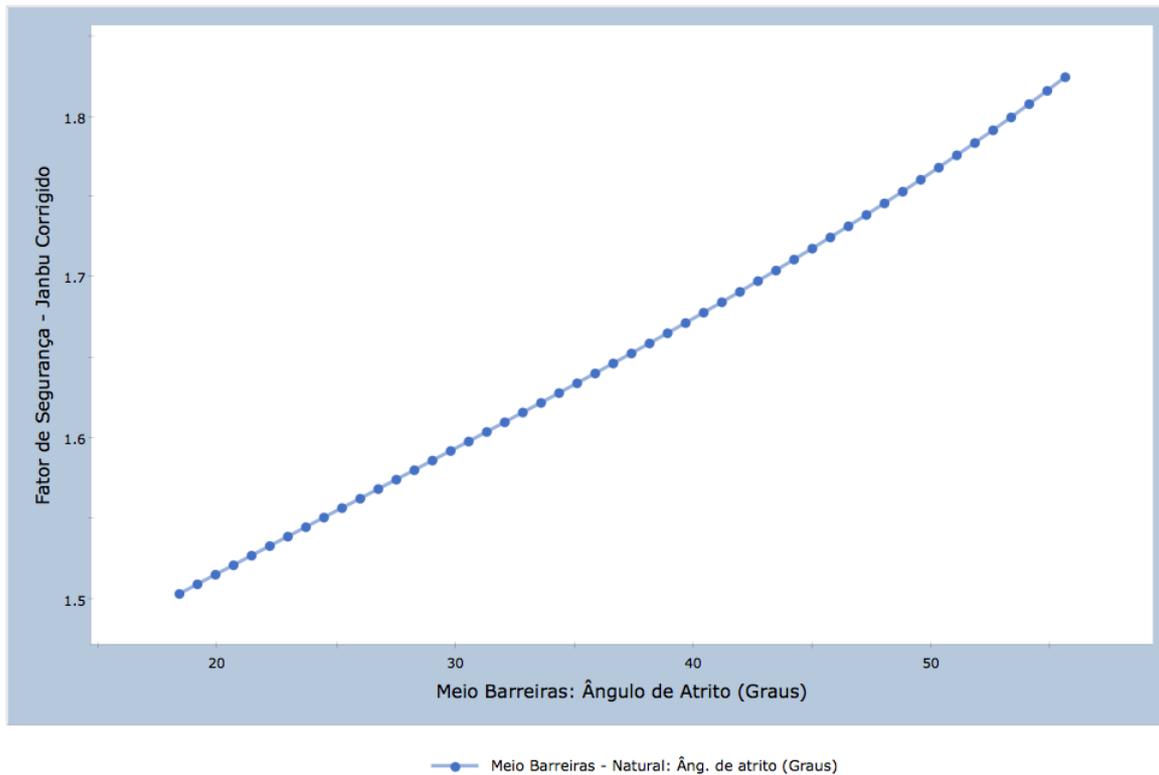


Figura 4.6 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro ângulo de atrito da camada do meio (Valor mínimo: 18,4°; Valor máximo: 55,6°) - “Hipótese 1”.

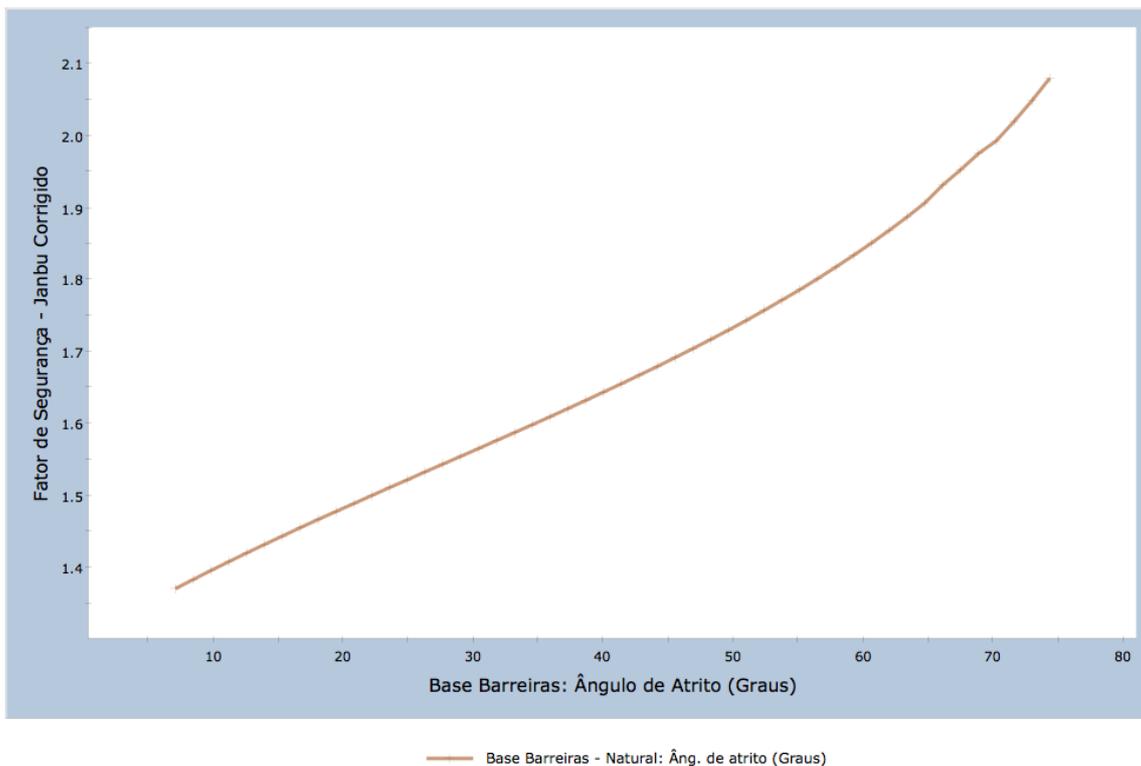


Figura 4.7 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro ângulo de atrito da camada da base (Valor mínimo: 7,1° ; Valor máximo: 74,3°) - “Hipótese 1”.

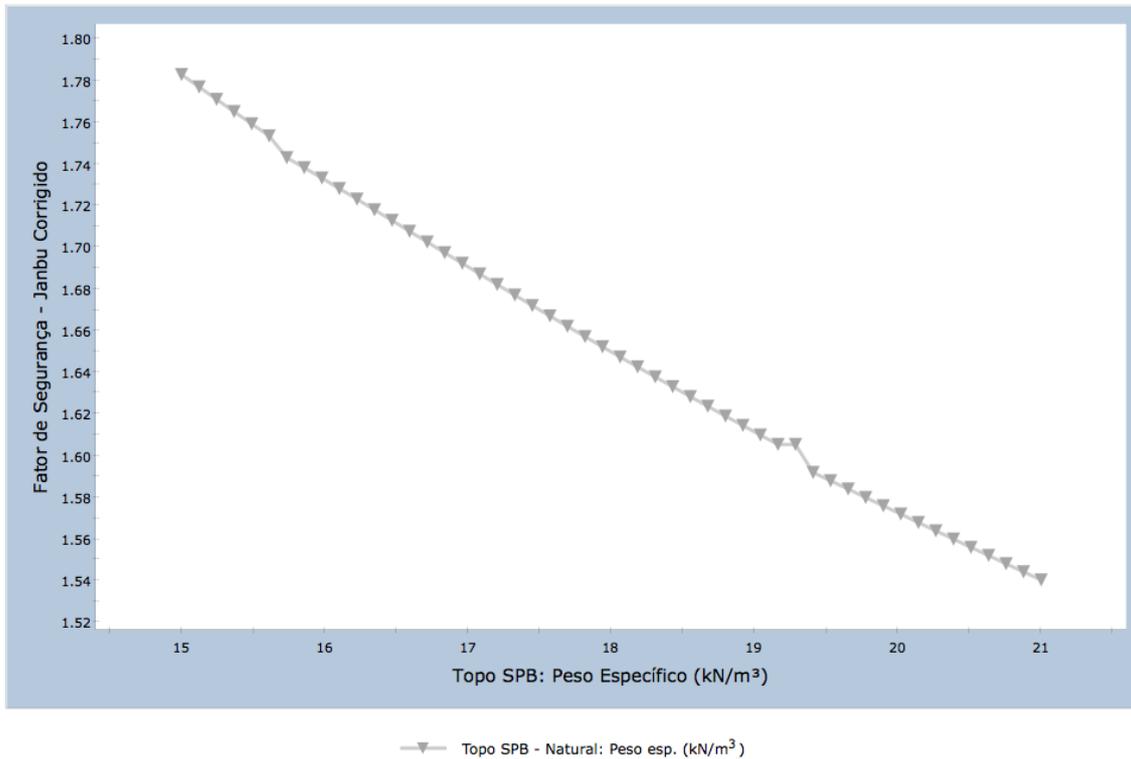


Figura 4.8 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro peso específico da camada da topo (Valor mínimo: 15kN/m³; Valor máximo: 21kN/m³) - “Hipótese 1”.

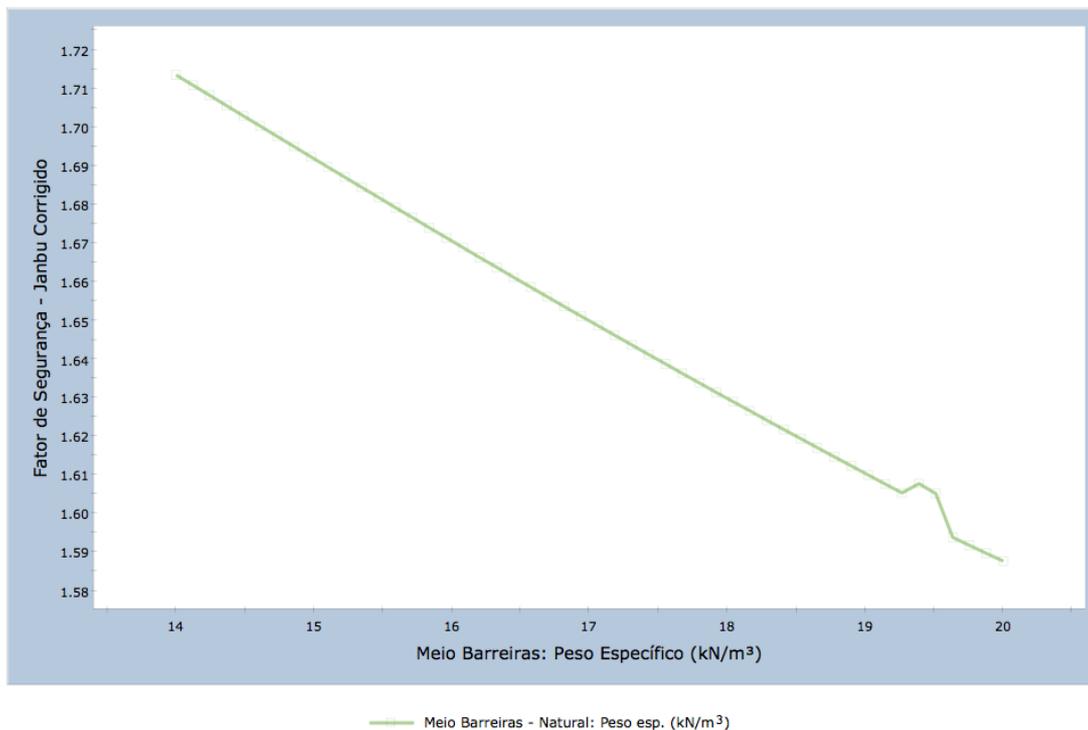


Figura 4.9 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro peso específico da camada da topo (Valor mínimo: 14kN/m³; Valor máximo: 20kN/m³) - “Hipótese 1”.

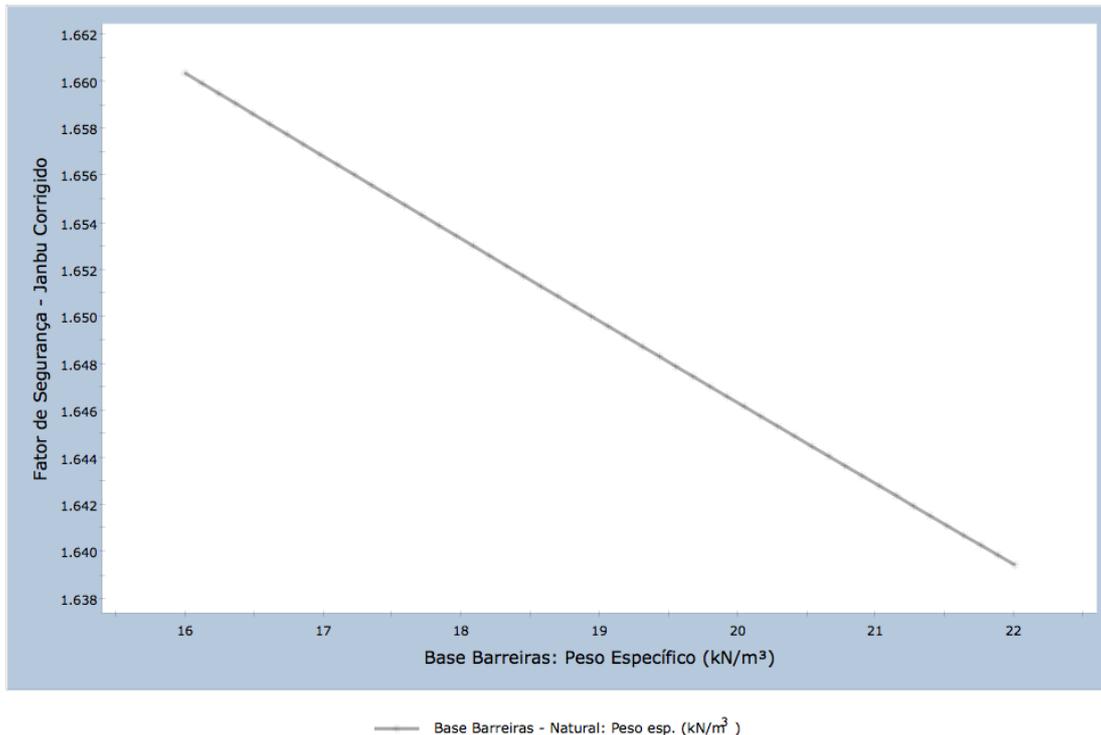


Figura 4.10 – Análise de Sensibilidade aplicada ao parâmetro peso específico da camada da topo (Valor mínimo: 16kN/m³; Valor máximo: 21,8kN/m³) - “Hipótese 1”.

Após a definição dos parâmetros que serão tratados como variáveis aleatórias, organização de todos os dados disponíveis e necessários para a realização de análises de estabilidade (Tabela 3.2 e Tabela 3.7), foi realizado a análise e o tratamento estatístico dos dados por meio de planilhas em Excel e do programa SPSS. Assim, todos os dados foram analisados criteriosamente com o intuito de verificar a consistência e evitar utilizar dados que não condizem com a realidade conhecida e encontrada em campo, relacionadas aos solos da Formação Barreiras.

Nessa fase, os parâmetros coesão e ângulo de atrito, foram analisados e tratados separadamente de acordo com a condição do ensaio realizado (no estado natural e inundado). Apenas, esses parâmetros foram tomados como variáveis aleatórias do problema. Gráficos do tipo histograma de frequência, referente a esses dados, foram gerados. Esse procedimento é uma ferramenta importante, para verificar padrões e consistência nos dados associados à forma do histograma.

O gráfico representado na Figura 4.11, mostra o histograma dos dados do parâmetro coesão natural. Apesar do baixo número de amostras, a forma do histograma se aproxima de uma função densidade de probabilidade do tipo normal. No mesmo gráfico está plotado a função normal de média (E) 185,3 kPa e desvio padrão (σ) 105,8 kPa.

Vale salientar que a função densidade de probabilidade deve se adequar aos limites físicos dos parâmetros analisados. Nesse caso, por exemplo, a distribuição normal gerada possui valores negativos. Dessa forma, para utilizar uma função densidade de probabilidade semelhante, considera-se somente a parcela positiva.

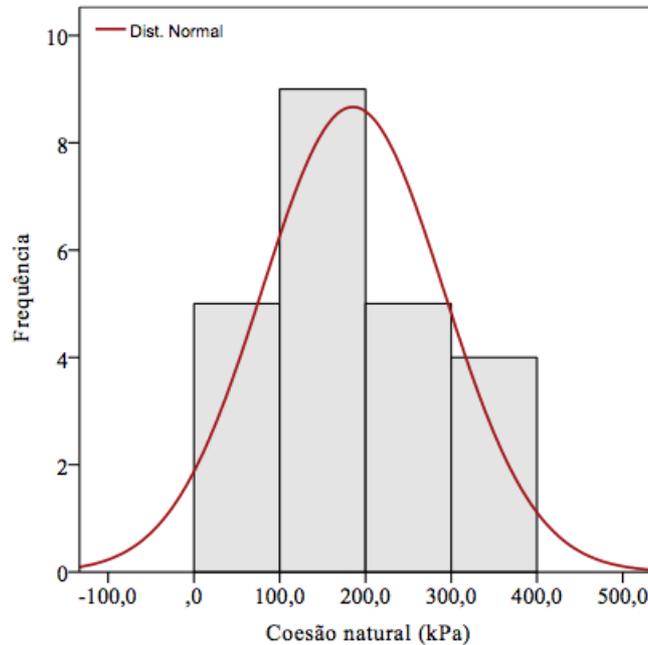


Figura 4.11 – Histograma dos dados do parâmetro Coesão Natural, obtido através de 23 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 185,3$; $\sigma = 105,8$.

O gráfico do tipo Q-Q é comumente utilizado para investigar se os dados obtidos experimentalmente se ajustam à distribuição obtida de forma paramétrica. Distribuições idênticas (em termos de forma, média e variância) se adequam em um gráfico com uma linha de 45 graus (El-Ramly, 2001). Se os pontos (dados experimentais) estiverem em concordância com a linha de 45 graus, significa um bom ajuste.

Na Figura 4.12, observa-se nesse caso um bom ajuste entre os dados experimentais e a distribuição paramétrica, com alguns pontos fora da reta. Além desse procedimento, junto do gráfico Q-Q e dos dados obtidos experimentalmente, também foi plotada a função linear de ajuste aos valores observados e o respectivo coeficiente de determinação (R^2). Esse valor, que varia de 0 a 1, traduz o quanto a função linear de ajuste se aproxima dos valores observados. Assim, é possível comparar os valores normais esperados, a melhor função linear de ajuste e os valores observados (Figura 4.12). Percebe-se que existe uma aproximação razoável entre as duas funções lineares, demonstrando uma tendência nos dados.

Essa ferramenta foi utilizada para tentar descrever o comportamento dos dados e ajustá-los de forma simples e prática a um padrão, para ser utilizado como dados de

entrada nas análises de estabilidade. O importante nesse caso é identificar que a variação dos dados de coesão no estado natural pode ser representada, de forma aproximada, por uma distribuição normal.

O mesmo procedimento foi adotado para os dados de Coesão no estado saturado, ângulo de atrito natural e saturado.

A Figura 4.13 mostra o histograma dos dados do parâmetro coesão no estado inundado, com a distribuição normal no mesmo gráfico ($E = 39,2$ kPa e $\sigma = 33,75$ kPa). Como esperado para esse tipo de solo, existe uma variação significativa dos valores de coesão no estado saturado. Nesse caso, não foi obtido um bom ajuste, sobretudo devido ao número elevado de amostras (6 amostras de 22) com coesão próximas a zero. Porém, dentre as opções de distribuições possíveis, no software SPSS, esse foi o melhor ajuste obtido. Isso pode ter acontecido pelo baixo número de amostras disponíveis.

Em casos que a quantidade de dados disponíveis não é suficiente, especifica-se uma distribuição paramétrica que melhor representa os dados amostrais (Deutsch, 1996).

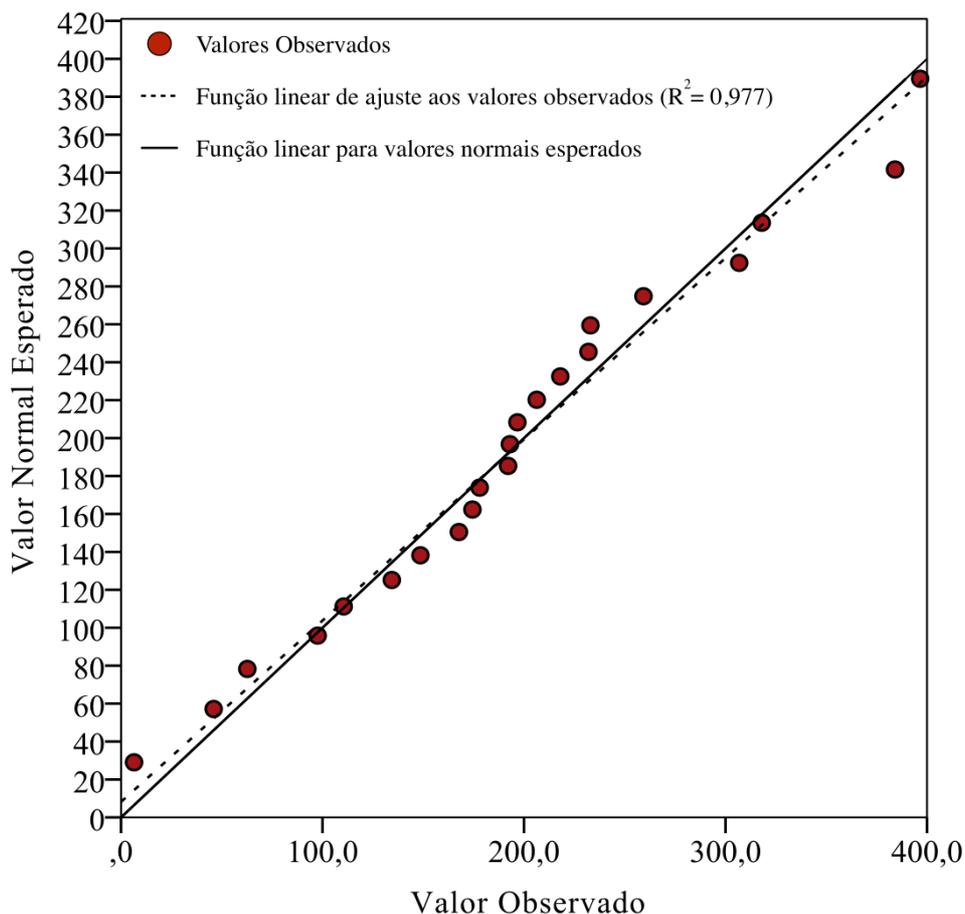


Figura 4.12 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal e os dados observados, referentes à **Coesão Natural** de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 23).

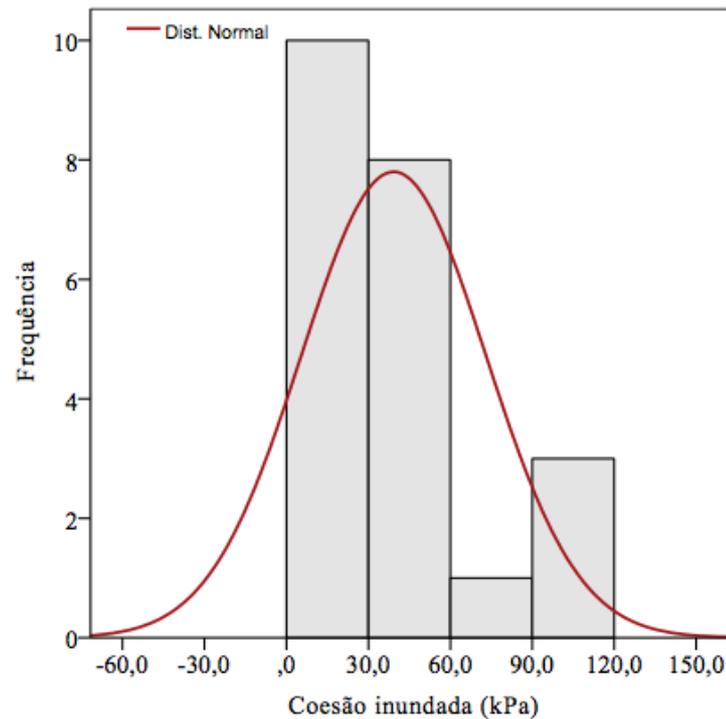


Figura 4.13 – Histograma dos dados do parâmetro **Coesão Inundada**, obtido através de 22 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 39,2$; $\sigma = 33,75$.

O gráfico Q-Q apresentado na Figura 4.14, reforça a dispersão dos dados experimentais de coesão na condição inundada. Por outro lado, a função linear de ajuste mostra aproximação gráfica comparada a função linear para valores normais esperados ($R^2 = 0,955$). Adicionalmente, na falta de dados, é aceitável utilizar essa distribuição por se tratar do mesmo parâmetro em outra condição. Ainda, segundo Ozelim *et al.* (2015), nos casos em que não existem muitas informações a respeito sobre as variáveis aleatórias, a distribuição Normal será a melhor forma de conduzir uma avaliação probabilística.

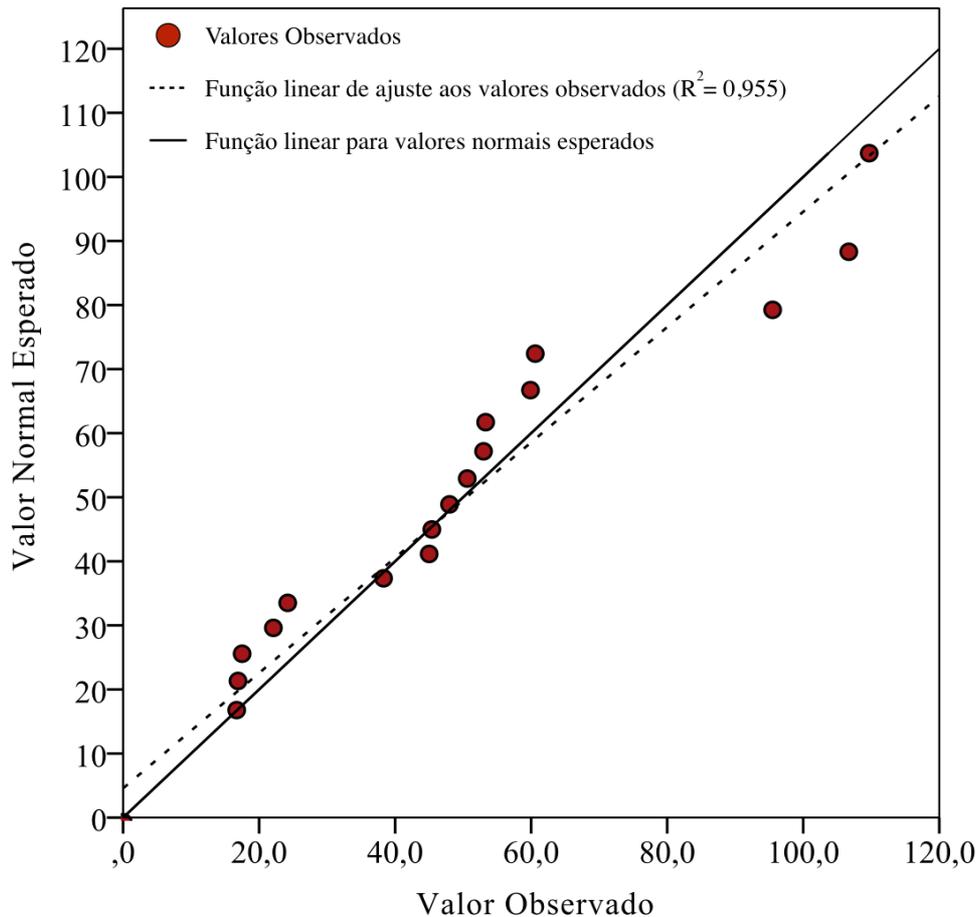


Figura 4.14 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes à **Coesão Inundada** de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 22).

O histograma do ângulo de atrito no estado natural, obtido através de 23 dados é mostrado na Figura 4.15. A distribuição normal paramétrica de média $37,4^\circ$ e desvio padrão 9° está em acordo com os dados experimentais desse parâmetro. Em outras palavras, a forma do histograma tem uma boa aproximação com a distribuição paramétrica normal. Esse fato é confirmado pelo gráfico Q-Q da Figura 4.16. A função linear de ajuste aos valores observados mostra aproximação gráfica comparada a função linear para valores normais esperados e ótimo valor de coeficiente de determinação ($R^2 = 0,978$). Todos esses fatores comprovam a tendência dos dados seguirem uma distribuição normal.

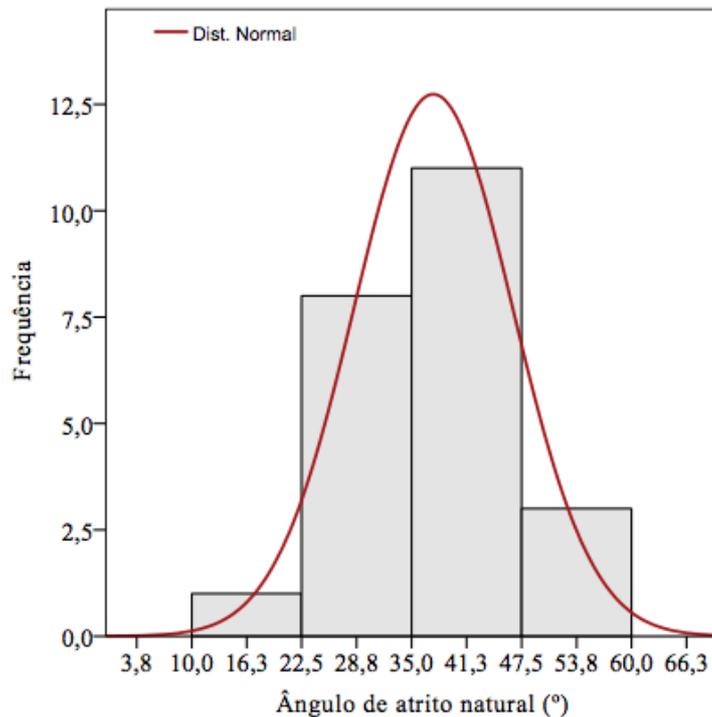


Figura 4.15 – Histograma dos dados do parâmetro **Ângulo de atrito natural**, obtido através de 23 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 37,4$; $\sigma = 9,0$.

O histograma do ângulo de atrito no estado saturado, obtido através de 22 dados é mostrado na Figura 4.17, a qual também está apresentada a distribuição normal paramétrica de média (E) $29,3^\circ$ e desvio padrão (σ) $4,8^\circ$. Apesar de a forma do histograma de frequência se aproximar de uma função densidade de probabilidade do tipo normal, existe um valor bem distinto ($12,1^\circ$), do comumente observado para esse parâmetro. É importante notar que esse dado diminui o valor da média e aumenta o desvio padrão.

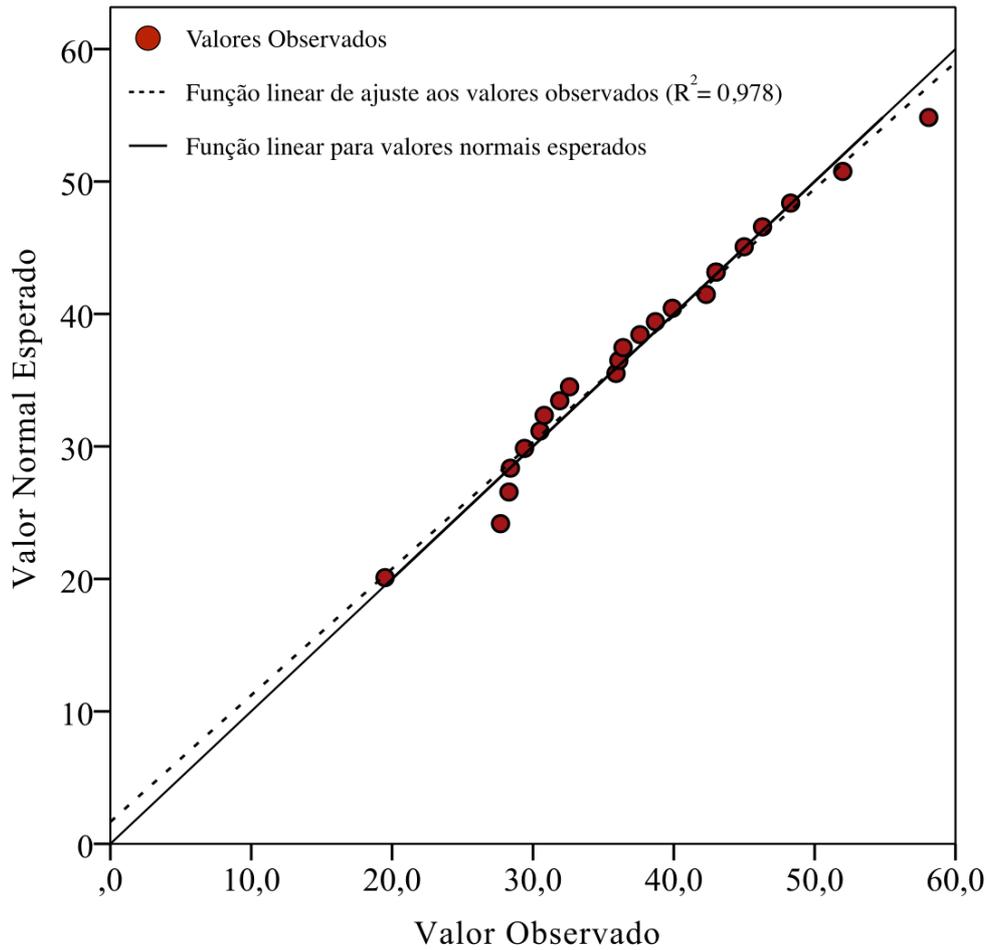


Figura 4.16 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes ao **ângulo de atrito natural** de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 23).

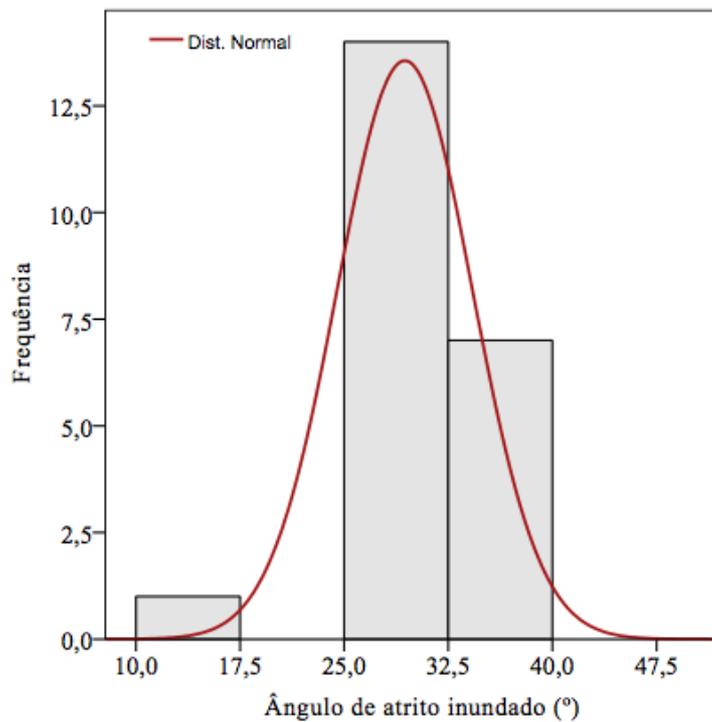


Figura 4.17 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito inundado**, obtido através de 22 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 29,3$; $\sigma = 4,8$.

O gráfico Q-Q mostra bem o padrão dos valores observados e o valor de $12,1^\circ$, incompatível com a realidade conhecida (Figura 4.18). Tanto a função linear de ajuste quanto a função linear para os valores normais esperados não obtiveram boa aproximação gráfica com os dados. Tampouco o coeficiente de determinação possui valor próximo da unidade ($R^2 = 0,775$). Assim, o dado foi selecionado para descarte, visto que considerando as características do solo da Formação Barreiras e o alto teor de areia da amostra (aproximadamente 70%), a magnitude do valor de ângulo de atrito é inconsistente.

Assim, após o descarte, foi realizada nova análise dos dados através de novo gráfico de histograma de frequência (Figura 4.19) e novo gráfico Q-Q (Figura 4.20).

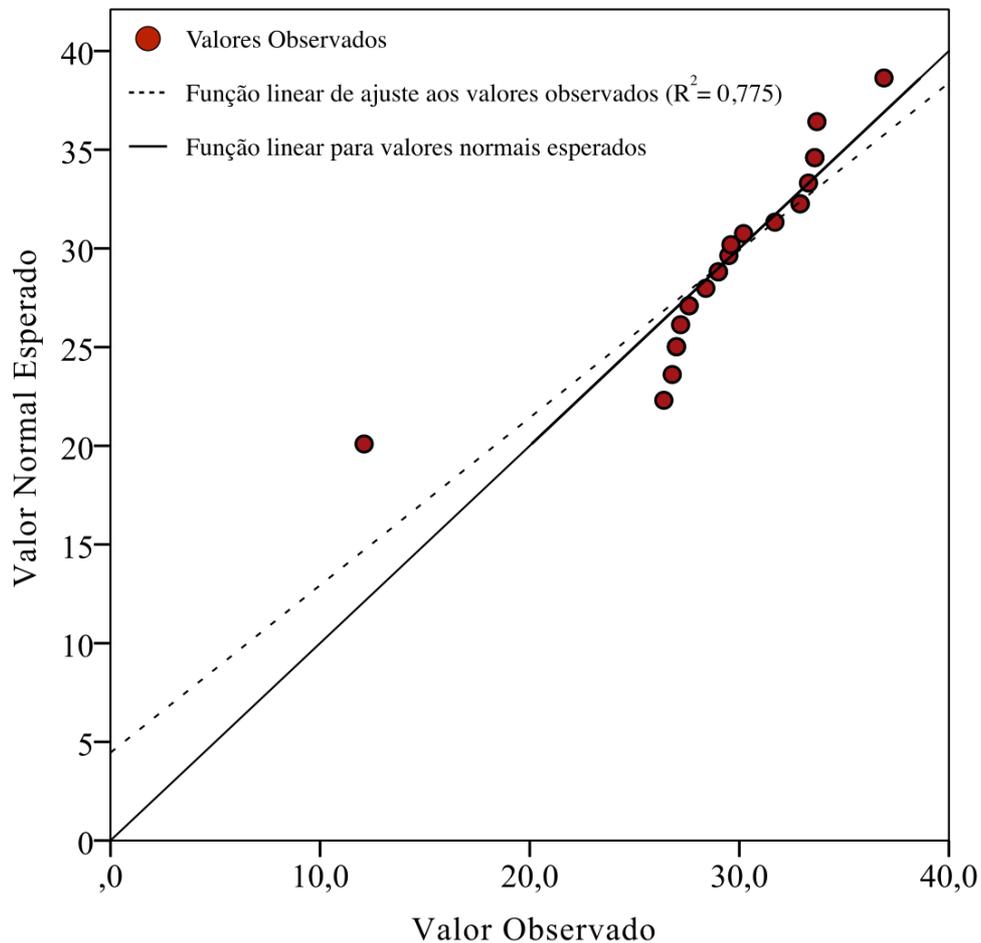


Figura 4.18 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes ao ângulo de atrito inundado de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 22).

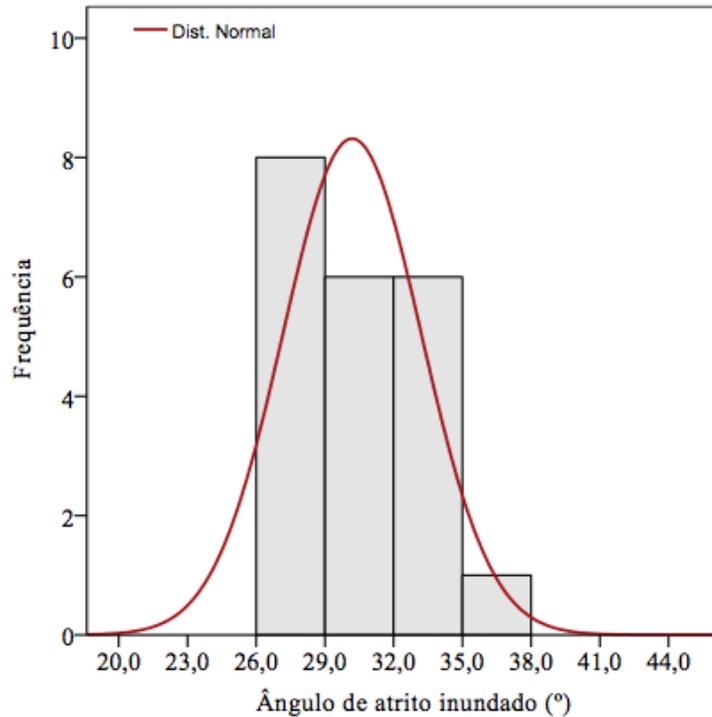


Figura 4.19 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito inundado**, obtido através de 21 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a 12,1°. $E = 30,2$; $\sigma = 3,0$.

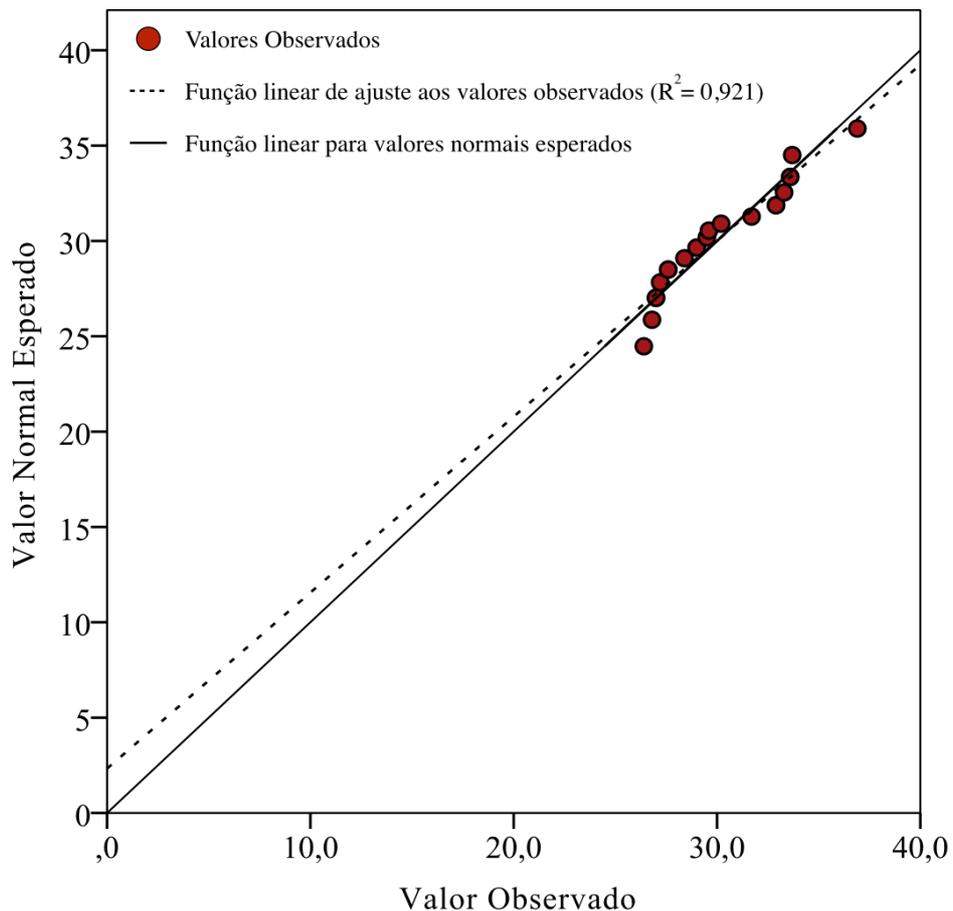


Figura 4.20 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados observados, referentes ao **ângulo de atrito inundado** de solos provenientes da Formação Barreiras (N = 21). Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a 12,1°.

Observa-se que após essa consideração há uma maior concentração (sem dispersão) dos dados, com valores variando de 26,4 e 36,9, além de aumentar a média para um valor mais coerente e diminuir o desvio padrão (Figura 4.19). Nota-se também, uma melhor aproximação gráfica entre as duas funções lineares comparadas. O coeficiente de determinação aumentou de 0,775 para 0,921, indicando adequação melhor entre os dados e a melhor função linear obtida (Figura 4.20).

Destaca-se que a elevada incerteza e dificuldade de definir uma melhor função de densidade de probabilidade relacionada aos parâmetros analisados está diretamente associada à quantidade de dados disponíveis.

Ressalta-se, que o processo de descrever como padrão a variação de um parâmetro do solo, tais como coesão e ângulo de atrito, é uma aproximação. Esses dados variam de forma aleatória conforme diversas características naturais e geológicas. Outro ponto importante, é que nessas medidas obtidas experimentalmente pode haver erros que dificultam ainda mais a transformação dos dados em uma tendência.

4.1.1 Definição das Camadas Constituintes das Falésias

Após essa etapa, foi realizada uma análise para identificar padrões, por camada de solo, no comportamento dos parâmetros e características. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de dividir todos os dados em diferentes camadas representativas da Formação Barreiras (Topo, Meio e Base).

Esse passo é importante, pois para realizar a modelagem do problema e analisar a estabilidade das falésias da Formação Barreiras, se faz necessário definir as propriedades de resistência dos solos de cada camada constituinte. As Figuras 4.21 e 4.22 demonstram de forma detalhada as diferentes camadas constituintes da Formação Barreiras, em uma Falésia típica localizada em Baía Formosa/RN. Percebem-se camadas com características distintas, sobretudo no que diz respeito ao seu nível de cimentação. Porém de forma geral, pode-se dividir essas Falésias em 3 camadas diferentes, da base para o topo: Rochas Cretáceas, Formação Barreiras e Sedimentos Pós-Barreiras, conforme descrito em Rossetti *et al.*, 2013. Para fins de modelagem do problema, esse estudo considerou as camadas de base e meio como Formação Barreiras, ao passo que a camada de topo foi considerada Sedimentos Pós-Barreiras.

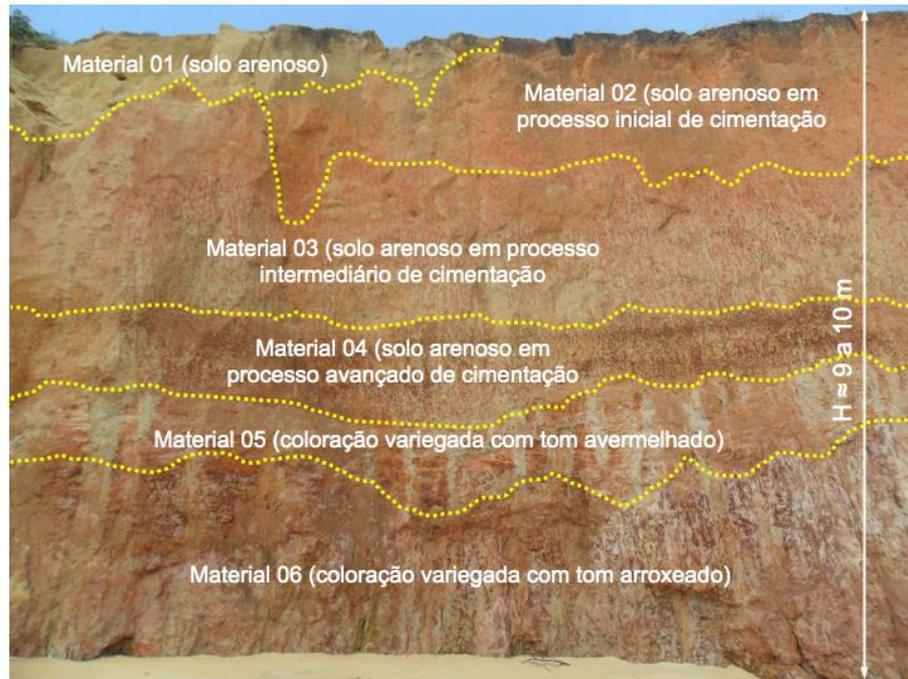


Fig. 4.21 – Perfil de Falésia da Formação Barreiras, localizada em Baía Formosa/RN. Camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados (Souza Jr., 2013).

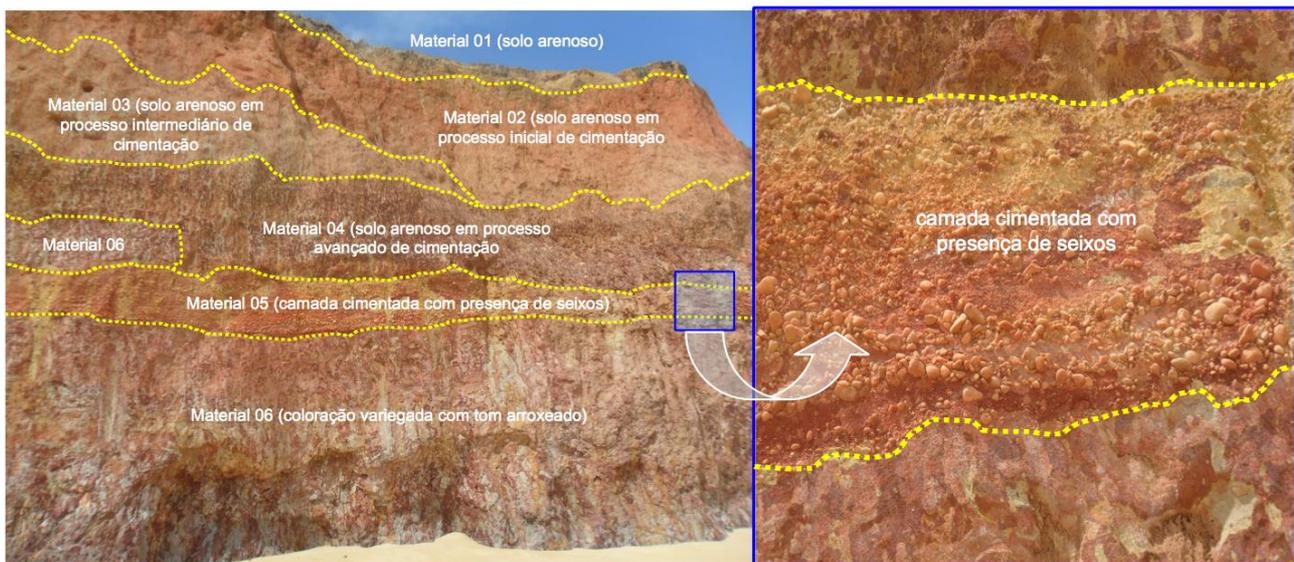


Fig. 4.22 – Perfil de Falésia da Formação Barreiras, localizada em Baía Formosa/RN. Camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados, com destaque para a camada cimentada com presença de seixos (Souza Jr., 2013).

Com o objetivo de definir as propriedades de resistências dos materiais para cada camada constituinte de forma simplificada, foram estabelecidos critérios levando-se em consideração a coloração da amostra (análise visual), a porcentagem de areia (granulometria) do material e o valor do parâmetro coesão. Esse último, diretamente relacionado ao nível de cimentação das partículas de solo. Dessa forma, a partir dos

dados apresentados na Tabela 3.2, para efeitos de modelagem do problema, foi estabelecido que as características de cada camada são as seguintes:

- ✓ **Camada de Topo da Falésia (Sedimentos Pós-Barreiras):** Possui porcentagem alta de areia, no geral acima de 70%, com características de material arenoso, os valores de coesão no estado saturado estão abaixo de 17kPa. Apresenta coloração avermelhada (Figura 4.23);



Fig. 4.23 – **Camada de topo** - Sedimentos Pós-Barreiras, apresentando coloração avermelhada (Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018)

- ✓ **Camada de Meio da Falésia (Camada Homogênea):** Possui porcentagem intermediária de areia (entre 65% e 70% aproximadamente), valores intermediários de coesão, coloração mais próxima do amarelo e vermelho. Visualmente essa camada possui uma coloração mais homogênea (Figura 4.24);



Fig. 4.24 – **Camada do meio da Falésia**, material Homogêneo (Severo, 2005; Severo, 2011; Sousa, 2018)

- ✓ **Camada de Base da Falésia** (Camada Heterogênea): Possui porcentagem areia abaixo de 65% aproximadamente; alto grau de cimentação, ou seja, alto valor de coesão, atingindo valores de até 400kPa na condição natural, coloração variegada com tons de roxo, vermelho e branco. Visualmente essa camada é bastante heterogênea (Figura 4.25).

O critério adotado nesse estudo é razoável, uma vez que todas as características definidas estão diretamente associadas ao nível de cimentação das partículas. Nesse caso, quanto mais avermelhada a amostra, maior a porcentagem de areia. Além disso, o nível de cimentação entre as partículas é diretamente proporcional aos valores de coesão e conseqüentemente da porcentagem de finos.



Fig. 4.25 – **Camada da base da Falésia**, material heterogêneo (Severo, 2005; Severo, 2011; Sousa, 2018)

4.1.2 Tratamento estatístico por Camadas

Com base na Tabela 3.7 (valores de peso específico), foi gerada a Tabela 4.1, a qual apresenta a variação dos dados de peso específico por camada, conforme a definição estabelecida nesse estudo para as camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras. Entretanto, as análises de estabilidade probabilísticas foram executadas considerando valores médios do peso específico.

Tabela 4.1 Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - **Peso específico**, obtidos em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras. (Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017).

Localização	Camada da Falésia	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	Referência
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Topo	19,5	17,2	20,7	Severo (2011)
Baía Formosa/RN	Topo	16,3	15,7	19,7	Souza Jr. (2013)
Barreira do Inferno/RN	Topo	16,4	16,1	18,7	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Meio	15,3	15,2	19,5	Severo (2005)

Tabela 4.1 Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - **Peso específico**, obtidos em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras. (Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017). **[CONTINUAÇÃO]**

Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Meio	15,6	15,3	19,5	Severo (2005)
Barreira do Inferno/RN	Meio	17,6	17,4	20,3	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Meio	18,1	17,4	20,3	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Base	18,8	18,4	-	Severo (2005)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Base	19,4	19,1	-	Severo (2005)
Piau (RN 003), Tibau do Sul/RN	Base	16,2	15,7	19,8	Severo (2005)
Piau (RN 003), Tibau do Sul/RN	Base	15,9	15,6	19,7	Severo (2005)
BR 101 (km 131), Tibau do Sul/RN	Base	16,9	16,7	20,4	Severo (2005)
BR 101 (km 131), Tibau do Sul/RN	Base	17,3	16,8	20,4	Severo (2005)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Base	21,6	18,8	21,7	Severo (2011)
Ponta do Pirambu, Tibau do Sul/RN	Base	21,2	18,4	21,5	Severo (2011)
Baía Formosa/RN	Base	19,3	17,7	21,1	Souza Jr. (2013)

A Tabela 4.2 mostra a variação dos parâmetros de resistência, conforme a definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras, no estado natural, segundo os critérios adotados. Vale salientar que esses critérios não foram atendidos em sua totalidade para a definição dessas camadas. Em alguns casos, os valores de porcentagem de areia, por exemplo, ultrapassam os limites ajustados. A variação dos dados é função de diversos fatores, tais como geologia, histórico de tensões e o processo de formação, os quais contribuíram para essa determinação. Ressalta-se a dificuldade de se estabelecer limiares padrões para características advindas da natureza,

de forma semelhante ao que ocorreu com a definição das funções densidade de probabilidade.

Tabela 4.2. Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - **Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição natural**. Informação da porcentagem de areia fina, média e grossa nas amostras ensaiadas. (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018).

Localização	Tipo de ensaio	Camada da Falésia	c (kPa)	ϕ (°)	Areia (%)	Referência
Tibau do Sul/RN	Triaxial (CD)	Topo - Sedimentos Pós Barreiras	6,5	29,4	62,2	Severo (2011)
Barreira do Inferno	Triaxial (CU)	Topo - Sedimentos Pós Barreiras	97,6	35,9	87,8	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Zona Norte	Cisalhamento Direto	Topo - Sedimentos Pós Barreiras	0,5	43,0	75,0	Sousa (2018)
Zona Norte	Cisalhamento Direto	Topo - Sedimentos Pós Barreiras	134,4	19,5	62,6	Sousa (2018)
Zona Norte	Cisalhamento Direto	Topo - Sedimentos Pós Barreiras	206,3	39,9	71,9	Sousa (2018)
Zona Norte	Cisalhamento Direto	Topo - Sedimentos Pós Barreiras	167,7	36,1	88,0	Sousa (2018)
Zona Norte	Cisalhamento Direto	Topo - Sedimentos Pós Barreiras	46,0	32,6	74,3	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	193,0	45,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	232,0	43,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	233,0	27,7	37,5	Severo (2005)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	Meio - Solo Homogêneo	174,4	30,8	69,8	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	Meio - Solo Homogêneo	192,1	36,4	74,2	Taquez (2017) e Barbosa (2017)

Tabela 4.2. Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - **Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição natural**. Informação da porcentagem de areia fina, média e grossa nas amostras ensaiadas. (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018). **[CONTINUAÇÃO]**

Zona Leste	Triaxial (CD)	Meio - Solo Homogêneo	196,7	38,7	65,1	Sousa (2018)
Zona Leste	Triaxial (CD)	Meio - Solo Homogêneo	178,0	37,6	66,1	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	318,00	52,00	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	384,1	28,4	63,0	Severo (2005)
Piau/RN 003	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	396,6	31,9	25,4	Severo (2005)
BR - 101 (km 131)	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	259,3	48,3	54,8	Severo (2005)
Tibau do Sul/RN	Triaxial (CD)	Base - Solo Heterogêneo	62,7	30,5	45,5	Severo (2011)
Tibau do Sul/RN	Triaxial (CD)	Base - Solo Heterogêneo	110,5	28,3	65,4	Severo (2011)
Zona Leste	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	148,6	58,1	62,0	Sousa (2018)
Zona Leste	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	218,0	42,3	73,4	Sousa (2018)
Zona Leste	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	306,8	46,3	62,1	Sousa (2018)

A Tabela 4.3 mostra a variação dos parâmetros de resistência, conforme a definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras (na condição inundada), segundo os critérios adotados.

Tabela 4.3. Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - **Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição inundada**. Informação da porcentagem de areia fina, média e grossa nas amostras ensaiadas. (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018).

Localização	Tipo de ensaio	Camada da Falésia	c (kPa)	ϕ (°)	Areia (%)	Referência
Baía Formosa/RN	Cisalhamento Direto	Topo - Formação Pós Barreiras	16,9	29,5	-	Souza Jr. (2013)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	Topo - Formação Pós Barreiras	16,7	29,0	87,82	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	Topo - Formação Pós Barreiras	0,0	33,7	75,00	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	Topo - Formação Pós Barreiras	0,0	33,3	62,55	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	Topo - Formação Pós Barreiras	0,0	32,9	71,89	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	Topo - Formação Pós Barreiras	0,0	36,9	88,00	Sousa (2018)
Zona Norte de Natal/RN	Cisalhamento Direto	Topo - Formação Pós Barreiras	0,0	32,9	74,26	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	48,0	27,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	53,0	29,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	50,6	27,5	37,50	Severo (2005)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	Meio - Solo Homogêneo	53,3	*12,1	69,77	Taquez (2017) e Barbosa (2017)

Tabela 4.3. Definição das camadas constituintes das Falésias da Formação Barreiras - **Parâmetros de resistência de pico obtidos em ensaios na condição inundada**. Informação da porcentagem de areia fina, média e grossa nas amostras ensaiadas. (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018). **[CONTINUAÇÃO]**

Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	Meio - Solo Homogêneo	60,6	27,6	74,23	Taquez (2017) e Barbosa (2017)
Zona Oeste de Natal	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	22,1	27,2	65,05	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal	Cisalhamento Direto	Meio - Solo Homogêneo	17,5	31,7	66,70	Sousa (2018)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	45,0	27,0	-	Silva (2003)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	45,4	26,8	63,00	Severo (2005)
Piau/RN 003	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	95,5	29,6	25,38	Severo (2005)
BR - 101 (km 131)	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	109,7	26,4	54,82	Severo (2005)
Baia Formosa/RN	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	59,9	33,6	-	Souza Jr. (2013)
Zona Oeste de Natal	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	106,7	30,2	61,95	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	38,3	28,4	73,42	Sousa (2018)
Zona Oeste de Natal	Cisalhamento Direto	Base - Solo Heterogêneo	24,2	33,6	62,05	Sousa (2018)

* O valor de 12,1° foi descartado dos dados de ângulo de atrito, por apresentar incompatibilidade com a realidade conhecida, sobretudo, referente às características do solo da Formação Barreiras e o alto teor de areia da amostra.

Na sequência, foram definidas as funções densidade de probabilidade das referidas variáveis aleatórias (parâmetros de entrada), assim como determinada média e desvio-padrão dessas distribuições. Nesse momento, os parâmetros coesão e ângulo de atrito foram analisados por camada, segundo o critério utilizado para essa definição (topo, meio e base). Esse procedimento foi realizado para todas as camadas de solo consideradas.

Como apresentado anteriormente nas Figuras 4.11 a 4.20, por meio de uma análise e tratamento geral de todos os dados o melhor ajuste obtido foi através da distribuição normal para todos os casos. A quantidade de dados utilizados para esse procedimento (considerando a Falésia como uma única camada) foi satisfatória, resultando em boas aproximações e tendências. Entretanto, a quantidade de dados disponíveis, por camada, para definir padrões, tendências e funções distribuições de probabilidade, é pequena.

Em decorrência disso, foi assumido que as variáveis aleatórias de todas as camadas são normalmente distribuídas. Essa consideração foi realizada, mesmo que a distribuição normal não apresente boa concordância com os dados dos parâmetros analisados, por camada. Isso se justifica, por se tratar do mesmo tipo de solo, apenas separando por camadas constituintes e condição, natural ou inundada. Em outras palavras, em termos práticos, a melhor forma de definir as funções distribuições de probabilidade para cada parâmetro dividido por camada, é extrapolando o tratamento estatístico realizado para os dados gerais (única camada).

As Figuras 4.26 a 4.51 mostram os gráficos de histograma de frequência e teste Q-Q, realizados para os parâmetros coesão e ângulo de atrito, por camada constituinte da Formação Barreiras, conforme critérios de separação adotados.

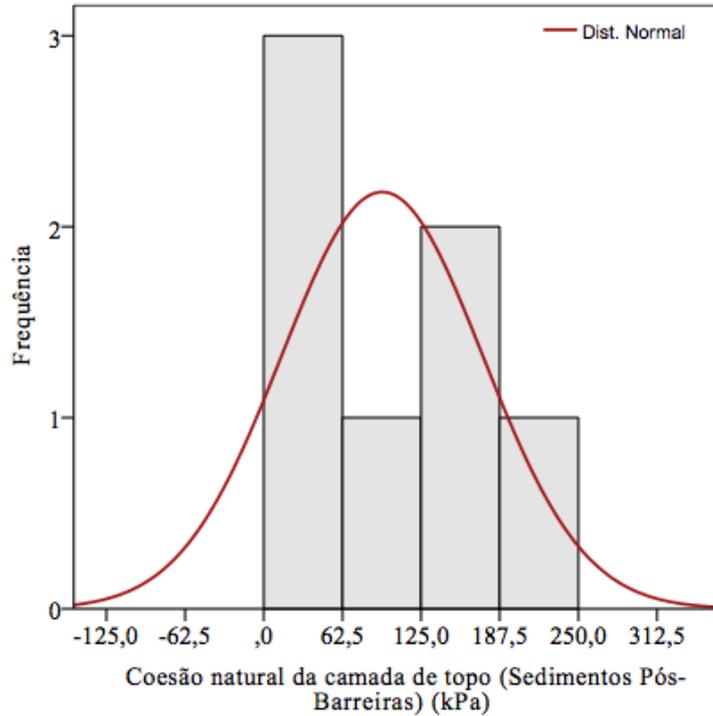


Figura 4.26 – Histograma dos dados do parâmetro **coesão natural da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 94,1$; $\sigma = 80,0$.

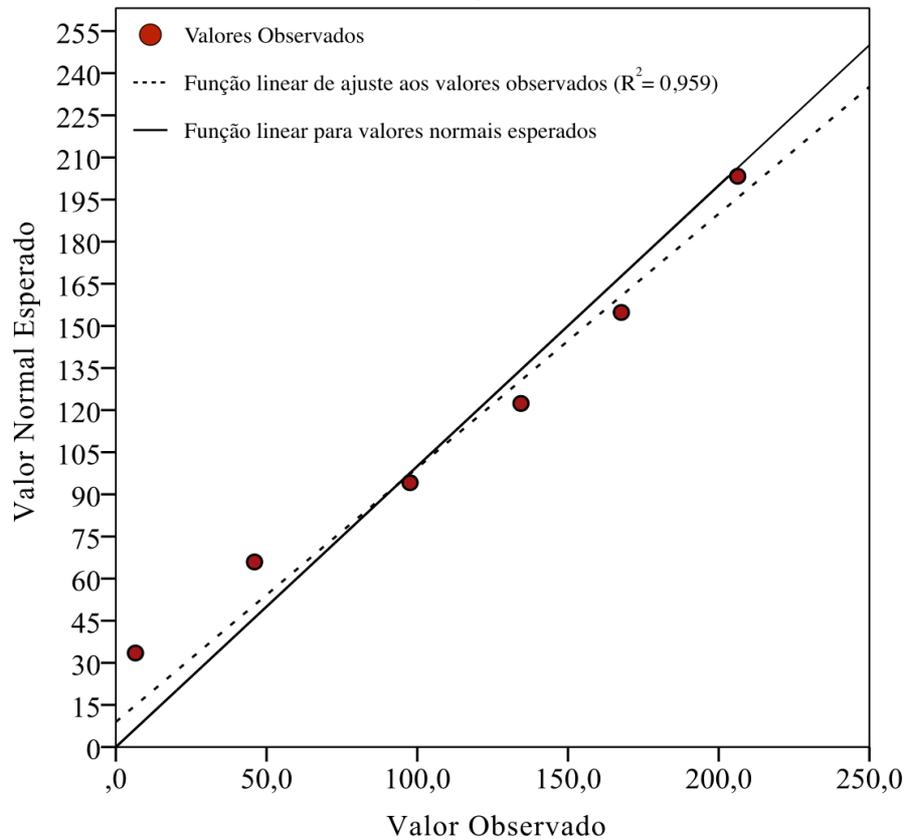


Figura 4.27 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à **coesão natural da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).

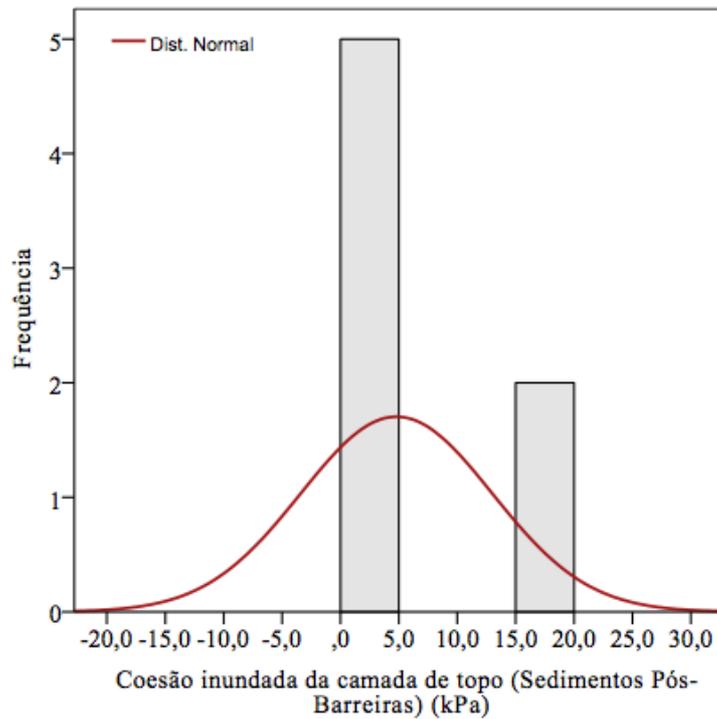


Figura 4.28 – Histograma dos dados do parâmetro **coesão inundada da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 4,8$; $\sigma = 8,2$.

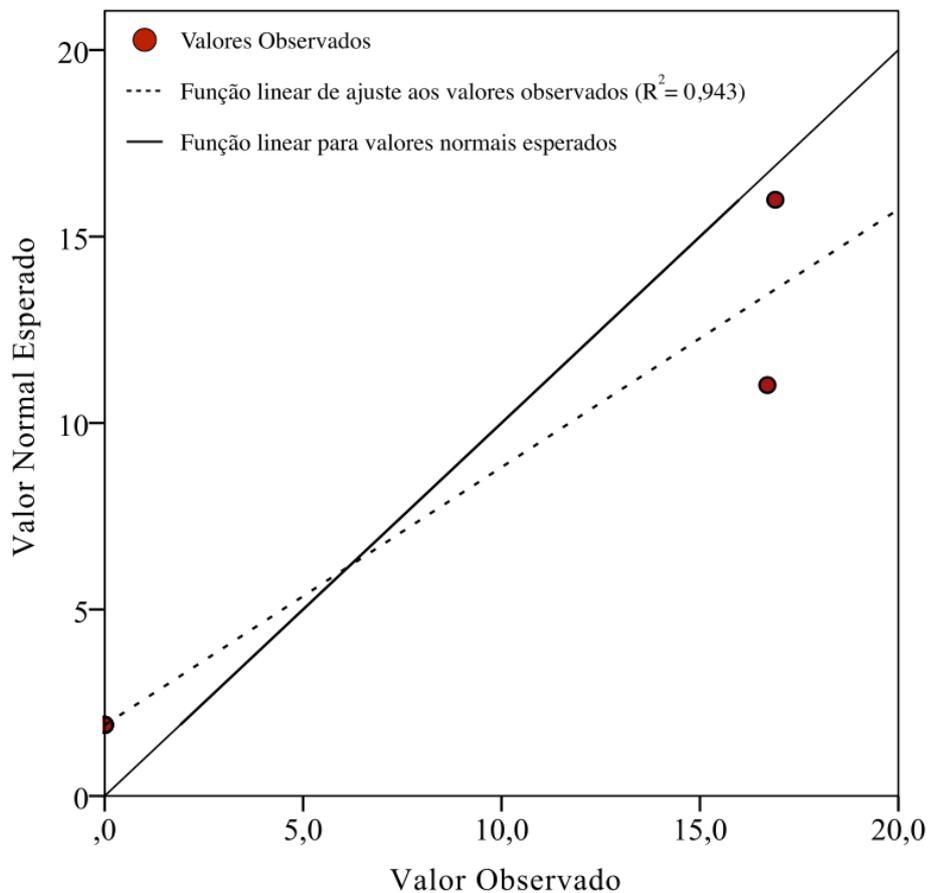


Figura 4.29 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à **coesão inundada da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).

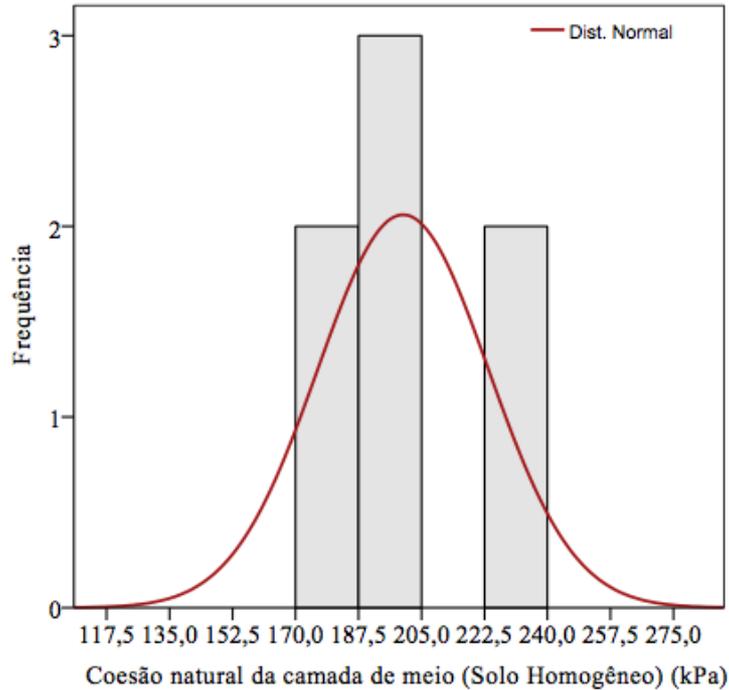


Figura 4.30 – Histograma dos dados do parâmetro **coesão natural da camada de meio** (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 199,9$; $\sigma = 23,7$.

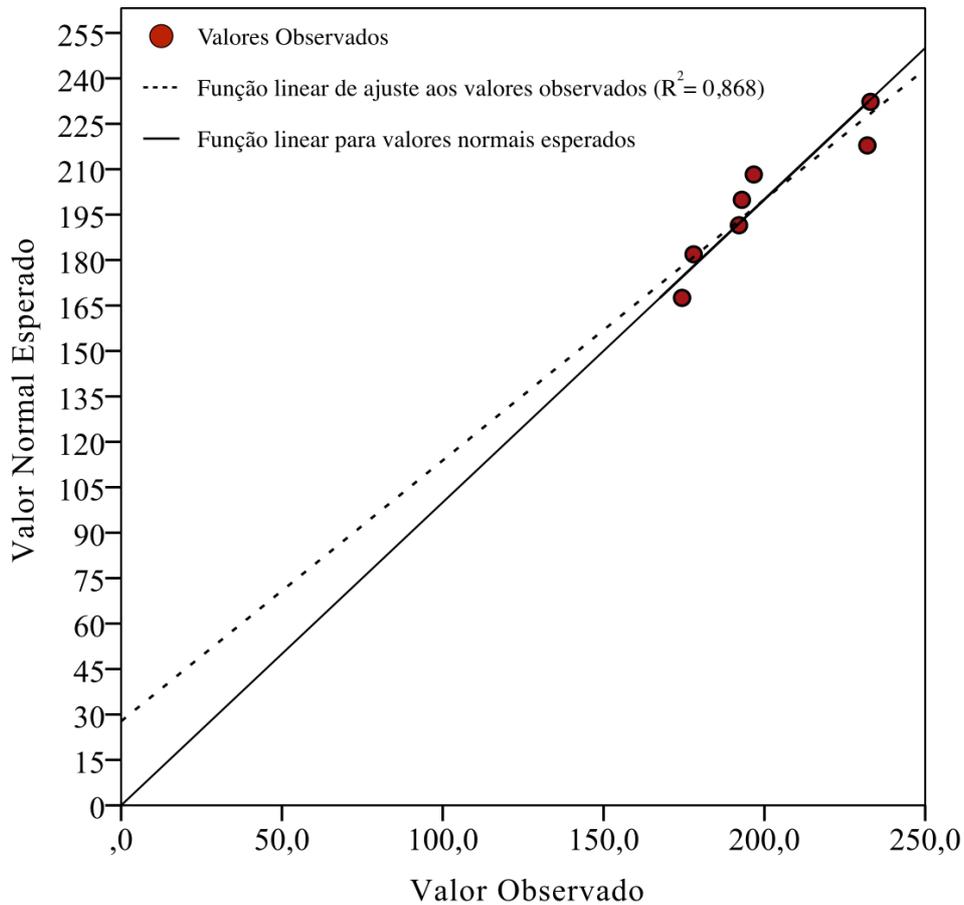


Figura 4.31 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à **coesão natural da camada de meio** (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).

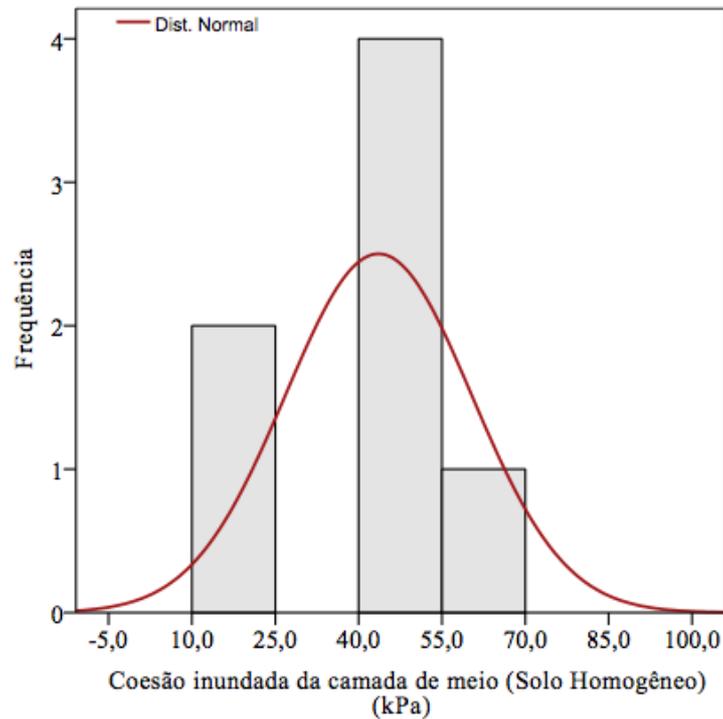


Figura 4.32 – Histograma dos dados do parâmetro **coesão inundada da camada de meio** (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 43,59$; $\sigma = 16,7$.

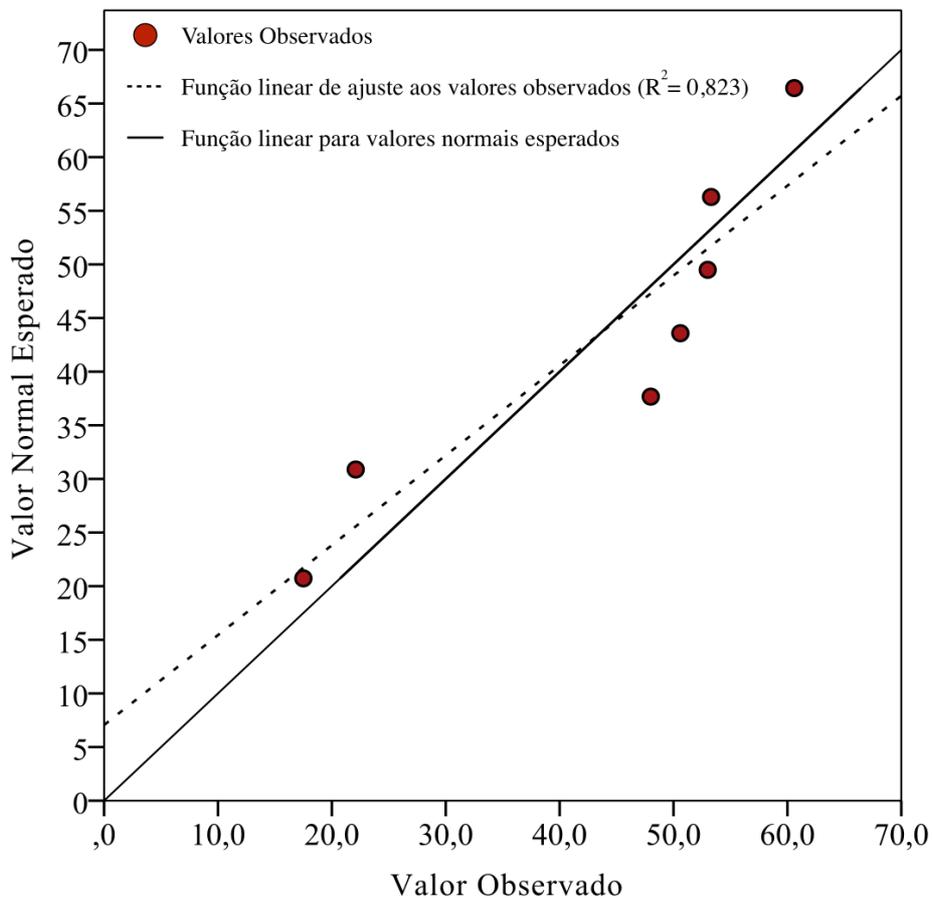


Figura 4.33 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à **coesão inundada da camada de meio** (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).

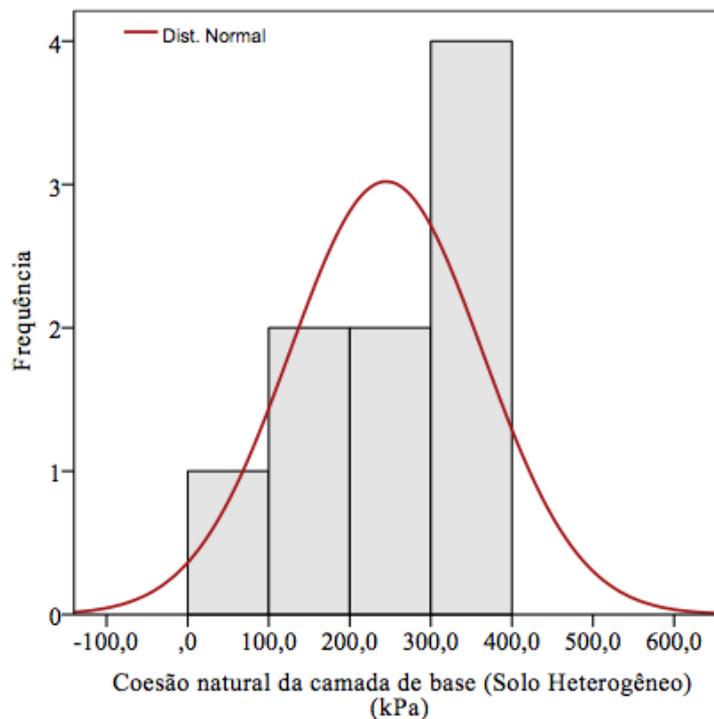


Figura 4.34 – Histograma dos dados do parâmetro **coesão natural da camada de base** (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 245,0$; $\sigma = 118,9$.

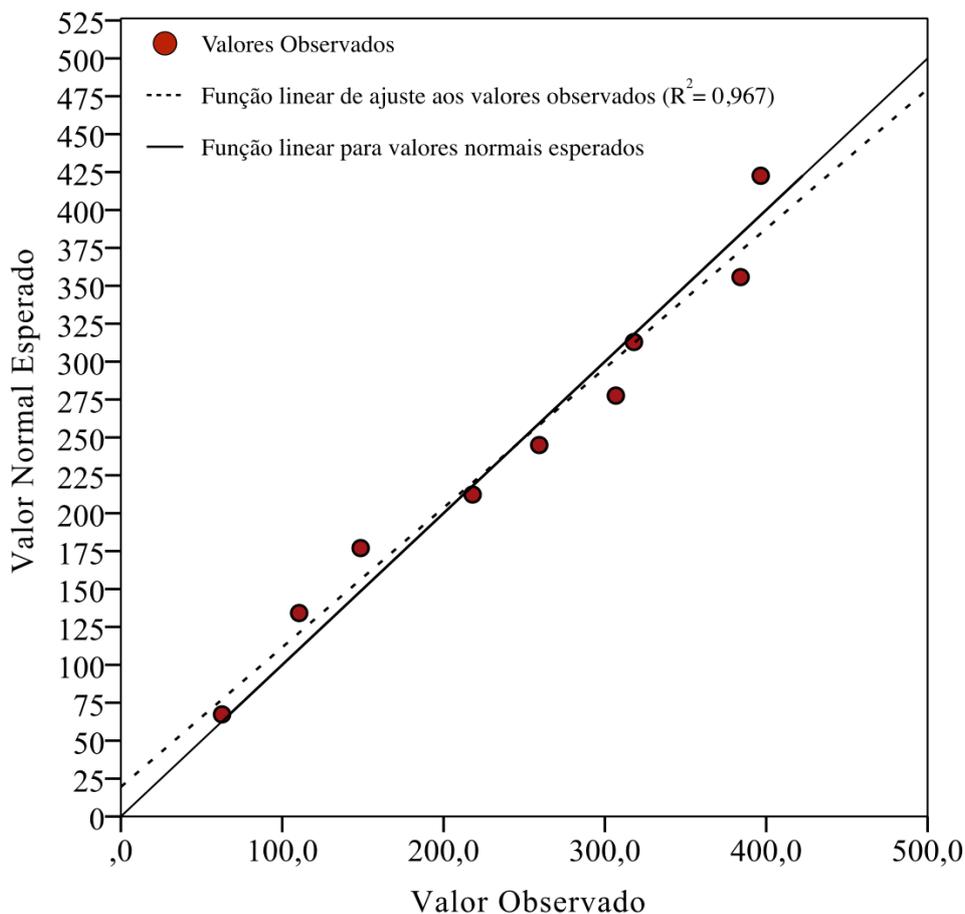


Figura 4.35 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à **coesão natural da camada de base** (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 9$).

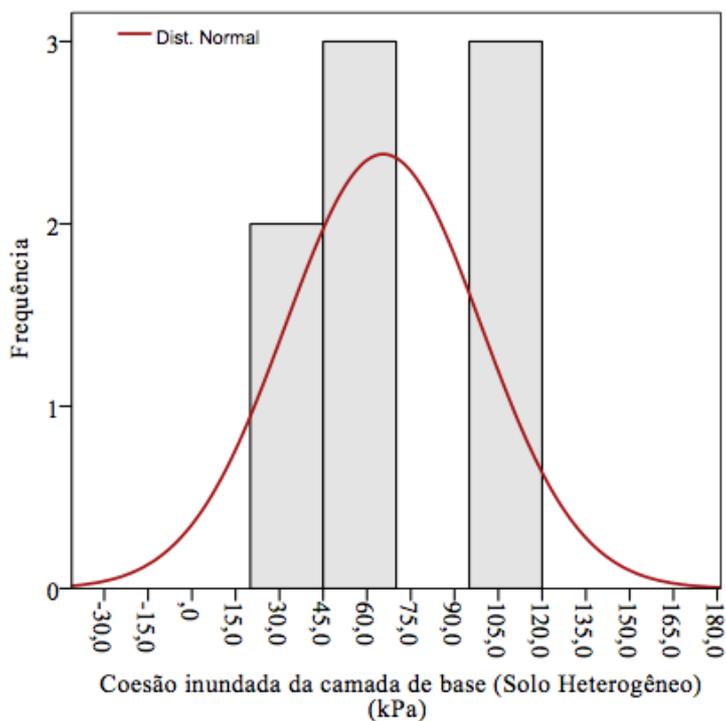


Figura 4.36 – Histograma dos dados do parâmetro Coesão inundada da camada de base (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 65,6$; $\sigma = 33,5$.

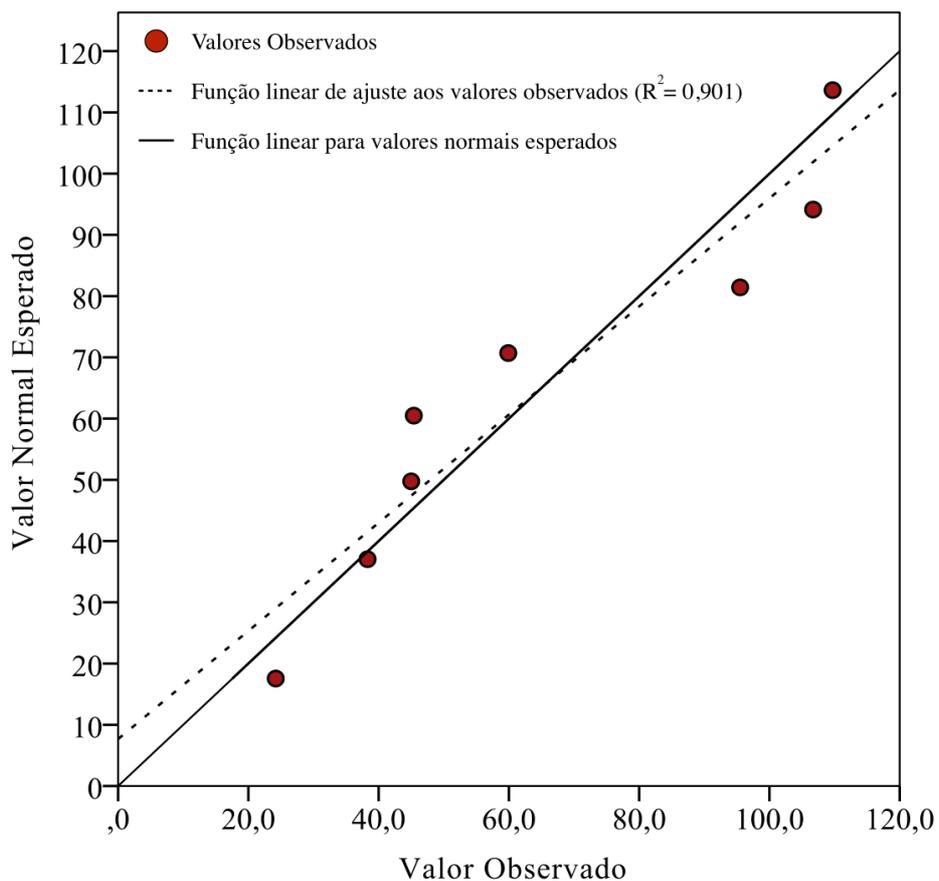


Figura 4.37 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes à coesão inundada da camada de base (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 9$).

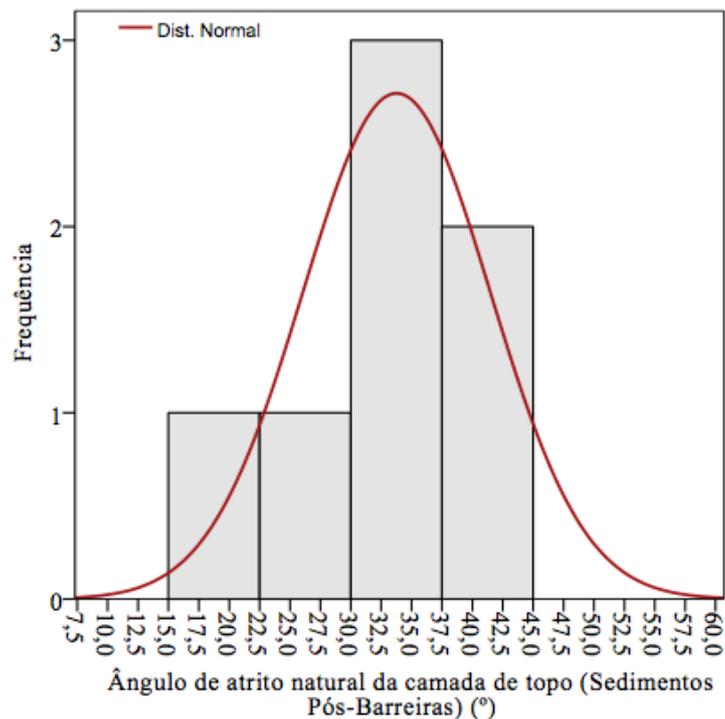


Figura 4.38 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito natural da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 33,8$; $\sigma = 7,7$.

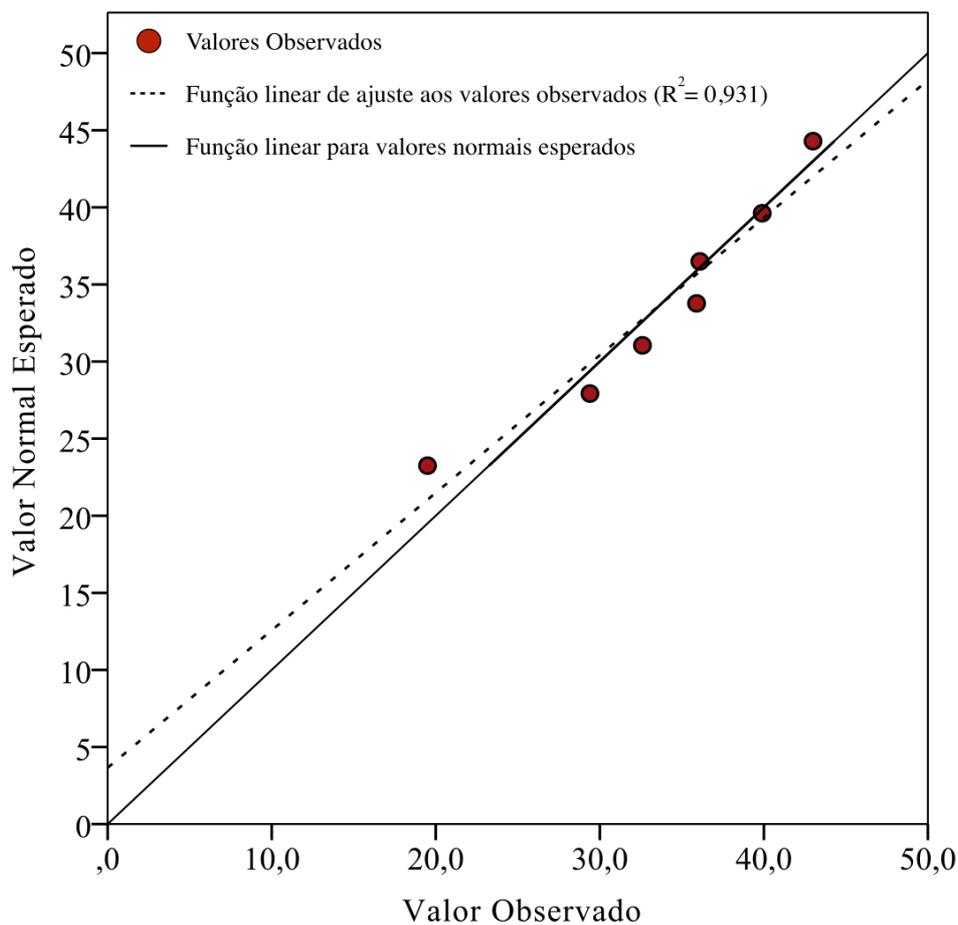


Figura 4.39 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao **ângulo de atrito natural da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).

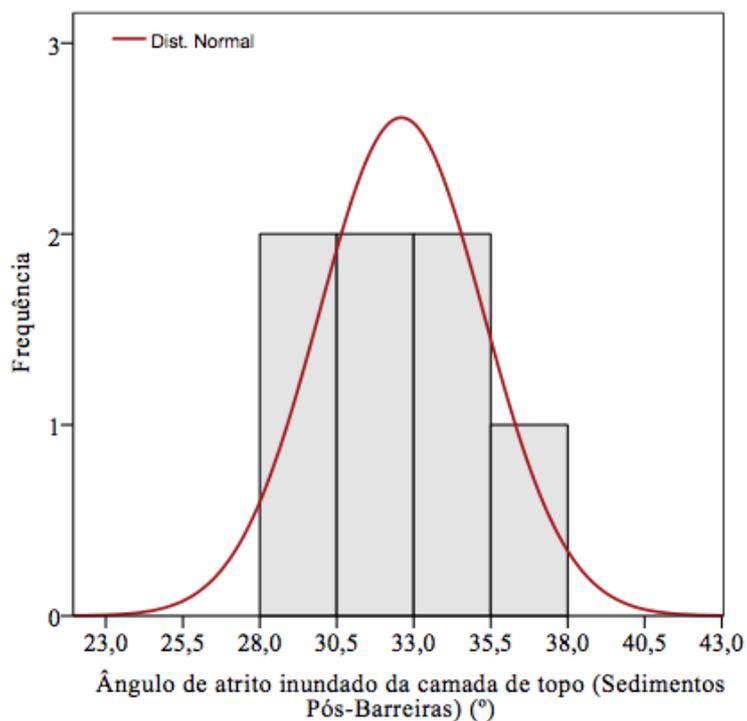


Figura 4.40 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito inundado da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 32,6$; $\sigma = 2,7$.

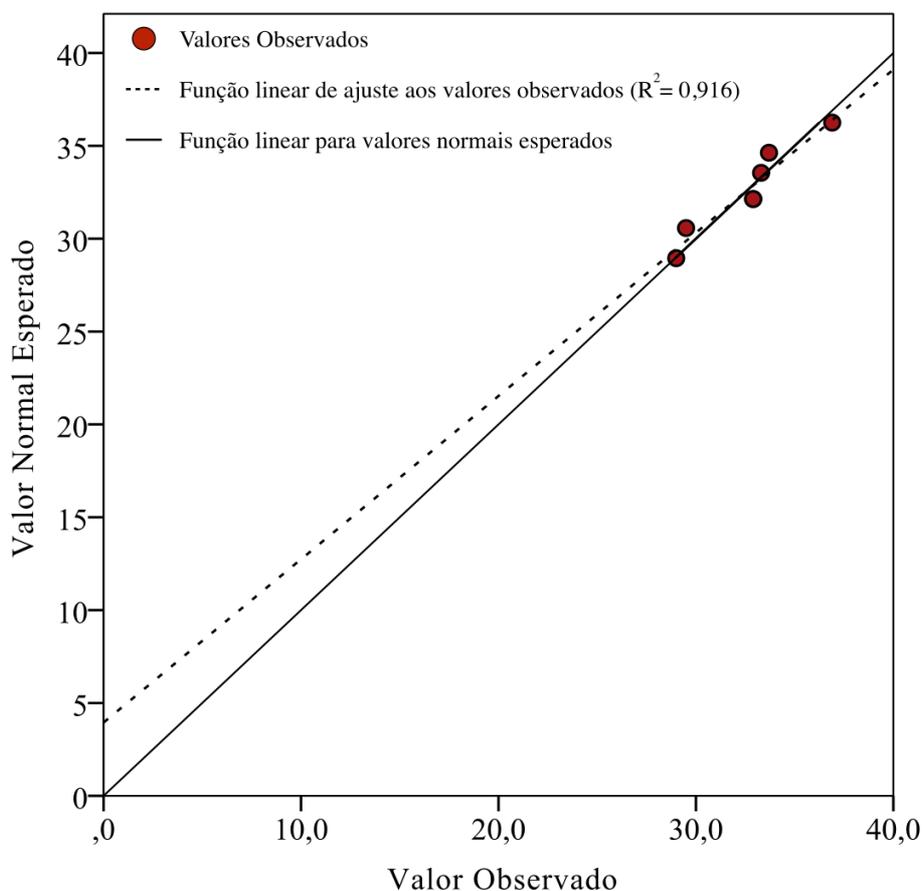


Figura 4.41 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao **ângulo de atrito inundado da camada de topo** (sedimentos pós Barreiras), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).

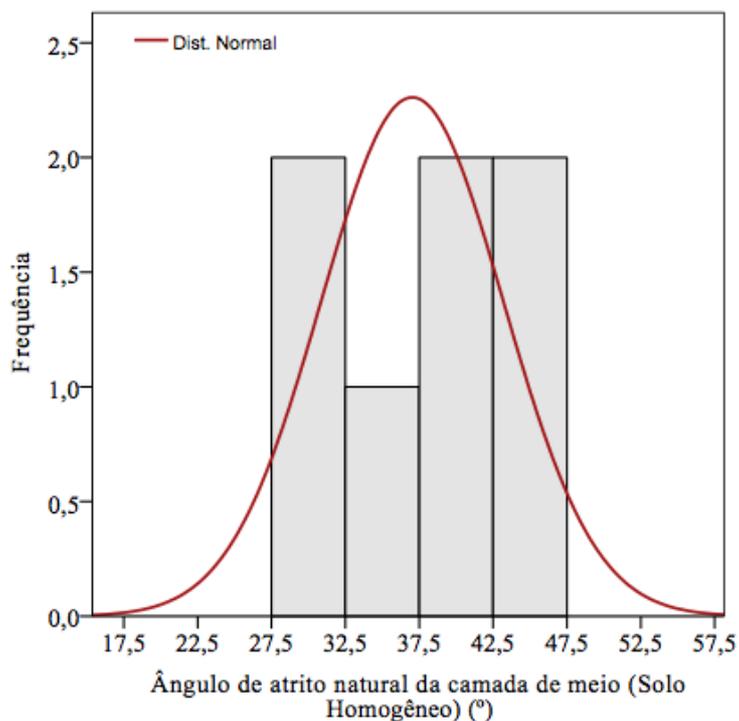


Figura 4.42 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito natural da camada de meio** (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 37,0$; $\sigma = 6,2$.

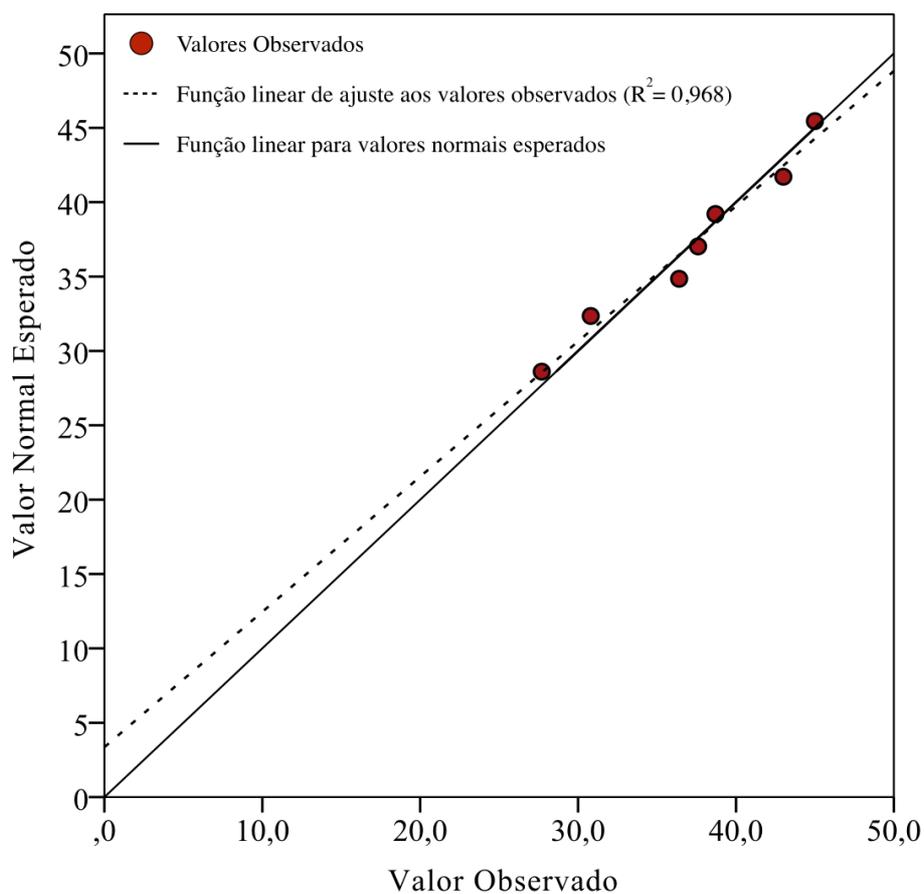


Figura 4.43 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao **ângulo de atrito natural da camada de meio** (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo ($N = 7$).

Os dados referentes ao ângulo de atrito inundado da camada do meio possui o valor de $12,1^\circ$, o qual foi descartado quando avaliado todos os dados. Assim, para os dados separados por camada, foi necessário realizar o mesmo ajuste. Em outras palavras, de forma análoga ao tratamento que foi realizado para os dados gerais, o ângulo de atrito de $12,1^\circ$ foi descartado para a camada do meio, visto que esse dado é incompatível com a realidade das características da Formação Barreiras. A fim de comparar o efeito desse valor na função distribuição de probabilidade e no gráfico Q-Q, apresentam-se os resultados das Figuras 3.88 e 3.89, os quais foram obtidos considerando o valor de $12,1^\circ$ enquanto que as Figuras 3.90 e 3.91 mostram os resultados desconsiderando o dado que foi rejeitado. Percebe-se com isso, um aumento no valor médio de ângulo de atrito no estado inundado na camada do meio e uma diminuição do desvio-padrão.

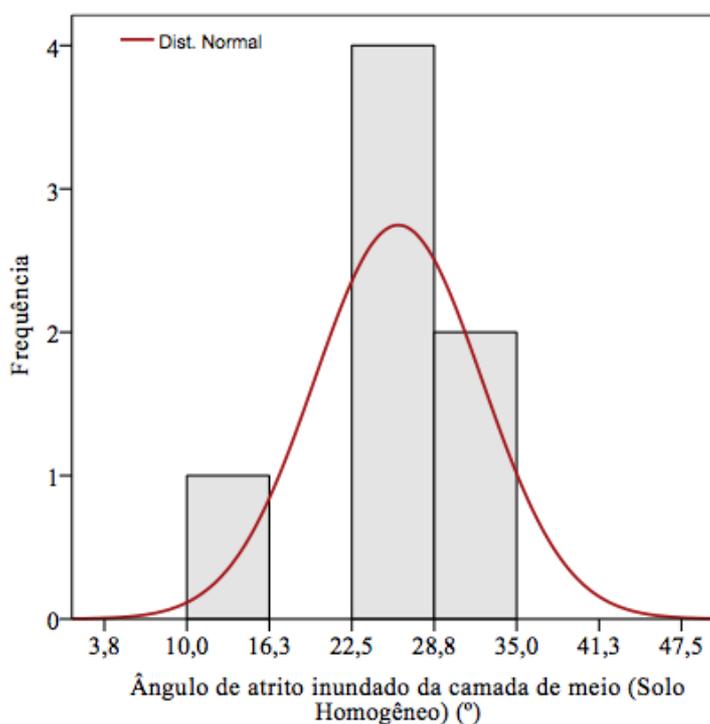


Figura 4.44 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito inundado da camada de meio** (Solo homogêneo), obtido através de 7 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 26,0$; $\sigma = 6,3$.

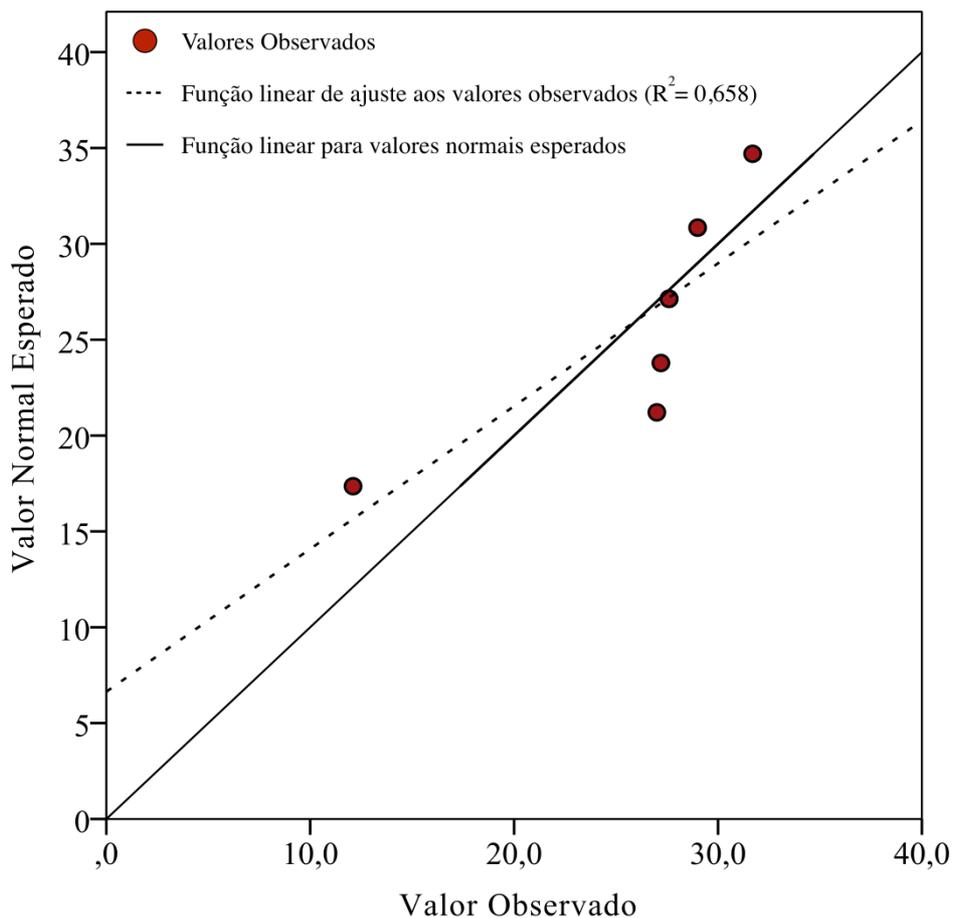


Figura 4.45 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao **ângulo de atrito inundado da camada de meio** (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 7).

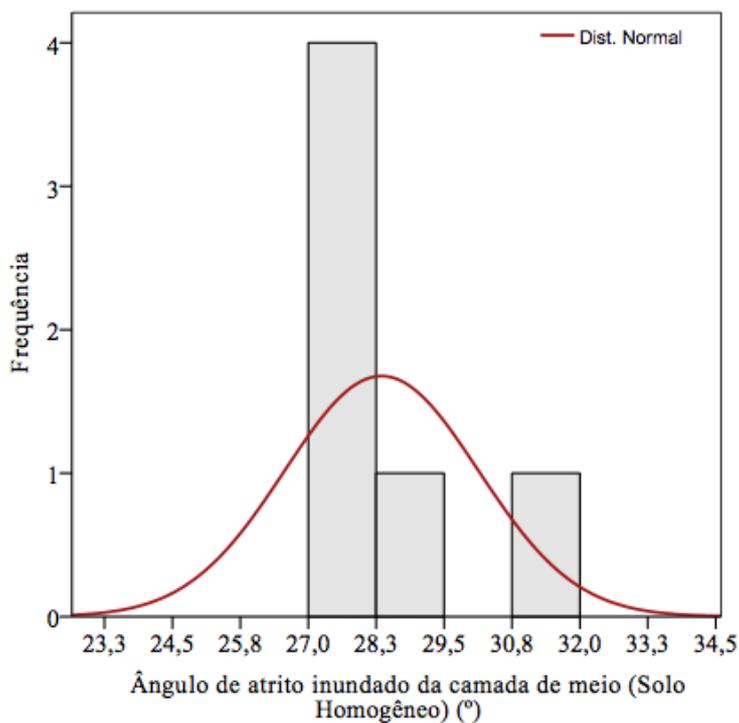


Figura 4.46 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito inundado da camada de meio** (Solo homogêneo), obtido através de 6 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 28,35$; $\sigma = 1,8$. Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a 12,1.

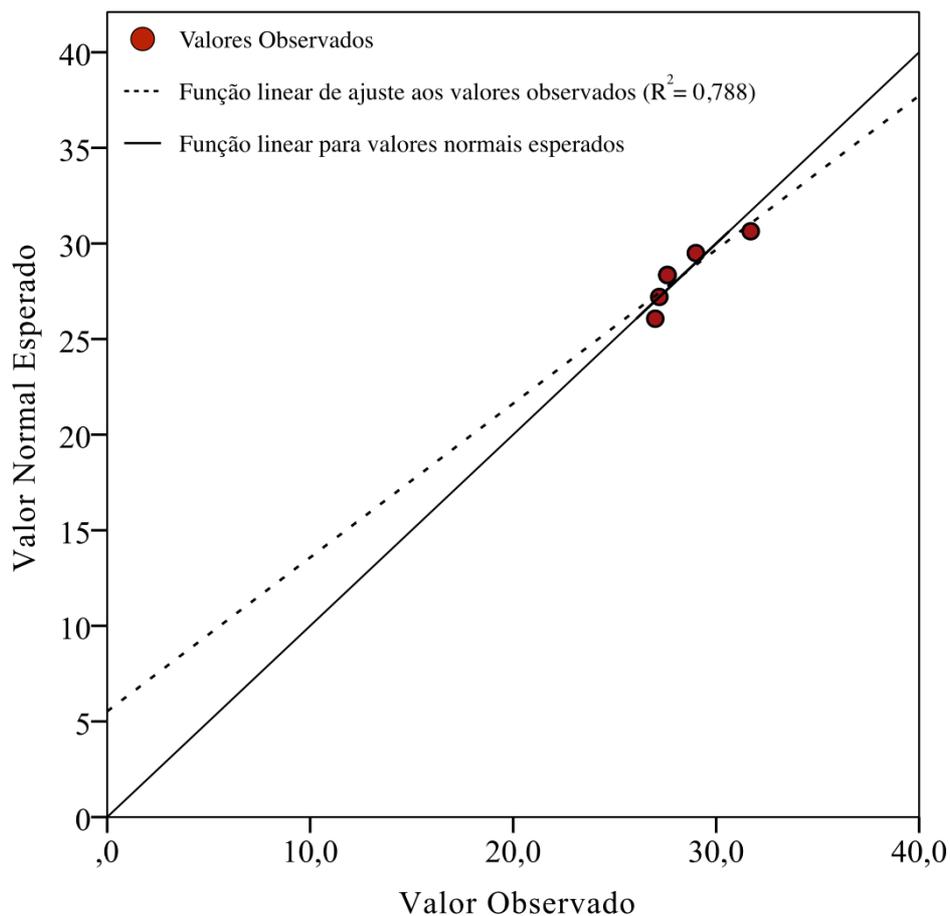


Figura 4.47 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao **ângulo de atrito inundado da camada de meio** (Solo homogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 6). Desconsiderado o valor de ângulo de atrito igual a 12,1.

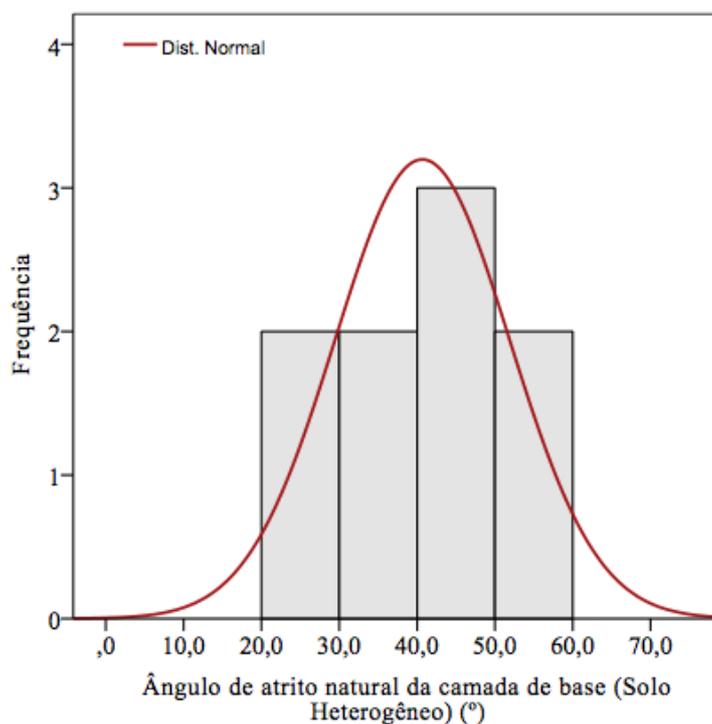


Figura 4.48 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito natural da camada de base** (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 40,7$; $\sigma = 11,2$.

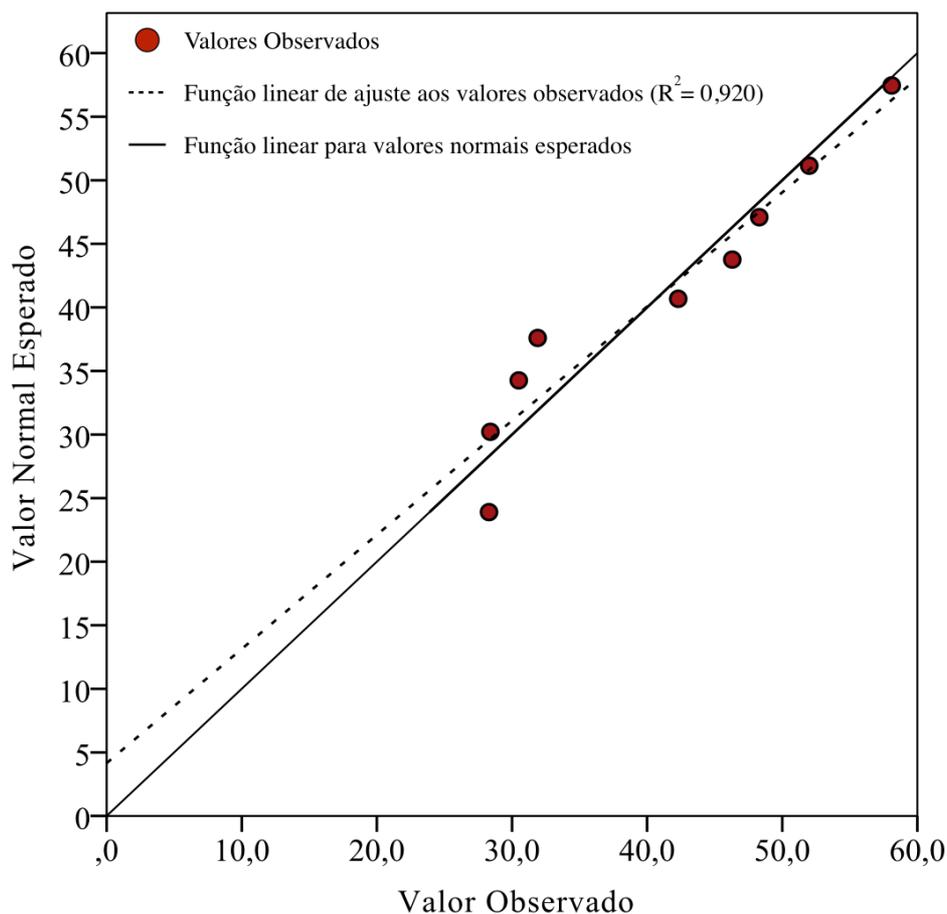


Figura 4.49 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao **ângulo de atrito natural da camada de base** (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 9).

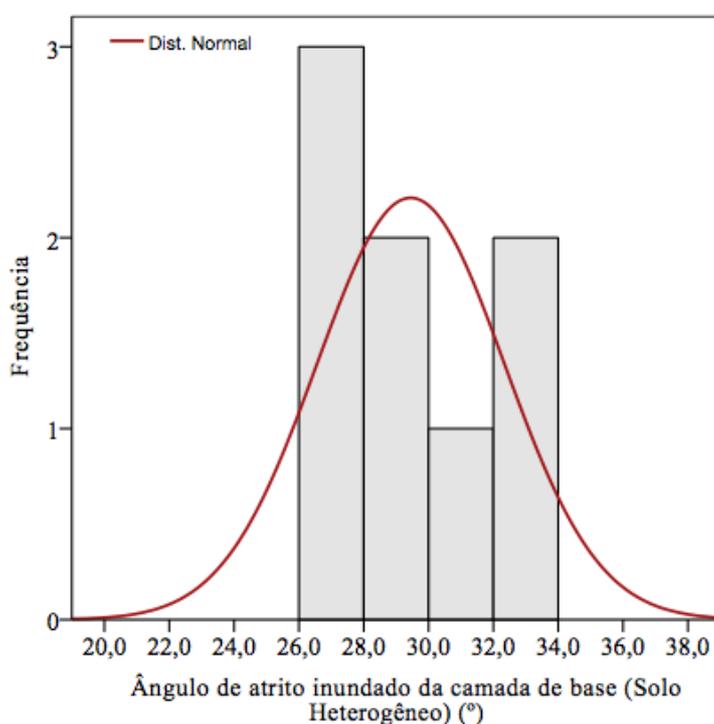


Figura 4.50 – Histograma dos dados do parâmetro **ângulo de atrito inundado da camada de base** (Solo heterogêneo), obtido através de 9 dados em amostras de solos provenientes da Formação Barreiras. $E = 29,4$; $\sigma = 2,9$.

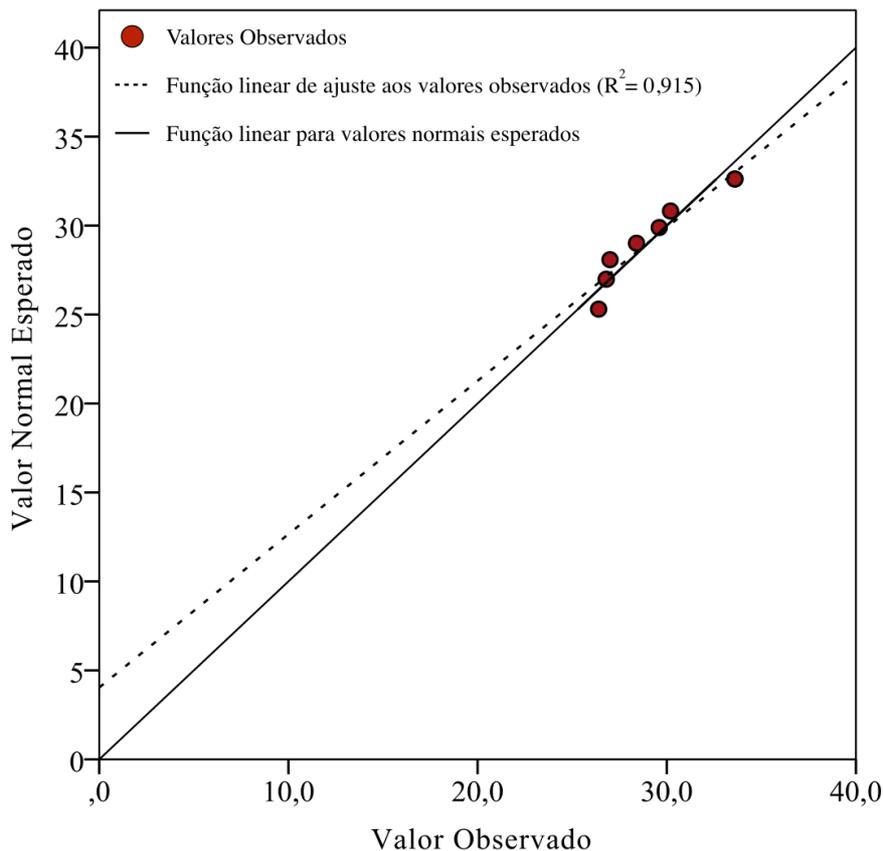


Figura 4.51 – Gráfico Q-Q dos dados esperados em uma distribuição normal (paramétrica) e os dados referentes ao ângulo de atrito inundado da camada de base (Solo heterogêneo), segundo definido nesse estudo (N = 9).

4.2 Modelagem

Nesse contexto, a Tabela 4.4 mostra todos os dados de entrada utilizados para executar as análises de estabilidade probabilísticas. Para definir os valores máximos e mínimos dos parâmetros coesão e ângulo de atrito, foi utilizada a regra dos 3 desvios padrão. Essa regra leva em consideração que, o valor da média somado ou subtraído a 3 vezes o desvio padrão, cobre cerca de 99,73% de todos os valores do parâmetro normalmente distribuído (Duncan, 2000). Porém, ao utilizar essa regra para o parâmetro coesão, o valor mínimo obtido seria menor do que zero. Dessa forma, a função distribuição de probabilidade da coesão de todas as camadas, foi truncada no zero.

Tabela 4.4. Resumo dos resultados do tratamento estatístico dos dados de entrada das análises de estabilidade da Formação Barreiras.

Camada Constituinte da Formação Barreiras	Variável Aleatória (Dados de Entrada)								Peso Específico γ (kN/m ³)
	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				
	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Natural (Topo)	94,1	80,0	334,1	0,0	33,8	7,7	56,9	10,7	18,00
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)	4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)	199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Homogênea - Inundada (Meio)	43,59	16,7	93,69	0,0	28,35	1,8	33,75	22,95	20,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)	245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00
Camada Heterogênea - Inundada (Base)	65,6	33,5	166,1	0,0	29,4	2,9	38,1	20,7	20,50

As análises de estabilidade foram executadas considerando as duas formas de procura por superfícies de ruptura, superfícies circulares e não circulares. Essa prática tem o objetivo de comparar os resultados obtidos e verificar qual a forma da superfície de ruptura mais crítica e associar à realidade. Assim, a busca pela superfície crítica de ruptura foi realizada através de dois métodos distintos. Para superfícies não circulares foi utilizado o método *Cuckoo Search* (algoritmo de otimização global). Esse método é capaz de rastrear a superfície de ruptura sem a necessidade de parâmetros de entrada. O *Cuckoo Search* busca todas as regiões possíveis, num dado espaço, e encontra o valor mínimo global verdadeiro, ou seja, o método possui a habilidade de “escapar” de um

valor mínimo local (Rocscience - Slide 7.0, 2016). A Figura 4.52, exemplifica de forma simplificada a diferença entre os valores mínimos. O método utilizado para superfícies circulares foi o método *Auto Refine Search*. Esse método representa um algoritmo simples e efetivo para localizar o mínimo global para a superfície de ruptura circular.

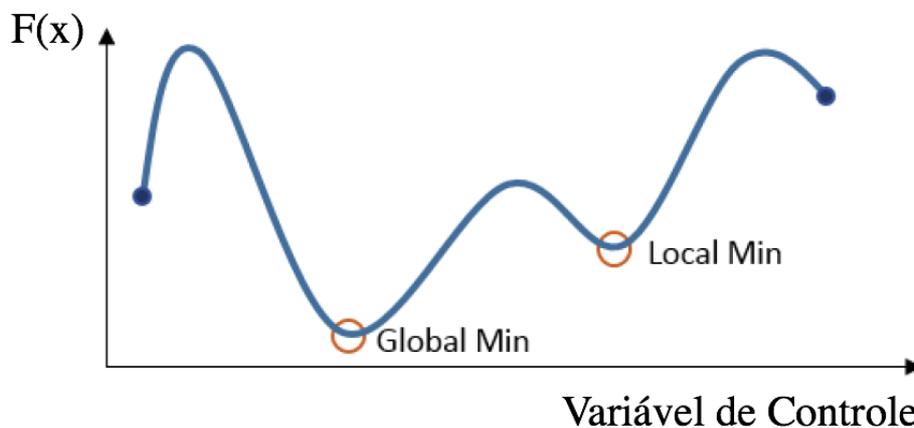


Figura 4.52 – Valor local mínimo x Valor global mínimo para uma função de uma dimensão. Traduzido de (Rocscience - Slide 7.0, 2016).

As análises de estabilidade foram realizadas considerando diferentes condições geotécnicas e premissas. Para facilitar o entendimento, cada condição modelada foi nomeada de hipótese. Para as análises de estabilidade foram assumidas sete diferentes hipóteses. Além disso, foram modeladas duas retroanálises, totalizando nove hipóteses analisadas.

Os parâmetros de resistência dos solos foram utilizados conforme a Tabela 4.4. Todas as análises foram executadas sem a presença de fluxo de água. A seção transversal modelada apresenta feições geométricas típicas da área de estudo. Para todas as hipóteses o perfil apresenta 40m de altura, 32m de extensão e cerca de 90° de inclinação com a horizontal. As alturas de cada camada considerada foram obtidas por meio de avaliação de imagens (Figura 3.27).

A hipótese 01 foi modelada considerando todo o maciço na condição de umidade natural e três diferentes camadas de solos. A camada da base possui 10m de altura, seguida das camadas do meio e topo, com 15m cada. As hipóteses 02 e 03 seguem o mesmo perfil. Entretanto, para hipótese 02 todas as camadas foram consideradas no estado inundado. Enquanto que para a hipótese 03, apenas a camada de topo encontra-se na condição inundada.

As hipóteses de 04 a 07 foram modeladas considerando a evolução da frente de umedecimento da camada de topo. Então, esse perfil apresenta quatro diferentes camadas de solo. A camada da base possui 10m de altura, em seguida a camada do meio com 15m, sucedida da camada de topo na condição natural e por último a camada de topo na condição saturada. A hipótese 04 considera 1m de avanço de frente de saturação no topo, ao passo que a hipótese 05 considera 2m e assim sucessivamente, até a hipótese 07, a qual considera 4m de material na condição inundada no topo. Dessa forma, para cada uma dessas hipóteses foi verificado a estabilidade da falésia diante de diferentes profundidades do material do topo na condição saturada.

A retroanálise probabilística foi executada com o objetivo de obter os prováveis parâmetros de resistência no instante da ruptura. Dessa forma, duas diferentes condições geotécnicas e premissas foram avaliadas. A superfície de ruptura para as duas hipóteses foi assumida diante do que foi observado em campo. Foi constatada uma superfície não circular, consideravelmente rasa que não atingia a camada de base da falésia.

A hipótese 08 foi modelada considerando toda a camada do meio da falésia na condição inundada. A falésia possui 40m de altura e três diferentes camadas de solos. A camada da base possui 10m de altura, seguida das camadas do meio com 26m e na sequência uma camada de solo arenoso com 4m. Apenas o material do meio foi considerado variável aleatória.

A hipótese 09 segue de forma análoga à hipótese 08. A única diferença é a consideração de uma faixa de 5m, localizada na borda da falésia, na condição inundada. Os materiais nas condições inundada e natural foram considerados variáveis aleatórias.

CAPÍTULO 5

Aferição do Modelo a Partir de Estudos Anteriores

5.1 Estudo de Caso – James Bay Dyke

Antes de tratar da estabilidade das falésias da área objeto de estudo propriamente dita (Praia de Barra de Tabatinga), é necessário analisar os resultados apresentados em um caso bem documentado na literatura, tanto para os valores de probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade, quanto para a forma da superfície potencial de ruptura, por meio do programa *Rocscience* – Módulo *Slide* 2D. Esse passo é importante para comparar os resultados obtidos com o desempenho constatado em casos conhecidos. Assim, será possível entender o significado dos resultados obtidos nas análises probabilísticas e realizar um melhor julgamento na modelagem das falésias. Além disso, a análise probabilística desse estudo de caso evidencia a racionalidade do uso de métodos dessa natureza, com o intuito de considerar a variabilidade espacial das propriedades do solo em taludes.

O caso analisado foi o projeto da hidroelétrica de *James Bay Dyke* (Quebec, Canadá). Trata-se da construção de aproximadamente 50 km de um aterro sobre camadas de argila, argila marinha sensível e argila lacustre (El-Ramly, 2001). Devido à complexidade dos problemas geotécnicos, o projeto se tornou um importante caso histórico. Apesar de não ter sido construída, a hidroelétrica foi alvo de diversos estudos, sobretudo no que se refere às fontes de incertezas, variabilidade espacial das propriedades do solo (Ladd *et al.*, 1983; Soulié *et al.*, 1990), avaliação probabilística da estabilidade, utilizando o método FOSM (Christian *et al.*, 1994) e aplicação de nova metodologia prática utilizando o método Monte Carlo (El-Ramly, 2001; El-Ramly *et al.*, 2002).

A geometria de uma seção típica, do projeto proposto, da hidroelétrica de *James Bay Dyke* está apresentada na Figura 5.1. O aterro possui 12 m de altura, com dois trechos planos, um de 40 m e outro de 56 m. Os taludes possuem inclinação de 18,4° (3H:1V). Abaixo do aterro, a fundação apresenta uma camada de 4 m de uma argila, seguida de 8 m de argila sensível (marinha) e 7 m de argila lacustre aproximadamente.

Através dos dados de ensaios do tipo *Vane test* (ensaios de palheta), foram obtidos as resistências não drenadas das camadas de argila, constituintes do perfil de solo.

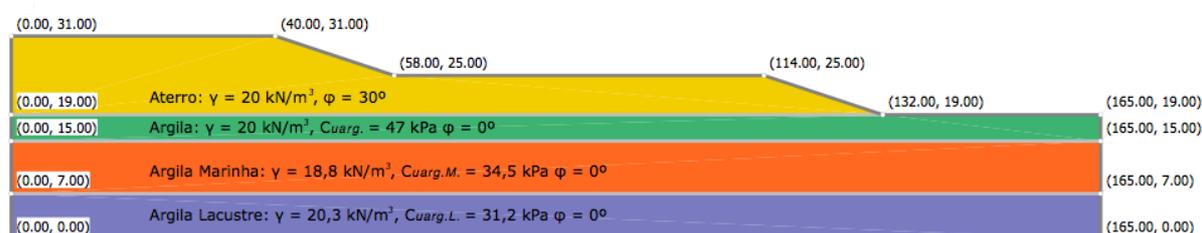


Figura 5.1 - Seção geométrica típica da hidroelétrica de *James Bay Dyke* (Ji, J., et al., 2017; Slide Manual, 2016)

Nas simulações, foram definidas quatro variáveis aleatórias, peso específico e ângulo de atrito do aterro e resistência não drenada das últimas duas camadas de argila (marinha e lacustre). Todas as variáveis aleatórias definidas na modelagem seguem a distribuição Normal. A primeira camada de argila abaixo do aterro não foi definida como variável aleatória, seguindo assim os valores médios (Figura 5.1). Na falta de dados mais precisos relacionados aos valores máximos e mínimos que as variáveis podem assumir, recomenda-se defini-los como a média somado/subtraído a três vezes o valor do desvio padrão. Esse critério foi adotado para garantir uma boa definição da distribuição normal.

A Tabela 5.1 mostra o resumo dos dados das propriedades do solo associadas às incertezas. Como o material utilizado no aterro passa por um processo de controle, sobretudo relacionado às propriedades dos materiais, considera-se que esse não possui variabilidade espacial (homogêneo). Apenas as camadas de argila (marinha e lacustre), foram definidas como possuindo variabilidade espacial. Por meio dos ensaios de palheta também é possível caracterizar essa variabilidade espacial das camadas de argila da fundação. Não existem descrições a respeito da caracterização da variabilidade espacial da argila lacustre. Entretanto é razoável assumir que a argila lacustre apresentará características semelhantes relacionadas à variabilidade espacial, uma vez que as duas camadas de material argiloso encontram-se no mesmo local e passaram pelos mesmos processos geológicos (Ji, J., et al., 2017).

Geralmente, em simulações desse tipo a variabilidade espacial é tratada por meio de funções de autocovariância Ji, J., et al. (2017). A variação das propriedades do solo depende da direção considerada, vertical ou horizontal. Nas análises realizadas nesse estudo, diferentes valores de distância de correlação foram assumidos (Tabela 5.1), a fim de comparar os resultados para diferentes cenários, sobretudo os valores de probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade obtida em estudos anteriores.

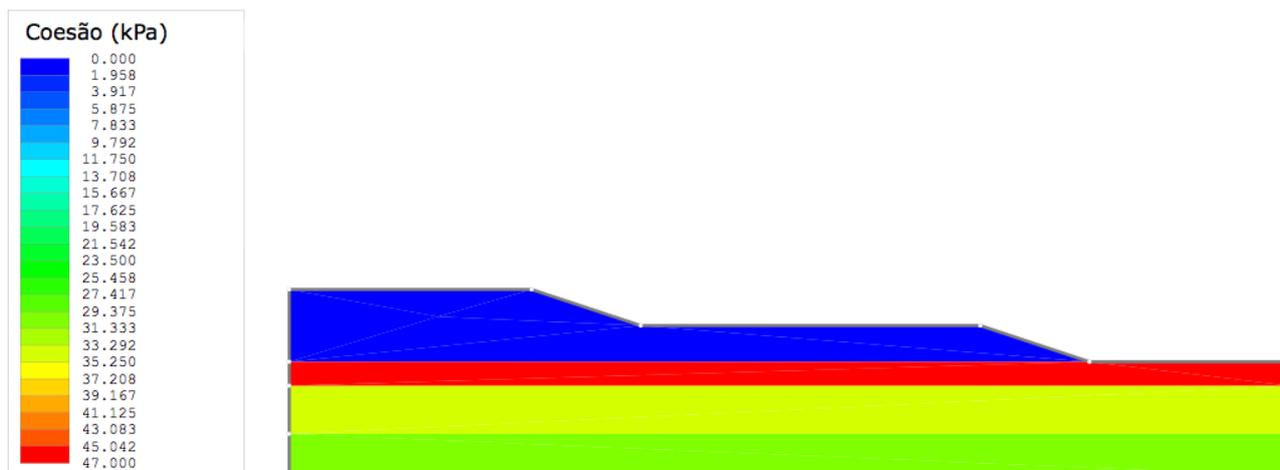
Tabela 5.1. Dados referentes as incerteza das propriedades dos solos da hidroelétrica de James Bay Dyke (Christian et al., 1994).

Variável Aleatória (Dados de Entrada)	Variabilidade do Solo		Valor Máximo	Valor Mínimo	Distância de Correlação
	Média (E)	Desvio Padrão (σ)			
Ângulo de Atrito do aterro (φ_{aterro})	30,0	1,00	33,0	27,0	Material considerado homogêneo
Peso específico do aterro (γ_{aterro})	20,0	1,00	17,0	23,0	Material considerado homogêneo
** Resistência não drenada da argila marinha (C_u)	34,5	8,14	*58,92	*10,08	(Homogêneo) ($\bar{\delta}x = 30m$; $\bar{\delta}y = 30m$) ($\bar{\delta}x = 30m$; $\bar{\delta}y = 1,5m$)
** Resistência não drenada da argila lacustre (C_u)	31,2	8,65	*57,15	*5,25	(Homogêneo) ($\bar{\delta}x = 30m$; $\bar{\delta}y = 30m$) ($\bar{\delta}x = 30m$; $\bar{\delta}y = 1,5m$)
* Para as análises que foram consideradas a variabilidade espacial (distância de correlação) das propriedades dos materiais, não é necessário informar os valores máximo e mínimo dos parâmetros de entrada.					
** Para as argilas com variabilidade espacial foram considerados três diferentes cenários, variando o a distância de correlação na direção horizontal e vertical ($\bar{\delta}x$ e $\bar{\delta}y$).					

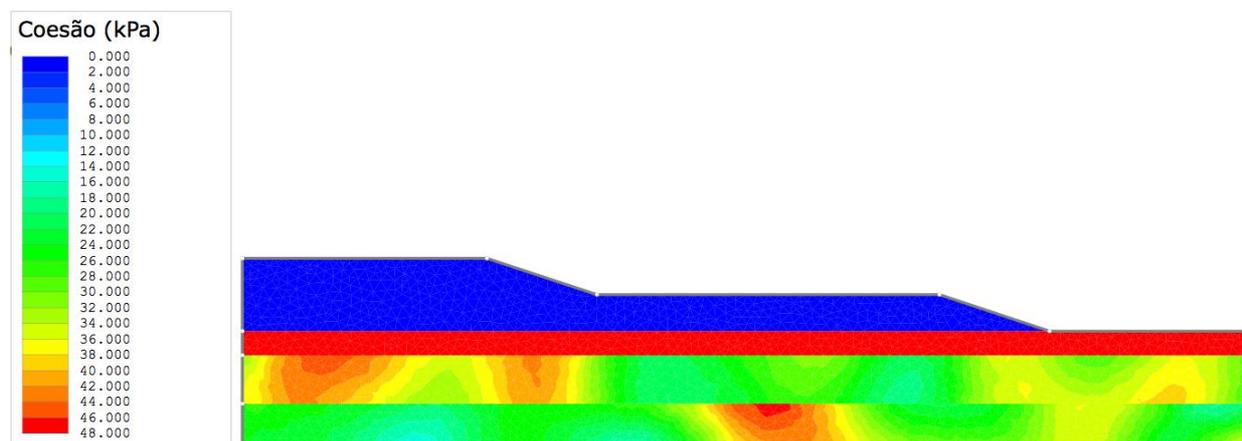
Segundo Degroot e Baecher, 1993, a distância de autocorrelação vertical (δy) varia de 1 a 2 m, ao passo que a distância de autocorrelação horizontal (δx) é algo em torno de 30 m. Nos casos em que o valor de δx é igual ao δy , significa que a variabilidade espacial foi considerada apenas em uma dimensão (1D). Para representar o campo aleatório (*random field*) da variabilidade espacial das camadas de argila marinha e lacustre, foi utilizado a função do tipo Gaussiana. A Figura 5.2 mostra os três modelos simulados no programa *Slide 2D* (Rocscience), destacando os perfis sem e com variabilidade espacial.

Observa-se na Figura 5.2 a que o modelo simulado sem considerar a variabilidade espacial, os parâmetros das camadas variam de forma homogênea, por simulação computada.

a)



b)



c)

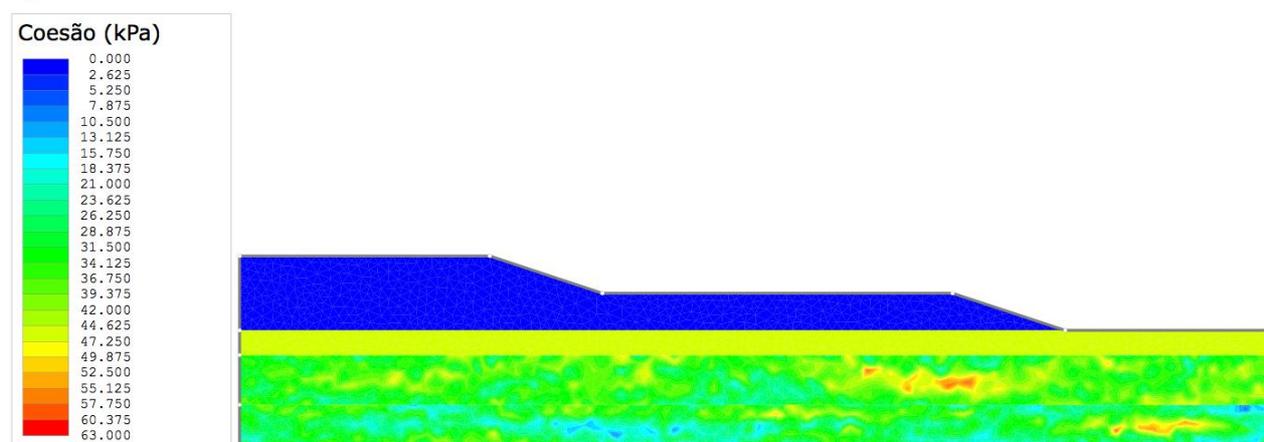


Figura 5.2 – Modelos simulados com diferentes considerações de variabilidade espacial. a) Sem variabilidade espacial; b) Com variabilidade ($\delta x = 30\text{m}$; $\delta y = 30\text{m}$); c) Com variabilidade ($\delta x = 30\text{m}$; $\delta y = 1,5\text{m}$).

É possível que, em algumas simulações, todas as camadas assumam os menores valores de cada parâmetro ao mesmo tempo, resultando em uma probabilidade de

ruptura mais alta e menores fatores de segurança. Dessa forma, esse modelo não representa uma forma realística de análise. Entretanto, pode ser utilizado por se tratar de um método mais conservador. As Figuras 5.2.b e Figura 5.2.c evidenciam as duas camadas de argila com diferentes variabilidades no eixo y, $\delta y = 30\text{m}$ e $\delta y = 1,5\text{m}$, respectivamente. Para cada hipótese considerada, esses gráficos são dos casos em que se obtiveram os menores fatores de segurança.

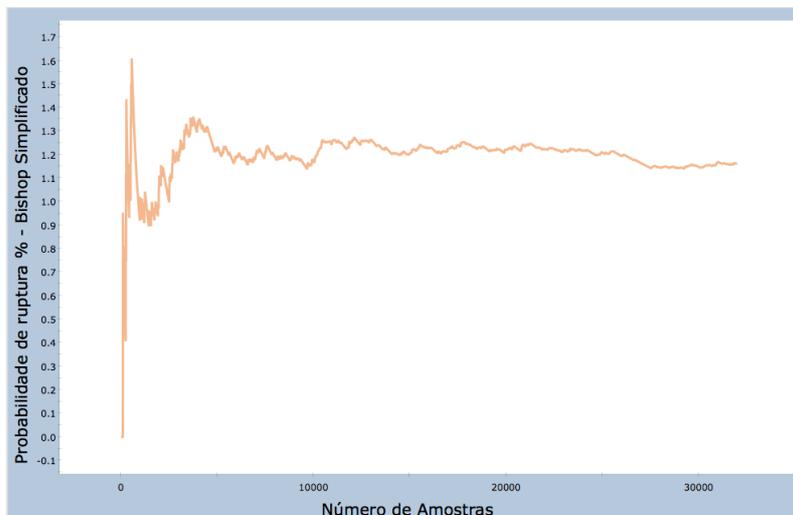
Para as análises sem a consideração da variabilidade espacial dos materiais, é possível obter um gráfico de análise de sensibilidade. Esse gráfico permite analisar o parâmetro que mais influencia nas variações do fator de segurança. Em outras palavras, indica a sensibilidade do fator de segurança relacionado às mudanças nos parâmetros de entrada (Rocscience Slide V.7.0, 2016).

As análises de estabilidade da hidroelétrica de *James Bay Dyke* foram realizadas através de simulações de Monte Carlo (probabilístico), utilizando o método de Bishop simplificado (determinístico), a fim de comparar os resultados com resultados publicados anteriormente. Nesse estudo, 32 mil iterações foram realizadas, ou seja, a análise de estabilidade foi calculada para 32 mil cenários possíveis de perfil de solo. Esse número foi adotado através dos resultados dos gráficos de convergência do *Rocscience – Módulo Slide 2D*, o qual determina se as análises probabilísticas estão convergindo para uma resposta final estável (i.e. probabilidade de ruptura, fator de segurança médio). A Figura 5.3 mostra o gráfico de convergência obtido para as três hipóteses consideradas. Esse número de iterações utilizado é próximo do número obtido e aplicado no estudo de El-Ramly (2001), demonstrando consistência nos dados.

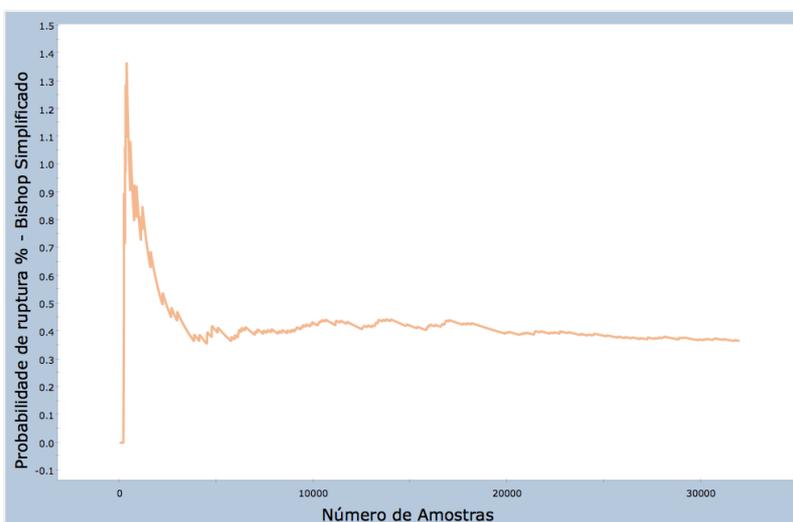
Observa-se que o gráfico de convergência da Figura 5.3.c ($\delta x = 30\text{m}$; $\delta y = 1,5\text{m}$), manteve-se constante durante toda a simulação. Isso ocorreu, pois essas simulações resultaram em probabilidade de ruptura igual a 0,0%, conforme analisado mais adiante.

Nos estudos detalhados em Christian *et al.* (1994) e El-Ramly (2001), a variação da espessura das camadas de argila foram consideradas como incertezas e tratadas estatisticamente. Com o objetivo de simplificar as análises, a variação da espessura do perfil de solo não foi considerada nessas análises. Essa simplificação também foi realizada no estudo realizado por Ji, J., *et al.* (2017), a qual proporcionou resultados próximos dos obtidos anteriormente e coerentes com a metodologia proposta. Desse modo, somente as incertezas inerentes da variabilidade das propriedades dos solos foram modeladas nessas simulações.

a)



b)



c)

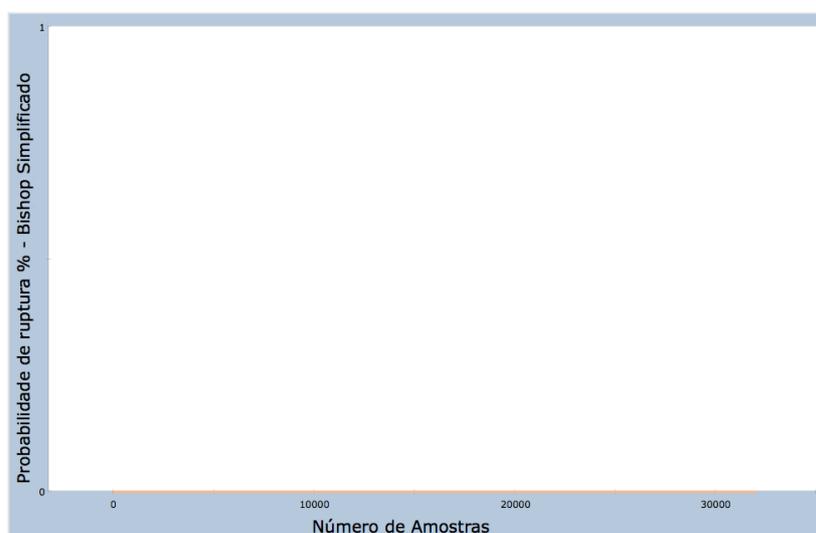


Figura 5.3 – Gráfico de convergência comprovando que os resultados das análises estão convergindo para uma resposta final estável. a) Sem variabilidade espacial; b) Com variabilidade espacial ($\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$); c) Com variabilidade espacial ($\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$).

Parte fundamental para obter uma análise de estabilidade mais realística é a busca pela superfície crítica de ruptura. A superfície crítica de ruptura foi identificada como sendo circular e tangente à base da camada de argila lacustre. Esse resultado também está de acordo com estudos anteriores (Christian *et al.*, 1994; El-Ramly, 2001; Ji, J., *et al.*, 2017). Foi utilizado o método denominado "*Auto Refine Search*" do *Rocscience* – Módulo *Slide 2D*. Para isso, foram determinados os pontos iniciais e finais de busca, próximo dos limites do talude. Assim, para cada iteração dentre os 32 mil cenários possíveis gerados aleatoriamente, o programa procura diversas superfícies de ruptura. Nesse caso, foi determinada uma busca de 19 mil superfícies para cada cenário.

5.1.1 Resultados – James Bay Dyke

Os principais resultados do estudo de caso da hidroelétrica de *James Bay Dyke*, para as três hipóteses consideradas, estão apresentados de forma resumida a seguir.

5.1.1.1 Resultados – James Bay Dyke (Sem Variabilidade Espacial)

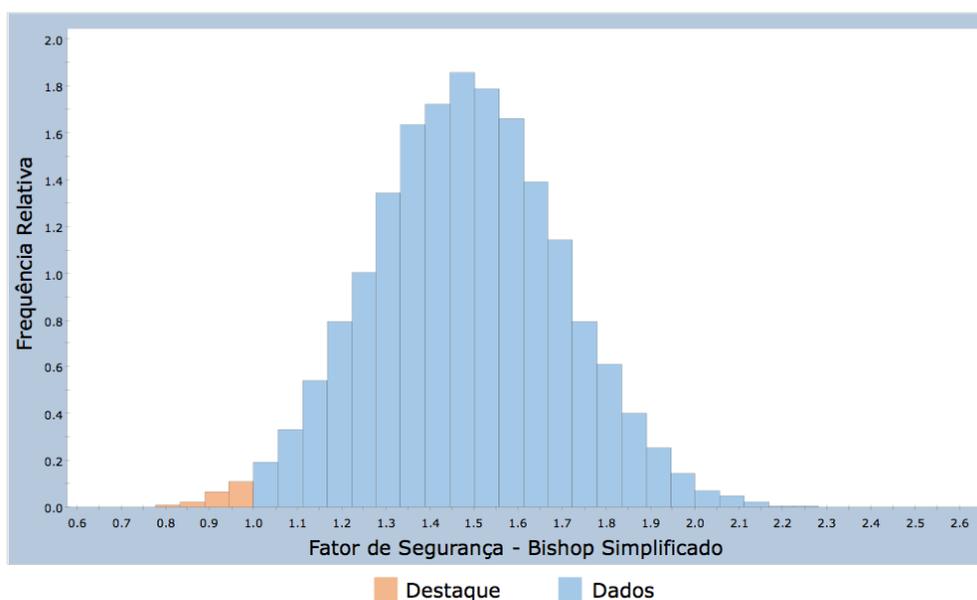
A Figura 5.4 mostra os principais resultados da análise probabilística juntamente com a superfície de ruptura mínima determinística (global mínimo). O fator de segurança determinístico é o calculado para a superfície crítica (não probabilística), ou seja, referente a uma análise de estabilidade convencional. Em outras palavras, esse cálculo é realizado para todos os parâmetros com valores iguais às suas médias. O fator de segurança médio é obtido através do cálculo da média de todos os fatores de segurança (análise probabilística). A probabilidade de ruptura é igual ao número de análises em que o fator de segurança é menor do que 1, dividido pelo total de amostras simuladas, conforme equação 2.15. Para esse exemplo, a probabilidade de ruptura é igual a 1,163%, a qual significa que 372, de 32 mil amostras, resultaram em um fator de segurança menor do que 1 (Figura 5.5). O índice de confiabilidade é um indicador do número de desvios-padrão que separa o fator de segurança médio do crítico (≤ 1). A distribuição normal foi o melhor ajuste (Figura 5.5), portanto o índice de confiabilidade é calculado conforme a equação 2.16. A Figura 5.5 também mostra a média do Fator de segurança, desvio padrão e os valores máximo e mínimo.

Superfície Crítica de Ruptura - Mínimo Global (Determinístico)
 FS (Determinístico) = 1,481
 FS (Média) = 1,482
 Probabilidade de Ruptura = 1,163%
 Índice de Confiabilidade (Normal) = 2,243
 Índice de Confiabilidade (Lognormal) = 2,655



Figura 5.4 – Principais resultados e superfície crítica de ruptura (Sem variabilidade espacial).

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado <1 (372 Pontos)



AMOSTRA: Média=1,482; D.P.=0,2151; Mín=0,738; Máx=2,408
 PF=1,163%; Índice de Conf.=2,24268; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 5.5 – Histograma do Fator de Segurança e melhor ajuste da distribuição (Sem variabilidade espacial). Em destaque os valores de Fator de Segurança menores do que 1.

A probabilidade de ruptura também pode ser avaliada através do gráfico da distribuição acumulada do fator de segurança (Figura 5.6), cujo valor acumulado até o fator de segurança igual a um, representa essa probabilidade.

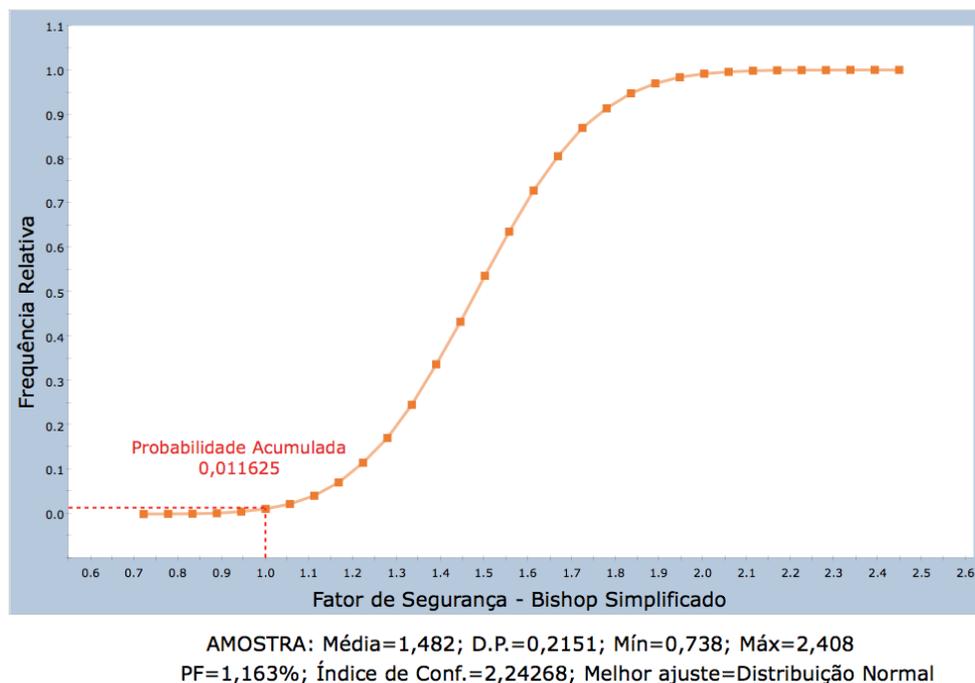


Figura 5.6 – Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Sem variabilidade espacial). Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1.

As Figuras 5.7 a 5.10 representam os histogramas, das variáveis consideradas aleatórias, o qual foi gerado pelo método Monte Carlo, a partir das distribuições estatísticas definidas. Os dados da amostra (em azul) representam os dados gerados aleatoriamente (Monte Carlo), enquanto que os dados de entrada (em cinza) são os dados definidos através da distribuição estatística definida para cada variável aleatória.

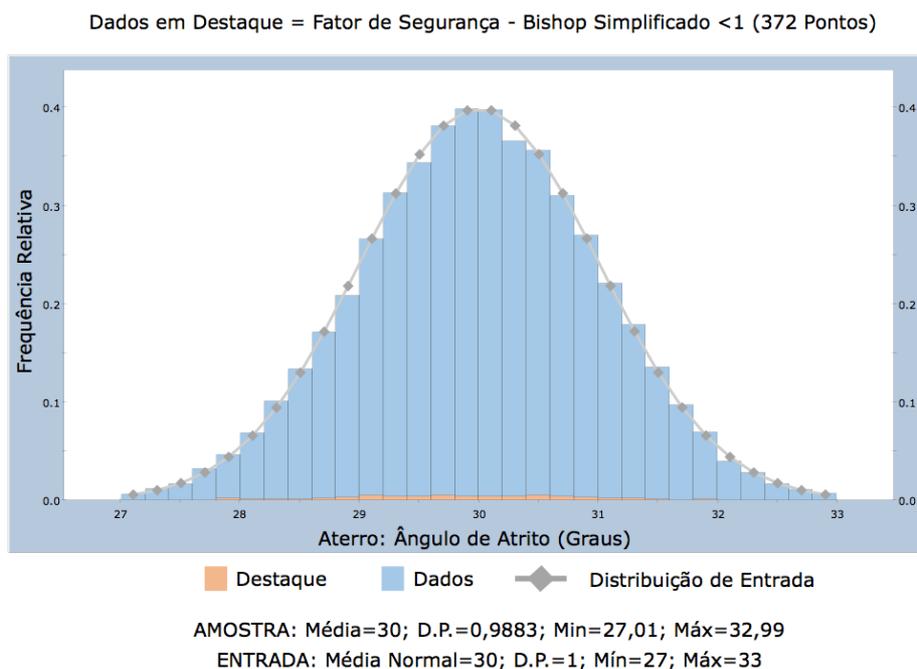


Figura 5.7 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o ângulo de atrito do aterro (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de ângulo de atrito que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

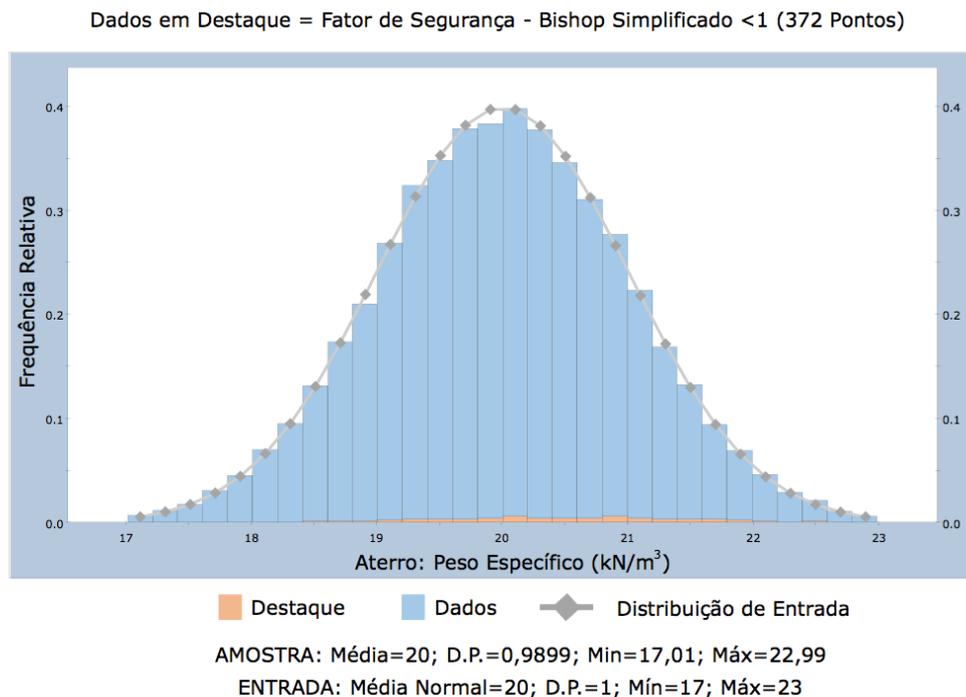


Figura 5.8 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o peso específico do aterro (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de peso específico que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

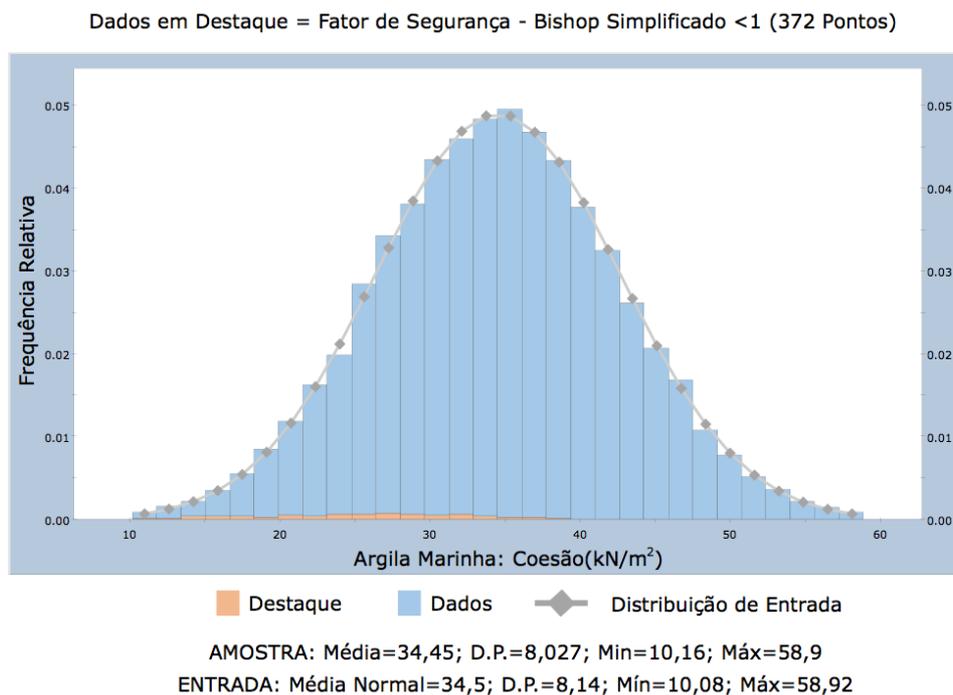


Figura 5.9 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para a coesão da Argila Marinha (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de coesão que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

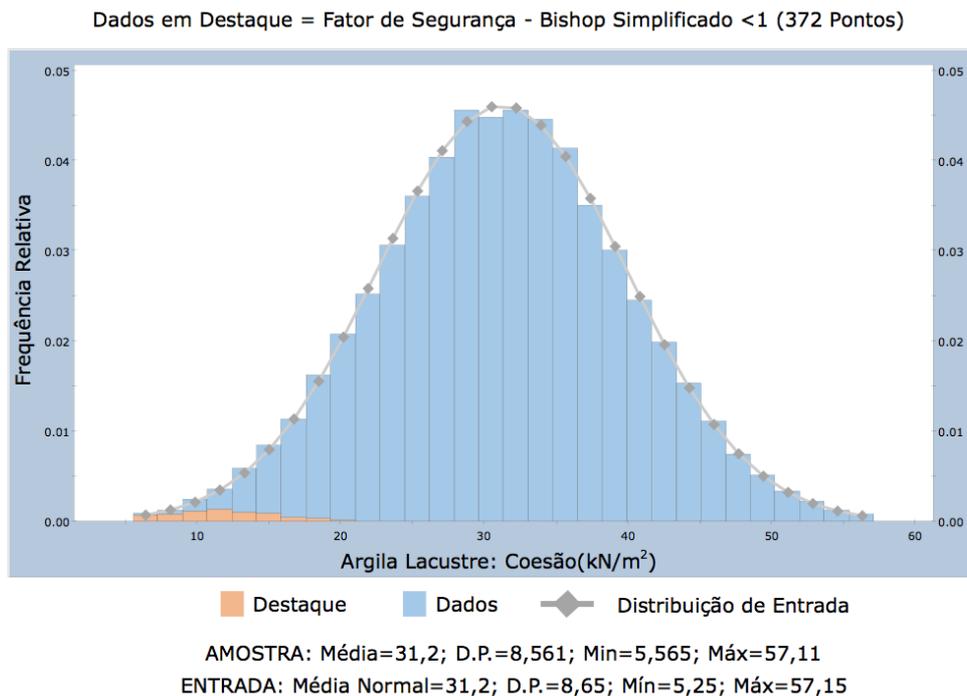


Figura 5.10 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para a coesão da Argila Lacustre (Sem Variabilidade). Em destaque os valores de coesão que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

Observa-se uma influência maior para os valores de coesão da argila marinha e lacustre (Figuras 5.9 e 5.10), pois os menores valores de Fator de Segurança estão associados aos menores valores de coesão dessas duas variáveis aleatórias. Por outro lado os outros dois parâmetros demonstram um maior equilíbrio (Figuras 5.7 e 5.8).

A Figura 5.11 a seguir apresenta o resultado das análises de sensibilidade. Conforme se pode perceber no gráfico, o fator de segurança é mais sensível à coesão da argila lacustre, seguida da argila marinha, pois apresenta uma curva mais inclinada. A variável aleatória que menos influencia na variação do fator de segurança é o ângulo de atrito do aterro, por apresentar uma curva quase sem inclinação. O peso específico do aterro exerce influência diferente se comparado com os outros parâmetros, conforme aumenta o valor do peso específico, o fator de segurança diminui.

É importante perceber que para um gráfico de análise de sensibilidade com múltiplas variáveis aleatórias, o eixo x do gráfico é representado em termos de porcentagem de variação. Porcentagem de variação igual a zero representa o valor mínimo de cada variável e porcentagem de variação igual a 100 se refere ao valor máximo. A Figura 5.12 corresponde à análise de sensibilidade da Argila Lacustre de forma isolada, ou seja, o eixo x está em termos de valores de coesão (valor mínimo = 5,565 e valor máximo = 57,11).

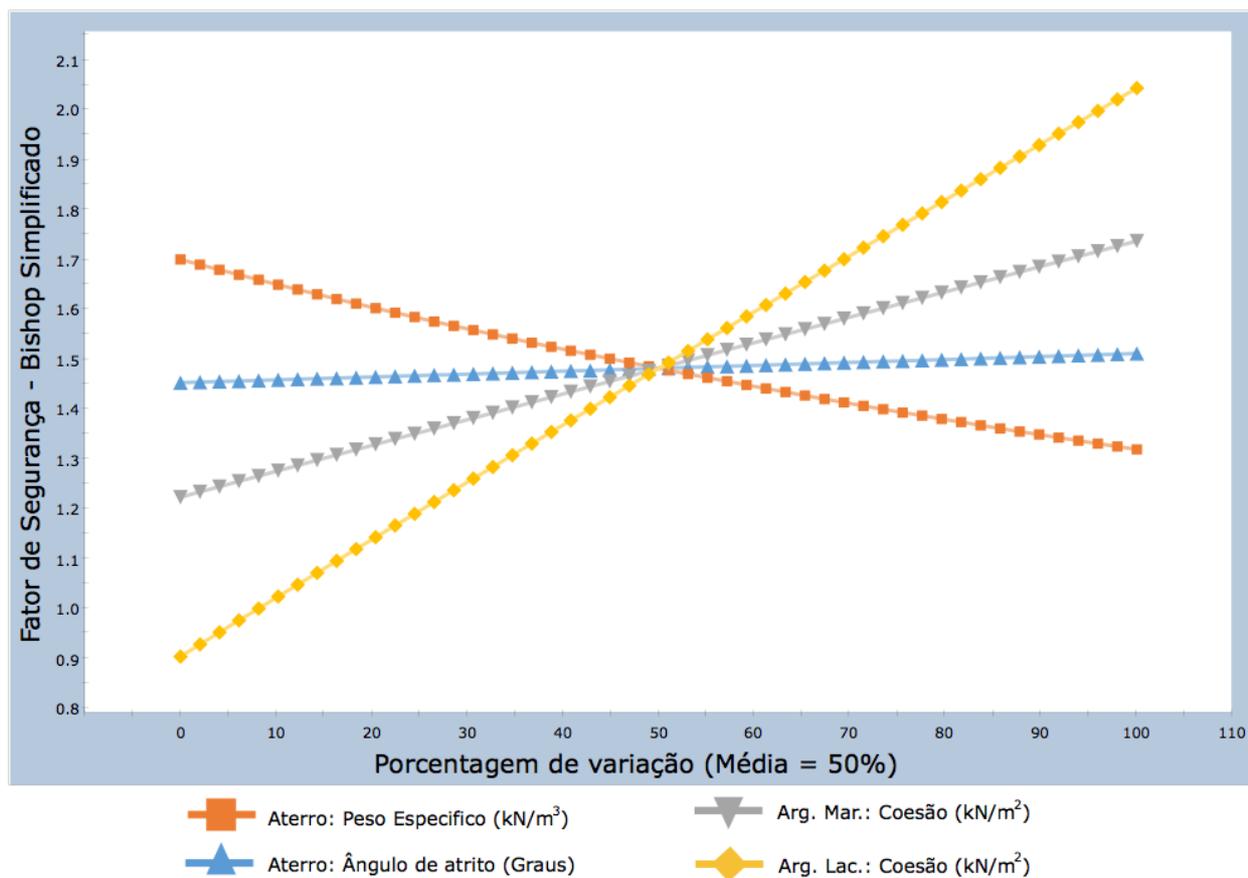


Figura 5.11 – Análise de Sensibilidade para todas as variáveis aleatórias (Sem Variabilidade).

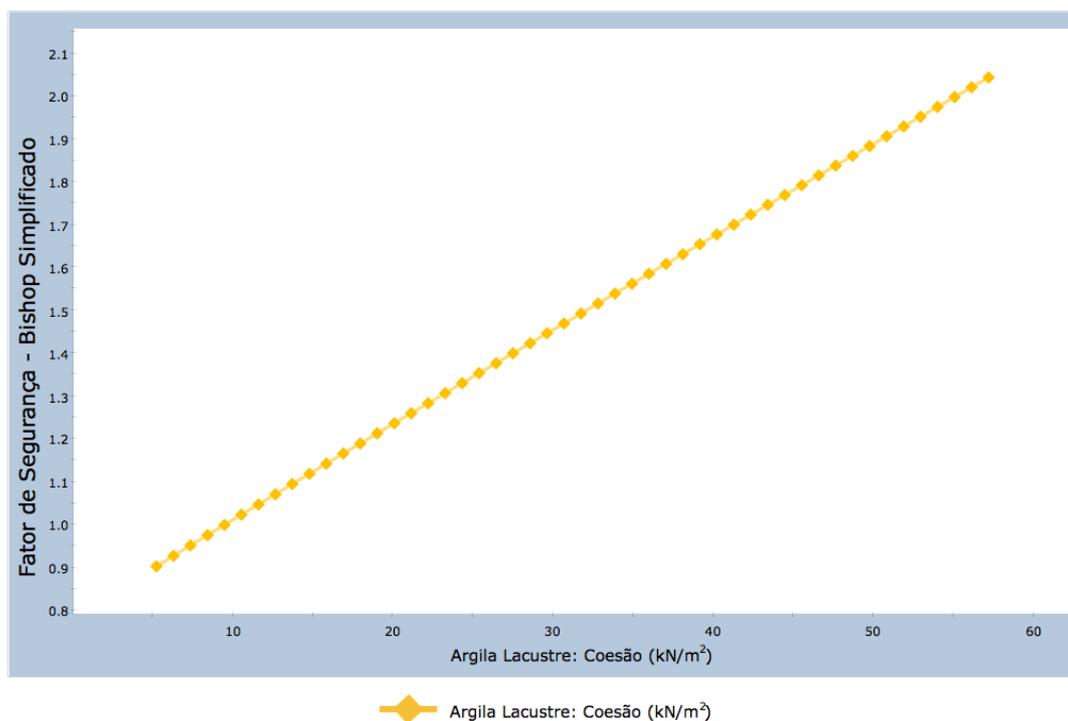
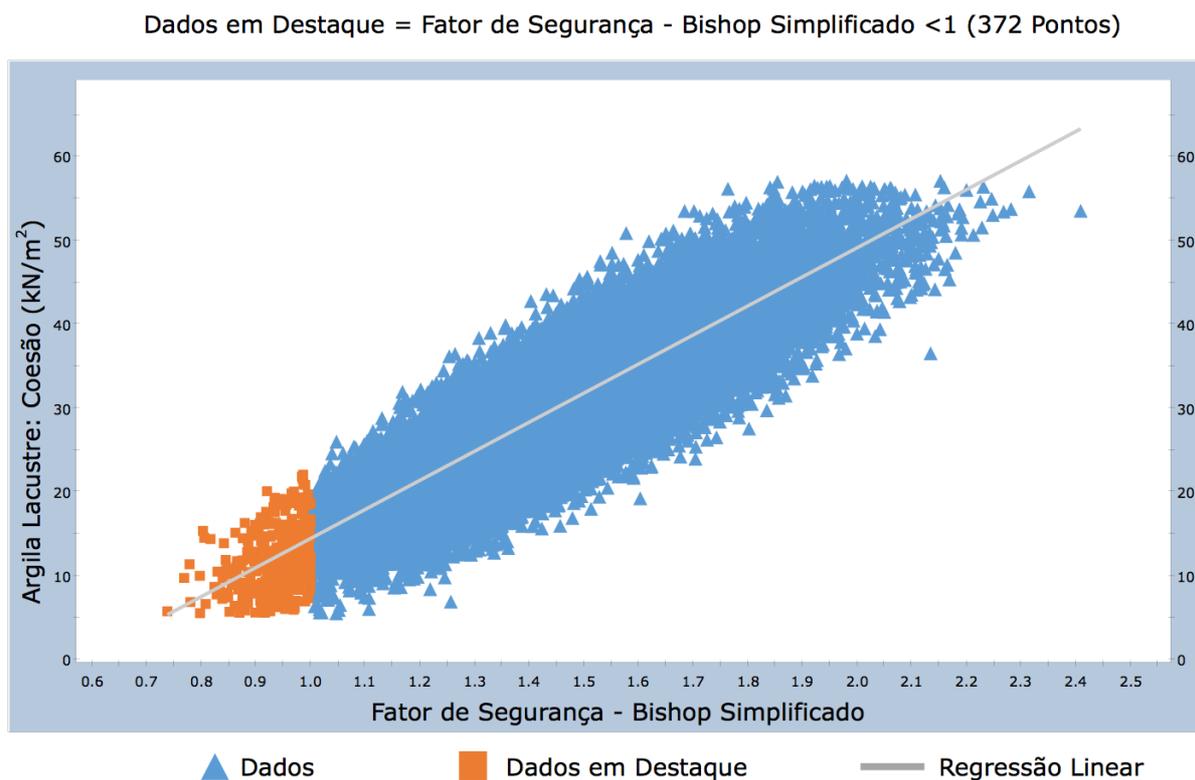


Figura 5.12 – Análise de Sensibilidade para a coesão da Argila Lacustre (Sem Variabilidade).

O gráfico de dispersão (Figura 5.13) possibilita analisar a relação entre a variável aleatória (coesão da argila lacustre) e o fator de segurança. O coeficiente de correlação indica o grau de correlação entre as duas variáveis no gráfico. Um valor de coeficiente de correlação próximo de 1 (ou -1), indica um grau elevado de correlação. Alpha e beta são o valor de intercepto no eixo y e inclinação, respectivamente. Os valores em destaque (em laranja) são todos os dados que resultaram em um fator de segurança menor do que a unidade.



Coeficiente de Correlação=0,8710, Alpha=-20,1993, Beta=34,6756 (Todos os dados)

Figura 5.13 – Gráfico de dispersão: Coesão da argila lacustre x Fator de segurança (Sem Variabilidade).

5.1.1.2 Resultados – James Bay Dyke (Com Variabilidade Espacial - $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$)

A Figura 5.14 apresenta os principais resultados da análise probabilística. Para essa hipótese, o valor do fator de segurança determinístico obtido ($FS = 1,481$) é igual ao calculado no caso anterior (talude sem variabilidade espacial). Por outro lado, o valor do fator de segurança médio diminuiu um pouco comparado com o caso anterior ($FS = 1,417$). A probabilidade de ruptura é igual a 0,366%, a qual significa que 117, de 32.000 amostras, (Figura 5.15) resultaram em um fator de segurança menor do que um. O índice de confiabilidade é igual a 2,881 para a distribuição normal, a qual foi o melhor ajuste atingido. A Figura 5.15 também mostra a média do Fator de segurança, desvio padrão e

os valores máximo e mínimo. Através desse gráfico, é possível distinguir melhor a diferença entre o fator de segurança determinístico, calculado utilizando os valores médios das propriedades do solo, e o fator de segurança médio, calculado através da média de todos os fatores de segurança (análise probabilística).

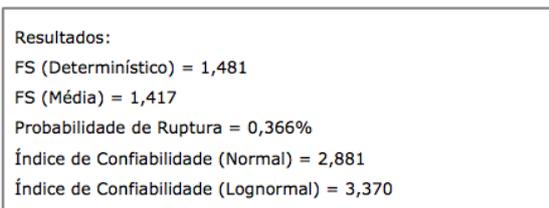
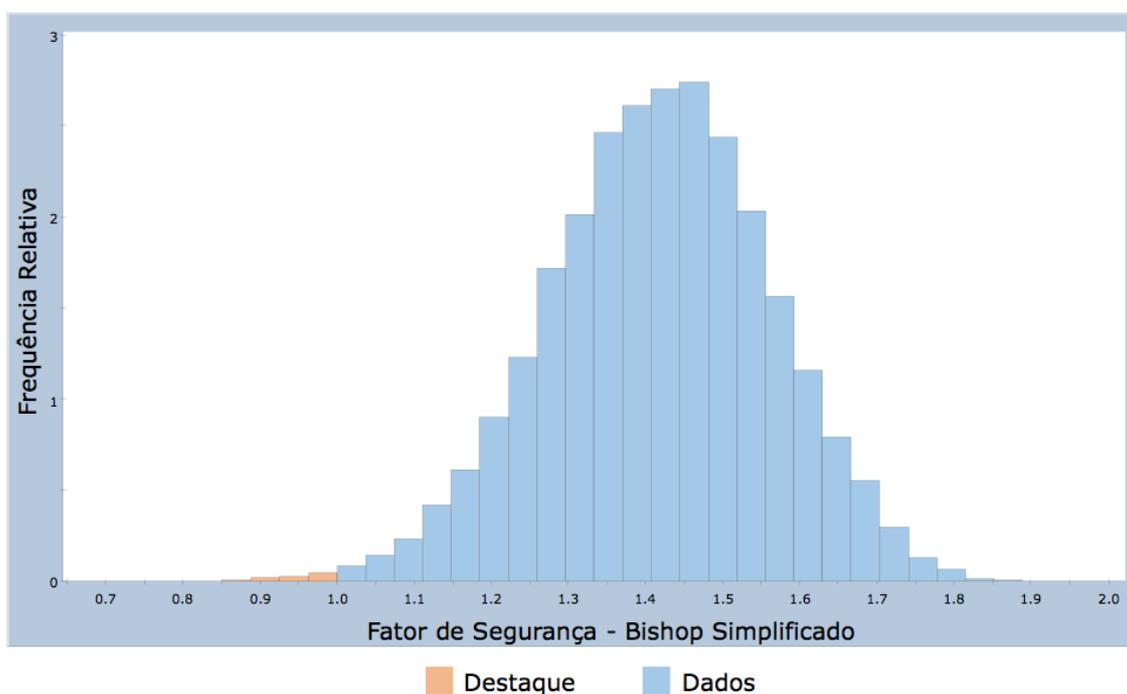


Figura 5.14 – Principais resultados e superfície crítica de ruptura (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).

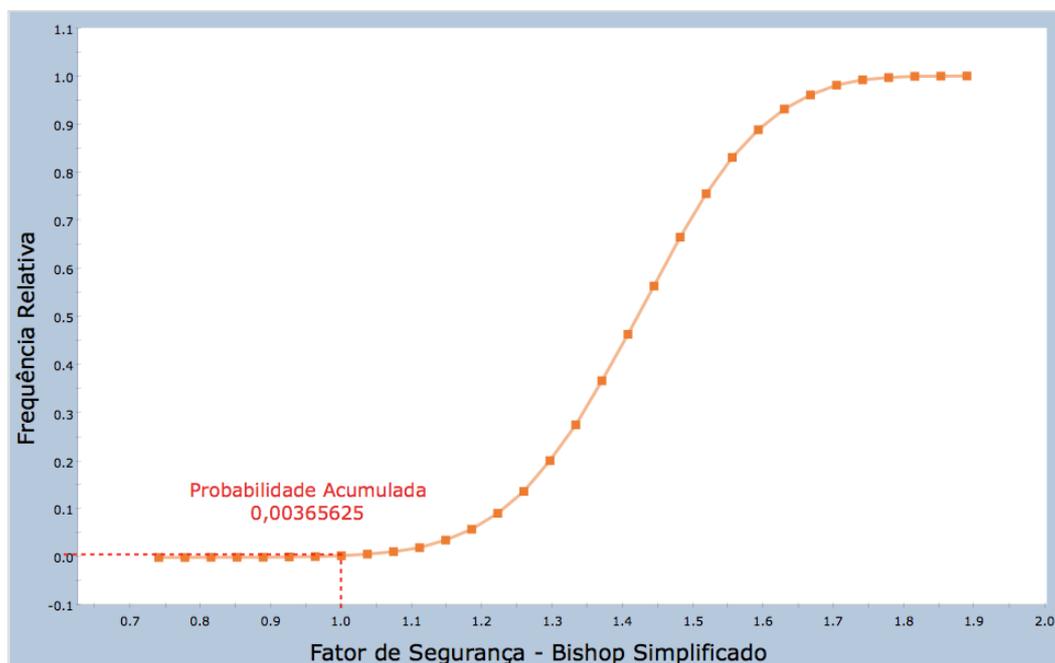
Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado <1 (117 Pontos)



AMOSTRA: Média=1,417; D.P.=0,1447; Mín=0,7645; Máx=1,875
 PF=0,366%; Índice de Conf.=2,88107; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 5.15 – Histograma do Fator de Segurança e melhor ajuste da distribuição (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$). Em destaque os valores de Fator de Segurança menores do que 1.

A probabilidade de ruptura também é evidenciada mediante o gráfico da distribuição acumulada do fator de segurança (Figura 5.16), bem como os valores mínimo (0,7645) e máximo do fator de segurança (1,875).



AMOSTRA: Média=1,417; D.P.=0,1447; Mín=0,7645; Máx=1,875
PF=0,366%; Índice de Conf.=2,88107; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 5.16 – Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).
Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1.

As Figuras 5.17 e 5.18 representam os histogramas, das variáveis consideradas aleatórias, os quais foram gerados pelo método Monte Carlo, a partir das distribuições estatísticas definidas. Nessa hipótese, as variáveis de coesão da argila marinha e lacustre, não variaram segundo uma distribuição normal definida, pois nesse caso essas duas variáveis possuem variabilidade espacial ($\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$), e, portanto, o solo não é considerado homogêneo por toda a sua camada. Em outras palavras, esses dois parâmetros variam por toda a camada de forma aleatória (campo aleatório), apresentando diferentes valores em pontos distintos da mesma camada, definidos segundo a função do tipo Gaussiana (ver Figura 5.2).

Esse fato justifica a diminuição da probabilidade de ruptura, pois os dois parâmetros que mais influenciam na variação do fator de segurança não variam mais por toda a camada de forma homogênea, e sim de forma pontual. Os valores em destaque (em vermelho) representam os dados em que resultaram fatores de segurança menores do que um.

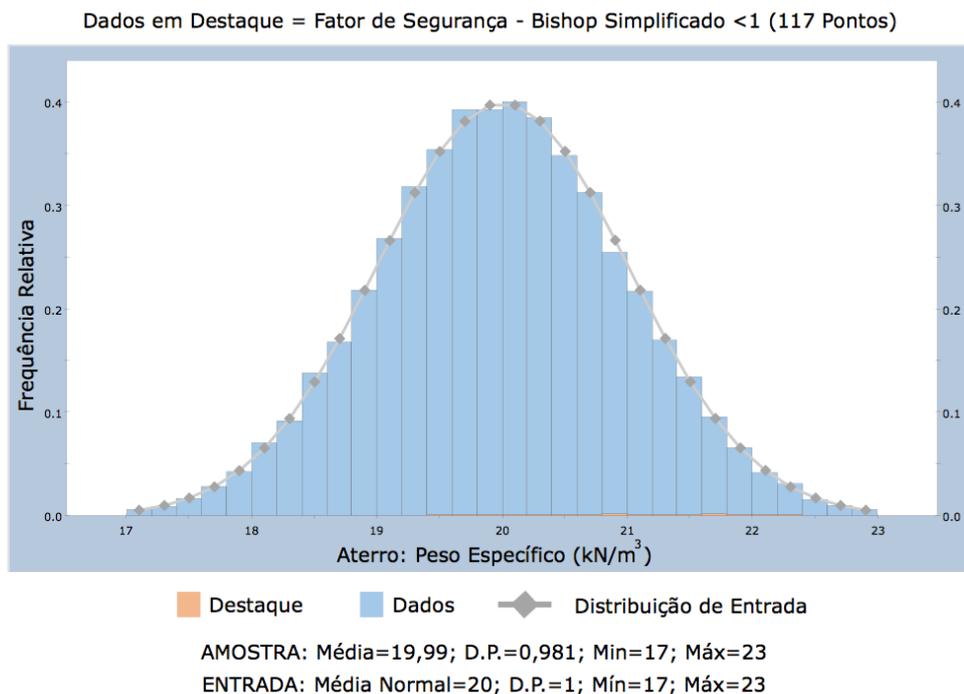


Figura 5.17 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o peso específico do aterro (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$). Em destaque os valores de ângulo de atrito que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

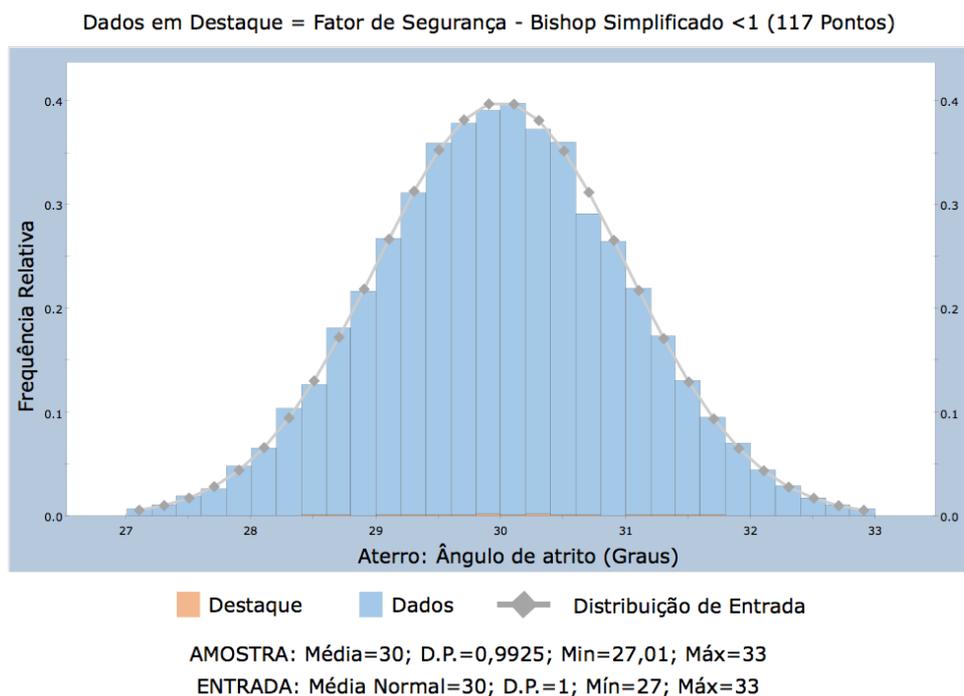


Figura 5.18 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o ângulo de atrito do aterro (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$). Em destaque os valores de peso específico que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

A Figura 5.19 a seguir apresenta o resultado das análises de sensibilidade. Conforme se pode perceber no gráfico, o fator de segurança é mais sensível ao peso específico do que ao ângulo de atrito, pois apresenta uma curva mais inclinada.

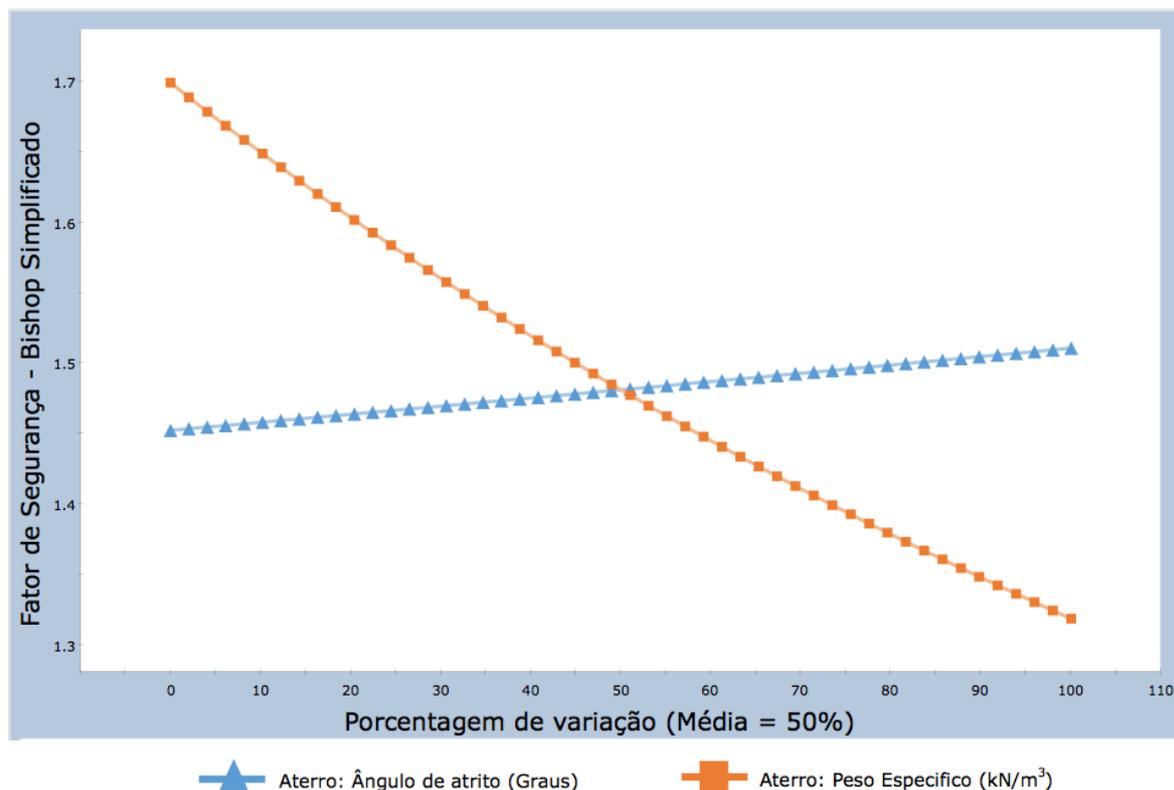


Figura 5.19 – Análise de Sensibilidade para todas as variáveis aleatórias (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).

O gráfico de dispersão (Figura 5.20) possibilita analisar a relação entre a variável aleatória (peso específico do aterro) e o fator de segurança. O coeficiente de correlação indica pouca ou quase nenhuma correlação entre os parâmetros (-0,434). Os valores em destaque (em laranja) são todos os dados que resultaram em um fator de segurança menor do que 1. Observa-se que conforme se aumenta o valor do peso específico, maiores são as chances de se obter um fator de segurança menor do que a unidade.

5.1.1.3 Resultados – James Bay Dyke (Com Variabilidade Espacial - $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$)

A Figura 5.21 apresenta os principais resultados da análise probabilística. Para essa hipótese, o valor do fator de segurança determinístico obtido (FS = 1,481) é igual ao calculado nos dois casos anteriores. O valor do fator de segurança médio é igual a 1,411. A probabilidade de ruptura é igual a zero, ou seja, nenhuma amostra resultou em um fator de segurança menor do que a unidade.

A Figura 5.22 mostra a média do Fator de segurança, desvio padrão e os valores máximo e mínimo. Percebe-se que nessa análise, o melhor ajuste foi alcançado mediante a distribuição gamma.

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado <1 (117 Pontos)

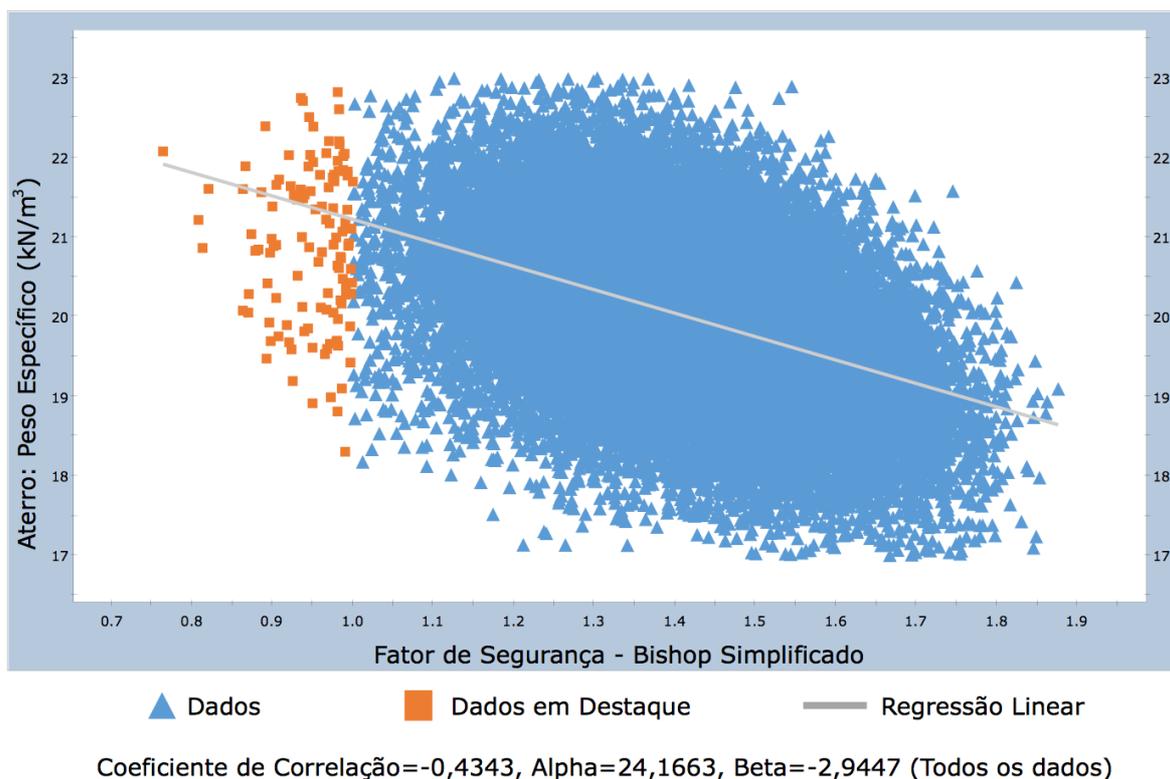


Figura 5.20 – Gráfico de dispersão: Peso específico do aterro x Fator de segurança (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).

Resultados
 FS (Determinístico) = 1,481
 FS (Média) = 1,411
 Probabilidade de Ruptura = 0,000%
 Índice de Confiabilidade (Normal) = 4,294
 Índice de Confiabilidade (Lognormal) = 5,048

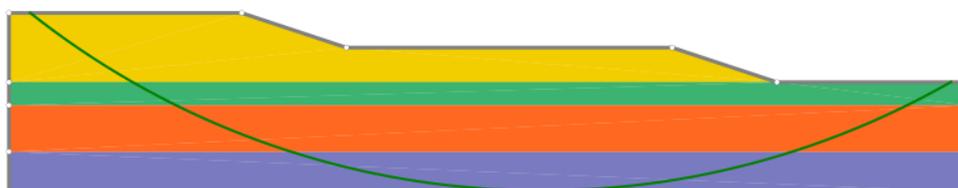
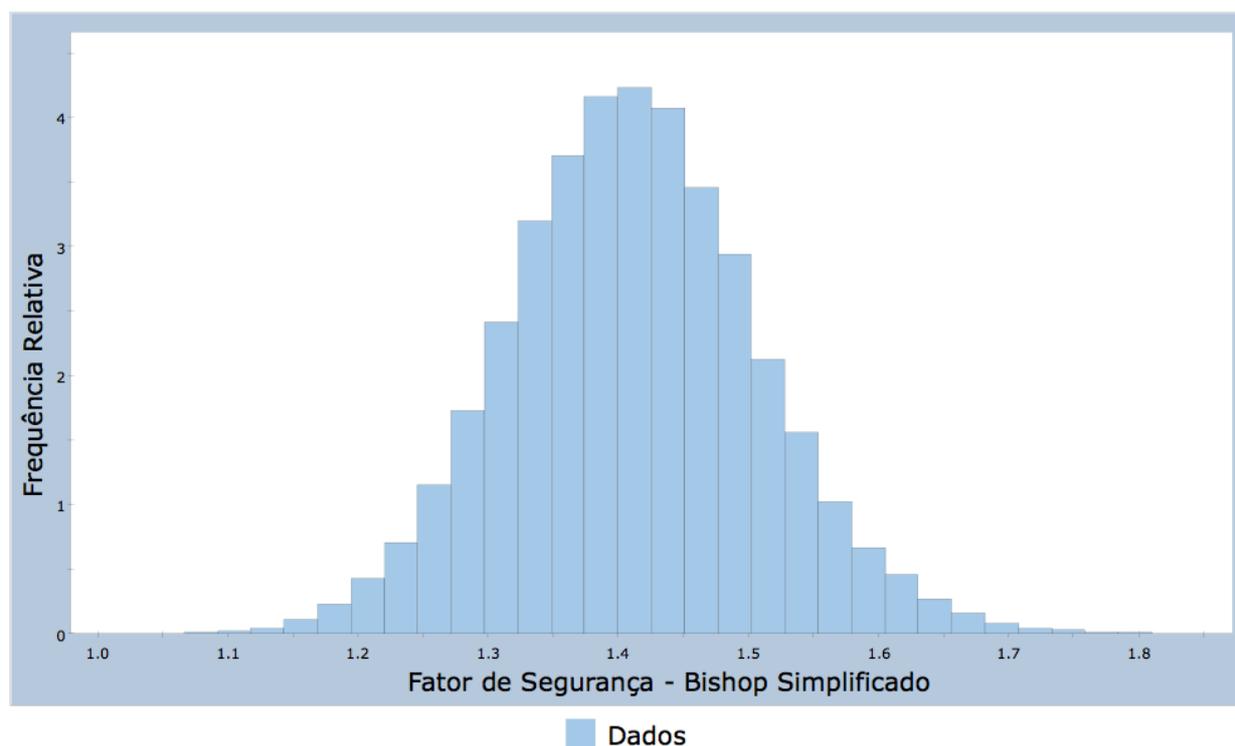


Figura 5.21 – Principais resultados e superfície crítica de ruptura (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$).

Sem dados com Fator de Segurança - Bishop Simplificado < 1

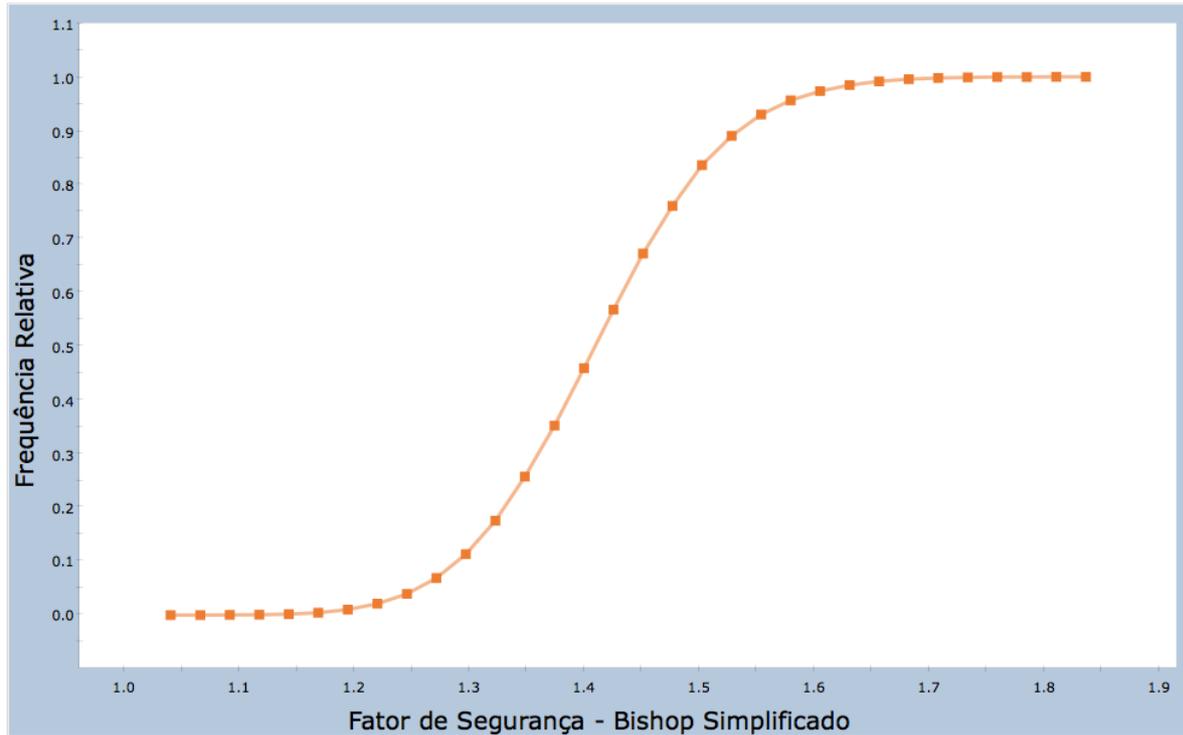


AMOSTRA: Média=1,411; D.P.=0,09575; Mín=1,041; Máx=1,81
 PF=0,000%; Índice de Conf.=4,2944; Melhor ajuste=Distribuição Gamma

Figura 5.22 – Histograma do Fator de Segurança e melhor ajuste da distribuição (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$). Em destaque os valores de Fator de Segurança menores do que 1.

A Figura 5.23 apresenta o gráfico da distribuição acumulada do fator de segurança, bem como os valores mínimo (1,041) e máximo do fator de segurança (1,81).

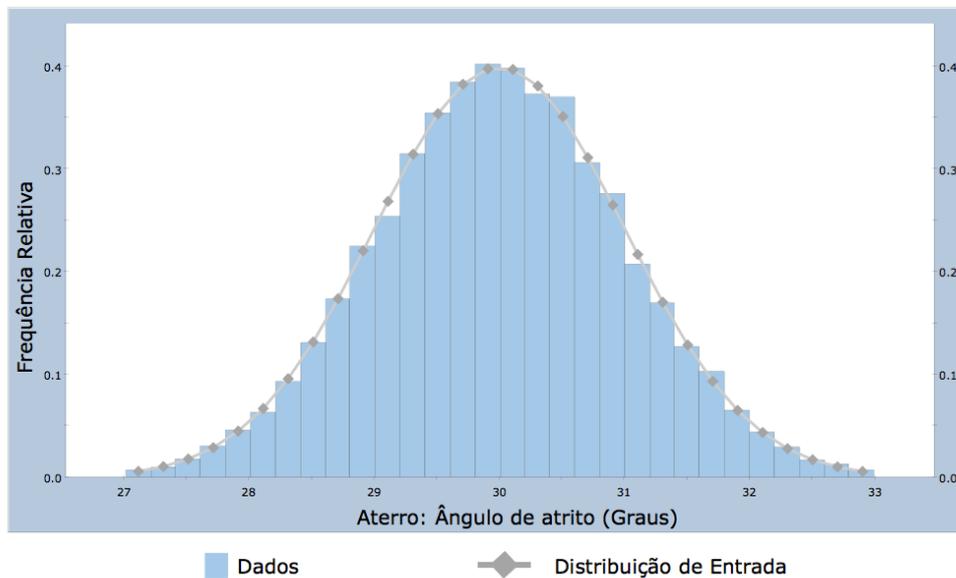
As Figuras 5.24 a 5.25 representam os histogramas, das variáveis consideradas aleatórias, os quais foram gerados pelo método Monte Carlo, a partir das distribuições estatísticas definidas. Nessa hipótese, as variáveis de coesão da argila marinha e lacustre também não variaram segundo uma distribuição normal definida, conforme hipótese anterior ($\delta x = 30m$; $\delta y = 30m$).



AMOSTRA: Média=1,411; D.P.=0,09575; Mín=1,041; Máx=1,81
 PF=0,000%; Índice de Conf.=4,2944; Melhor ajuste=Distribuição Gamma

Figura 5.23 – Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Variabilidade espacial : $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$).
 Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1.

Sem dados com Fator de Segurança - Bishop Simplificado < 1



AMOSTRA: Média=30,01; D.P.=0,9833; Min=27,02; Máx=33
 ENTRADA: Média Normal=30; D.P.=1; Mín=27; Máx=33

Figura 5.24 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o ângulo de atrito do aterro (Variabilidade espacial: $\delta x = 30m$; $\delta y = 1,5m$). Em destaque os valores de ângulo de atrito que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

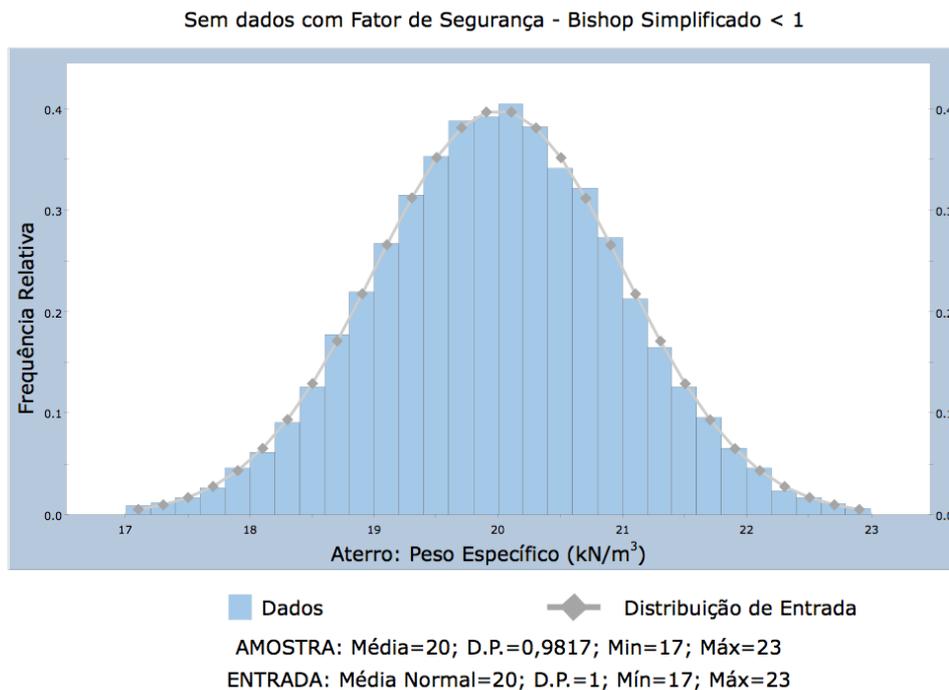


Figura 5.25 – Histograma dos dados gerados e a distribuição de entrada para o peso específico do aterro (Variabilidade espacial : $\delta x = 30\text{m}$; $\delta y = 1,5\text{m}$). Em destaque os valores de peso específico que resultaram em fatores de segurança menores do que 1.

5.1.2 Discussão dos Resultados – James Bay Dyke

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos de índice de confiabilidade, probabilidade de ruptura e fator de segurança (determinístico), de forma resumida. Esses valores são comparados com os resultados de trabalhos anteriores obtidos em outros programas e/ou diferentes métodos. Todos os fatores de segurança determinísticos obtidos nesse estudo proporcionaram valores iguais, uma vez que esse valor depende somente dos valores médios das propriedades dos solos. Se comparado com estudos anteriores, a variação do fator de segurança determinístico é pequena, dependendo principalmente do método determinístico e probabilístico utilizado e considerações na modelagem do problema.

De forma geral, os resultados de probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade estão de acordo com valores obtidos em estudos anteriores. Um aspecto importante analisado em todos os estudos é a influência da variabilidade espacial. Percebe-se um aumento no valor de probabilidade de ruptura (uma ordem de grandeza) nos casos em que não foi considerado a variabilidade espacial. Isso pode ser explicado pelo fato de ser possível que todas as camadas homogêneas assumam valores mais desfavoráveis ao mesmo tempo. É importante perceber que esse modelo não representa uma forma realista de análise. Porém, por se tratar de um método mais conservador e

superestimar os valores de probabilidade de ruptura, em problemas de estabilidade de taludes governado pelas incertezas referentes às propriedades dos solos, essa simplificação pode ser utilizada como parâmetro de comparação.

Tabela 5.2 Resultados das análises para diferentes distâncias de correlações, comparados com resultados encontrados na literatura.

Distância de correlação	Índice de Conf. (β)	Pf (%)	FS - valores médios (Determinístico)	Método Determinístico	Método Probabilístico	Referência
Sem variabilidade Espacial	2,165	1,34	1,460	Bishop Simplificado	Monte Carlo	Geo - Slope
$\delta x = 30m$ $\delta y = 30m$	2,66	0,40	1,450	Bishop Simplificado	FOSM	Christian <i>et al.</i> , 1994
$\delta x = 30m$ $\delta y = 30m$	2,76	0,23	1,460	Bishop Simplificado	Monte Carlo	Christian <i>et al.</i> , 1994
Sem variabilidade Espacial	1,84	2,37	1,460	Bishop Simplificado	Monte Carlo	El-Ramly <i>et al.</i> , 2002
$\delta x = 30m$ $\delta y = 30m$	2,32	0,47	1,460	Bishop Simplificado	Monte Carlo	El-Ramly <i>et al.</i> , 2002
$\delta x = 30m$ $\delta y = 30m$	2,552	0,54	1,473	Spencer	FORM	Ji, J., <i>et al.</i> , 2017
$\delta x = 30m$ $\delta y = 1,5m$	2,913	0,18	1,473	Spencer	FORM	Ji, J., <i>et al.</i> , 2017
Sem variabilidade Espacial	2,243	1,163	1,481	Bishop Simplificado	Monte Carlo	Presente Estudo
$\delta x = 30m$ $\delta y = 30m$	2,881	0,366	1,481	Bishop Simplificado	Monte Carlo	Presente Estudo
$\delta x = 30m$ $\delta y = 1,5m$	4,294	0,000	1,481	Bishop Simplificado	Monte Carlo	Presente Estudo

Com relação ao índice de confiabilidade, nota-se o aumento do seu valor, conforme a distância de correlação diminui, ou seja, uma variação dos parâmetros associada a uma menor distância. Isso é resultado direto da redução significativa nas incertezas relacionadas à variabilidade dos solos. Em outras palavras, quanto mais informações se tem sobre a variabilidade espacial, maior será o índice de confiabilidade. Por meio de

todos os resultados apresentados da Tabela 5.2, verifica-se que a sensibilidade referente à variabilidade espacial dos solos é evidente para baixas probabilidades.

Os resultados das análises realizadas no presente estudo indicam uma variação da probabilidade de ruptura de 1,163% (sem variabilidade espacial), para 0,0% com uma distância de correlação de 30m no eixo x e 1,5m no eixo y. Assim, a melhor forma de avaliar a influência da variabilidade espacial é através de análises com diferentes considerações.

CAPÍTULO 6

Resultados e Discussões

6.1 Análises de Estabilidade Probabilísticas - Falésias de Tabatinga

Após a organização dos dados disponíveis referentes aos parâmetros geotécnicos dos materiais da Formação Barreiras, foram realizadas análises computacionais para verificar as condições de estabilidade das falésias da Praia de Barra de Tabatinga/RN. Nesta etapa, as análises de estabilidade probabilísticas foram realizadas por meio do *software Slide 7.0*, pertencente à plataforma *Rocscience* – Módulo *Slide 2D*. As análises foram realizadas utilizando a abordagem probabilística através de simulações de Monte Carlo. Para isso, os métodos determinísticos aplicados foram: Janbu corrigido, Spencer e GLE/Morgenstern - Price. A Figura 6.1 mostra o fluxograma da aplicação do método Monte Carlo.

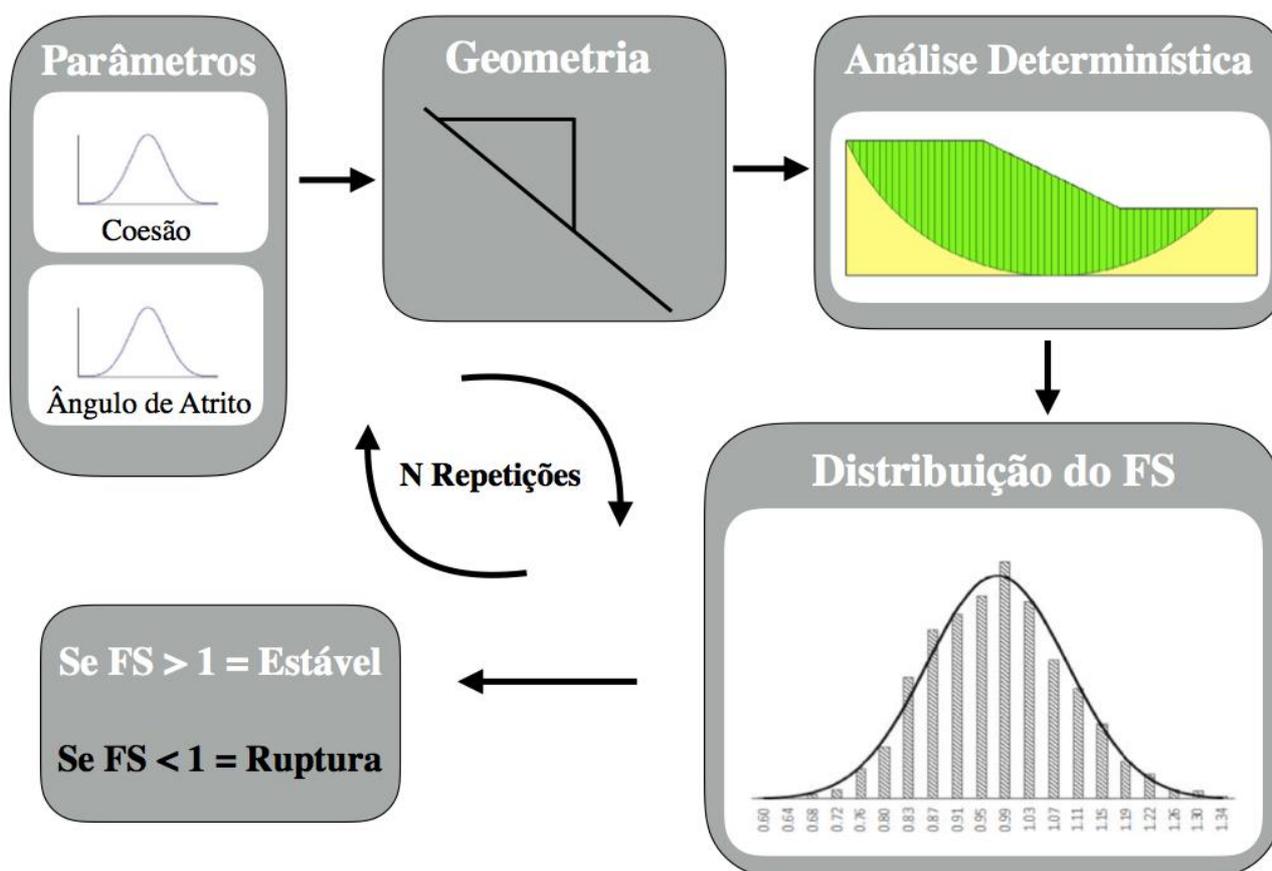


Figura 6.1 – Fluxograma: Aplicação do método Monte Carlo.

Na sequência, foram realizadas retroanálises probabilísticas da ruptura de grandes proporções (Figuras 3.10 a 3.13; 3.27 e 3.36 a 3.39) identificada na área de trabalho na fase de reconhecimento de campo. Essa retroanálise foi executada para obter os prováveis parâmetros de resistência no instante da ruptura. Para essa finalidade, foram utilizados os seguintes métodos determinísticos: Janbu corrigido, Bishop simplificado e GLE/Morgenstern - Price.

Diferentes situações foram modeladas para verificar a estabilidade diante de diferentes condições dos parâmetros de solo. Os parâmetros de resistência dos solos foram utilizados conforme a Tabela 6.1 a seguir.

Tabela 6.1 Caracterização estatística dos dados de entrada das análises de estabilidade da Formação Barreiras.

Camada Constituinte da Formação Barreiras	Variável Aleatória (Dados de Entrada)								Peso Específico γ (kN/m ³)
	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				
	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Natural (Topo)	94,1	80,0	334,1	0,0	33,8	7,7	56,9	10,7	18,00
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)	4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)	199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Homogênea - Inundado (Meio)	43,59	16,7	93,69	0,0	28,35	1,8	33,75	22,95	20,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)	245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00
Camada Heterogênea - Inundado (Base)	65,6	33,5	166,1	0,0	29,4	2,9	38,1	20,7	20,50

Todas as análises foram executadas sem a presença de fluxo de água. A seção transversal modelada apresenta feições geométricas típicas da área de estudo. O perfil apresenta 40m de altura, 32m de extensão e cerca de 90° de inclinação com a horizontal. As alturas de cada camada considerada foram obtidas por meio de avaliação de imagens (Figura 3.27).

Foram realizadas sete análises, as quais serão tratadas por “hipóteses” (Tabela 6.2). Para todas as hipóteses foram realizados testes de convergência, a fim de garantir que os resultados convergem para uma resposta final estável. Cada hipótese avalia a estabilidade sob diferentes condições geotécnicas. Depois disso, é realizada uma análise conjunta de todos os resultados obtidos, sobretudo relacionados à probabilidade de ruptura. As análises também são comparadas em termos de métodos de equilíbrio limite (determinístico) utilizados e quanto à forma da superfície de ruptura.

Tabela 6.2 Resumo das hipóteses consideradas para as análises de estabilidade.

Análises de Estabilidade	Descrição da Hipótese	Camadas			Observação
		Topo	Meio	Base	
Hipótese 01	Todas as camadas na condição natural.	15 m	15 m	10 m	-
Hipótese 02	Todas as camadas na condição inundada.	15 m	15 m	10 m	-
Hipótese 03	A camada de topo na condição inundada.	15 m	15 m	10 m	-
Hipótese 04	Frente de umedecimento na camada de topo.	14 m	15 m	10 m	1 m de camada inundada localizada no topo.
Hipótese 05	Frente de umedecimento na camada de topo.	13 m	15 m	10 m	2 m de camada inundada localizada no topo.
Hipótese 06	Frente de umedecimento na camada de topo.	12 m	15 m	10 m	3 m de camada inundada localizada no topo.
Hipótese 07	Frente de umedecimento na camada de topo.	11 m	15 m	10 m	4 m de camada inundada localizada no topo.

No tocante às retroanálises probabilísticas, duas “hipóteses” foram consideradas (Tabela 6.3). Essas hipóteses foram modeladas com vistas a obter os prováveis parâmetros de resistência no instante da ruptura em diferentes condições geotécnicas. A superfície de ruptura para as duas hipóteses foi assumida diante do que foi observado em campo. Para essas hipóteses, apenas o material do meio foi considerado variável aleatória. As duas configurações foram avaliadas considerando quatro possíveis formas de variabilidade espacial dos parâmetros de resistência do solo. A hipótese 08 considera a camada do meio completamente saturada, ao passo que a hipótese 09 considera uma faixa de 5m, localizada na borda da falésia, na condição inundada.

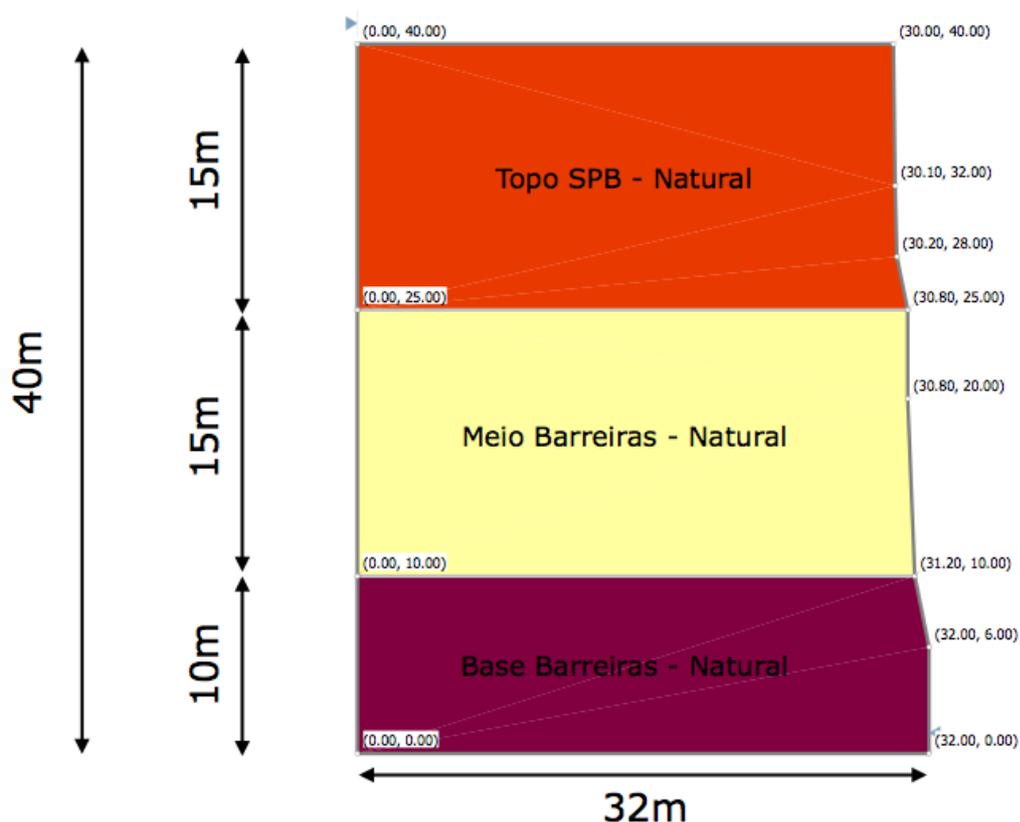
Tabela 6.3 Resumo das hipóteses consideradas para as retroanálises probabilísticas.

Retroanálises	Descrição da Hipótese	Camadas			Variabilidade Espacial dos solos
		Topo	Meio	Base	
Hipótese 08	- Topo 4 m de solo arenoso;	4 m	26 m	10 m	Homogêneo: $\delta x = 0$ m; $\delta y = 0$ m
	- Camada de meio na condição inundada (variável aleatória);	4 m	26 m	10 m	Variabilidade: $\delta x = 20$ m; $\delta y = 20$ m
	- Camada de base na condição natural (valores médios)	4 m	26 m	10 m	Variabilidade: $\delta x = 5$ m; $\delta y = 5$ m
		4 m	26 m	10 m	Variabilidade: $\delta x = 2$ m; $\delta y = 2$ m
Hipótese 09	- Topo 4 m de solo arenoso;	4 m	26 m	10 m	Homogêneo: $\delta x = 0$ m; $\delta y = 0$ m
	- Faixa de 5 m, da borda, de camada de meio na condição inundada (variáveis aleatórias);	4 m	26 m	10 m	Variabilidade: $\delta x = 20$ m; $\delta y = 20$ m
		4 m	26 m	10 m	Variabilidade: $\delta x = 5$ m; $\delta y = 5$ m
	- Camada de base na condição natural (valores médios)	4 m	26 m	10 m	Variabilidade: $\delta x = 2$ m; $\delta y = 2$ m

A seguir são apresentados os resultados das análises de estabilidade probabilísticas realizadas.

6.1.1 Resultados - Hipótese 01

A hipótese 01 foi modelada considerando todo o maciço na condição natural. A Figura 6.2 mostra a geometria, estratigrafia e os parâmetros de entrada utilizados nesse cenário. O maciço possui 40m de altura e três diferentes camadas de solos. A camada da base possui 10m de altura, seguida das camadas do meio e topo, com 15m cada. Essa condição representa a situação mais favorável possível à segurança do maciço.



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Natural (Topo)		94,1	80,0	334,1	0,0	33,8	7,7	56,9	10,7	18,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)		199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00

Figura 6.2 – Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 01.

Na hipótese 01, 50 mil iterações foram realizadas. Em outras palavras, a análise de estabilidade foi calculada para 50 mil diferentes cenários de perfis de solos possíveis, dentro da função distribuição de probabilidade de cada parâmetro. Entretanto, o programa verifica a convergência em direção a uma resposta final estável para cada método de equilíbrio limite utilizado. As Figuras 6.3 e 6.4 mostram o gráfico de convergência obtido para os métodos de Janbu corrigido e GLE/Morgenstern - Price.

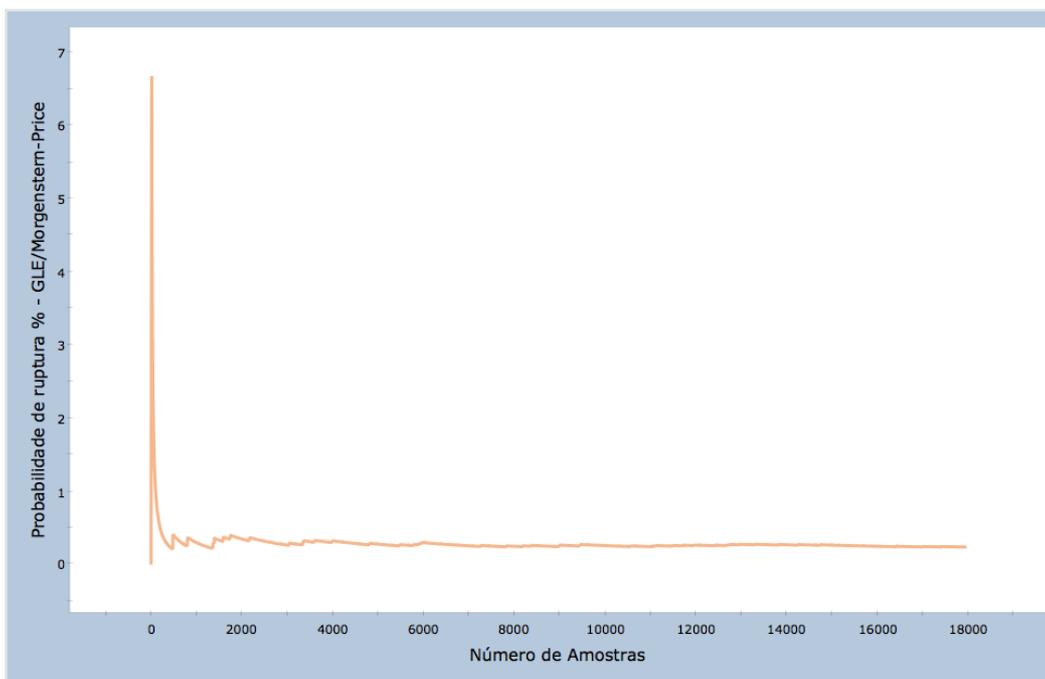


Figura 6.3 – Gráfico de convergência (Probabilidade de Ruptura x Número de amostras). Método de GLE/Morgenstern - Price.

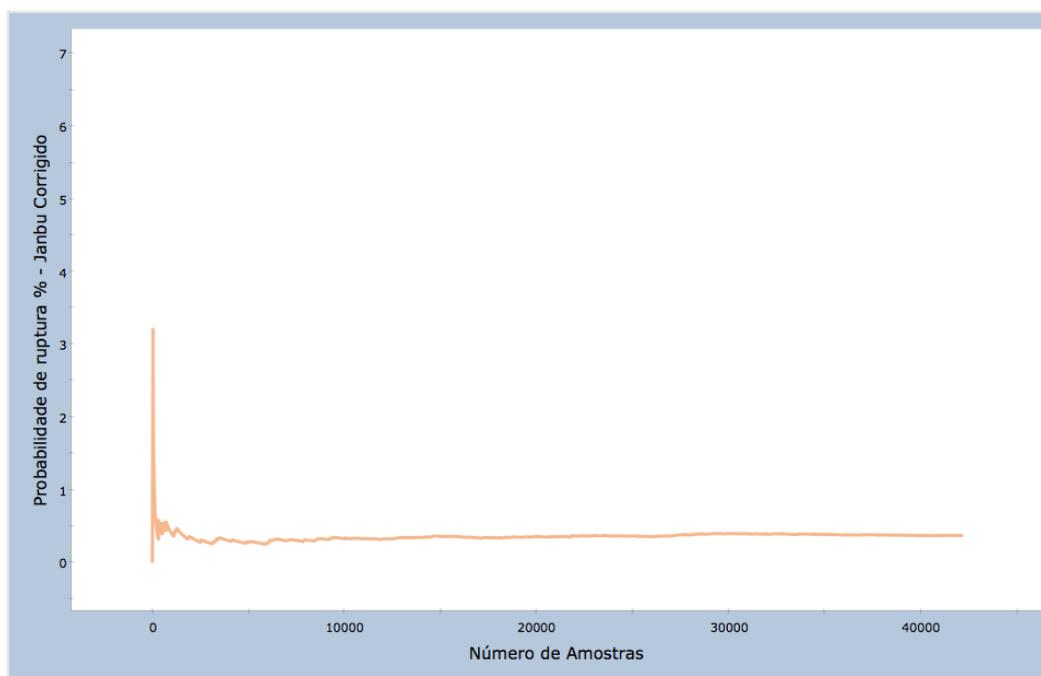


Figura 6.4 – Gráfico de convergência (Probabilidade de Ruptura x Número de amostras). Método de Janbu corrigido.

Observa-se que para o método de Janbu corrigido o programa executou cerca de 40 mil amostras, ao passo que para o método de GLE/Morgenstern - Price, cerca de 18 mil amostras foram geradas.

A Figura 6.5 mostra os resultados obtidos através dos métodos de Janbu corrigido e GLE/Morgenstern - Price, considerando uma superfície de ruptura não circular. Os valores de fator de segurança crítico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade também são exibidos.

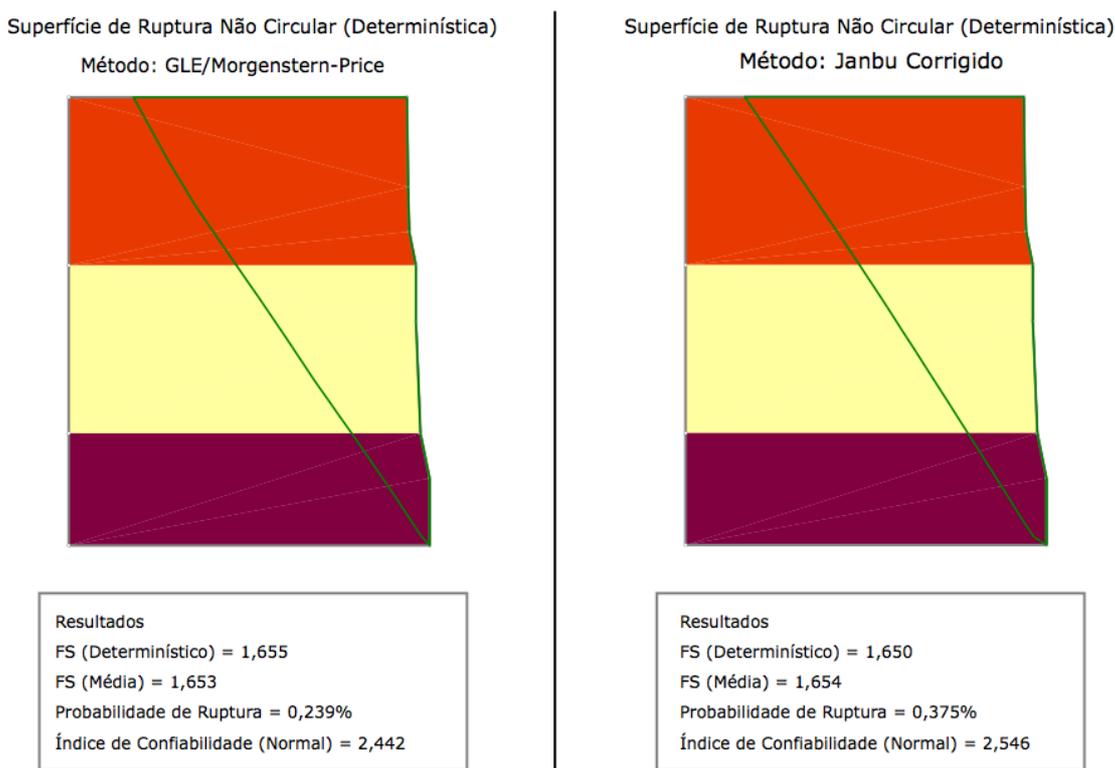
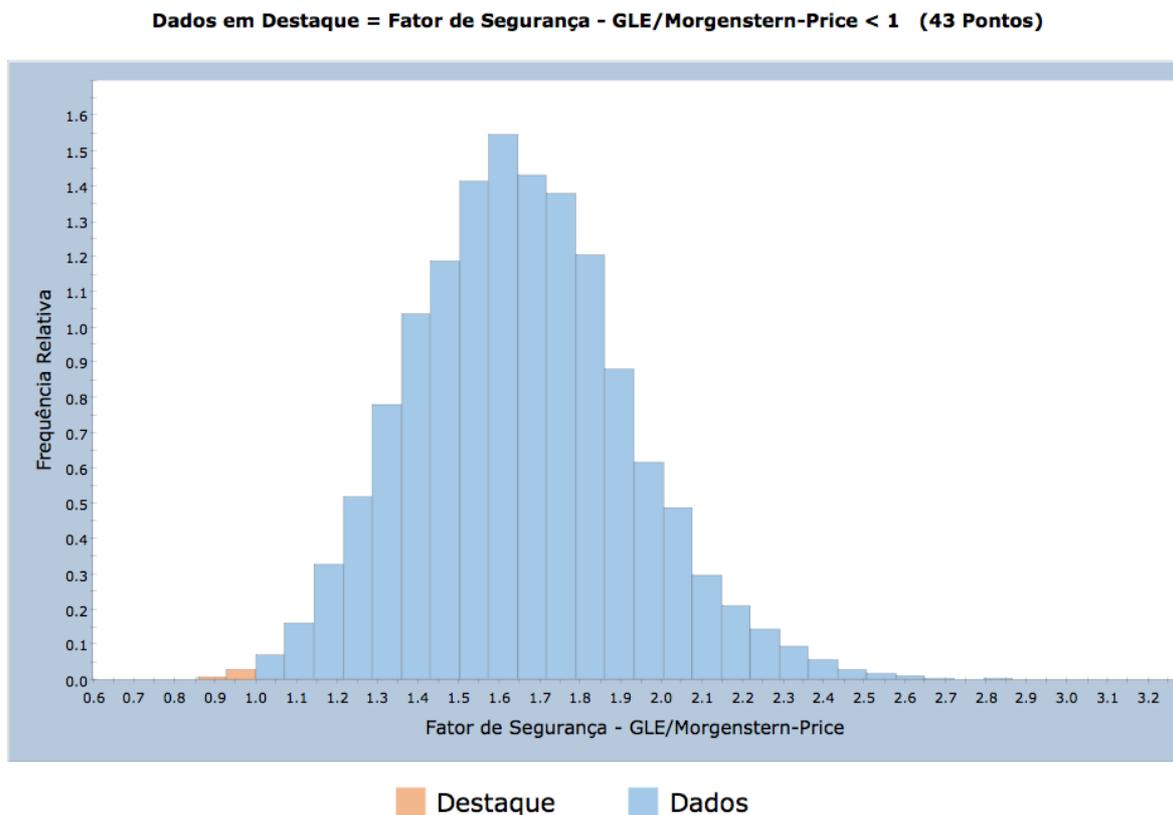


Figura 6.5 – Superfícies de ruptura não circular obtidas pelos métodos de GLE/Morgenstern - Price e Janbu Corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade obtidos por cada método, para a hipótese 01.

Observa-se que o método de equilíbrio limite utilizado não produz diferença significativa na forma da superfície de ruptura. Os valores de fator de segurança determinístico, fator de segurança médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade também não apresentam diferenças expressivas. É importante notar que, apesar dessa hipótese retratar a situação mais favorável relacionada à segurança do talude e o fator de segurança médio ser superior a 1,6, existe uma probabilidade de ruptura associada.

A Figura 6.6 mostra o histograma do fator de segurança obtido pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Mediante 18 mil iterações, ocorreram 43 cenários em que o

fator de segurança foi menor do que a unidade (em destaque). As simulações de Monte Carlo retornaram um fator de segurança médio de 1,653 com desvio padrão de 0,267. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição gamma.



AMOSTRA: Média=1,653; D.P.=0,2673; Mín=0,8332; Máx=2,986
 PF=0,239%; Índice de Conf.=2,441; Melhor ajuste=Distribuição Gamma

Figura 6.6 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição gamma.

Os resultados obtidos através dos métodos de Janbu corrigido e GLE/Morgenstern - Price, considerando uma superfície de ruptura circular estão apresentados na Figura 6.7. Percebe-se que as superfícies de ruptura são idênticas para os dois métodos. Inclusive se comparada com as superfícies de ruptura não circular, os resultados são semelhantes. Os valores de fator de segurança determinístico, fator de segurança médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade também não apresentam diferenças consideráveis.

Considerando o método de GLE/Morgenstern - Price e a superfície de ruptura circular, o fator de segurança médio obtido é igual a 1,624, com desvio padrão de 0,2461 (Figura 6.8). Em destaque no histograma os 123 cenários em que o fator de segurança obtido foi menor do que a unidade.

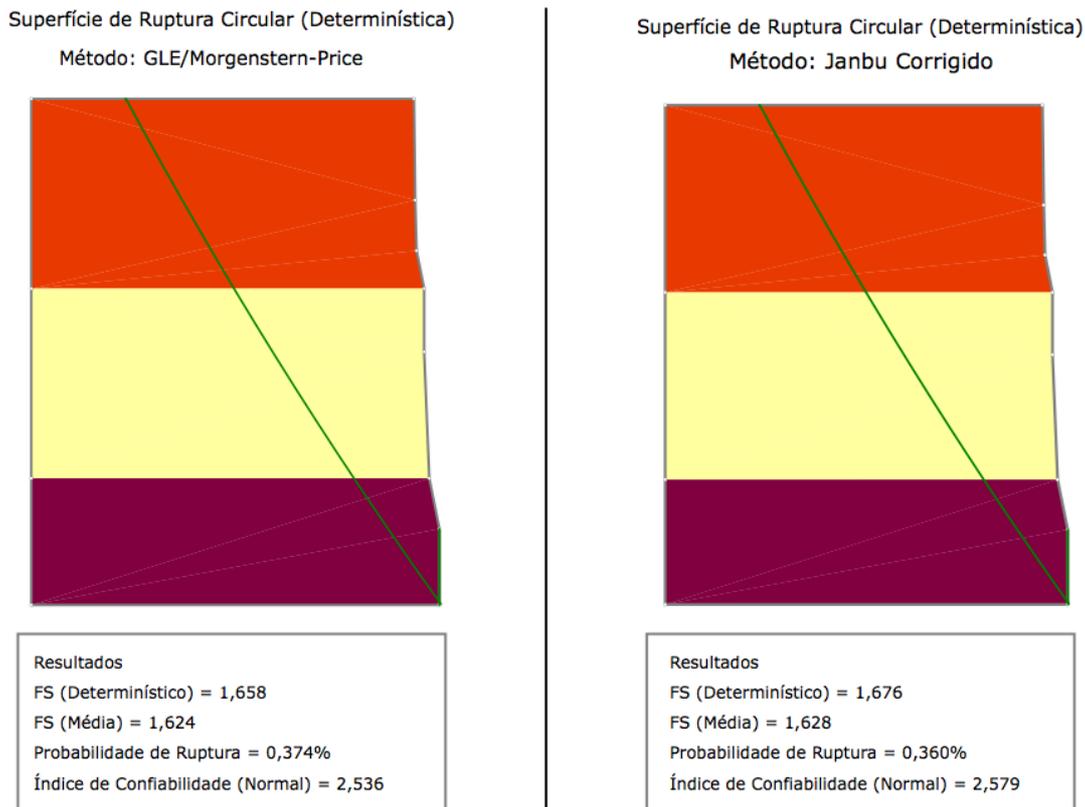


Figura 6.7 – Superfícies de ruptura circular obtidas pelos métodos de GLE/Morgenstern - Price e Janbu Corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade obtidos por cada método, para a hipótese 01.

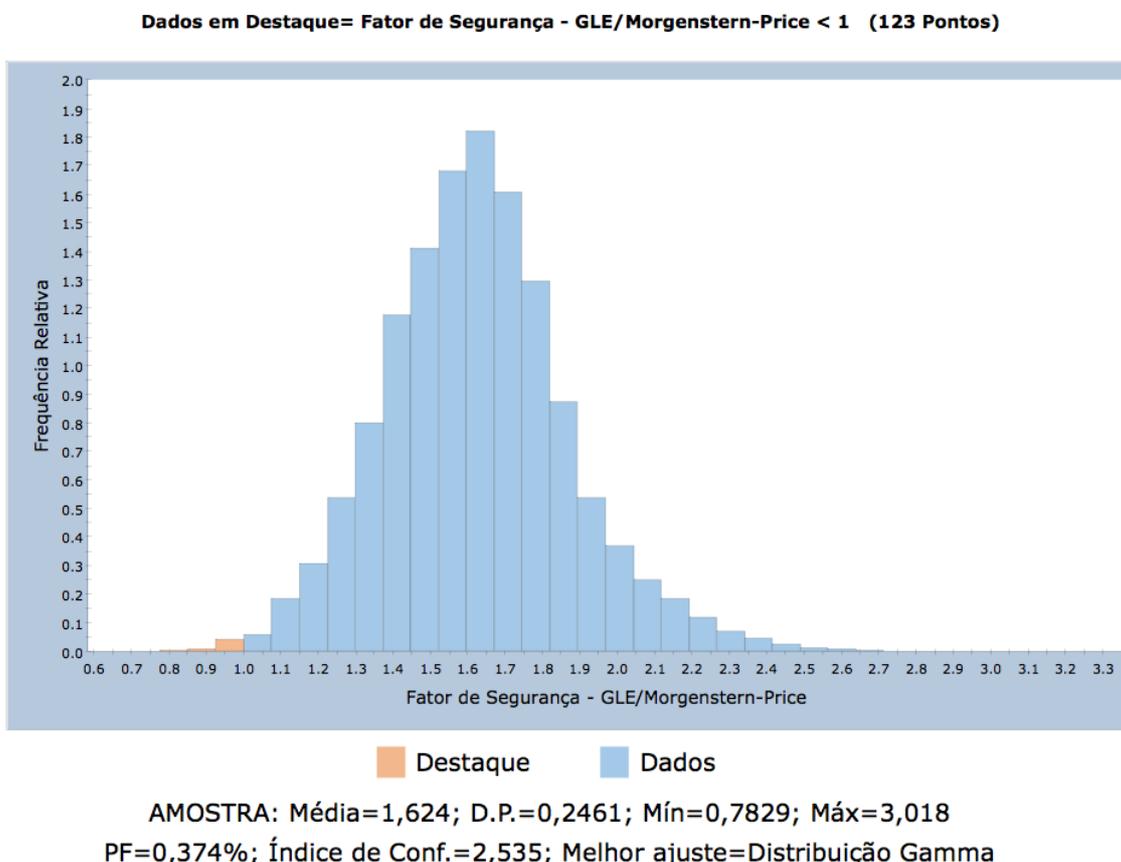


Figura 6.8 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição gamma.

Os resultados de todas as análises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 01, estão sintetizados nas Tabelas 6.4 e 6.5. Não se observa diferenças significativas quando comparado o fator de segurança determinístico com o médio (probabilístico). No mesmo contexto, as diferenças nos resultados, comparando o tipo de superfície crítica de análise, são mínimas. A maior diferença encontrada é no método de Janbu Corrigido, em que o valor passa de 1,65 para 1,67.

É importante explicitar que as formas das superfícies de ruptura obtidas nas análises da hipótese 01, tanto circular quanto não circular, não representam na prática o que ocorre em campo. As superfícies de ruptura encontradas em campo são menos profundas e não atingem a camada de base (Figuras 3.10 a 3.13; 3.27, 3.30, 3.33 e 3.36 a 3.39).

Tabela 6.4 Hipótese 01: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica **não circular**.

Hipótese 01: Perfil com Solo Natural - Superfície Não Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
2,546	0,375%	1,650	1,654	Janbu Corrigido
2,489	0,275%	1,653	1,660	Spencer
2,442	0,239%	1,655	1,653	GLE / Morgenstern - Price

Tabela 6.5 Hipótese 01: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície **crítica circular**.

Hipótese 01: Perfil com Solo Natural - Superfície Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
2,579	0,360%	1,676	1,628	Janbu Corrigido
2,534	0,357%	1,656	1,623	Spencer
2,536	0,374%	1,658	1,624	GLE / Morgenstern - Price

Uma vez que o fator de segurança determinístico é obtido considerando os valores médios dos parâmetros de entrada, a variação entre os métodos não é expressiva, conforme esperado.

Diante das condições geotécnicas atribuídas para a hipótese 01, todos os fatores de segurança, tanto determinísticos quanto probabilísticos, forneceram valores acima de 1,6. De acordo com o *Corps of Engineers* (1997), no tocante aos valores de probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade, o maciço possui nível de pobre a abaixo da média (β entre 3,0 e 2,5 e PR maiores do que $1,3 \times 10^{-3}$). Segundo El-Ramly (2001), o talude possui desempenho aceitável, pois possui índice de confiabilidade maior do que 2,0 e probabilidade de ruptura menor do que $2,0 \times 10^{-2}$.

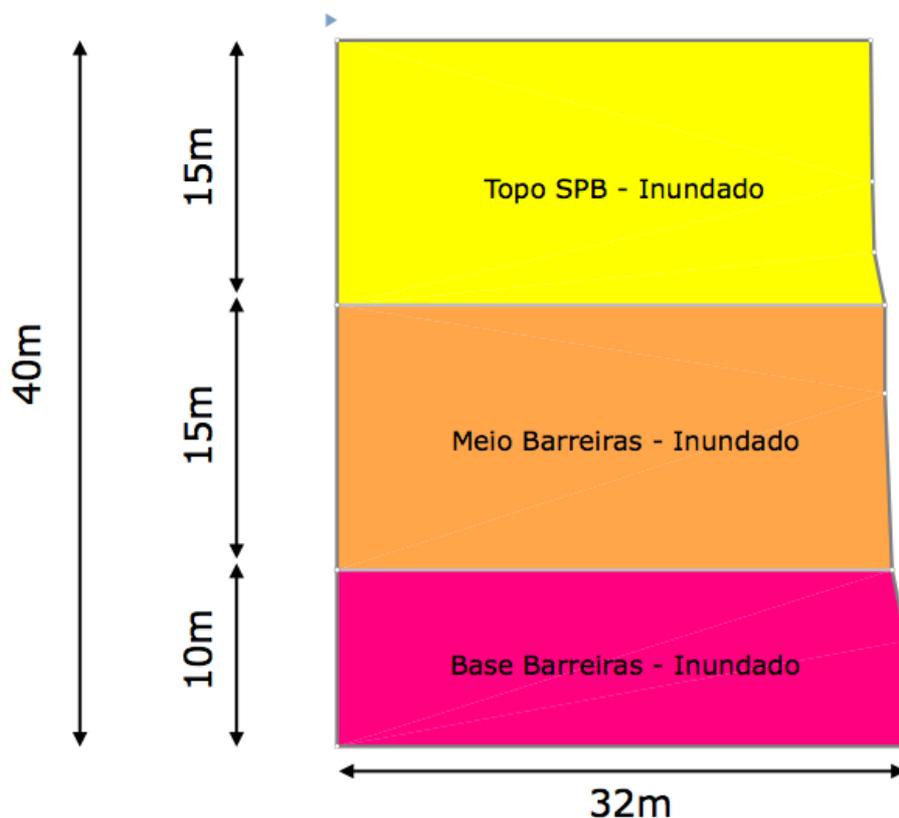
6.1.2 Resultados - Hipótese 02

A hipótese 02 foi modelada considerando todo o maciço na condição inundada (Figura 6.9). A geometria, e estratigrafia seguem de forma análoga a hipótese 01. Porém, todos os parâmetros de entrada utilizados para esse caso encontram-se na condição inundada. Essa condição representa a situação mais desfavorável possível à segurança do talude.

Na prática, essa condição é praticamente impossível de ser encontrada na natureza, pois para encostas íngremes como essas, a frente de saturação ocorre do topo para a base. Dessa forma, é improvável que as camadas de meio e base alcancem graus de saturação elevados. Contudo, a análise de situações extremas como essas fornece informações relevantes e pode nortear avaliações mais prováveis.

Na hipótese 02 foram realizadas 100 mil iterações. As simulações de Monte Carlo foram executadas até a estabilização do gráfico de convergência, de forma análoga ao que foi realizado na hipótese 01. Para esse cenário foi necessário o dobro de diferentes cenários de perfis de solos possíveis, dentro da função distribuição de probabilidade de cada parâmetro.

A Figura 6.10 mostra os resultados obtidos através do método de GLE/Morgenstern - Price, considerando uma superfície de ruptura não circular. É apresentada a superfície de ruptura determinística, bem como as possíveis superfícies de ruptura, que retornam fatores de segurança próximos à unidade ($0,99 < FS < 1,0$). Os valores de fator de segurança crítico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade também são exibidos.



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)		4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Camada Homogênea - Inundado (Meio)		43,59	16,7	93,69	0,0	28,35	1,8	33,75	22,95	20,00
Camada Heterogênea - Inundado (Base)		65,6	33,5	166,1	0,0	29,4	2,9	38,1	20,7	20,5

Figura 6.9 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 02.

Os resultados do fator de segurança determinístico e médio foram 0,333 e 0,320, respectivamente. Como esses dois valores estão abaixo da unidade, a ruptura ocorreria antes mesmo da saturação completa do material. Esse fato corrobora com a premissa de que esse estado não é encontrado na natureza. No entanto, a forma da superfície de crítica determinística e a maioria das que retornam fatores de segurança próximos à unidade (superfícies mais rasas) retratam situações observadas em campo (Figura 3.33).

A Figura 6.11 mostra o histograma do fator de segurança obtido pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Diante de 19.266 iterações, ocorreram 19.256 cenários em que o fator de segurança foi menor do que a unidade (em destaque). Ressalta-se que os resultados se concentram distante da unidade, ratificando a dificuldade de encontrar tais

condições geotécnicas nessas falésias. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição beta.

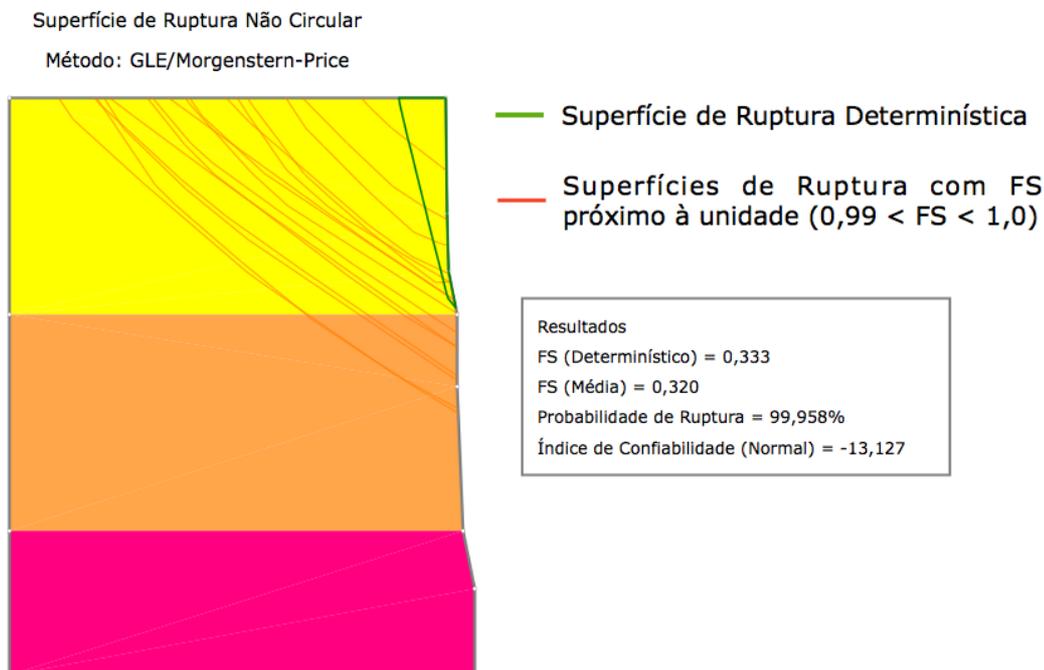


Figura 6.10 – Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese O2.

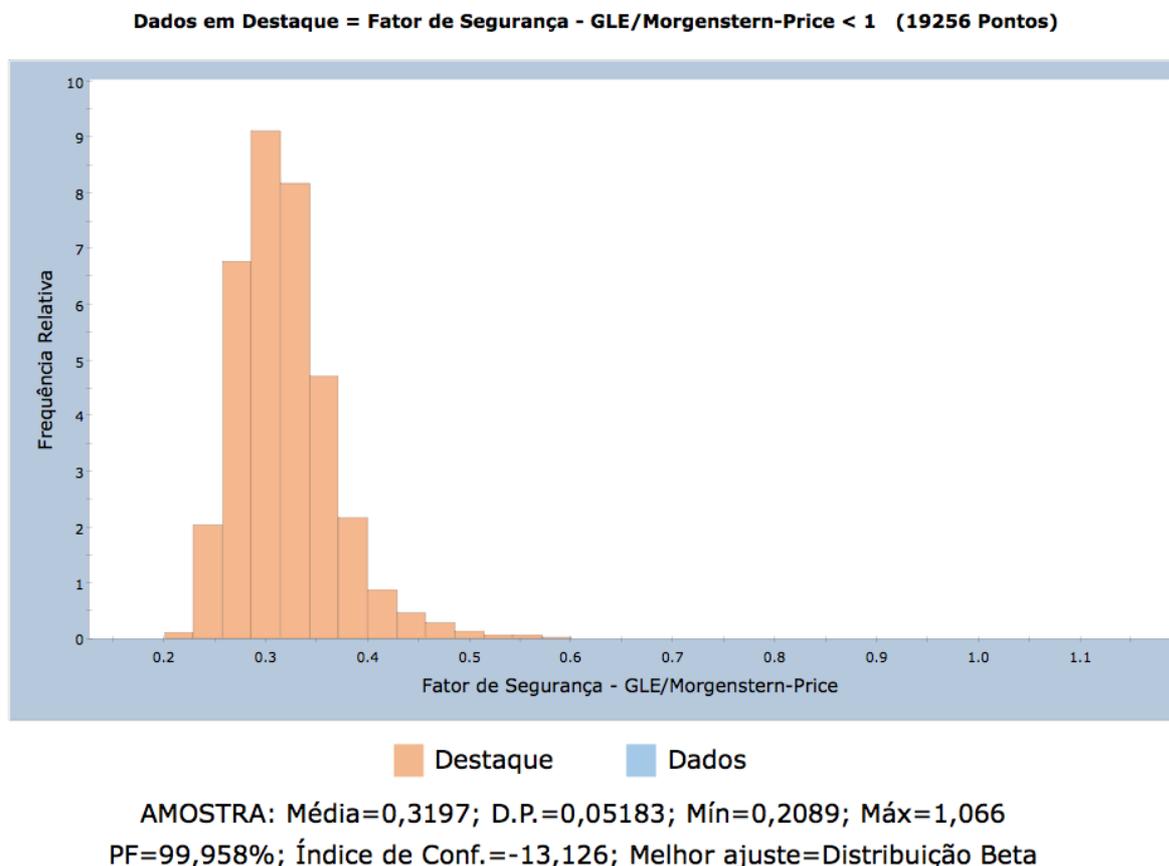


Figura 6.11 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.

A Figura 6.12 apresenta os resultados obtidos através do método de GLE/Morgenstern - Price, considerando uma superfície de ruptura circular. Os fatores de segurança determinístico e médio são 0,354 e 0,400, respectivamente. De forma análoga ao que foi apresentado para uma superfície de ruptura não circular, os resultados obtidos estão abaixo da unidade. As superfícies que retornam fatores de segurança próximos à unidade são mais profundas para esse caso e não representam a realidade.

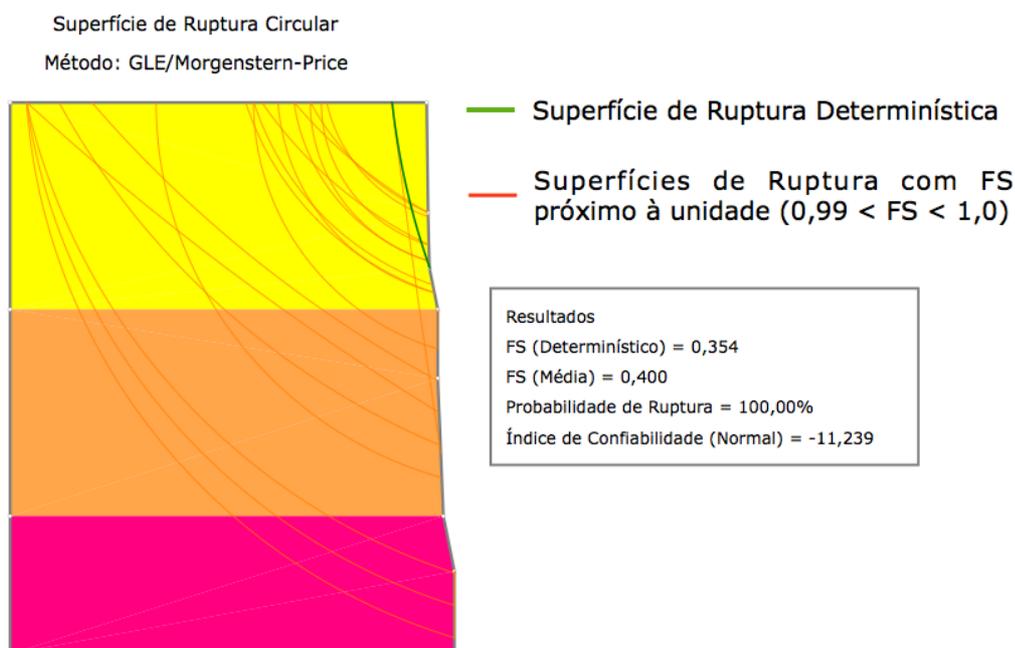


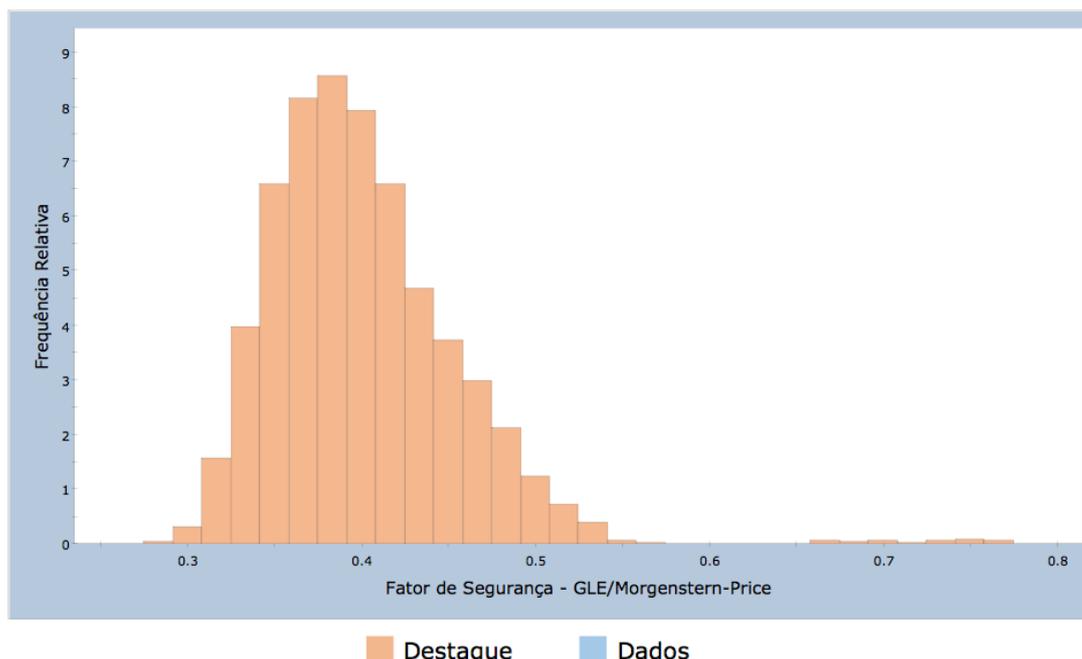
Figura 6.12 – Superfície de ruptura circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 02.

Considerando o método de GLE/Morgenstern - Price e a superfície de ruptura circular, o fator de segurança médio obtido é igual a 0,400, com desvio padrão de 0,05337 (Figura 6.13). Em destaque no histograma, todos os cenários simulados retornaram fatores de segurança menores do que a unidade. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição beta.

Os resultados de todas as análises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 02, estão resumidos nas Tabelas 6.6 e 6.7. Nota-se que as diferenças nos resultados, comparando os tipos de superfície crítica de análise, são mínimas.

Os valores do fator de segurança determinístico e médio, para a superfície de ruptura não circular são ligeiramente menores, quando comparados com os valores obtidos para superfícies circulares. Apesar disso, de forma geral, as probabilidades de ruptura são maiores. Esse fato demonstra que nem sempre fatores de segurança mais altos retornam probabilidades de ruptura mais baixas e vice versa.

Dados em Destaque = Fator de Segurança - GLE/Morgenstern-Price < 1 (18505 Pontos)



AMOSTRA: Média=0,400; D.P.=0,05337; Mín=0,2747; Máx=0,774
 PF=100,00%; Índice de Conf.=-11,238; Melhor ajuste=Distribuição Beta

Figura 6.13 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de **ruptura circular** obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.

Tabela 6.6 Hipótese 02: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica **não circular**.

Hipótese 02: Perfil com Solo Saturado - Superfície Não Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-3,739	98,464%	0,338	0,349	Janbu Corrigido
-6,182	99,459%	0,339	0,362	Spencer
-13,127	99,958%	0,333	0,320	GLE / Morgenstern - Price

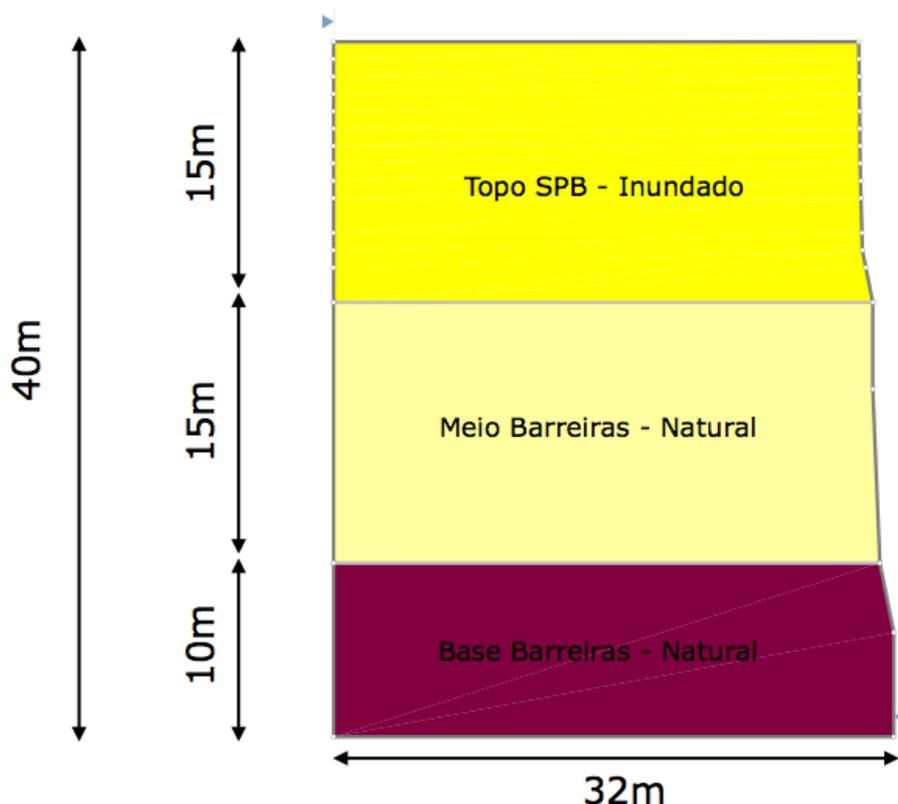
Tabela 6.7 Hipótese 02: Resumo os resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica **circular**.

Hipótese 02: Perfil com Solo Saturado - Superfície Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-3,054	97,699%	0,351	0,379	Janbu Corrigido
-5,522	100,000%	0,352	0,456	Spencer
-11,239	100,000%	0,354	0,400	GLE / Morgenstern - Price

Diante das condições geotécnicas atribuídas para a hipótese 02, todos os fatores de segurança, tanto determinísticos quanto probabilísticos, forneceram valores abaixo de 0,4. Nesse caso, a ruptura ocorreria antes de alcançar tal estado de saturação. Todos os valores de probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade indicam que esse cenário é instável e, por isso, não é encontrado na natureza.

6.1.3 Resultados - Hipótese 03

A hipótese 03 foi modelada considerando apenas a camada de topo do maciço na condição inundada (Figura 6.14). Esse cenário foi modelado com o intuito de obter uma condição mais próxima da realidade.



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)		4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)		199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00

Figura 6.14 – Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 03.

A Figura 6.15 mostra os resultados obtidos através do método de GLE/Morgenstern - Price, considerando uma superfície de ruptura não circular. É apresentada a superfície de ruptura determinística, bem como as possíveis superfícies de ruptura, que retornam fatores de segurança próximos à unidade ($0,99 < FS < 1,0$). Os valores de fator de segurança crítico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade também são exibidos.

A principal diferença entre as hipóteses 03 e 02 é a forma da superfície de ruptura. Percebe-se que de forma geral, as superfícies que apresentam fatores de segurança próximos da unidade estão situadas por completo na camada do topo. Os resultados do fator de segurança determinístico e médio são 0,355 e 0,432, respectivamente. Esses valores estão próximos dos valores encontrados para a hipótese 02. Isso mostra que as

condições geotécnicas simuladas na hipótese 03, também são improváveis de ocorrer na prática. Em outras palavras, supondo uma frente de saturação no topo da falésia, a ruptura ocorreria antes de atingir 15m de profundidade.

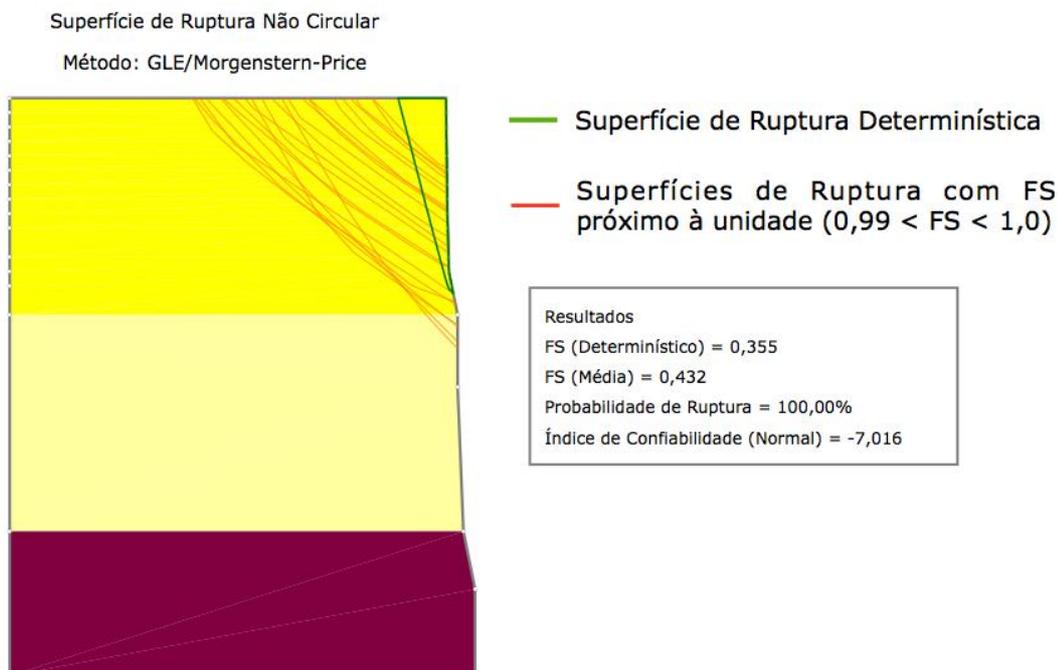
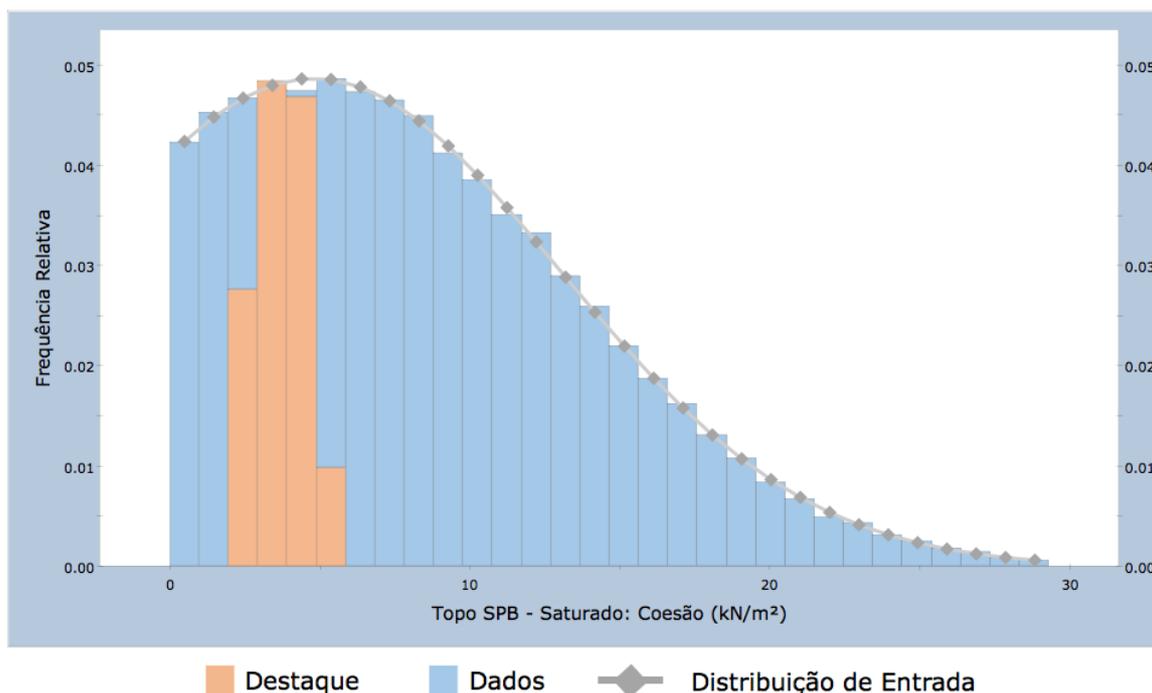


Figura 6.15 – Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 03.

As Figuras 6.16 a 4.18 mostram os histogramas do parâmetro coesão da camada de topo, para os métodos GLE/Morgenstern - Price, Spencer e Janbu corrigido. Em destaque os valores de coesão em vermelho, os quais retornaram valores de fator de segurança menores do que a unidade.

Dados em Destaque = Fator de Segurança - GLE/Morgenstern-Price < 1 (9005 pontos)

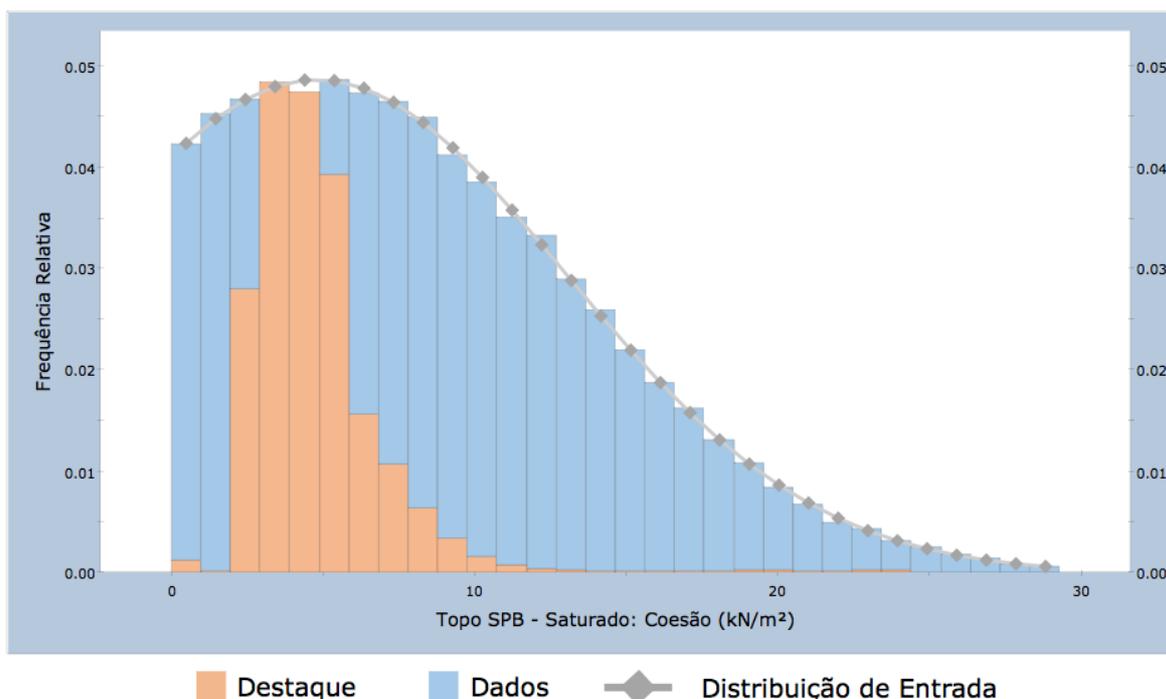


AMOSTRA: Média=8,564; D.P.=5,757; Min=0,000; Máx=29,29

ENTRADA: Média Normal=4,8; D.P.=8,2; Mín=0; Máx=29,4

Figura 6.16 – Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de topo inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de GLE/Morgenstern - Price para superfície de ruptura não circular.

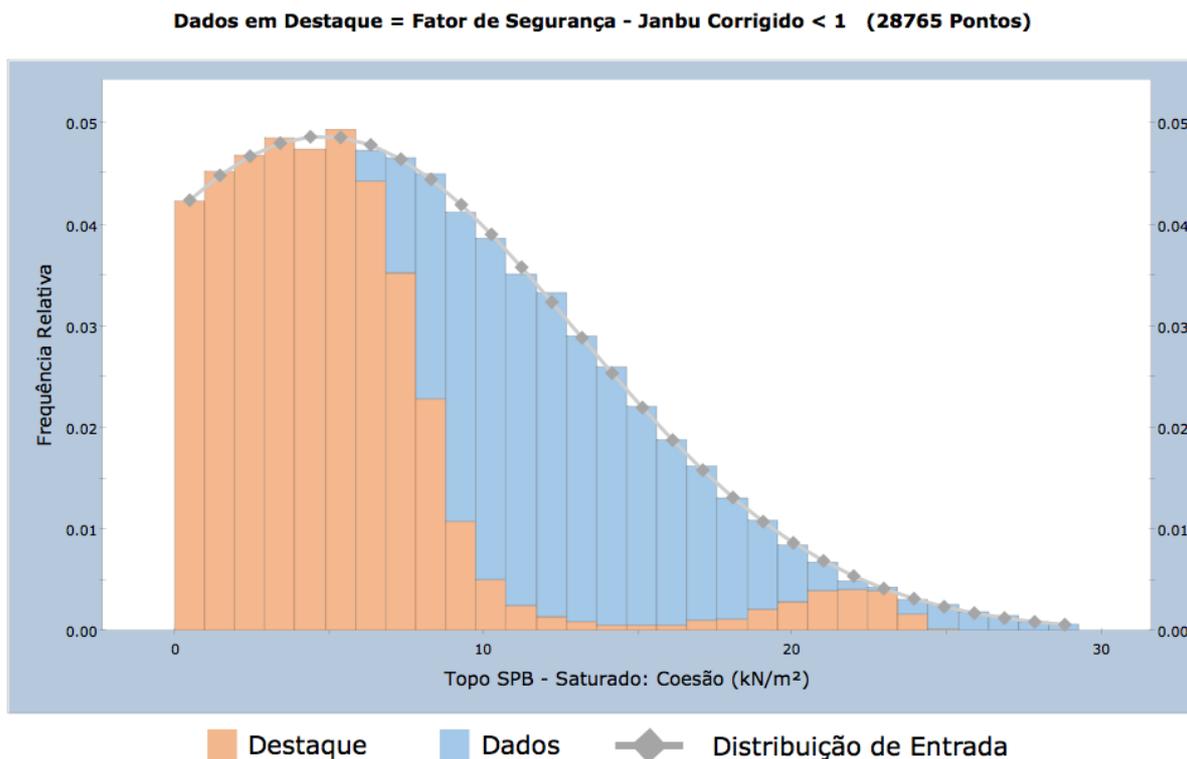
Dados em Destaque = Fator de Segurança - Spencer < 1 (13921 pontos)



AMOSTRA: Média=8,564; D.P.=5,757; Min=0,000; Máx=29,29

ENTRADA: Média Normal=4,8; D.P.=8,2; Mín=0; Máx=29,4

Figura 6.17 – Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de topo inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Spencer para superfície de ruptura não circular.



AMOSTRA: Média=8,564; D.P.=5,757; Min=0,000; Máx=29,29

ENTRADA: Média Normal=4,8; D.P.=8,2; Mín=0; Máx=29,4

Figura 6.18 – Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de topo inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Janbu corrigido para superfície de ruptura não circular.

Percebe-se a concentração de valores de coesão da camada de topo do lado esquerdo da distribuição de probabilidade, ou seja, quando são assumidos os valores mais baixos de coesão, existe uma tendência do fator de segurança ser menor do que um. Para todos os métodos, existem poucos pontos em vermelho acima de 20kPa. A quantidade de iterações exerce influência sobre esse fato. No método de Janbu corrigido, o qual foi realizado cerca de 28.880 iterações, identificam-se mais pontos nessa faixa de valores de coesão (Figura 6.18).

As Figuras 6.19 a 6.21 mostram os histogramas do fator de segurança obtidos pelos métodos de GLE/Morgenstern - Price, Spender e Janbu corrigido. A probabilidade de ruptura é acima de 98% para todos os métodos, considerando a superfície de ruptura não circular. Para o método de GLE/Morgenstern - Price, o fator de segurança médio é 0,304 com desvio padrão de 0,034. O melhor ajuste obtido foi através da distribuição beta. O fator de segurança médio para os métodos de Spencer e Janbu corrigido são 0,353 e 0,370 e o melhor ajuste foi obtido mediante a distribuição lognormal.

Dados em Destaque = Fator de Segurança - GLE/Morgenstern-Price < 1 (9005 pontos)

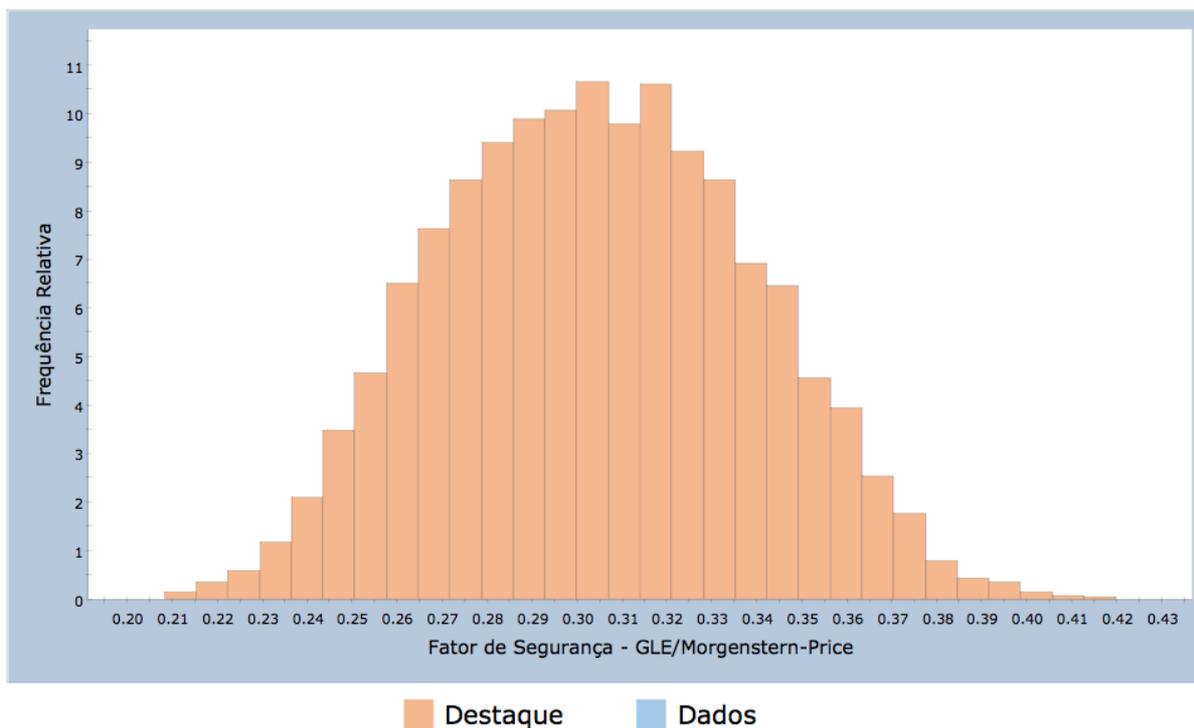


Figura 6.19 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Spencer < 1 (13921 pontos)

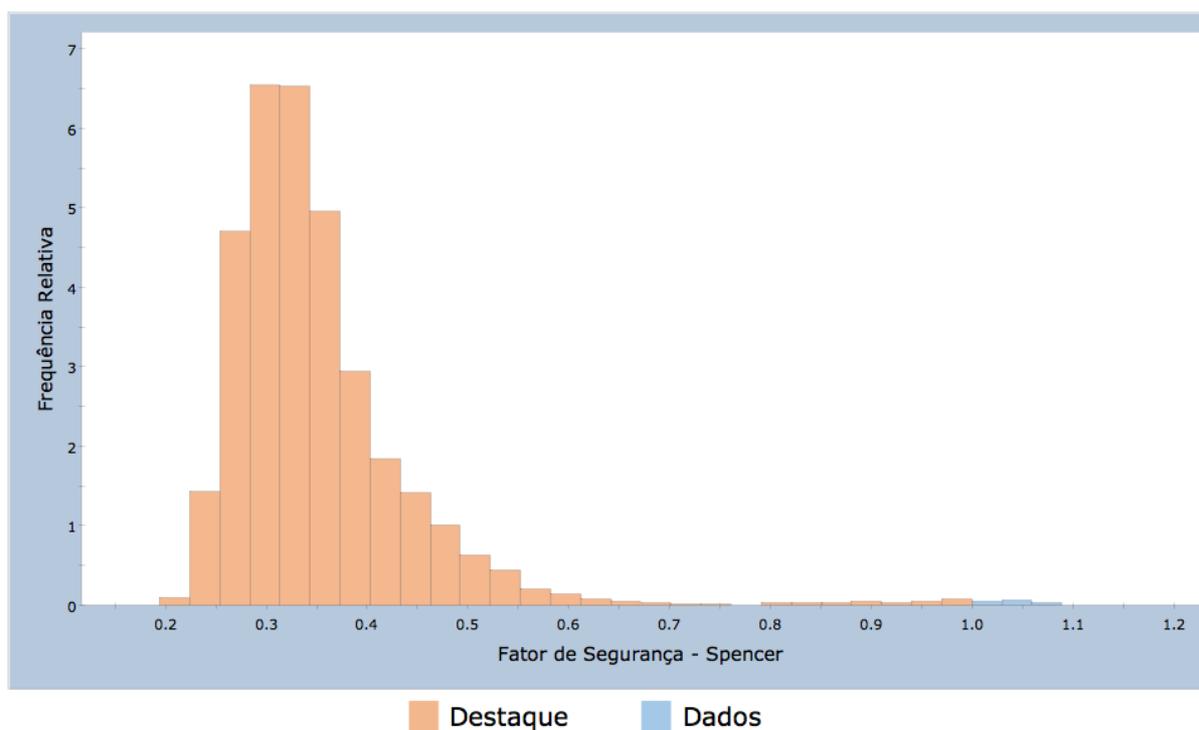
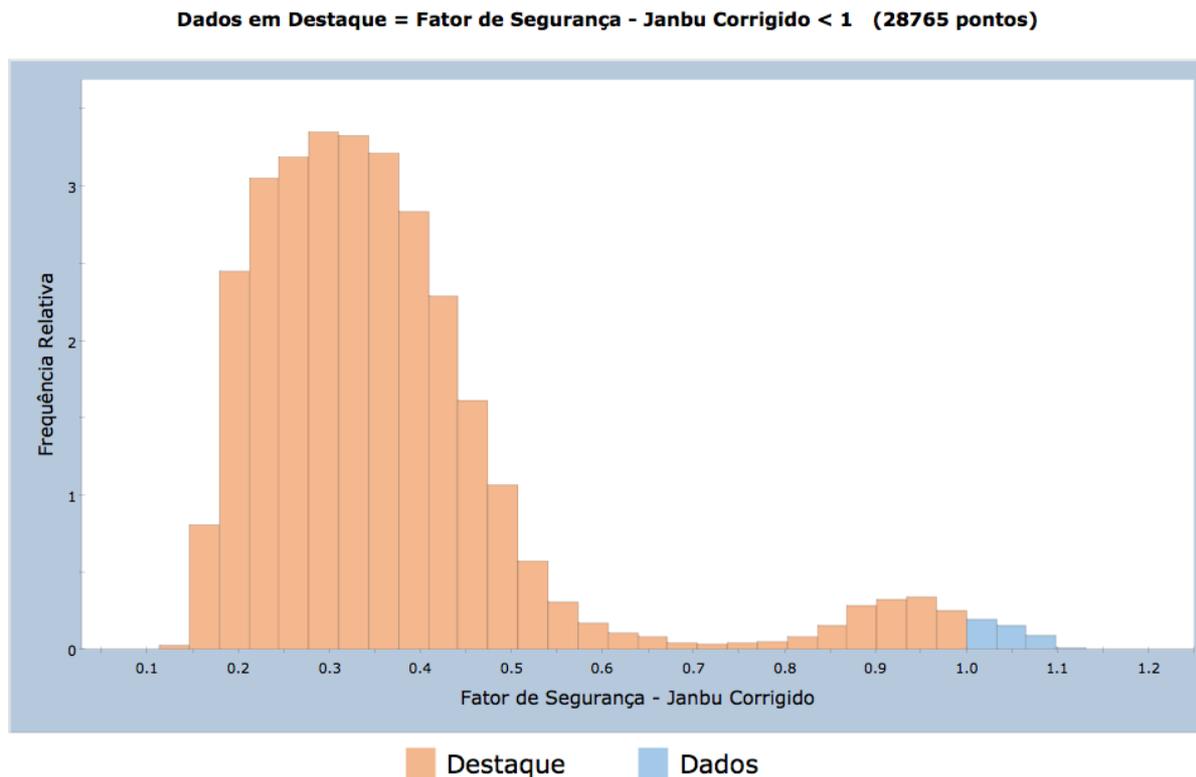


Figura 6.20 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Spencer. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição lognormal.



AMOSTRA: Média=0,3705; D.P.=0,1779; Mín=0,1333; Máx=1,118

PF=98,574%; Índice de Conf.=-3,538; Melhor ajuste=Distribuição Lognormal

Figura 6.21 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição lognormal

Observa-se, para os métodos de Spencer e Janbu corrigido, a ocorrência de fatores de segurança maiores do que a unidade. A Figura 6.22 apresenta o gráfico de dispersão: coesão da camada de topo vs fator de segurança. Dessa forma é possível perceber que valores de coesão acima de 23kPa resultam em fatores de segurança acima da unidade.

A Figura 6.23 mostra os resultados obtidos através do método de GLE/Morgenstern - Price, considerando uma superfície de ruptura circular. É apresentada a superfície de ruptura determinística, bem como as possíveis superfícies de ruptura, que retornam fatores de segurança próximos à unidade ($0,99 < FS < 1,0$). Os resultados do fator de segurança determinístico e médio são 0,342 e 0,304, respectivamente. De forma análoga ao que ocorreu com os resultados para a superfície não circular

A principal diferença entre as hipóteses 03 e 02 é a forma da superfície de ruptura. Percebe-se que de forma geral, as superfícies que apresentam fatores de segurança próximos da unidade estão situadas por completo na camada do topo. Os resultados do fator de segurança determinístico e médio são 0,342 e 0,304, respectivamente. Esses

valores estão próximos dos valores encontrados para a hipótese 02. Isso mostra que as condições geotécnicas simuladas na hipótese 03, também são improváveis de ocorrer na prática. Em outras palavras, supondo uma frente de saturação no topo da falésia, a ruptura ocorreria antes de atingir 15m de profundidade.

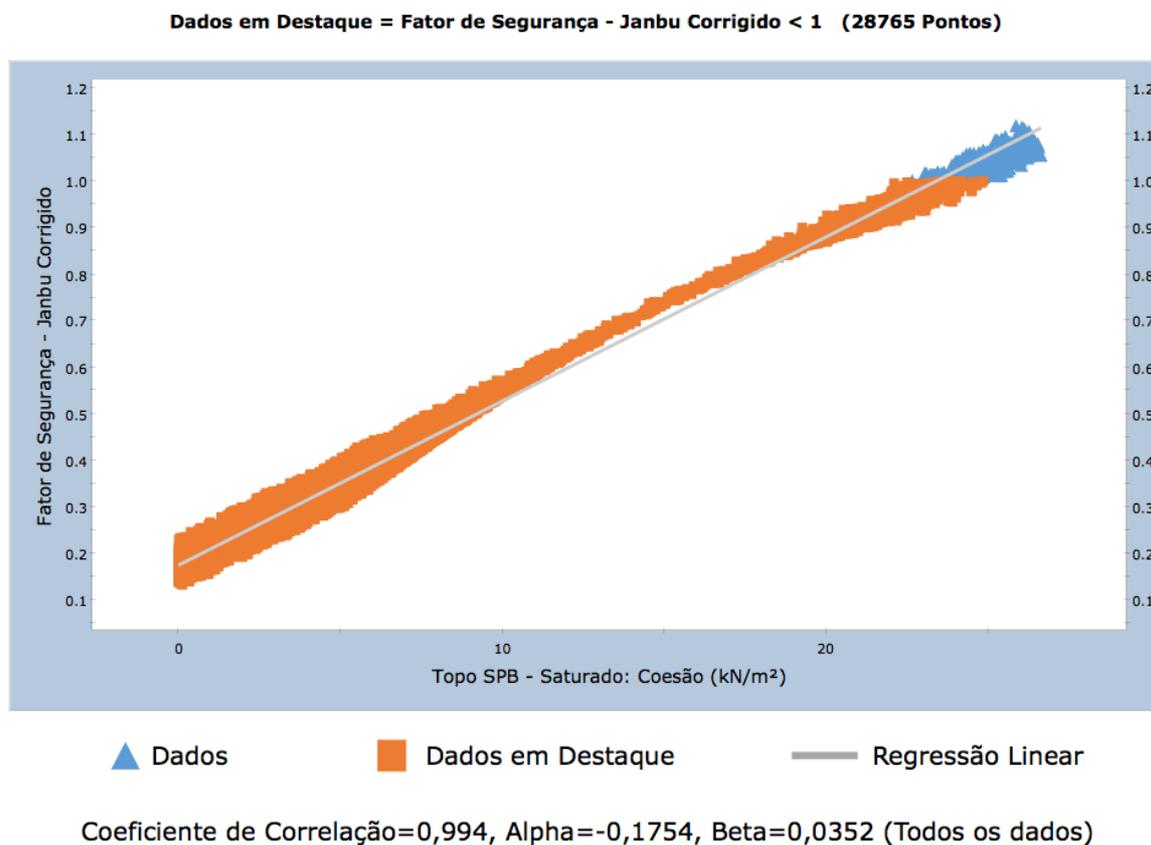


Figura 6.22 – Gráfico de dispersão: Coesão da camada de topo x Fator de segurança (Janbu corrigido). Em destaque valores de coesão que resultam FS < 1.

A localização das superfícies críticas de ruptura, ou seja, na iminência do movimento de massa são bem parecidas para os dois tipos de superfícies de ruptura. Para as duas formas possíveis de avaliação, as superfícies se concentraram no topo da falésia. Os valores são muito semelhantes, inclusive quando comparados com a hipótese 02. Esse fato reforça a idéia de que o parâmetro que mais influencia, nesse caso em específico, é a coesão do topo da falésia. Outra circunstância que corrobora para essa afirmação é o posicionamento das superfícies de ruptura encontradas.

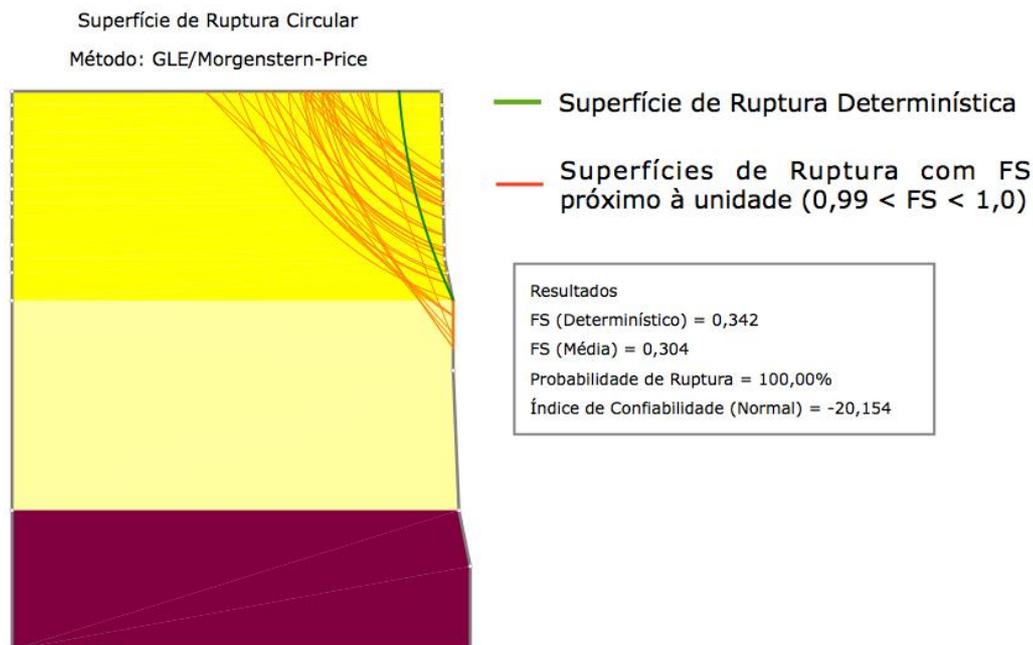


Figura 6.23 – Superfície de ruptura circular obtida pelo método de GLE/Morgenstern - Price. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 03.

Os resultados resumidos, de todas as análises probabilísticas realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 03, estão demonstrados nas Tabelas 6.8 e 6.9.

Os valores de índice de confiabilidade negativos indicam que a média do fator de segurança é menor do que a unidade. Nota-se que para a hipótese 03, os valores de probabilidade de ruptura são próximos ou iguais a 100%.

Os valores do fator de segurança determinístico, para os dois tipos de superfícies de ruptura são menores, quando comparados com o fator de segurança médio. Diante das condições geotécnicas propostas para a hipótese 03, todos os fatores de segurança, tanto determinísticos quanto probabilísticos, forneceram valores abaixo de 0,460.

Tabela 6.8 Hipótese 03: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.

Hipótese 03: Perfil com Solo do Topo Saturado - Superfície Não Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-3,538	98,574%	0,342	0,370	Janbu Corrigido
-6,486	99,606%	0,340	0,353	Spencer
-20,154	100,000%	0,342	0,304	GLE / Morgenstern - Price

Tabela 6.9 Hipótese 03: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.

Hipótese 03: Perfil com Solo do Topo Saturado - Superfície Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-3,035	97,625%	0,351	0,379	Janbu Corrigido
-5,511	100,000%	0,352	0,457	Spencer
-7,016	100,000%	0,355	0,432	GLE / Morgenstern - Price

6.1.4 Resultados - Hipótese 04 a Hipótese 07

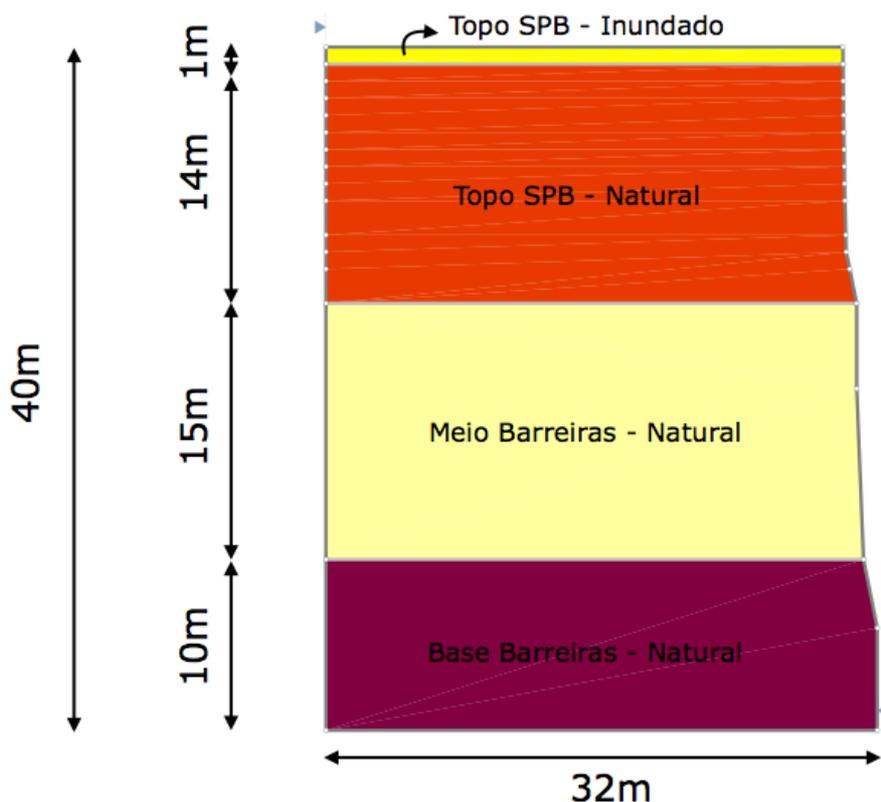
Em razão dos valores de probabilidade de ruptura próximos de 100% obtidos nas hipóteses 02 e 03, as hipóteses de 04 a 07 descrevem uma situação mais plausível. Essas hipóteses foram modeladas considerando a evolução da frente de umedecimento da camada de topo. Dessa forma, para cada hipótese a seguir (04 a 07) foi verificado a estabilidade da falésia diante de diferentes profundidades do material do topo na condição saturada.

6.1.4.1 Resultados - Hipótese 04 (1m de frente de saturação no topo)

A hipótese 04 apresenta o maciço com 1m de frente de saturação no topo da falésia. Portanto, dos 40m de altura da falésia foram consideradas quatro diferentes camadas de solos. A camada da base possui 10m de altura, em seguida a camada do meio com 15m, sucedida da camada de topo na condição natural e por último a camada de topo na condição saturada. A Figura 6.24 mostra em detalhes a seção transversal e as propriedades geotécnicas atribuídas para cada camada de solo.

Observa-se que essa seção transversal é muito semelhante da hipótese 01. A diferença se encontra na espessura da camada de topo natural e a presença da camada de topo na condição inundada, de 1m.

A Figura 6.25 mostra os resultados obtidos através do método de Janbu corrigido, considerando uma superfície de ruptura não circular. O fator de segurança determinístico obtido é igual a 1,631 e o médio 1,641.



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)		4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Sedimentos Pós-Barreiras - Natural (Topo)		94,1	80,0	334,1	0,0	33,8	7,7	56,9	10,7	18,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)		199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00

Figura 6.24 – Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 04.

Os resultados para a análise de sensibilidade para a hipótese 04 é mostrada na Figura 6.26. Verifica-se no gráfico, a curva referente à coesão de topo na condição inundada, é aproximadamente sem inclinação.

Comparando-se a influência no parâmetro coesão de topo nas condições natural e inundada, para esse caso, o material natural é mais crítico no que diz respeito à estabilidade do maciço. Esse comportamento pode ser explicado por dois motivos: a forma da superfície de ruptura profunda e a espessura da camada de topo inundada (Figura 6.26).

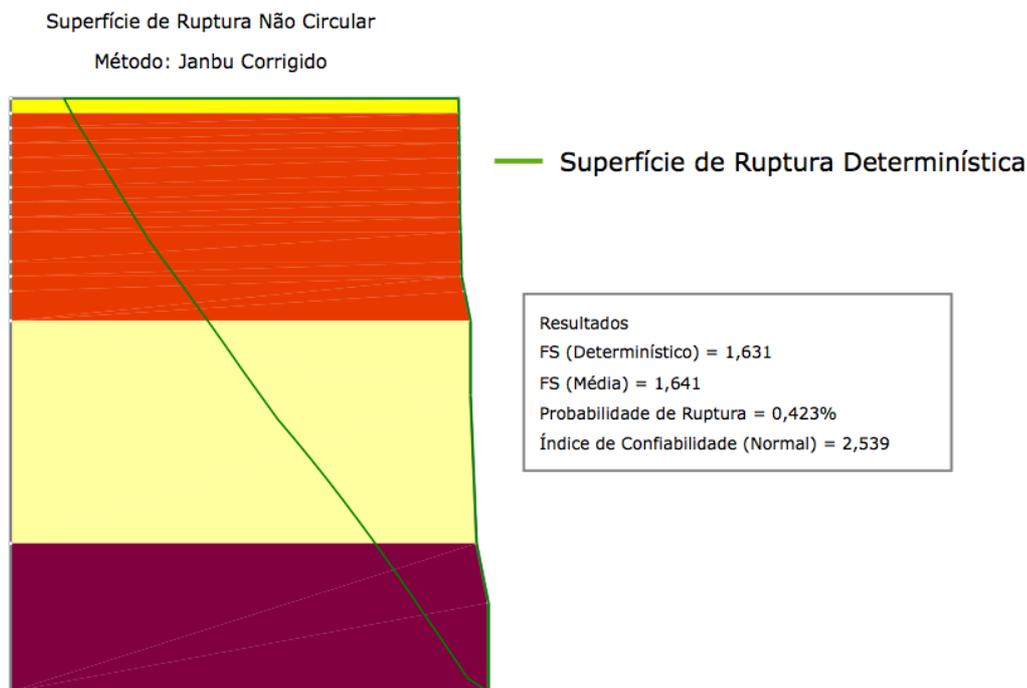


Figura 6.25 – Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 04.

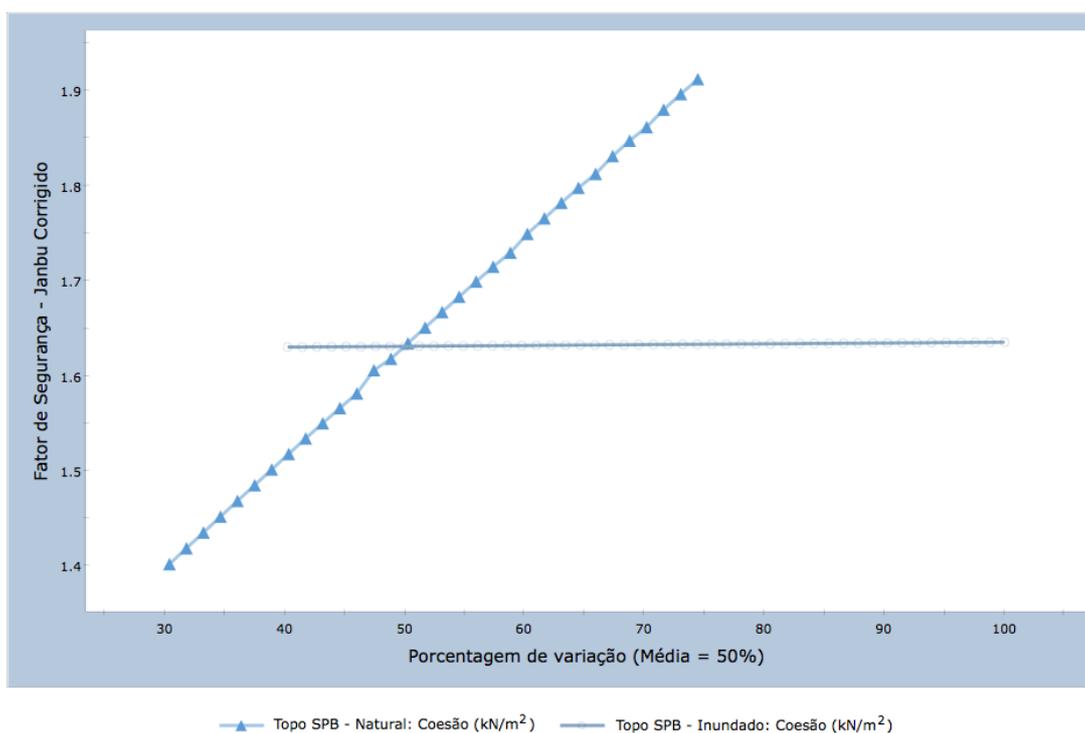
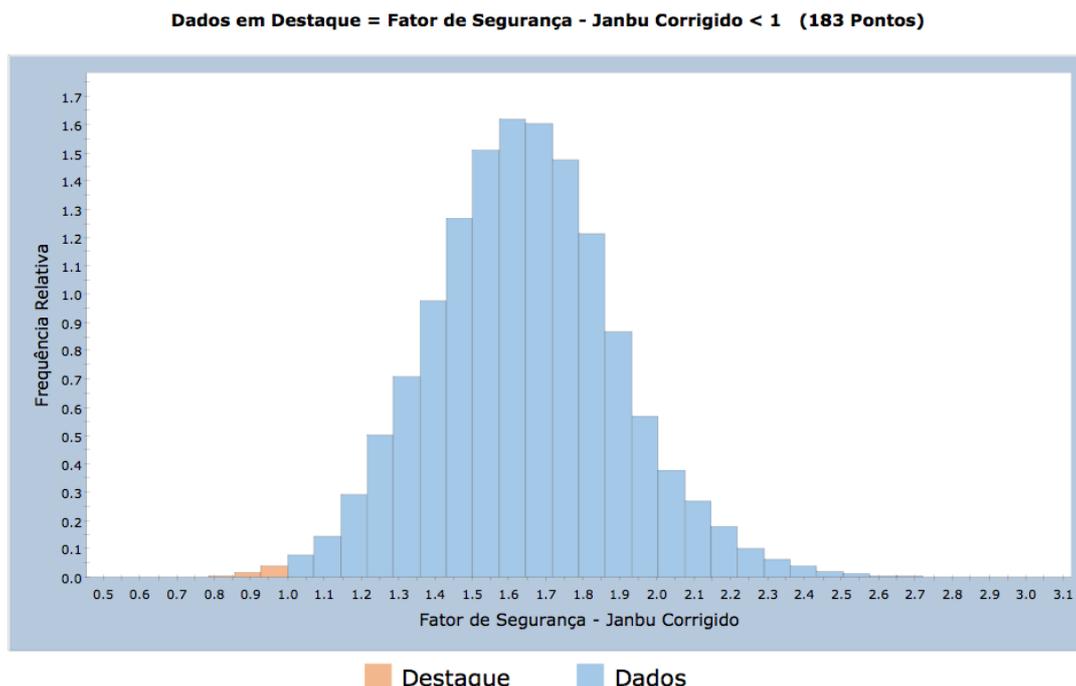


Figura 6.26 – Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 04).

A Figura 6.27 mostra o histograma do fator de segurança obtido pelo método de Janbu corrigido. Os valores mínimo e máximo obtidos para o fator de segurança são 0,668 e 2,819, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição normal.



AMOSTRA: Média=1,641; D.P.=0,2526; Mín=0,6684; Máx=2,819

PF=0,423%; Índice de Conf.=2,5387; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.27 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal.

Os resultados de todas as análises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 04, estão resumidos nas Tabelas 6.10 e 6.11. No geral, comparando-se com a hipótese 01, os resultados são similares em todos os aspectos, inclusive a forma da superfície de ruptura (Figura 6.25). Para essa hipótese todos os valores de probabilidade de ruptura estão abaixo de 0,430%. Dessa forma, segundo o *Corps of Engineers* (1997), o maciço possui nível de pobre a abaixo da média (β entre 3,0 e 2,5 e PR maiores do que $1,3 \times 10^{-3}$). De acordo com El-Ramly (2001), o talude possui desempenho aceitável, pois possui índice de confiabilidade maior do que 2,0 e a probabilidade de ruptura menor do que 2,0%.

Tabela 6.10 Hipótese 04: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.

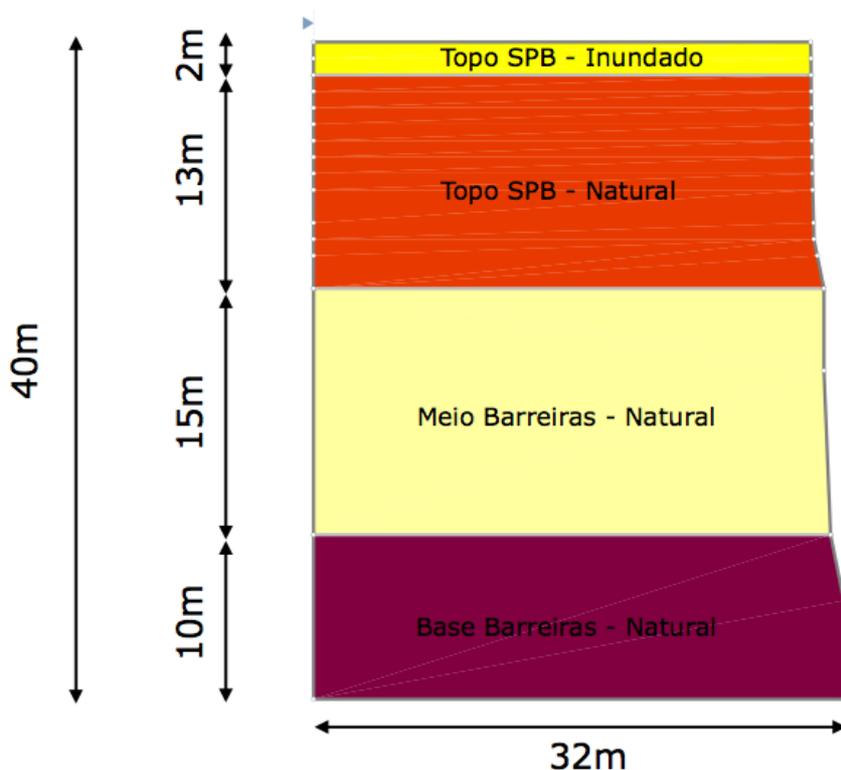
Hipótese 04: Perfil com frente de saturação (1m) - Superfície Não Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
2,539	0,423%	1,631	1,641	Janbu Corrigido
2,500	0,280%	1,634	1,647	Spencer
2,493	0,174%	1,635	1,671	GLE / Morgenstern - Price

Tabela 6.11 Hipótese 04: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.

Hipótese 04: Perfil com frente de saturação (1m) - Superfície Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
2,622	0,281%	1,656	1,692	Janbu Corrigido
2,459	0,413%	1,643	1,608	Spencer
2,511	0,289%	1,643	1,680	GLE / Morgenstern - Price

6.1.4.2 Resultados - Hipótese 05 (2m de frente de saturação no topo)

A hipótese 05 apresenta o maciço com 2m de frente de saturação no topo da falésia (Figura 6.28).



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)		4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Sedimentos Pós-Barreiras - Natural (Topo)		94,1	80,0	334,1	0,0	33,8	7,7	56,9	10,7	18,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)		199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00

Figura 6.28 – Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 05.

A Figura 6.29 mostra os resultados obtidos através do método de Janbu corrigido, considerando uma superfície de ruptura não circular. O fator de segurança determinístico obtido é igual a 0,963 e o médio 0,918. Os dois valores encontram-se abaixo do valor aceitável para o fator de segurança. Observa-se que houve uma diminuição de aproximadamente 59% no fator de segurança determinístico, comparando-se as hipóteses 04 e 05. Além disso, nota-se a mudança na superfície de ruptura crítica, tornando-se uma superfície menos profunda e mais próxima da realidade das falésias da Formação Barreiras.

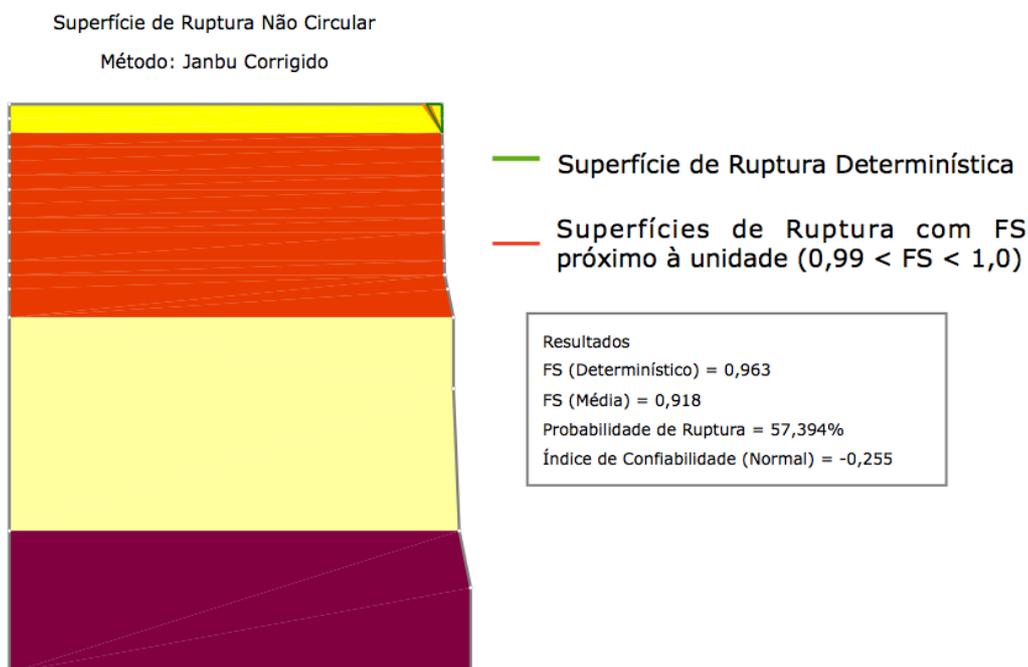


Figura 6.29 – Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 05.

A Figura 6.30 mostra a análise de sensibilidade para a hipótese 5. Percebe-se que, para esse caso, a curva que representa o parâmetro coesão de topo na condição inundada é mais inclinada, e, portanto exerce maior influência na variação do fator de segurança. O material na condição natural apresenta uma curva quase paralela ao eixo x. Essa mudança no comportamento dos resultados da análise de sensibilidade corrobora com a afirmação efetuada na hipótese 04. Dessa forma, o aumento na espessura da camada de topo inundada, pode potencializar a ocorrência de movimentos de massa.

A Figura 6.31 mostra o histograma do fator de segurança obtido pelo método de Janbu corrigido. Os valores mínimo e máximo obtidos para o fator de segurança são 0,2726 e 1,631, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição beta.

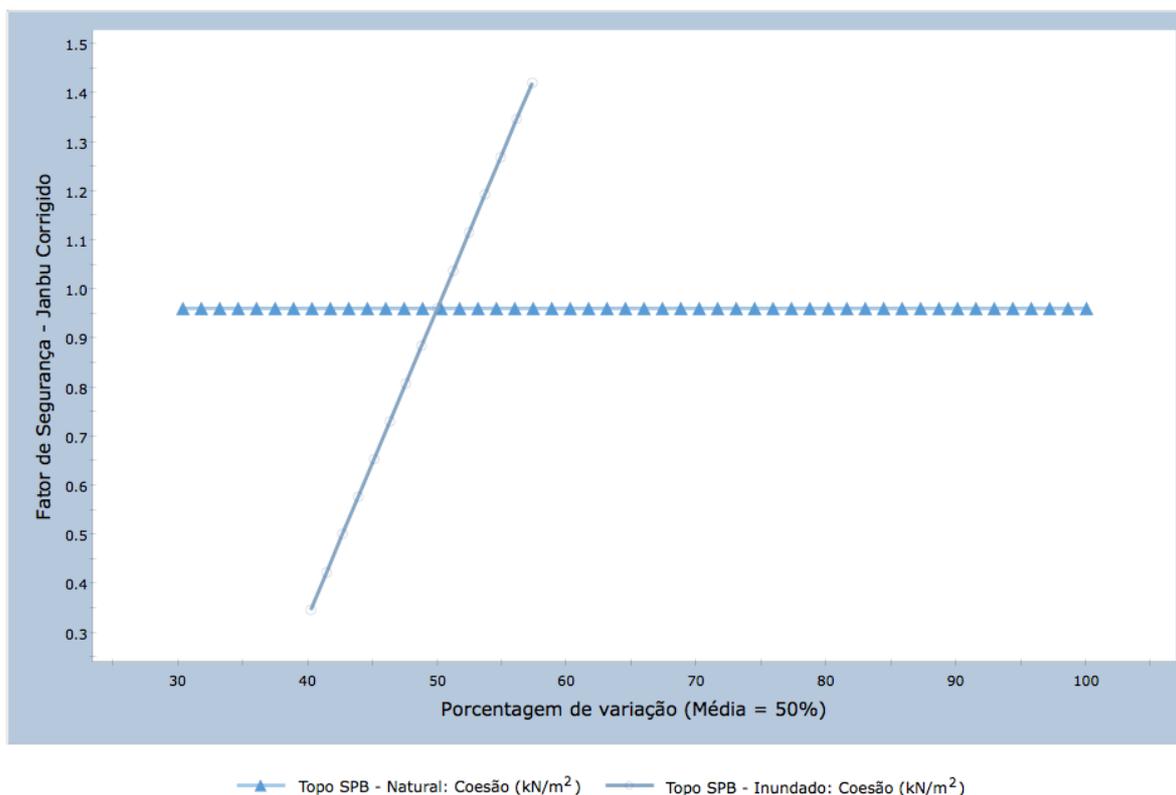
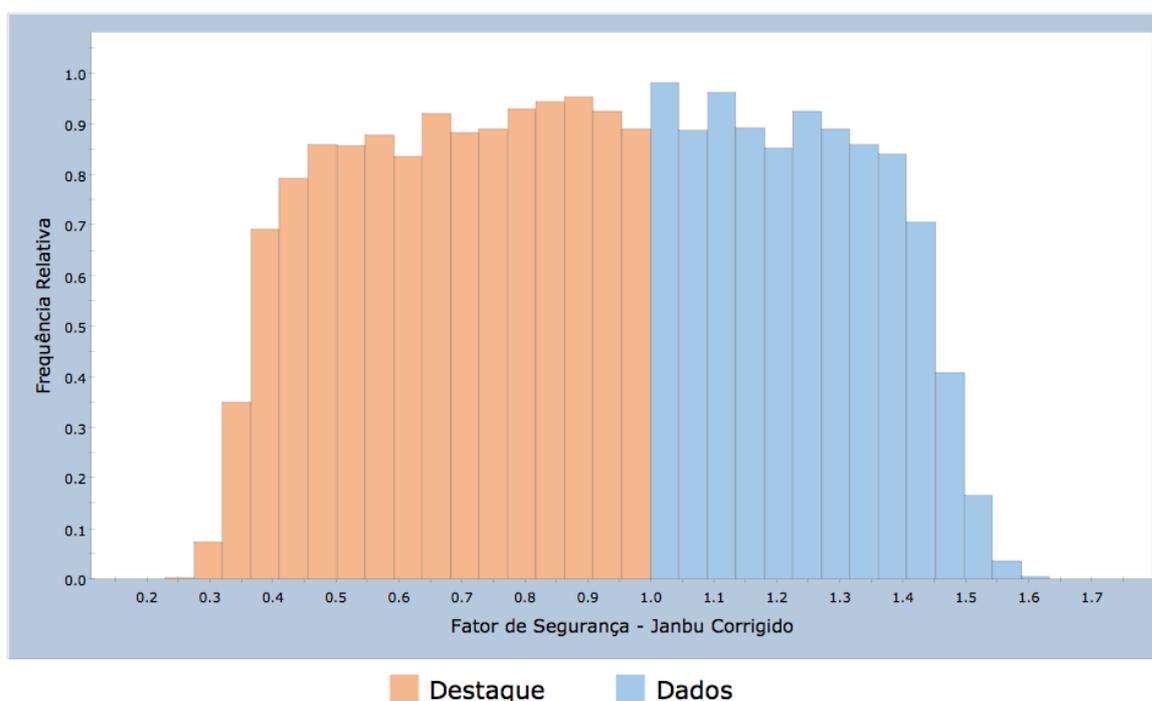


Figura 6.30 – Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 05).

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Janbu Corrigido < 1 (16300 Pontos)



AMOSTRA: Média=0,9179; D.P.=0,3221; Mín=0,2726; Máx=1,631

PF=57,394%; Índice de Conf.=-0,2548; Melhor ajuste=Distribuição Beta

Figura 6.31 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.

Nota-se o aumento no desvio padrão e a mudança na distribuição de ajuste. (A Figura 6.31). Adicionalmente, comparando-se com a hipótese 04, é notável o aumento expressivo da probabilidade de ruptura, bem como a diminuição no índice de confiabilidade (Tabelas 6.12 e 6.13). Outro ponto para se destacar é a diferença obtida nos resultados de probabilidade de ruptura entre o método de Janbu Simplificado e os outros dois. Enquanto que no método de Janbu Simplificado a probabilidade de ruptura se manteve em torno de 57% para as superfícies não circular e circular, GLE/Morgenstern e Spencer varia de cerca de 80% para 95% aproximadamente.

Tabela 6.12 Hipótese 05: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.

Hipótese 05: Perfil com frente de saturação (2m) - Superfície Não Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,255	57,394%	0,963	0,918	Janbu Corrigido
-0,799	79,732%	0,961	0,771	Spencer
-0,718	79,041%	0,959	0,800	GLE / Morgenstern - Price

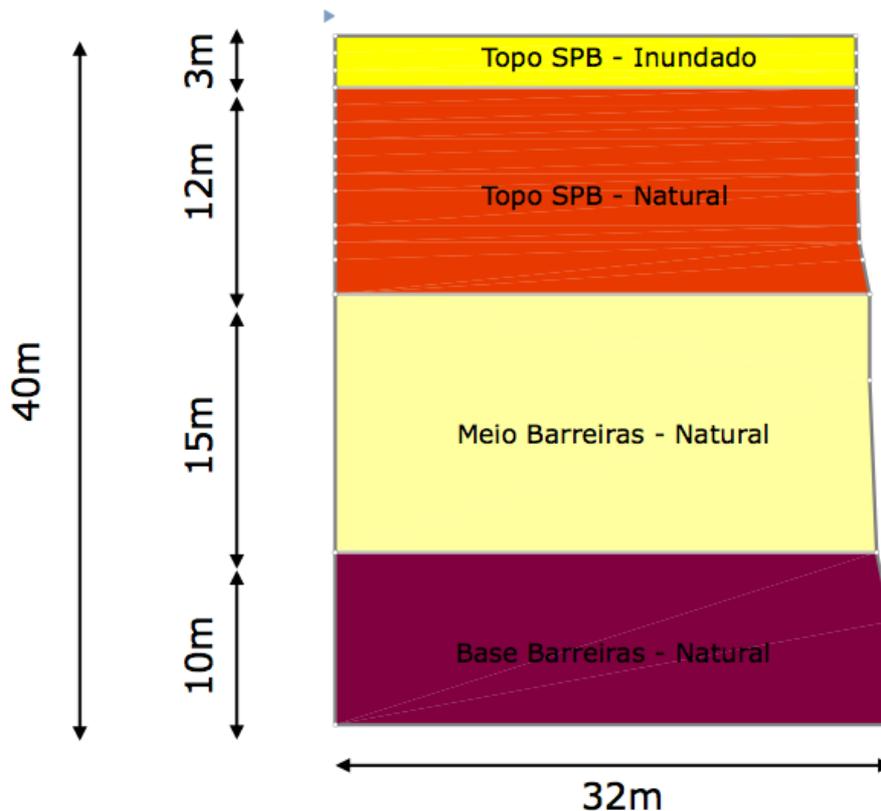
Tabela 6.13 Hipótese 05: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.

Hipótese 05: Perfil com frente de saturação (2m) - Superfície Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,266	57,933%	0,974	0,915	Janbu Corrigido
-1,498	94,263%	0,948	0,696	Spencer
-1,632	95,512%	0,950	0,679	GLE / Morgenstern - Price

O avanço da frente de umedecimento de 1m para 2m de profundidade no topo da falésia ocasiona aumento expressivo na probabilidade de ruptura e consequentemente diminuição no fator de segurança e índice de confiabilidade. Salienta-se que essa diminuição está diretamente relacionada com a mudança também na forma da superfície de ruptura crítica.

6.1.4.3 Resultados - Hipótese 06 (3m de frente de saturação no topo)

A Figura 6.32 apresenta a hipótese 06, a qual considera o maciço com 3m de frente de saturação no topo da falésia



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)		4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Sedimentos Pós-Barreiras - Natural (Topo)		94,1	80,0	334,1	0,0	33,8	7,7	56,9	10,7	18,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)		199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00

Figura 6.32 – Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 06.

A Figura 6.33 mostra os resultados obtidos através do método de Janbu corrigido, considerando uma superfície de ruptura não circular. O fator de segurança determinístico obtido é igual a 0,749 e o médio 0,805. Os dois valores encontram-se abaixo do valor aceitável para o fator de segurança. Conforme a Figura 6.33, nota-se uma concentração maior de superfícies de ruptura com fator de segurança entre 0,99 e 1,0. A superfície de ruptura é semelhante ao encontrado para a hipótese 05.

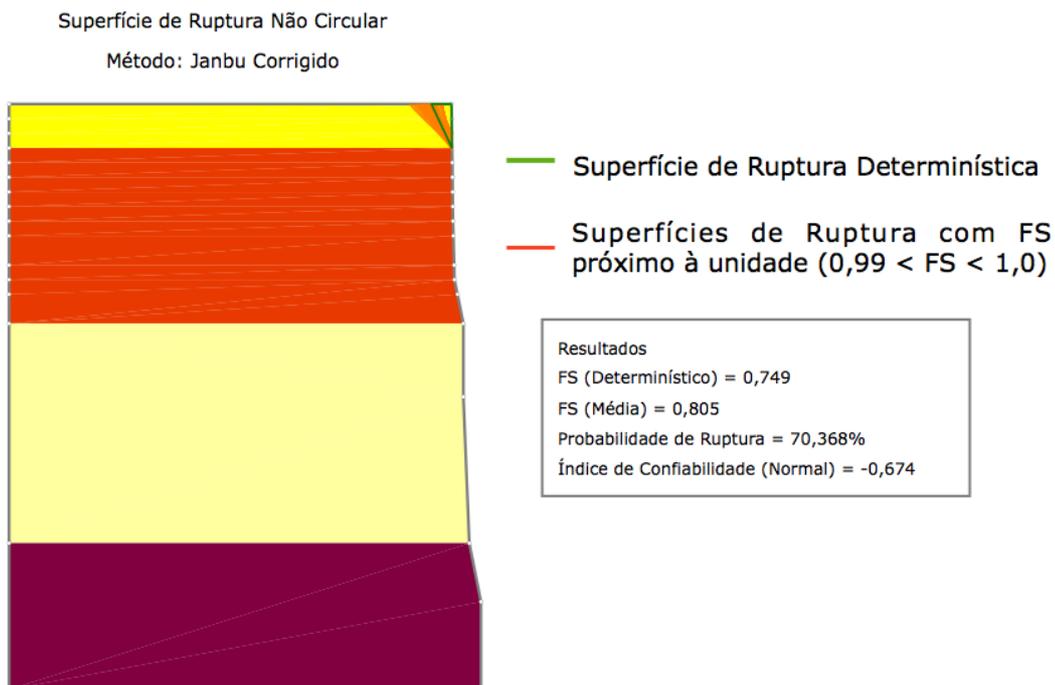


Figura 6.33 – Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 06.

A Figura 6.34 mostra a análise de sensibilidade para a hipótese 06. Os resultados seguem de forma análoga aos obtidos para a hipótese 05.

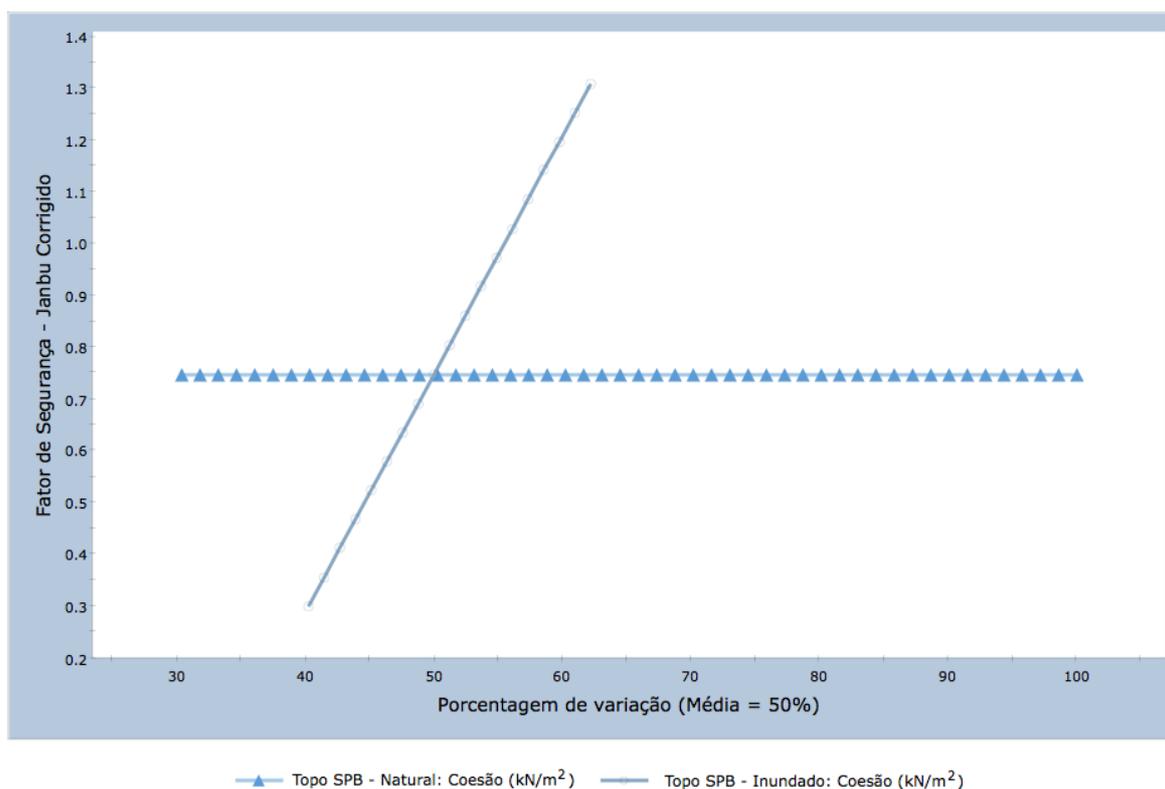


Figura 6.34 – Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 06).

A Figura 6.35 mostra o histograma do fator de segurança obtido pelo método de Janbu corrigido. Os valores mínimo e máximo para o fator de segurança sofreram diminuição quando comparados à hipótese 05 (0,2327 e 1,442). O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição beta.

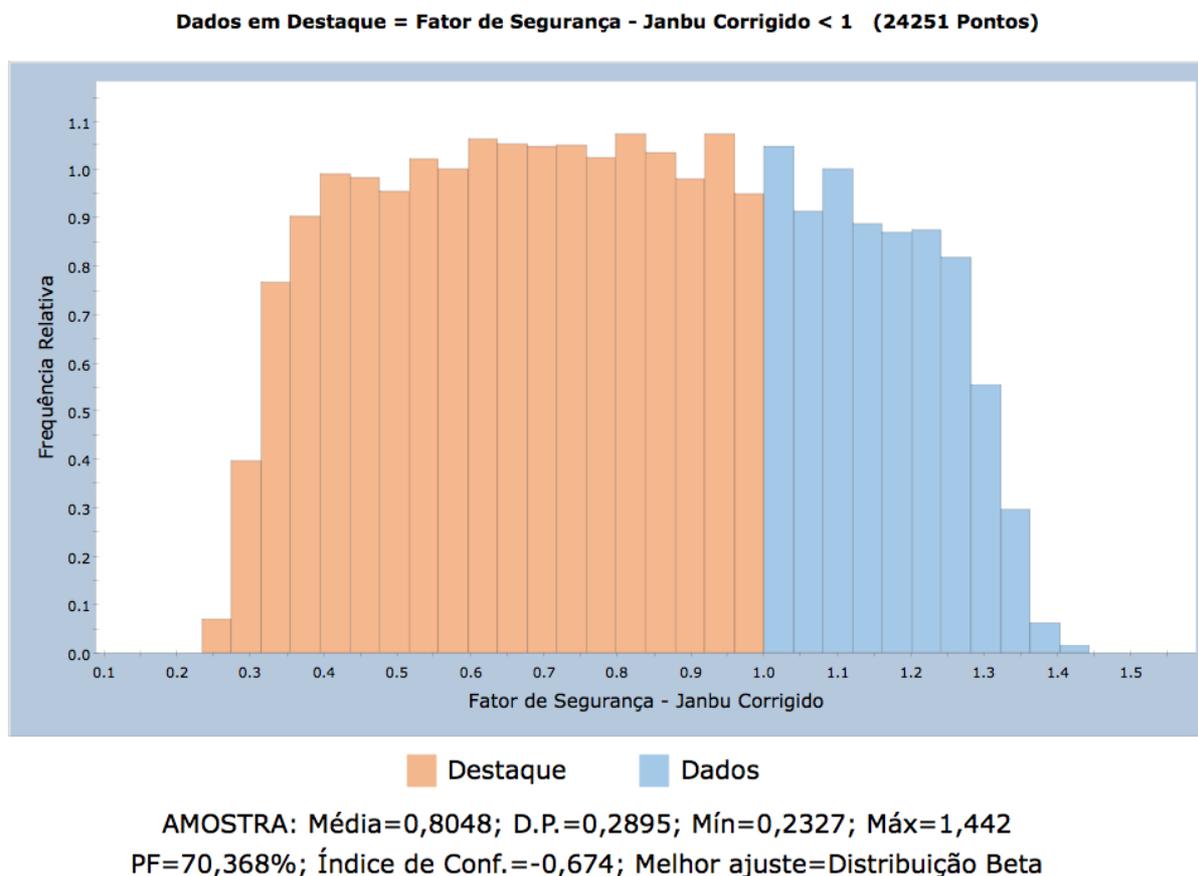


Figura 6.35 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.

Os resultados de todas as análises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 06, estão resumidos nas Tabelas 6.14 e 6.15. A probabilidade de ruptura aumentou para todas as situações analisadas, ao passo que o índice de confiabilidade e os fatores de segurança determinístico e médio diminuíram. A diferença notada para a hipótese 05 volta a se repetir para a hipótese 06. O método de Janbu corrigido continua retornando valores mais baixos de probabilidade de ruptura. Para esse caso, a diferença apresentada nas probabilidades de ruptura, entre os métodos para uma superfície de ruptura não circular é em torno de 24% e de 30% para superfície circular.

Tabela 6.14 Hipótese 06: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.

Hipótese 06: Perfil com frente de saturação (3m) - Superfície Não Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,674	70,368%	0,749	0,805	Janbu Corrigido
-1,619	94,755%	0,745	0,649	Spencer
-2,049	96,702%	0,746	0,622	GLE / Morgenstern - Price

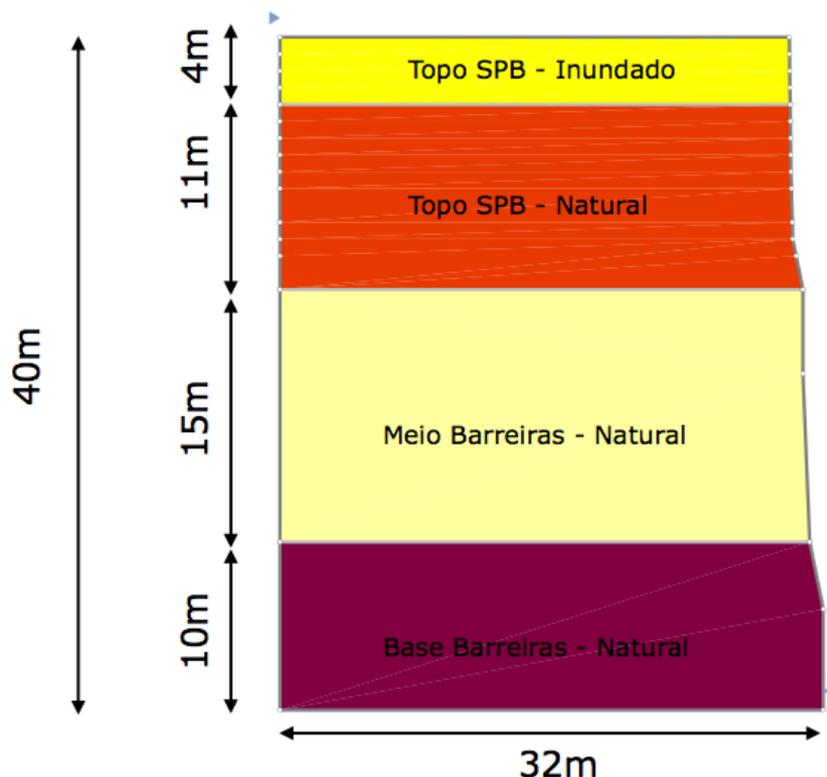
Tabela 6.15 Hipótese 06: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.

Hipótese 06: Perfil com frente de saturação (3m) - Superfície Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,647	69,413%	0,797	0,812	Janbu Corrigido
-2,933	99,965%	0,783	0,580	Spencer
-2,790	99,829%	0,781	0,582	GLE / Morgenstern - Price

Inicialmente (hipótese 04) o talude apresentava um desempenho aceitável segundo El-Ramly (2001) e um nível entre pobre e baixo da média de acordo com o *Corps of Engineers* (1997). Conforme ocorre o avanço da frente de umedecimento de 1m para 3m de profundidade no topo da falésia, ocorre uma mudança significativa nas condições de estabilidade do maciço. Verifica-se uma situação de instabilização eminente, pois além dos fatores de segurança retornar valores abaixo da unidade para todos os métodos, Spencer e GLE/Morgenstern - Price indicam probabilidades de ruptura estão acima de 94%.

6.1.4.4 Resultados - Hipótese 07 (4m de frente de saturação no topo)

A hipótese 07 é apresentada na Figura 6.36. Para esse modelo, a frente de saturação atinge 4m de profundidade partindo do topo da falésia em direção à base.



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Sedimentos Pós-Barreiras - Inundado (Topo)		4,8	8,2	29,4	0,0	32,6	2,7	40,7	24,5	19,00
Sedimentos Pós-Barreiras - Natural (Topo)		94,1	80,0	334,1	0,0	33,8	7,7	56,9	10,7	18,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)		199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	118,9	601,7	0,0	40,7	11,2	74,3	7,1	19,00

Figura 6.36 – Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a Hipótese 07.

Os fatores de segurança determinístico e médio, obtidos através do método de Janbu corrigido, considerando uma superfície de ruptura não circular, são 0,632 e 0,751 (Figura 6.37). Os dois valores encontram-se abaixo do valor aceitável para o fator de segurança. Analogamente ao que ocorre na hipótese 06, observa-se uma concentração maior de superfícies de ruptura com fator de segurança entre 0,99 e 1,0. As superfícies de ruptura que retornam fatores de segurança próximos à unidade encontram-se localizadas no topo da falésia. Essas superfícies representam rupturas rasas, as quais são identificadas em campo de forma semelhante. Na prática, as rupturas mais profundas constatadas na praia de Tabatinga/RN, não se assemelham com os resultados apresentados nas hipóteses 01 e 04.

A Figura 6.38 mostra a análise de sensibilidade para a hipótese 07. Nota-se que da hipótese 05 em diante, todas as análises de sensibilidade são semelhantes.

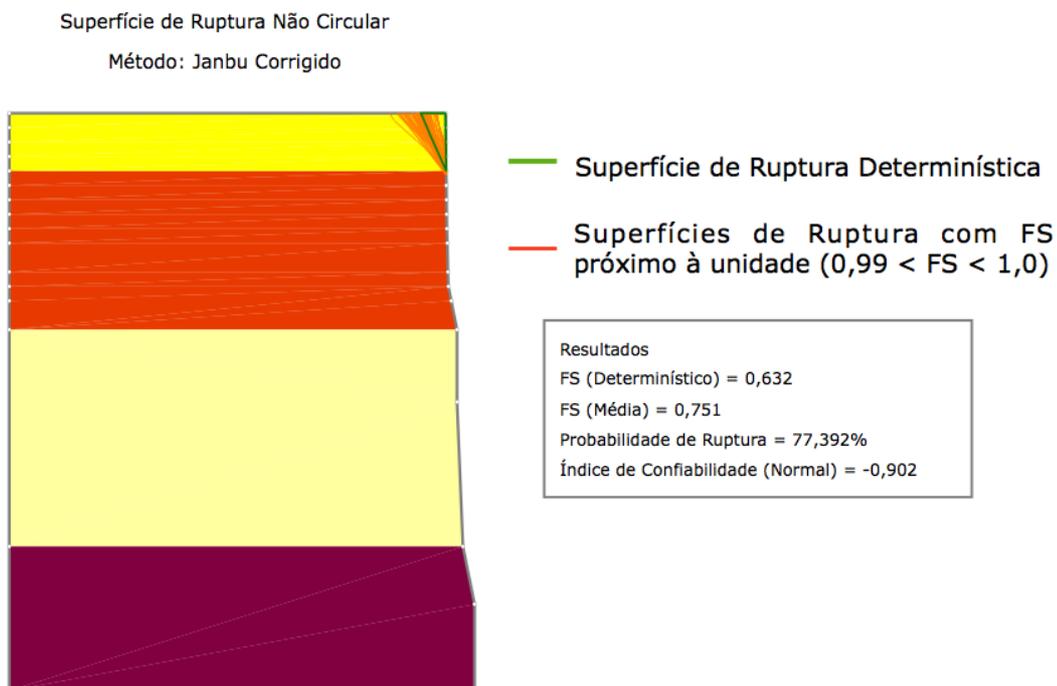


Figura 6.37 – Superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Valores de fator de segurança determinístico, médio, probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade para a hipótese 07.

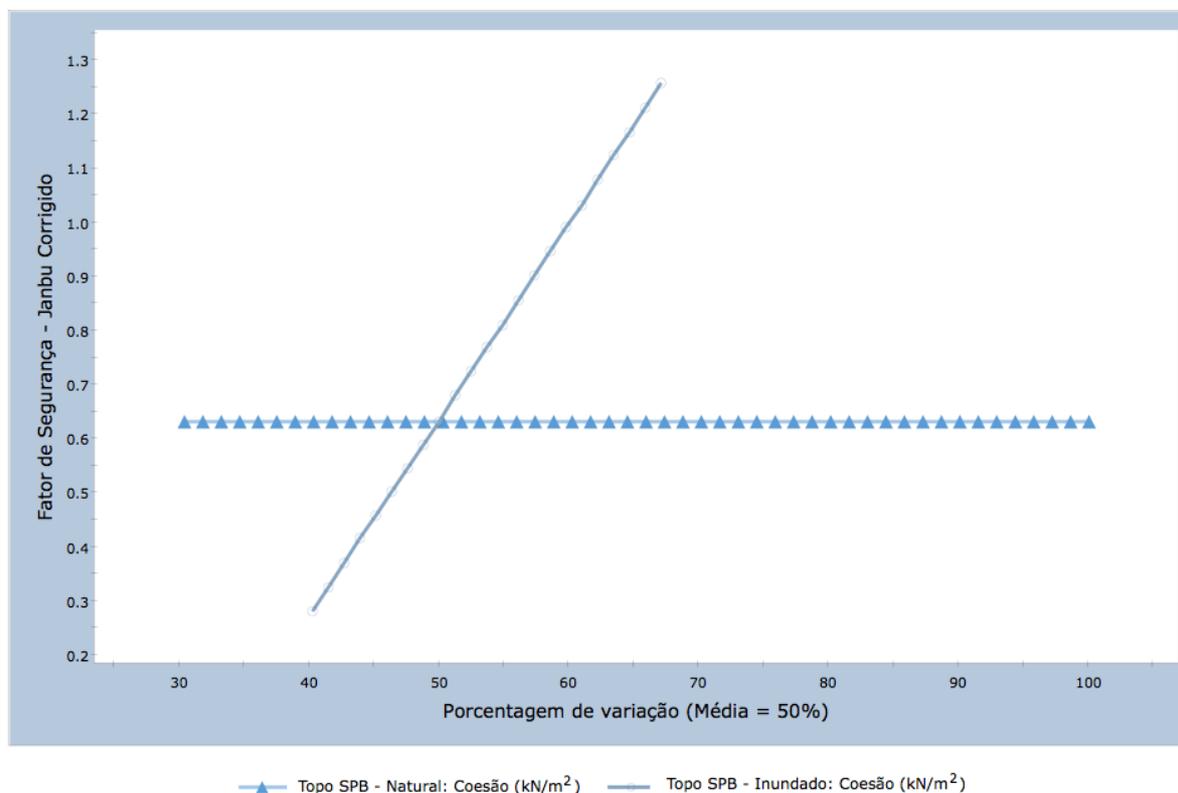
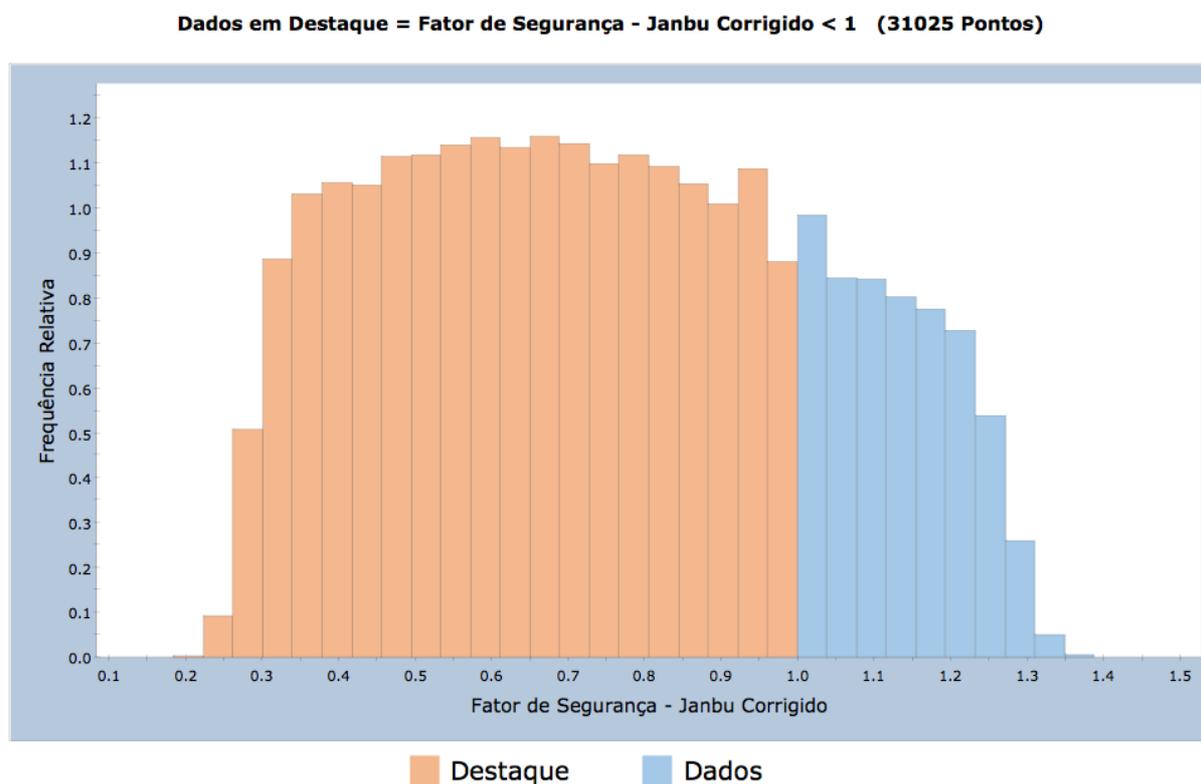


Figura 6.38 – Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão de topo, nas condições natural e inundada (hipótese 07).

A Figura 6.39 mostra o histograma do fator de segurança obtido pelo método de Janbu corrigido. De forma equivalente ao que foi observado com a análise de sensibilidade, a partir da hipótese 05, o padrão se repete com o histograma do fator de segurança. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição beta.



AMOSTRA: Média=0,7509; D.P.=0,276; Mín=0,2168; Máx=1,382
 PF=77,392%; Índice de Conf.=−0,902; Melhor ajuste=Distribuição Beta

Figura 6.39 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando a superfície de ruptura não circular obtida pelo método de Janbu corrigido. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta.

Os resultados de todas as análises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 07, estão sintetizados nas Tabelas 6.16 e 6.17. A probabilidade de ruptura se aproximou de 100% para todos os métodos determinísticos aplicados. Porém, através do método de Janbu corrigido a probabilidade de ruptura alcançou 77% para os dois tipos de superfície de ruptura considerados. Para esse caso, a diferença apresentada entre os métodos para uma superfície de ruptura não circular é em torno de 24% e de 30% para superfície circular.

Verifica-se uma situação de instabilização eminente, pois além dos fatores de segurança retornar valores abaixo da unidade para todos os métodos, Spencer e GLE/Morgenstern - Price indicam probabilidades de ruptura estão acima de 99%.

Tabela 6.16 Hipótese 07: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica não circular.

Hipótese 07: Perfil com frente de saturação (4m) - Superfície Não Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,902	77,392%	0,632	0,751	Janbu Corrigido
-2,780	100,00%	0,630	0,537	Spencer
-3,203	99,867%	0,626	0,504	GLE / Morgenstern - Price

Tabela 6.17 Hipótese 07: Resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas (Monte Carlo), considerando a superfície crítica circular.

Hipótese 07: Perfil com frente de saturação (4m) - Superfície Circular				
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - (Determinístico)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,887	77,153%	0,634	0,755	Janbu Corrigido
-3,181	99,982%	0,621	0,571	Spencer
-2,822	99,908%	0,621	0,598	GLE / Morgenstern - Price

Essa foi a profundidade máxima modelada para a verificação das condições de estabilidade, pois as probabilidades de ruptura obtidas por todos os métodos alcançaram valores iguais ou próximos de 100%.

As Figuras 6.40 e 6.41 mostram a evolução da probabilidade de ruptura conforme ocorre o avanço da frente de umedecimento no topo da falésia. Para os dois tipos de superfície de ruptura considerados, percebe-se um aumento expressivo das probabilidades de ruptura na transição de 1m para 2m do umedecimento do solo.

Outro ponto importante é a diferença identificada entre os resultados de probabilidade de ruptura obtidos através do método de Janbu corrigido e os outros dois. Nota-se que, independente do tipo de superfície de ruptura considerado, no geral os valores de probabilidade de ruptura calculadas por esse método são menores. Dessa forma, conclui-se que para os cenários apresentados o método de Janbu corrigido é não conservador e retorna valores contra a segurança (Figuras 6.40 e 6.41).

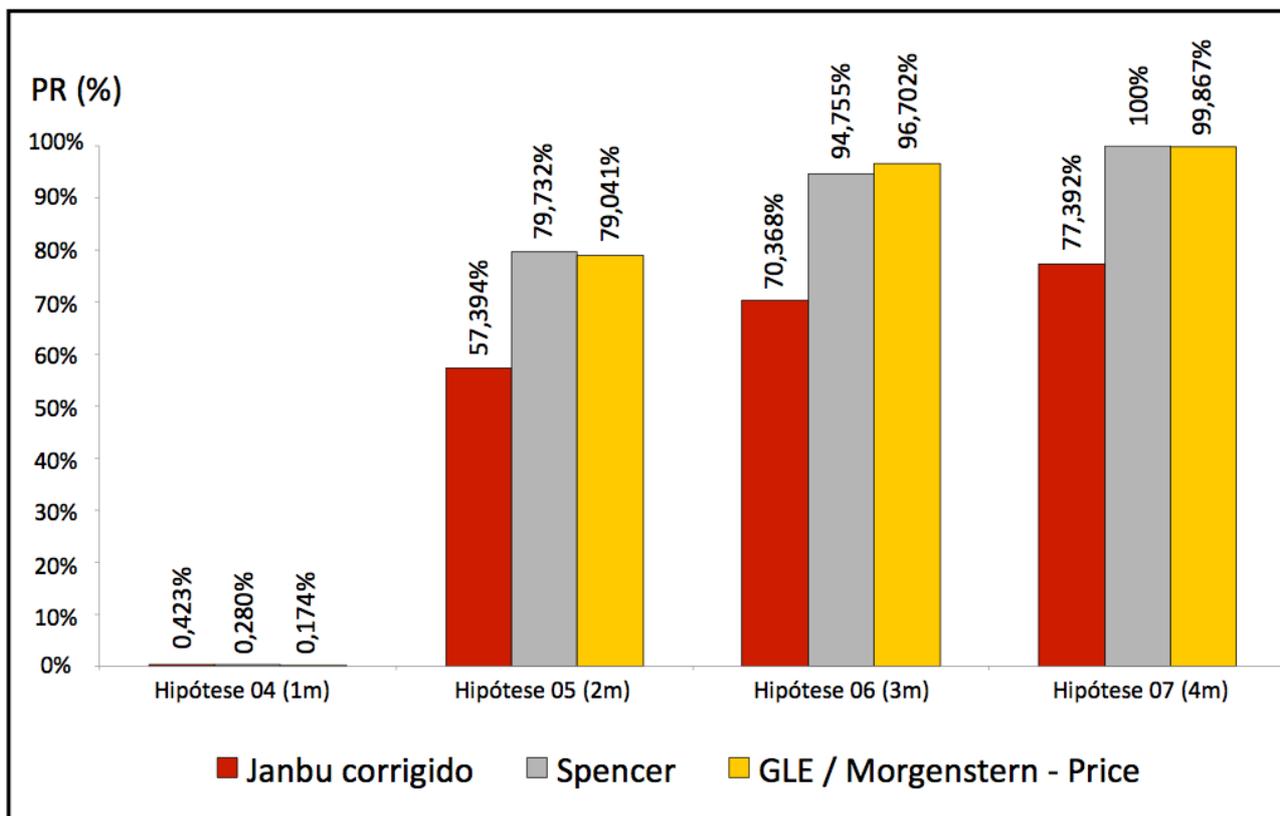


Figura 6.40 – Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as hipóteses 04 a 07, para uma superfície de ruptura não circular.

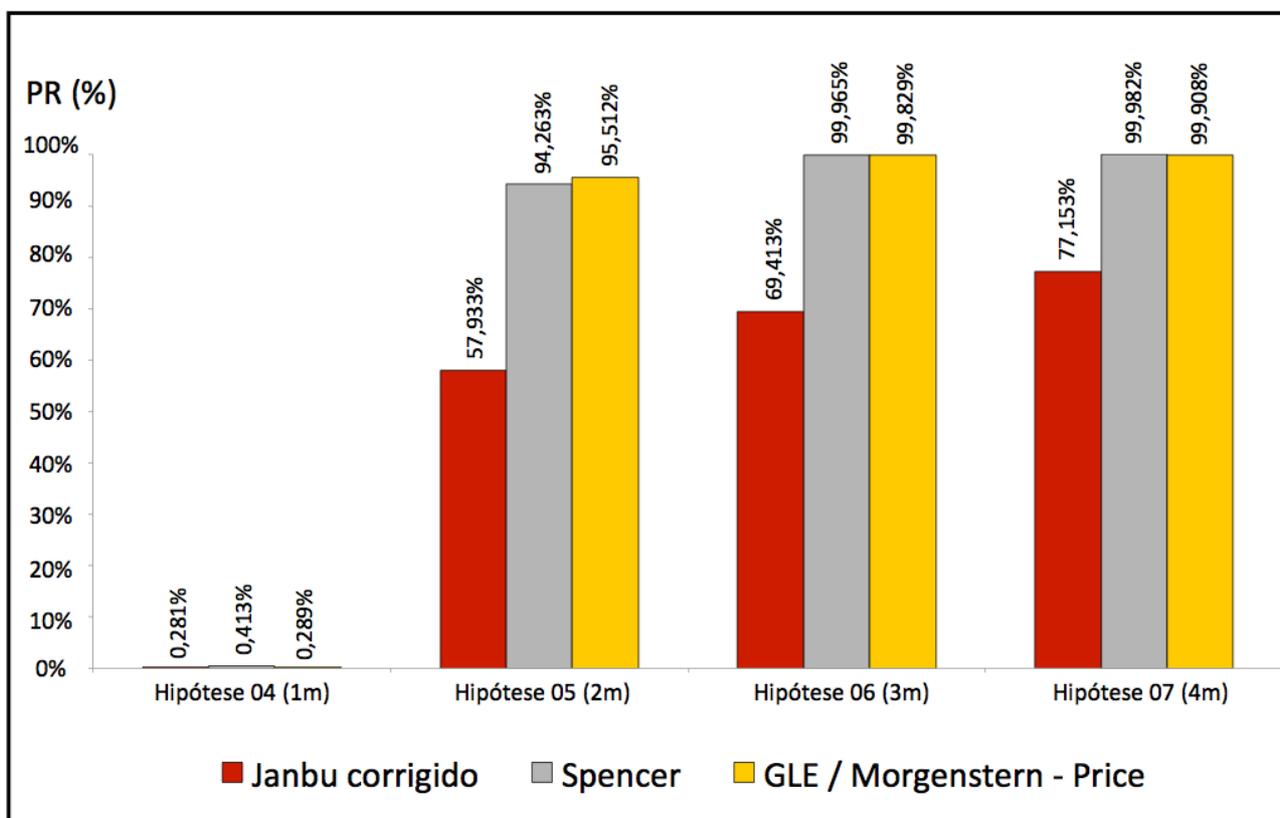


Figura 6.41 – Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as hipóteses 04 a 07, para uma superfície de ruptura circular.

Os resultados obtidos por meio dos métodos de Spencer e GLE/Morgenstern - Price são semelhantes para as duas situações de superfície de ruptura analisadas. Observa-se que o aumento da probabilidade de ruptura ocorre de forma brusca (de 1m para 2m de frente de umedecimento), sobretudo quando a superfície de ruptura é circular (Figuras 6.40 e 6.41).

6.1.5 Síntese dos Resultados nas Análises de Estabilidade

Os resultados de todas as análises de estabilidade probabilísticas executadas, considerando um perfil típico das falésias da praia de Barra de Tabatinga, no município de Nísia Floresta/RN, são apresentados nas Figuras 6.42 e 6.43.

As análises realizadas para as hipóteses 01 e 04 retornam valores de probabilidade de ruptura abaixo de 0,430%. Esses dois cenários são os únicos modelos que resultam em baixas probabilidades de ruptura. Para os dois casos, os taludes possuem níveis de pobre a abaixo da média (β entre 3,0 e 2,5 e PR maiores do que $1,3 \times 10^{-3}$), segundo o *Corps of Engineers* (1997). De acordo com El-Ramly (2001), as duas hipóteses possuem desempenho aceitável, pois possuem índices de confiabilidade maiores do que 2,0 e probabilidade de ruptura menores do que 2,0%. Ressalta-se que apesar das duas hipóteses retornarem valores de fator de segurança médio e determinístico superiores a 1,6, existe uma probabilidade de ruptura associada a esses cenários.

As análises realizadas com os parâmetros de resistência na condição inundada, em todo o talude (hipótese 02) e somente na camada de topo (hipótese 03), retornaram as maiores probabilidades de ruptura. Apesar das diferenças notadas na forma da superfície de ruptura para as duas hipóteses, os resultados de probabilidade de ruptura são semelhantes (próximas de 100%). As condições geotécnicas atribuídas para essas duas hipóteses são improváveis de se encontrar em campo. Provavelmente a ruptura desses taludes ocorreriam antes de alcançar esse estado de inundação dos materiais.

Dentro desse contexto as hipóteses 04 a 07 foram modeladas com o objetivo de alcançar condições mais próximas da realidade. Com esses resultados fica evidente o aumento da probabilidade de ruptura com o progresso da frente de umedecimento do material. Na transição de 1m para 2m de frente de umedecimento há um aumento significativo das probabilidades de ruptura, para os dois tipos de superfície de ruptura. Para os métodos de Spencer e GLE/Morgenstern - Price, a alteração é maior quando a superfície é circular.

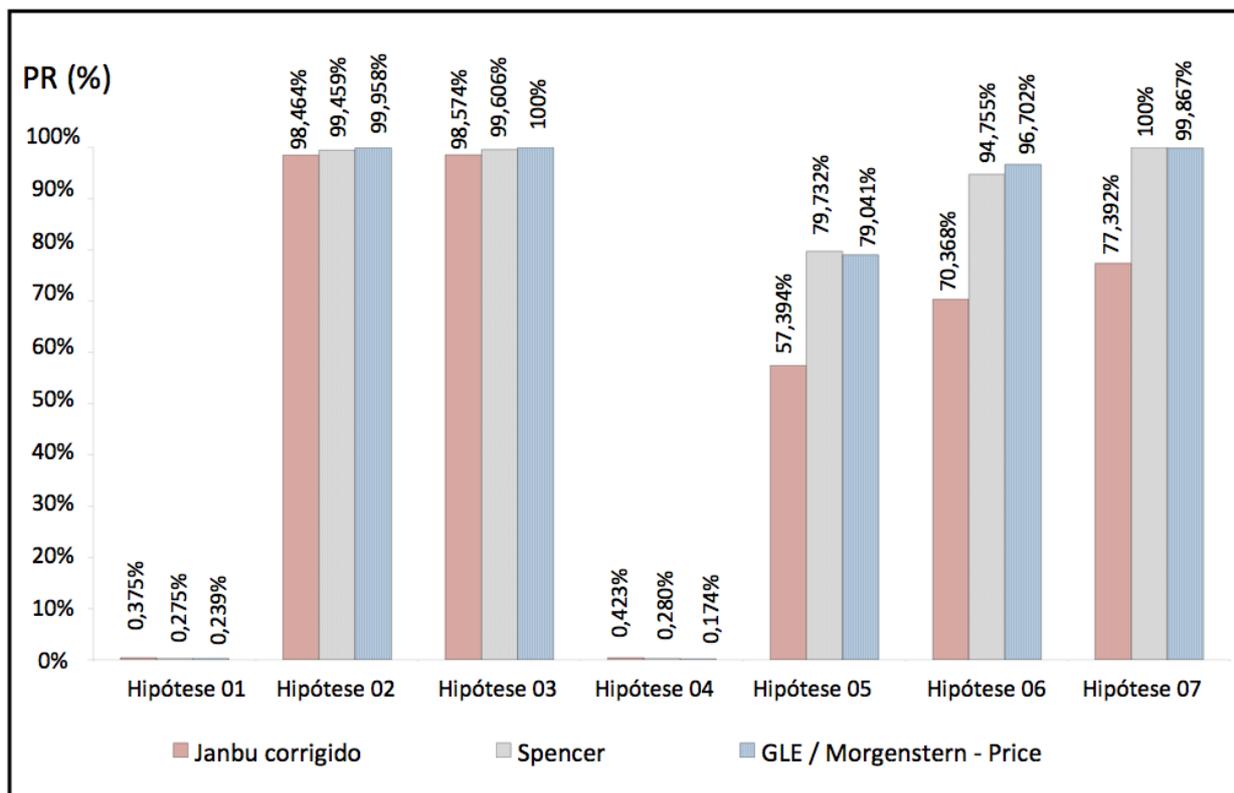


Figura 6.42 – Resumo das probabilidades de ruptura obtidas nas hipóteses de 01 a 07 para uma superfície de ruptura não circular.

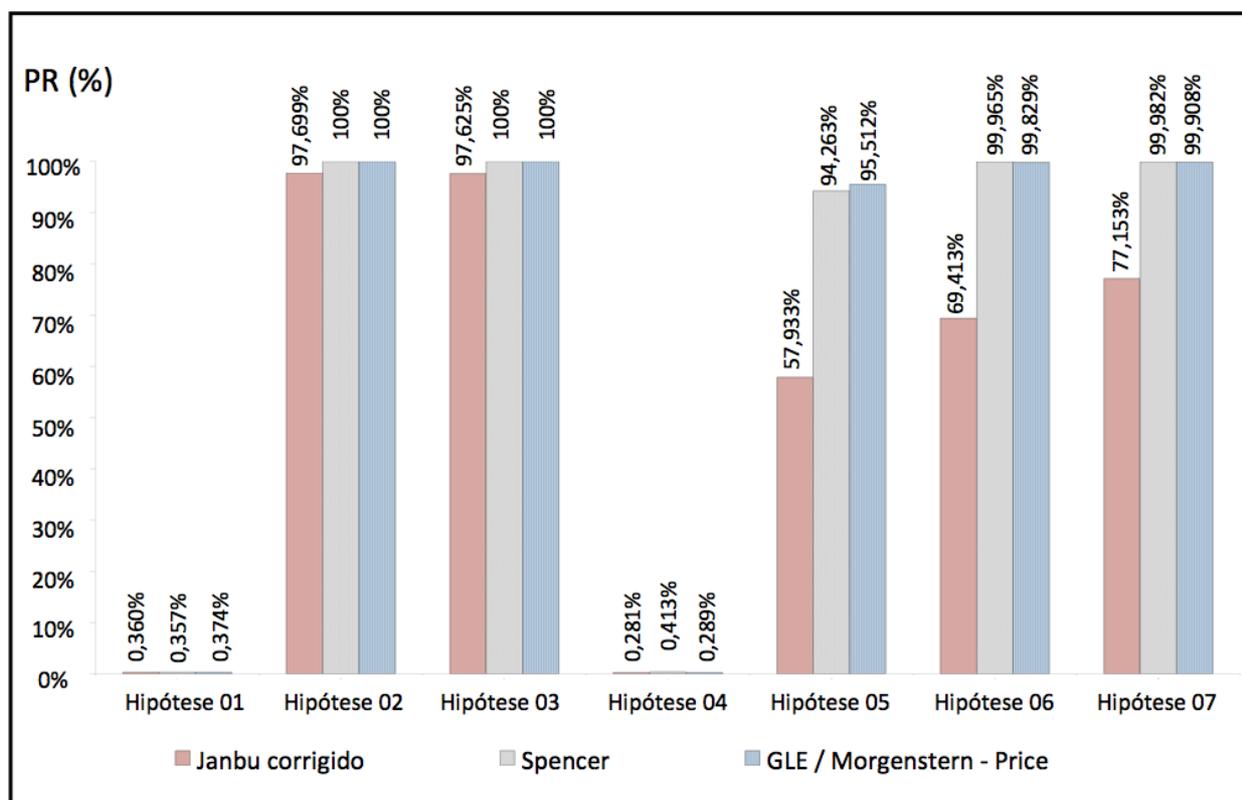


Figura 6.43 – Resumo das probabilidades de ruptura obtidas nas hipóteses de 01 a 07 para uma superfície de ruptura circular.

Uma vez que o fator de segurança determinístico é obtido considerando os valores médios dos parâmetros de entrada, a variação entre os métodos não é expressiva,

conforme era esperado. Além disso, Não se observa diferenças significativas quando comparado o fator de segurança determinístico com o médio (probabilístico).

De forma geral, as diferenças nos resultados, comparando o tipo de superfície crítica de análise, são mínimas. Os valores do fator de segurança determinístico e médio, para a superfície de ruptura não circular são ligeiramente menores, quando comparados com os valores obtidos para superfícies circulares. Apesar disso, de forma geral, as probabilidades de ruptura são maiores. Esse fato demonstra que nem sempre fatores de segurança mais altos retornam probabilidades de ruptura mais baixas e vice versa.

No geral, para as análises realizadas, os valores do fator de segurança determinístico, para os dois tipos de superfícies de ruptura são menores do que o fator de segurança médio.

6.2 Retroanálises Probabilísticas - Falésia de Tabatinga

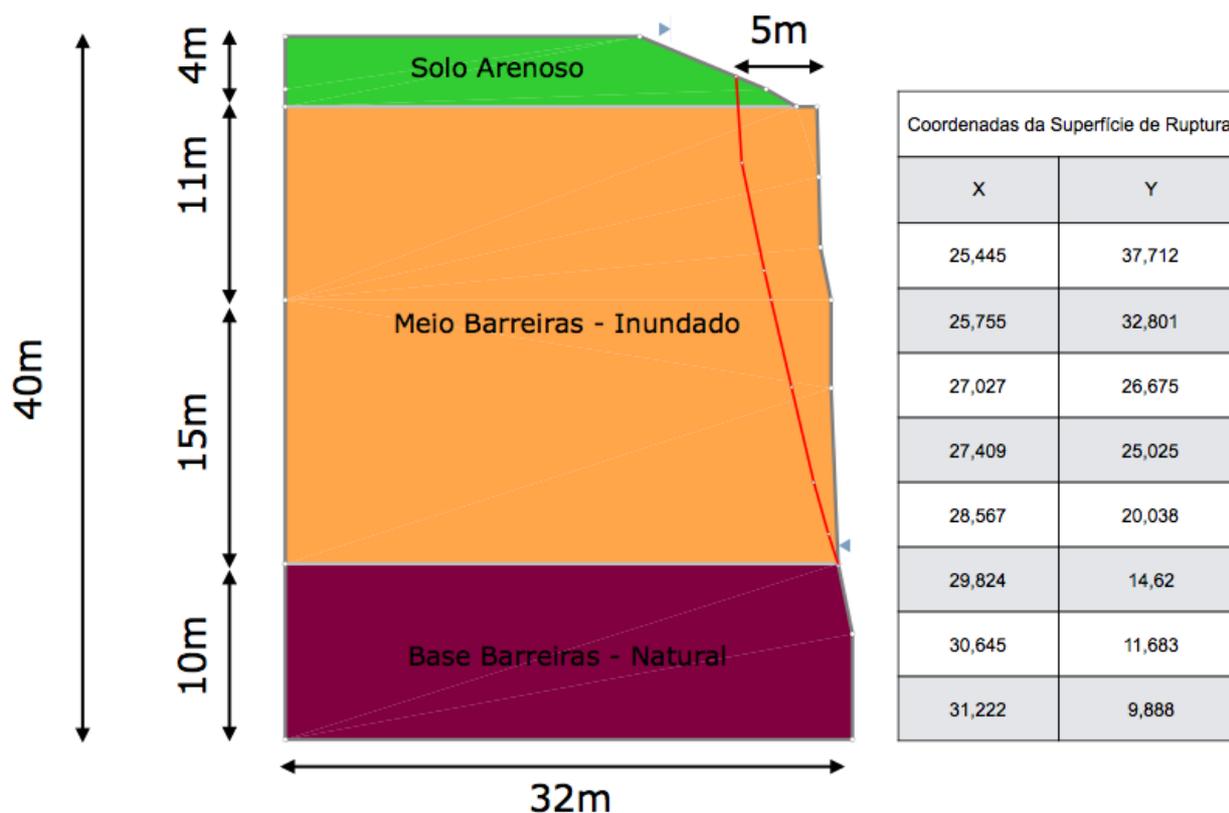
A retroanálise probabilística da ruptura de grandes proporções, observada mediante investigações de campo, foi realizada por meio do mesmo *software* das análises de estabilidade probabilísticas. A seção transversal modelada foi obtida através de análises de imagens aéreas. O perfil corresponde de forma aproximada ao que foi constatado em campo. A retroanálise probabilística foi executada com o objetivo de obter os prováveis parâmetros de resistência no instante da ruptura. Para essa finalidade, aplicou-se o método de Monte Carlo com os seguintes métodos determinísticos: Janbu corrigido, Bishop simplificado e GLE/Morgenstern - Price. Todas as análises foram realizadas sem considerar a presença de fluxo de água.

Após a modelagem do perfil, determina-se a superfície de ruptura, conforme foi constatado por meio de visitas de campo. Para isso, rastreou-se a superfície de ruptura com a forma mais próxima da realidade e com fator de segurança próximo de um. Nas imagens da ruptura (Figuras 3.10 a 3.13; 3.27 e 3.36 a 3.39), observa-se que a ruptura ocorreu apenas no material do meio, ou seja, a camada de base não foi atingida.

Diante disso, duas hipóteses foram modeladas com vistas a obter os valores dos parâmetros de resistência dos solos, no momento da ruptura. Cada hipótese foi analisada com diferentes considerações na variabilidade espacial dos parâmetros de resistência do solo.

6.2.1 Resultados - Retroanálise (Hipótese 08)

A hipótese 08 foi modelada considerando toda a camada do meio da falésia na condição inundada. A Figura 6.44 mostra a geometria, estratigrafia, as coordenadas da superfície de ruptura e os parâmetros de entrada utilizados nesse cenário. A falésia possui 40m de altura e três diferentes camadas de solos. A camada da base possui 10m de altura, seguida das camadas do meio com 26m e na sequência uma camada de solo arenoso com 4m.



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Solo arenoso (não consolidado)		0	-	-	-	35	-	-	-	17,00
Camada Homogênea - Inundado (Meio)		43,59	16,7	93,69	0,0	28,35	1,8	33,75	22,95	20,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	-	-	-	40,7	-	-	-	19,00

Figura 6.44 – Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a retroanálise (hipótese 08).

Para a retroanálise apenas os parâmetros de resistência da camada do meio foram consideradas variáveis aleatórias. Foram atribuídos valores médios para o solo arenoso e a camada da base (Figura 6.44).

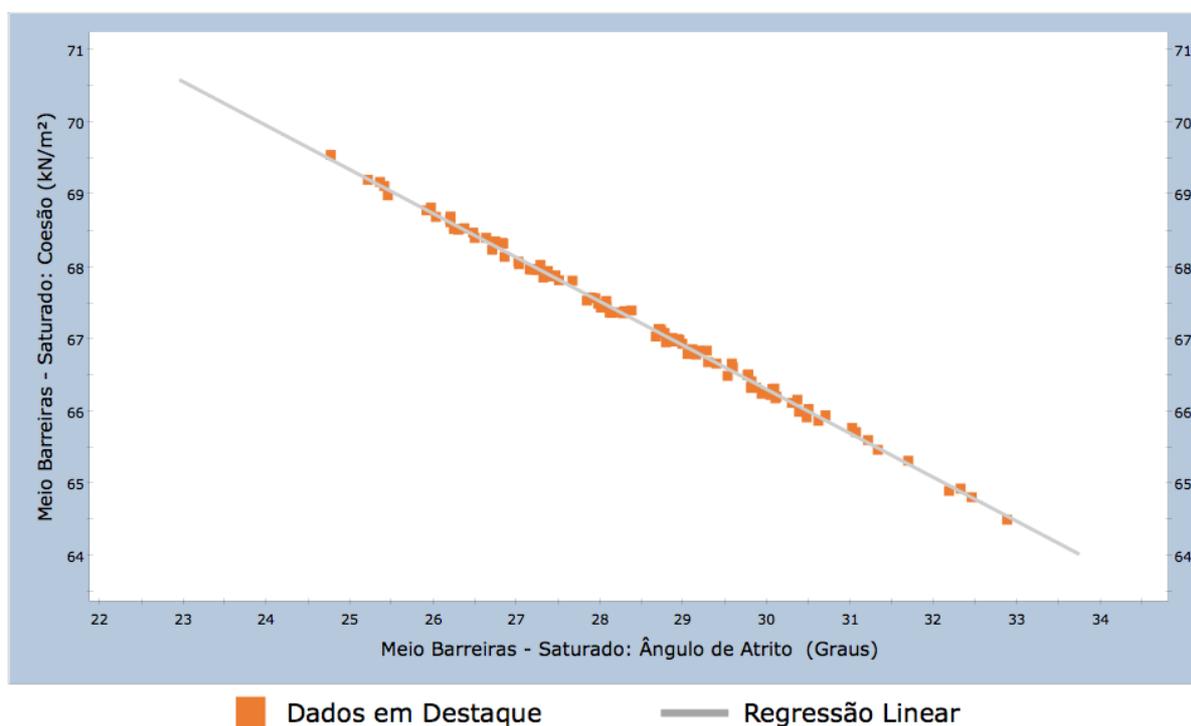
A hipótese 08 foi analisada supondo a camada do meio homogênea (sem variabilidade espacial) e, também considerando a variabilidade dos parâmetros de resistência. Geralmente, as análises probabilísticas são realizadas sem levar em consideração a variabilidade espacial dos solos. Dessa forma, são atribuídas amostras para toda a região ou camada de solo. Considerando a variabilidade espacial do solo, diferentemente do convencional, o programa gera um “campo aleatório” de valores das variáveis aleatórias, baseado na distribuição estatística e distância de correlação do material. Nesse caso, o campo aleatório foi definido segundo a função do tipo Gaussiana. Essa ferramenta cria uma distribuição de valores aleatória dentro da camada de solo, para cada amostra. Em outras palavras, se a variabilidade espacial para a coesão for igual a 20m na direção y e 20m na direção x, o valor desse parâmetro apresentará diferentes valores em pontos distintos da camada.

Assim, para os casos em que foi levada em consideração a variabilidade espacial, três diferentes cenários foram modelados: V20 - $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$; V05 - $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$; V02 - $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$.

6.2.1.1 Resultados - Hipótese 08, V00 (Sem Variabilidade)

A retroanálise probabilística foi executada para obter a coesão e o ângulo de atrito da camada de meio da falésia no instante da ruptura. Além disso, a probabilidade de ruptura associada à superfície de ruptura determinada no modelo (Figura 6.44). Ressalta-se que existem inúmeros pares de valores para coesão e ângulo de atrito que resultam na ruptura da falésia ($FS < 1$). Para diminuir as possibilidades e determinar a relação entre esses pares, apenas os valores que retornam fatores de segurança entre 0,999 e 1 foram levados em consideração. A Figura 6.45 mostra a relação entre a coesão e o ângulo de atrito para a camada do meio na condição inundada, para um fator de segurança de aproximadamente 1. Nota-se que foi possível obter uma relação linear entre os valores dos parâmetros. O valor de beta representa a inclinação da regressão linear, ao passo que alpha é o valor interceptado no eixo y. Dessa forma, qualquer ponto nessa linha, entre os valores de 24° e 33°, representa um par de valores de coesão e ângulo de atrito para os quais retornam um fator de segurança de aproximadamente um.

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado $0,999 < FS < 1,0$ (99 Pontos)



Coeficiente de Correlação=-0,9985, Alpha=84,579, Beta=-0,6094 (Dados em Destaque)

Figura 6.45 – Gráfico de dispersão: Coesão x Ângulo de atrito da camada de meio na condição inundada (hipótese 08).

Percebe-se para esse caso, 99 pontos que resultam na ruptura da falésia para a superfície de ruptura determinada previamente. Outro ponto importante reside na variação do parâmetro coesão, a qual está entre 64kPa e 70kPa, para essa hipótese.

A Figura 6.46 mostra os resultados da análise de sensibilidade obtida para a hipótese 08. Verifica-se que a inclinação da curva do parâmetro coesão é mais acentuada do que o ângulo de atrito. Esse fato sugere que a influência da variação do parâmetro coesão da camada de meio, para esse caso, é mais crítica. Por meio desse gráfico, percebe-se que quando a coesão assume o valor de 10% da variação (cerca de 9 kPa) o fator de segurança é aproximadamente 0,25. Ao passo que, quando a coesão apresenta o valor de 100% da sua variação (93,69 kPa) resulta em um fator de segurança de 1,3.

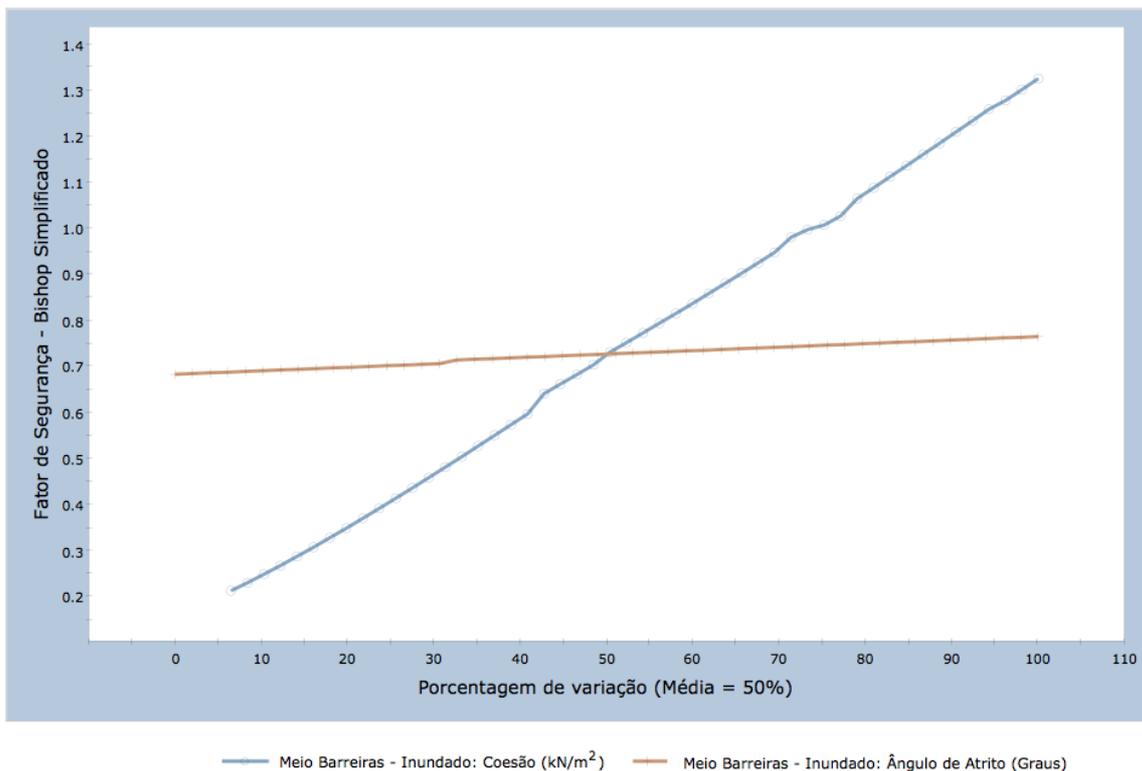


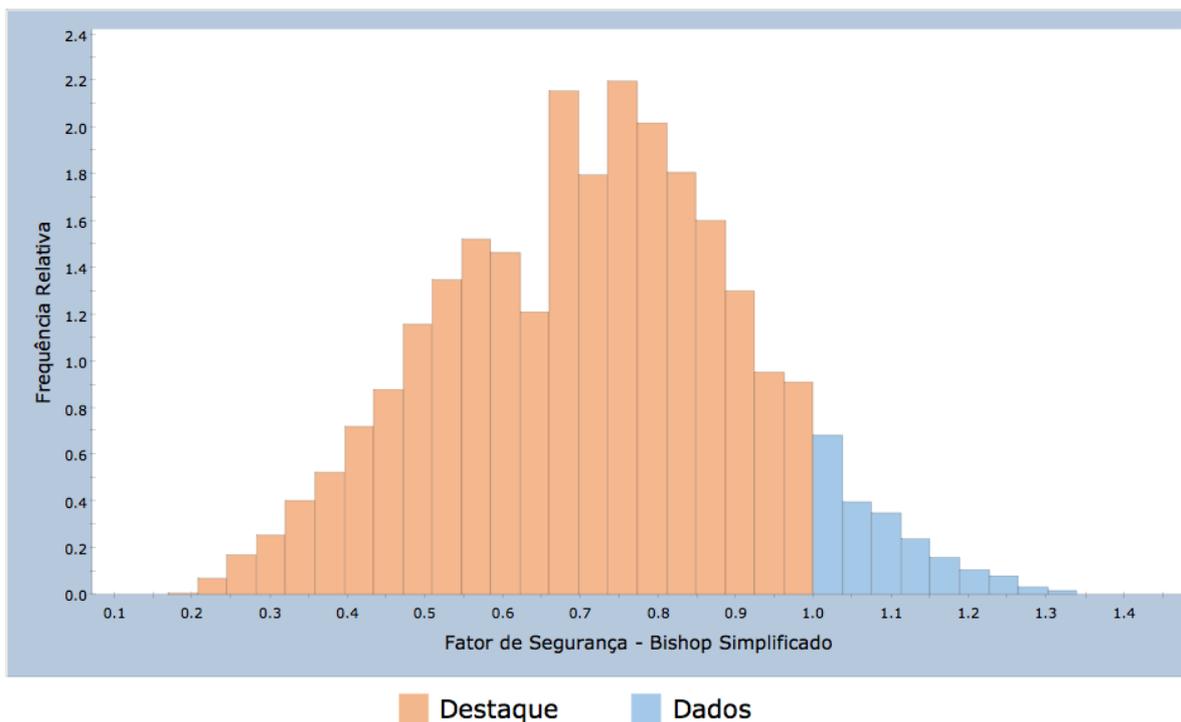
Figura 6.46 – Análise de Sensibilidade aplicada aos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio, na condição inundada (hipótese 08).

A Figura 6.47 mostra o histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado para a hipótese 08. Os valores mínimo e máximo obtidos para o fator de segurança são 0,20 e 1,33, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição normal. O fator de segurança médio obtido é igual a 0,719. A probabilidade de ruptura obtida para a retroanálise é de 92,24%.

A Figura 6.48 mostra a probabilidade acumulada do fator de segurança assumir valores menores do que 1. Esse gráfico apresenta outra forma de compreender a probabilidade de ruptura.

As Figuras 6.49 e 6.50 mostram os histogramas do parâmetro coesão e ângulo de atrito da camada de meio na condição inundada. Para a coesão, a distribuição da amostra indica que a maioria dos valores abaixo de 70 kPa, retornaram valores de fator de segurança menores do que um (em destaque na Figura 6.49). Enquanto que para o ângulo de atrito, nota-se que toda a distribuição da amostra retorna valores abaixo de um para o fator de segurança (Figura 6.50). Esse comportamento evidencia o mesmo comportamento constatado através da análise de sensibilidade.

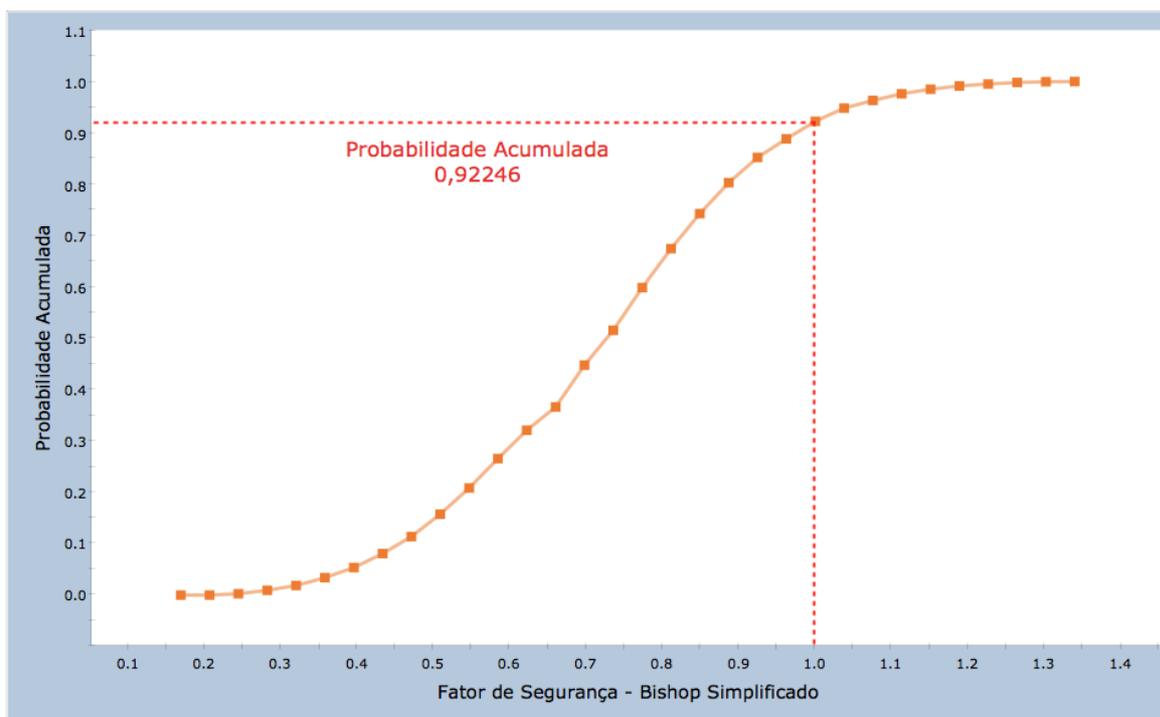
Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado < 1 (46123 Pontos)



AMOSTRA: Média=0,7196; D.P.=0,1978; Mín=0,2006; Máx=1,333

PF=92,246%; Índice de Conf.=-1,4177; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.47 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 08 V00).

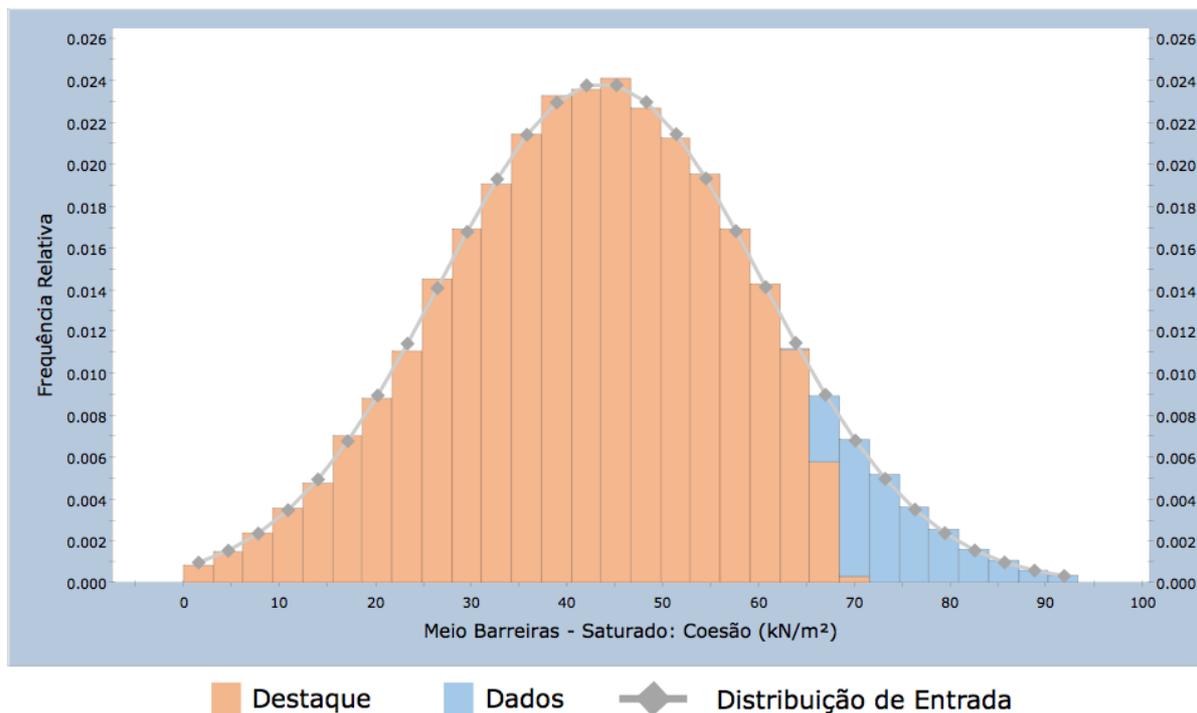


AMOSTRA: Média=0,7196; D.P.=0,1978; Mín=0,2006; Máx=1,333

PF=92,246%; Índice de Conf.=-1,4177; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.48 – Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Sem variabilidade espacial). Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1 (hipótese 08).

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado < 1 (46123 Pontos)

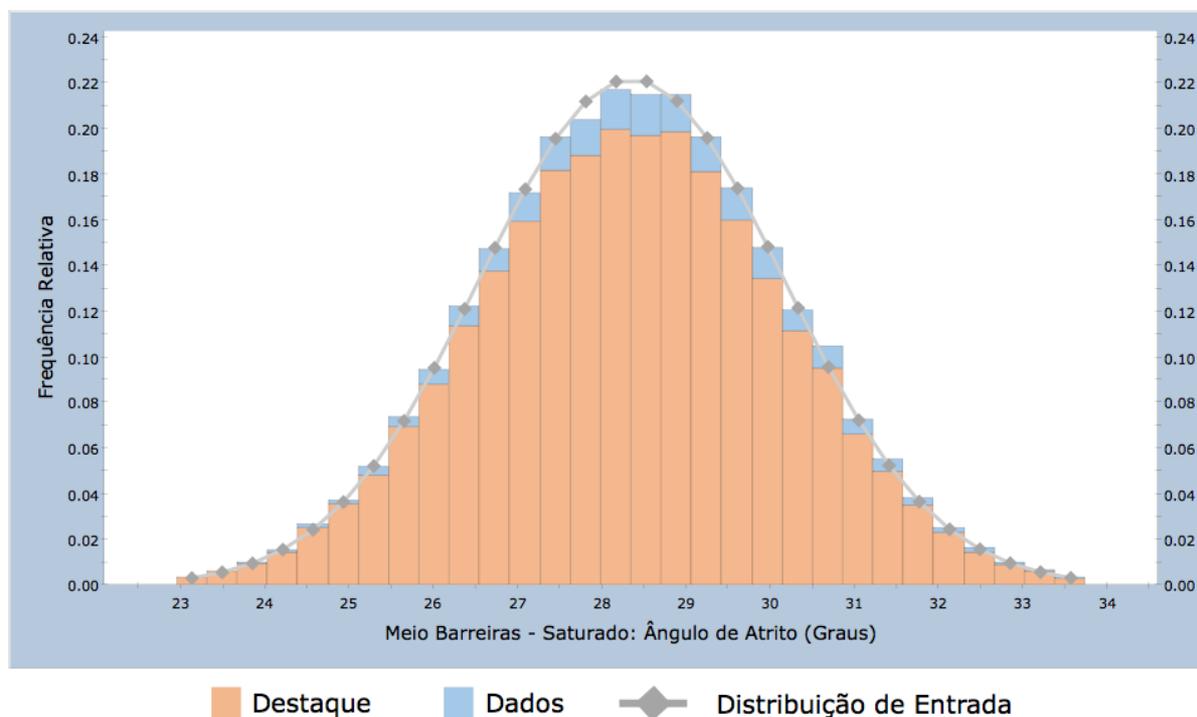


AMOSTRA: Média=43,81; D.P.=16,26; Min=0,001; Máx=93,35

ENTRADA: Média Normal=43,59; D.P.=16,7; Mín=0; Máx=93,69

Figura 6.49 – Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 08).

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado < 1 (46123 Pontos)



AMOSTRA: Média=28,36; D.P.=1,788; Min=22,96; Máx=33,74

ENTRADA: Média Normal=28,35; D.P.=1,8; Mín=22,95; Máx=33,75

Figura 6.50 – Função distribuição de probabilidade do ângulo de atrito da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 08).

Os resultados de todas as retroanálises probabilísticas sem variabilidade espacial, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 08, estão sintetizadas na Tabela 6.18. O fator de segurança determinístico para todos os métodos se aproximaram de 1, determinando a instabilidade da falésia modelada. A probabilidade de ruptura se aproximou de 90% para os métodos de Bishop simplificado e GLE / Morgenstern - Price. Por sua vez, através do método de Janbu corrigido a probabilidade de ruptura foi aproximadamente 50%.

Diante dos resultados das retroanálises, conjectura-se que a falésia modelada representa bem as possíveis condições geotécnicas que promovem a instabilização do maciço. Os altos valores de probabilidade de ruptura e valores de fator de segurança médio abaixo da unidade indicam uma situação de instabilização do maciço para as condições atribuídas.

Tabela 6.18 Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Sem variabilidade espacial).

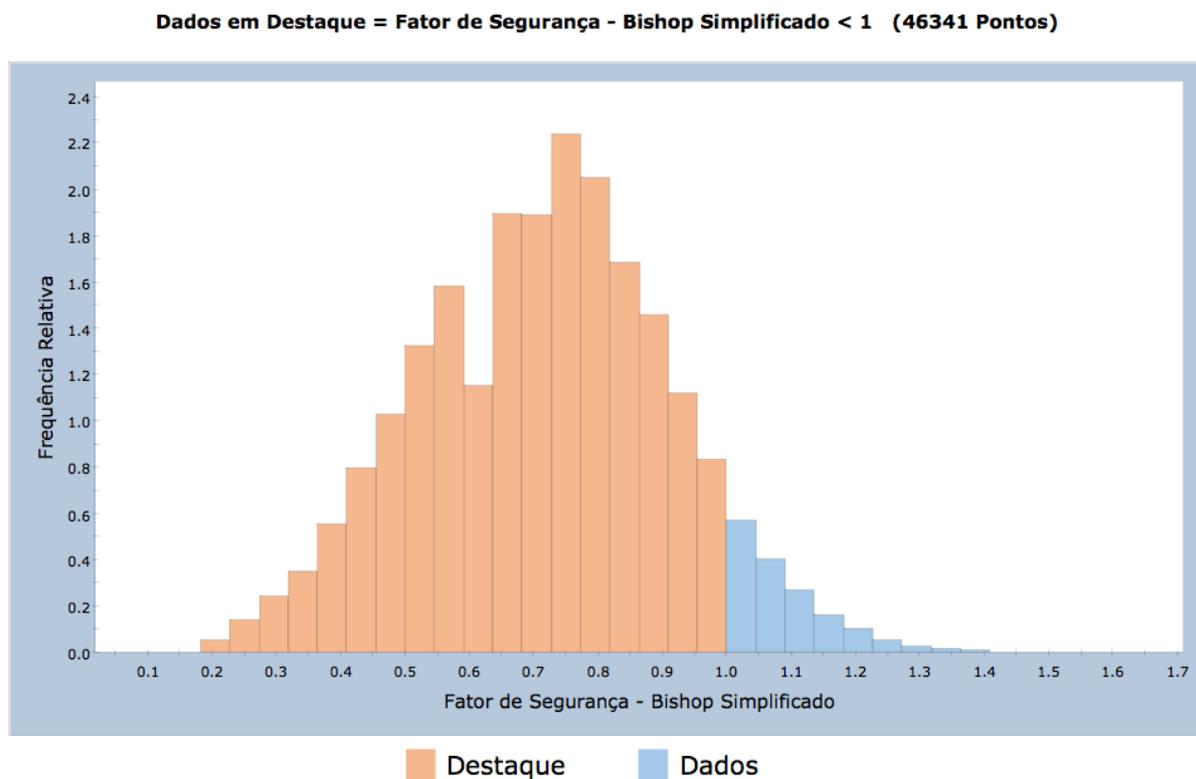
Hipótese 08 V00 - Sem variabilidade espacial (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,313	50,264%	0,927	Janbu Corrigido
-1,418	92,246%	0,720	Bishop Simplificado
-0,489	85,825%	0,887	GLE / Morgenstern - Price

6.2.1.2 Resultados - Hipótese 08, V20 (Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$)

Com a finalidade de tentar representar um cenário mais próximo da realidade, a hipótese 08 foi analisada considerando a variabilidade espacial dos parâmetros de resistência. Em outras palavras, o cenário foi avaliado supondo que a camada do meio não é homogênea.

O histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado, para a hipótese 08 com variabilidade espacial ($\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$) é apresentado na Figura 6.51. Apesar de ter ocorrido a diminuição do desvio padrão, em comparação com o cenário apresentado anteriormente, o fator de segurança mínimo diminuiu e o máximo aumentou. Os fatores de segurança mínimo e máximo obtidos são 0,16 e 1,52, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição

normal. Não houve variação relacionada ao fator de segurança médio (igual a aproximadamente 0,719). A probabilidade de ruptura obtida para a retroanálise é de 92,68%.



AMOSTRA: Média=0,7181; D.P.=0,1965; Mín=0,1608; Máx=1,523
PF=92,682%; Índice de Conf.=-1,4344; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.51 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtido pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 08 V20).

A Figura 6.52 apresenta duas das possíveis amostras obtidas para os parâmetros coesão e ângulo de atrito, da camada do meio, com variabilidade espacial de 20m nas duas direções ($\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$). Somente a camada em que foi considerada a variabilidade espacial estão sendo mostradas na figura. Percebe-se que o valor dos parâmetros de resistência tem diferentes valores em pontos distintos da camada em questão.

Nesse caso, as amostras de número 214 e 353 retornam valores de fator de segurança entre 0,99 e 1. Observa-se uma predominância dos valores de coesão próximo da média atribuída à camada do meio, ou seja, próximo de 43 kPa. (faixa em verde). O mesmo ocorre para o ângulo de atrito, sobretudo para a mostra 214, em que os valores estão próximos de 28° (do vermelho ao laranja). Dentro desse contexto, a combinação da amostra 214.a (coesão), com a 214.b retorna um valor de fator de segurança próximo da

unidade. Essa mesma lógica segue de forma análoga para a amostra número 353 (Figura 6.52).

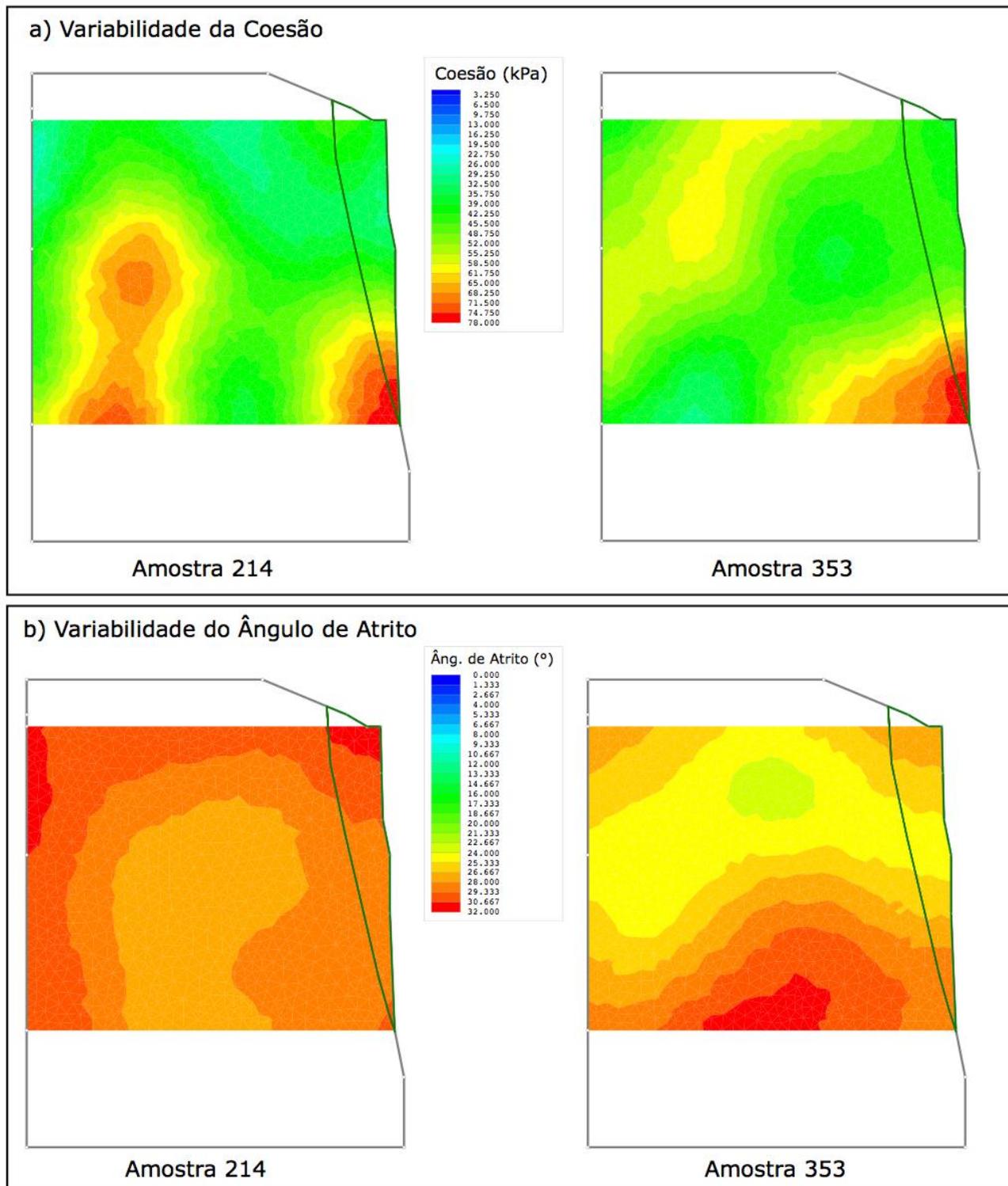


Figura 6.52 – Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\delta x = 20\text{m}$; $\delta y = 20\text{m}$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.

Para os casos modelados que a variabilidade espacial é levada em consideração, não é possível obter um gráfico de dispersão do tipo coesão x ângulo de atrito. Isso ocorre, pois a camada é considerada heterogênea, ou seja, para cada amostra, diversos

valores dos parâmetros de resistência são atribuídos segundo a função do tipo Gaussiana.

A Tabela 6.19 mostra o resumo das retroanálises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 08 V20 ($\bar{\delta}x = 20m$; $\bar{\delta}y = 20m$). A probabilidade de ruptura se aproximou de 90% para o método de Bishop simplificado. Por sua vez, através do método de Janbu corrigido a probabilidade de ruptura foi aproximadamente 46%. O método de GLE / Morgenstern - Price retornou valores equilibrados em comparação aos outros dois métodos.

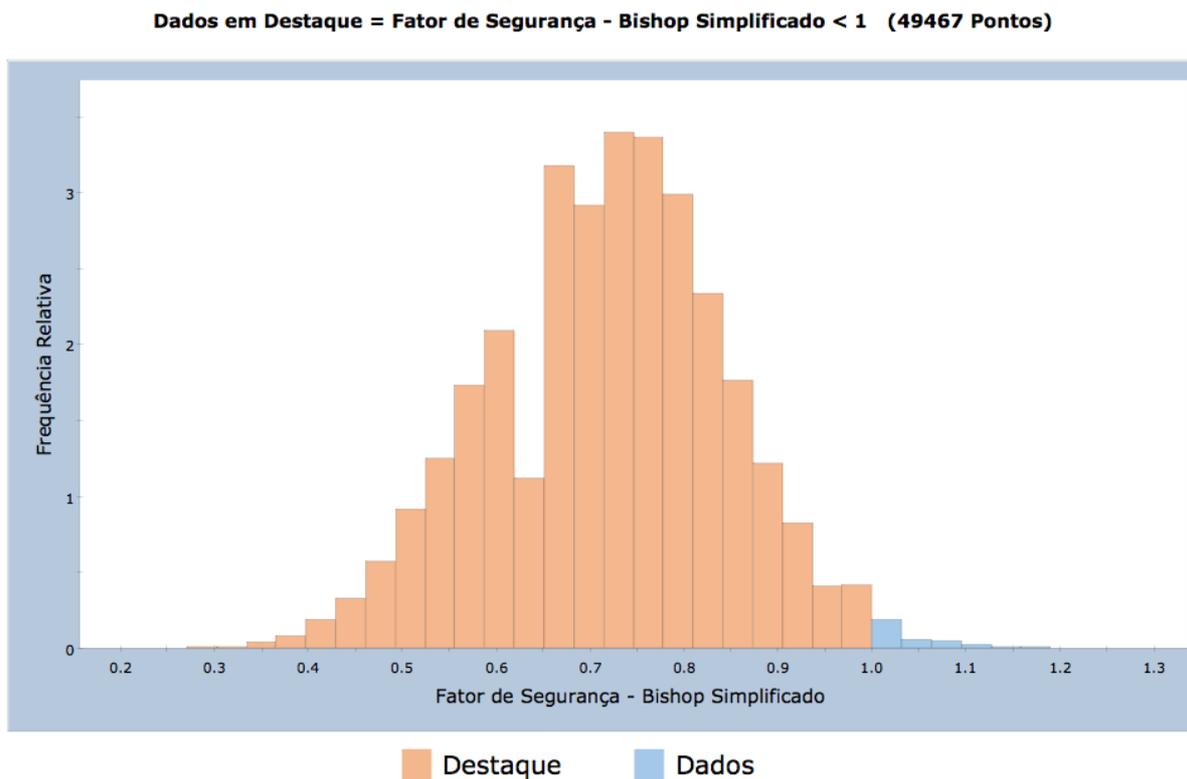
De forma geral, comparando-se a hipótese sem e com variabilidade espacial, nota-se uma diminuição dos valores de probabilidade de ruptura. Esse fato é razoável, pois no modelo sem considerar a variabilidade espacial, em algumas simulações toda a camadas pode assumir os menores valores dos parâmetros de resistência ao mesmo tempo. Todas as simulações em que isso ocorre, os valores de fator de segurança retornados serão mais baixos e conseqüentemente a probabilidade de ruptura será maior.

Tabela 6.19 Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\bar{\delta}x = 20m$; $\bar{\delta}y = 20m$).

Hipótese 08 V20 - Variabilidade $\bar{\delta}x = 20m$; $\bar{\delta}y = 20m$ (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,033	46,455%	0,997	Janbu Corrigido
-1,434	92,682%	0,718	Bishop Simplificado
-0,248	63,771%	0,971	GLE / Morgenstern - Price

6.2.1.3 Resultados - Hipótese 08, V05 (Variabilidade $\bar{\delta}x = 5m$; $\bar{\delta}y = 5m$)

O histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado, para a hipótese 08 V05 ($\bar{\delta}x = 5m$; $\bar{\delta}y = 5m$) é apresentado na Figura 6.53. Os fatores de segurança mínimo e máximo obtidos são 0,26 e 1,22, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição normal. Não houve variação relacionada ao fator de segurança médio (igual a aproximadamente 0,719). Observa-se no gráfico a diminuição da frequência relativa dos fatores de segurança maiores do que 1 (dados em azul). A probabilidade de ruptura obtida para a retroanálise é de 98,93%.



AMOSTRA: Média=0,7197; D.P.=0,1252; Mín=0,2686; Máx=1,22
 PF=98,934%; Índice de Conf.=-2,238; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.53 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 08 V05).

A Figura 6.54 apresenta duas das possíveis amostras obtidas para os parâmetros coesão e ângulo de atrito, da camada do meio, com variabilidade espacial de 5m nas duas direções ($\bar{\delta}x = 5m$; $\bar{\delta}y = 5m$).

Nesse caso, percebe-se uma variabilidade maior comparado com o cenário anterior. À medida que a distância de correlação diminui, se aproximando de zero, significa maior incerteza nos dados utilizados e maior heterogeneidade do material. As amostras de número 18 e 179 retornam valores de fator de segurança entre 0,99 e 1. Para a coesão, é possível perceber vários pontos em azul, ou seja, valores entre 0kPa e 25kPa. O ângulo de atrito, para essas duas amostras em específico, apresenta uma variação próxima da média de 28° (pontos em amarelo). Vale salientar que dentro desse contexto, a combinação da amostra 18.a (coesão), com a 18.b retorna um valor de fator de segurança próximo da unidade. Essa mesma lógica ocorre para a amostra número 353 (Figura 6.54).

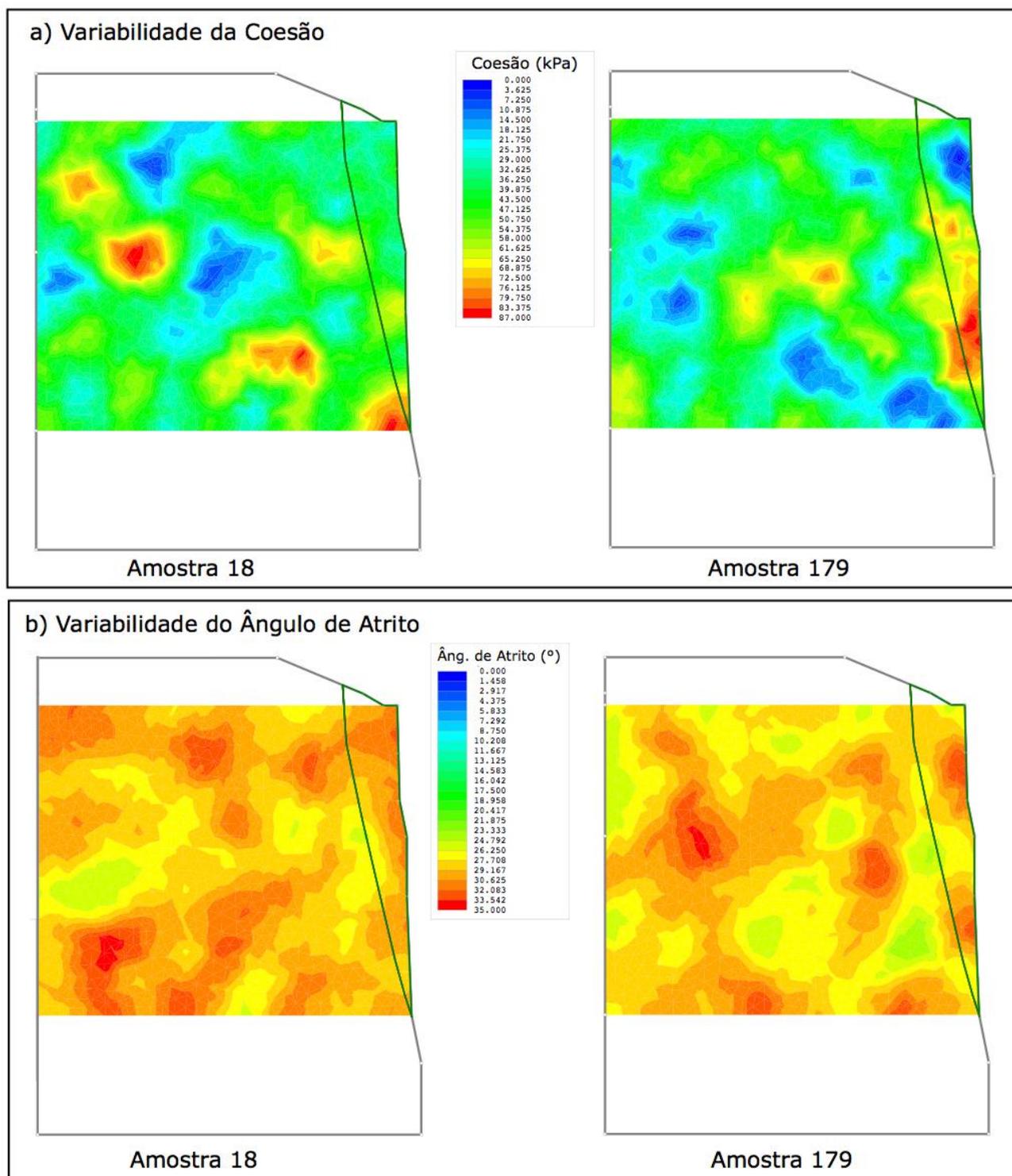


Figura 6.54 – Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.

A Tabela 6.20 exhibe o resumo das retroanálises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 08 V05 ($\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$). De certa forma o padrão volta a se repetir. A maior probabilidade de ruptura foi obtida mediante o método de Bishop simplificado. Enquanto que através do método de Janbu corrigido a probabilidade de ruptura é a menor entre os três métodos. Por sua vez o

método de GLE / Morgenstern - Price retornou probabilidade de ruptura intermediária em comparação aos outros dois métodos.

Isso posto, percebe-se uma diferença considerável em relação à probabilidade de ruptura obtida entre os três métodos. Por esse motivo, é importante avaliar as condições de estabilidade de um talude por mais de um método.

Tabela 6.20 Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$).

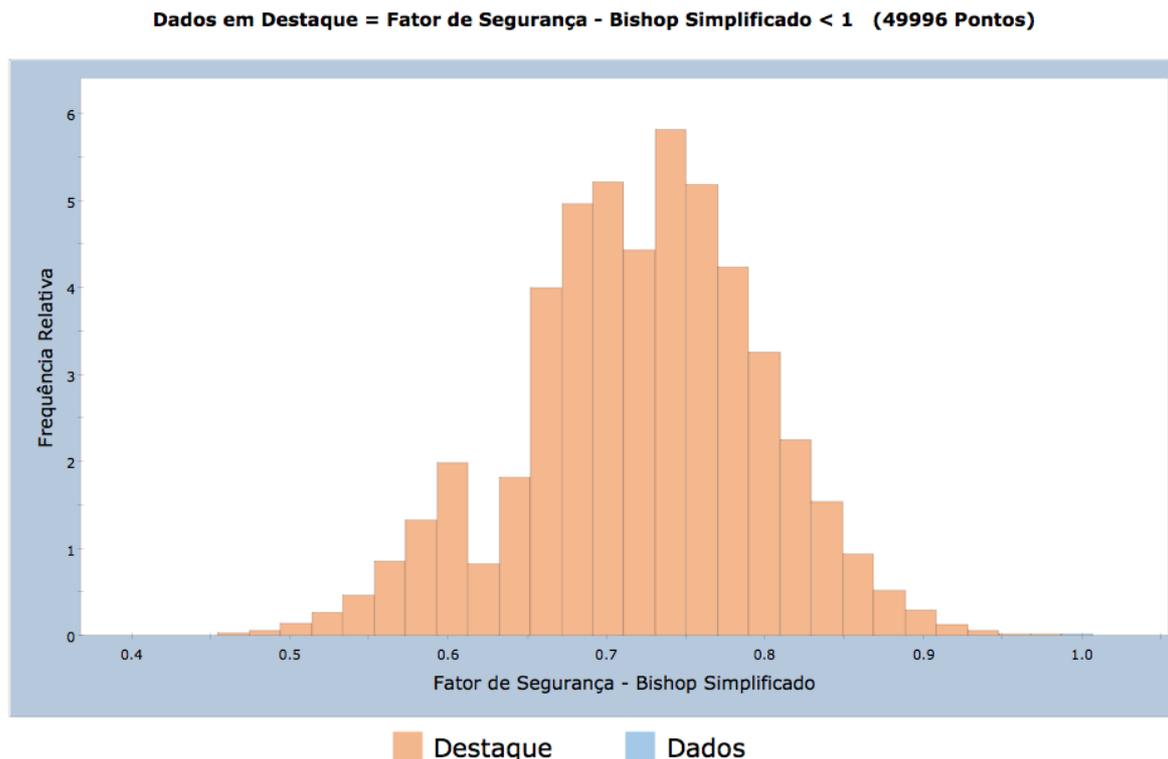
Hipótese 08 V05 - Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$ (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
0,205	44,270%	1,005	Janbu Corrigido
-2,238	98,934%	0,720	Bishop Simplificado
-0,550	66,759%	0,986	GLE / Morgenstern - Price

6.2.1.4 Resultados - Hipótese 08, V02 (Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$)

O histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado, para a hipótese 08 V02 ($\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$) é apresentado na Figura 6.55. Os fatores de segurança mínimo e máximo obtidos são 0,41 e 1,007, respectivamente. Para essa hipótese houve alteração na melhor distribuição de ajuste. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição beta. Comparando-se com as hipóteses apresentadas, a variação relacionada ao fator de segurança médio não é expressiva. A probabilidade de ruptura obtida foi de 99,99%.

A Figura 6.56 apresenta duas das possíveis amostras obtidas para os parâmetros coesão e ângulo de atrito, da camada do meio, com variabilidade espacial de 2 m nas duas direções ($\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$).

Nesse caso, percebe-se uma variabilidade maior comparado com o cenário anterior. Com a distância de correlação em 2m, o material apresenta maior heterogeneidade. As amostras de número 375 e 6.336 retornam valores de fator de segurança entre 0,99 e 1. Os gráficos do lado esquerdo da Figura 6.56 (coesão), apresenta vários pontos em azul (0kPa e 25kPa) na camada do meio. O parâmetro ângulo de atrito, representado nos gráficos do lado direito, apresenta quantidade expressiva de valores acima da média (pontos em vermelho).



AMOSTRA: Média=0,722; D.P.=0,075; Mín=0,4152; Máx=1,007
PF=99,992%; Índice de Conf.=-3,662; Melhor ajuste=Distribuição Beta

Figura 6.55 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição beta (hipótese 08 V02).

A combinação da amostra 375.a (coesão), com a 375.b (ângulo de atrito) retorna um valor de fator de segurança próximo entre 0,99 e 1. Segue essa mesma lógica a amostra número 6.336 (Figura 6.56).

Apesar de a maioria dos valores dos parâmetros de resistência distribuídos na camada do meio, situarem-se na média ou acima, essas simulações retornam condições de instabilidade.

A Tabela 6.21 exibe o resumo das retroanálises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 08 V02 ($\bar{\delta}x = 2m$; $\bar{\delta}y = 2m$). De forma geral, o padrão relacionado às probabilidades de ruptura para os três métodos se repete. Bishop simplificado retorna o maior valor de probabilidade de ruptura. Ao passo que o método de Janbu corrigido resulta na menor probabilidade de ruptura.

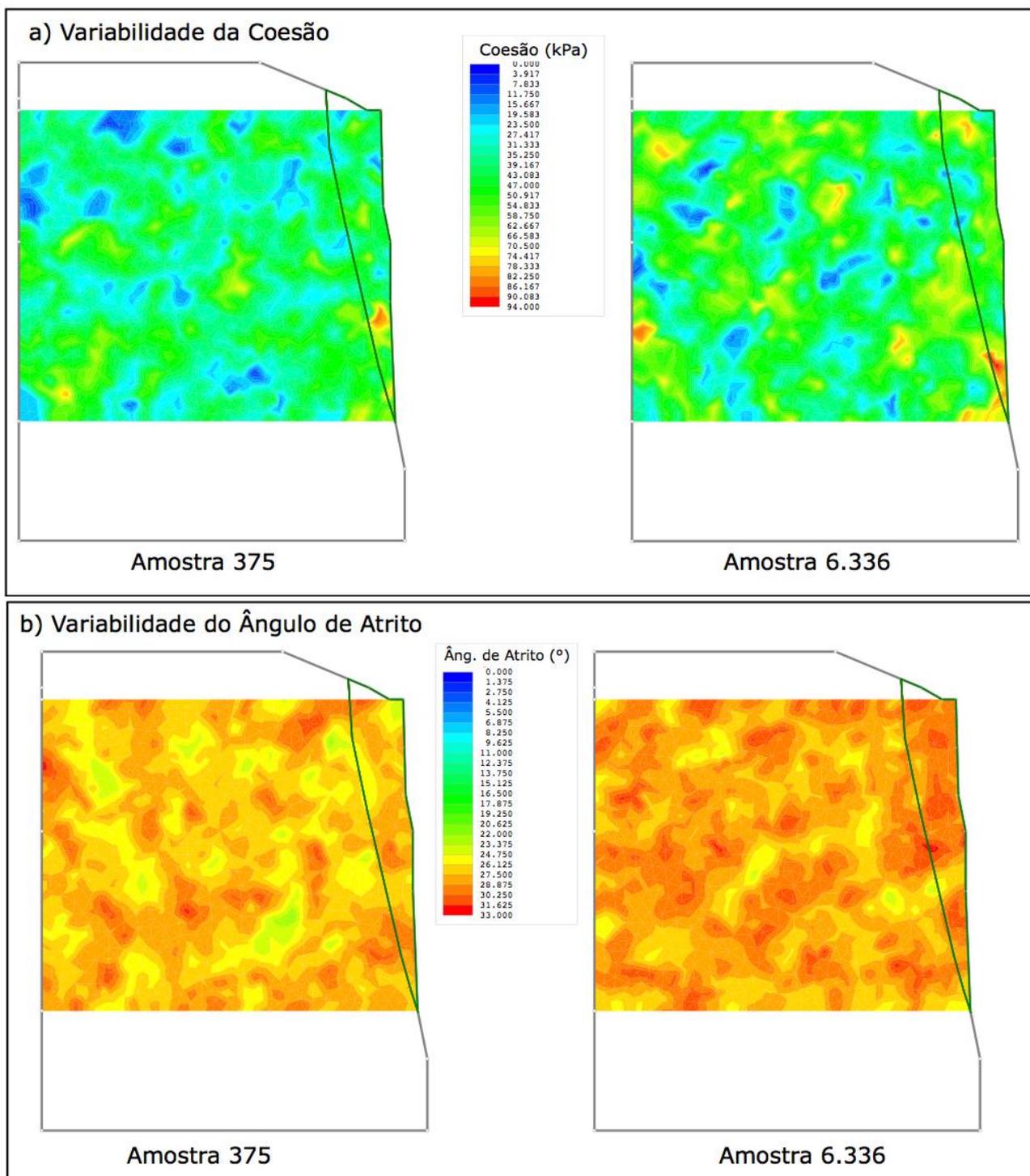


Figura 6.56 – Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\bar{\delta}x = 2m$; $\bar{\delta}y = 2m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.

Diante dos diferentes resultados obtidos através dos três métodos, o ideal é considerar o pior caso para que a análise esteja a favor da segurança.

Tabela 6.21 Hipótese 08: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$).

Hipótese 08 V02 - Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$ (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
0,240	42,601%	1,006	Janbu Corrigido
-3,663	99,992%	0,722	Bishop Simplificado
-0,513	65,631%	0,987	GLE / Morgenstern - Price

6.2.2 Resultados - Retroanálise (Hipótese 09)

A modelagem da hipótese 09 foi realizada com vistas a obter um cenário ainda mais plausível do que a hipótese 08. Para isso o mesmo perfil da hipótese 08 foi analisado sob diferentes condições geotécnicas. Nesse caso, foi considerado que uma faixa de 5m, localizada na borda da falésia, estava na condição inundada. De forma prática, essa situação é possível se houver a existência de fendas de tração na borda da falésia (Figuras 6.57). Desse modo, a saturação do solo ocorre através das fendas de tração. Esse cenário foi constatado nas falésias, em vários trechos (Figuras 3.28 a 3.30). Entretanto, todas as análises foram realizadas sem considerar a presença de fluxo de água.

Assim, essa retroanálise probabilística foi executada para obter os prováveis parâmetros de resistência no instante da ruptura, do material nas condições inundada e natural. Além disso, a probabilidade de ruptura associada à superfície de ruptura definida, também foi obtida. Para esse fim, aplicou-se o método de Monte Carlo com os seguintes métodos determinísticos: Janbu corrigido, Bishop simplificado e GLE/Morgenstern - Price.

A superfície de ruptura utilizada nessas simulações foi igual à hipótese 08. Percebe-se que toda a superfície está contida na região em que o material se encontra na condição inundada. Além disso, a superfície de ruptura não engloba a camada da base, conforme foi constatado em campo. Essa suposição é coerente com as observações de campo, visto que é difícil de observar a ruptura no solo na condição natural.

Diante disso, de forma análoga ao que foi realizado na hipótese 08, a hipótese 09 foi analisada com diferentes considerações na variabilidade espacial dos parâmetros de resistência do solo.

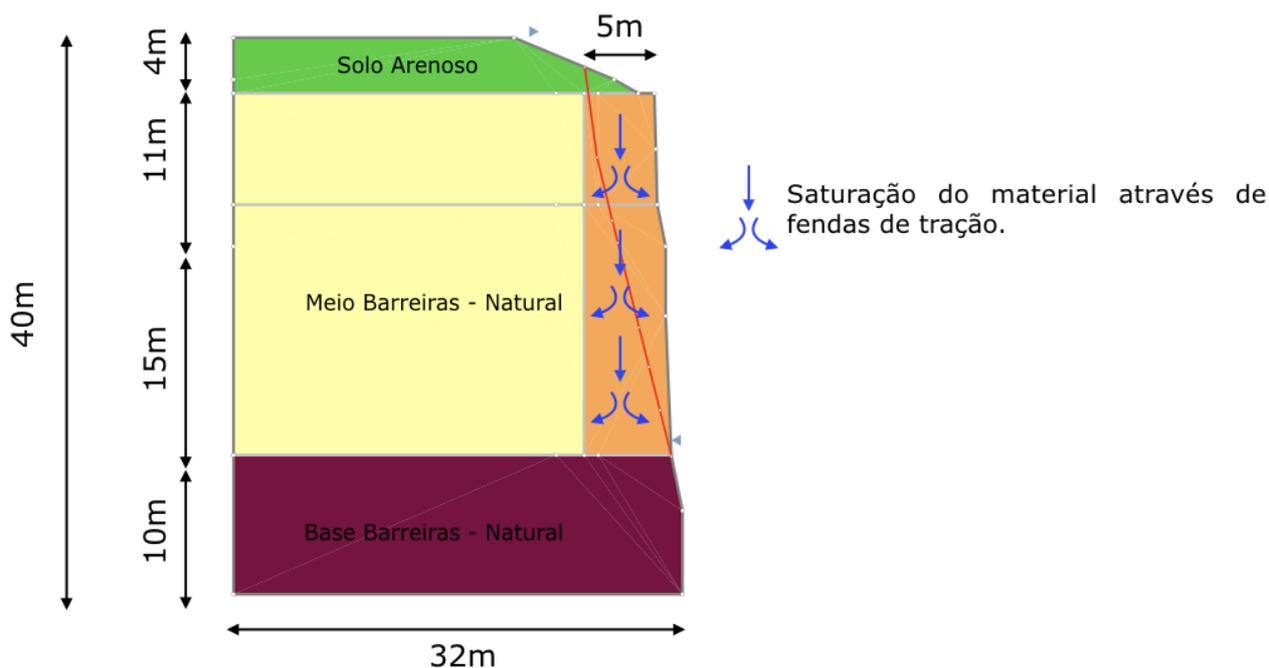
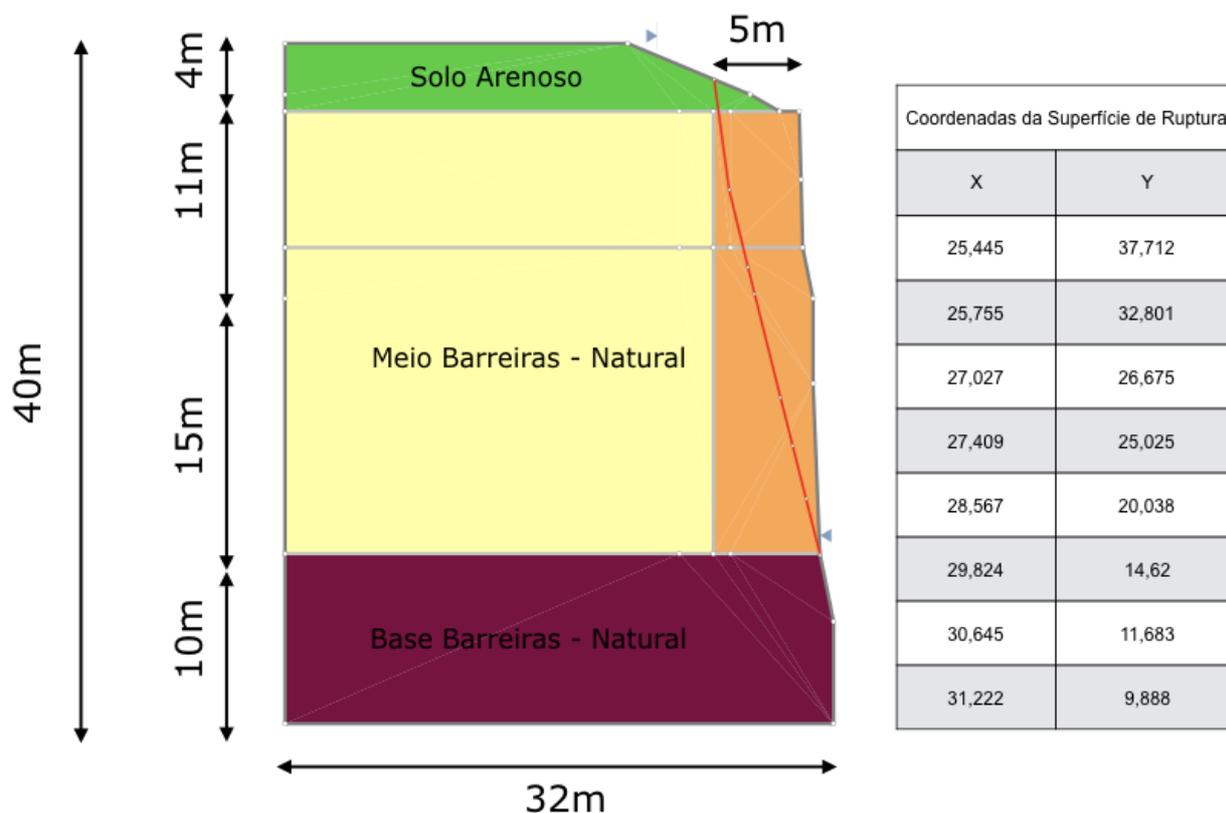


Figura 6.57 – Explicação das condições para a ocorrência do cenário modelado (hipótese 09).

A Figura 6.58 mostra a geometria, estratigrafia, as coordenadas da superfície de ruptura e os parâmetros de entrada utilizados para a hipótese 09. A falésia possui 40m de altura e quatro diferentes camadas de solos. A camada da base possui 10m de altura, seguida das camadas do meio com 26m e na sequência uma camada de solo arenoso com 4m. Na camada do meio situada na borda da falésia (5m de espessura), o material encontra-se na condição inundada.

Para a retroanálise apenas os parâmetros de resistência da camada do meio foram consideradas variáveis aleatórias. Para o solo arenoso e a base da falésia, foram utilizados parâmetros médios, para simplificar o modelo (Figura 6.58).

Nos cenários desenvolvidos na hipótese 09, em que foi considerada a variabilidade espacial dos parâmetros de resistência dos solos, o campo aleatório foi definido segundo a função do tipo Gaussiana. Dessa forma, para essas situações, dois campos aleatórios foram gerados, um para a camada do meio na condição natural e outro na condição inundada.



Material	Variável Aleatória (Dados de Entrada)									
	Cor	Coesão (kPa)				Ângulo de Atrito (°)				Peso Específico (kN/m ³)
		Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)	Desvio Padrão (σ)	Máximo	Mínimo	Média (E)
Solo arenoso (não consolidado)		0	-	-	-	35	-	-	-	17,00
Camada Homogênea - Inundado (Meio)		43,59	16,7	93,69	0,0	28,35	1,8	33,75	22,95	20,00
Camada Homogênea - Natural (Meio)		199,9	23,7	271,0	0,0	37,0	6,2	55,6	18,4	17,00
Camada Heterogênea - Natural (Base)		245,0	-	-	-	40,7	-	-	-	19,00

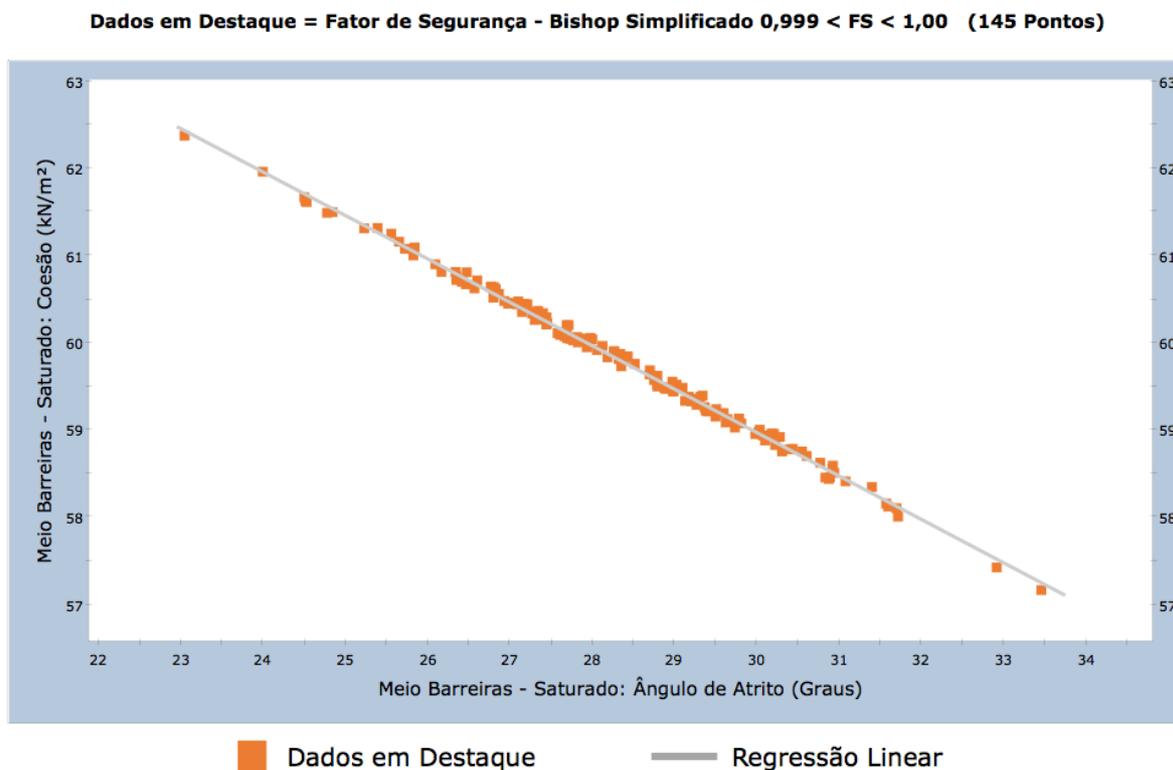
Figura 6.58 - Seção transversal e parâmetros de entrada considerados para a retroanálise (hipótese 09).

6.2.2.1 Resultados - Hipótese 09, V00 (Sem Variabilidade)

Os parâmetros de resistência, da camada de meio inundada, que retornam fatores de segurança entre 0,999 e 1,0 estão apresentados na Figura 6.59. Ressalta-se que existem inúmeros pares de valores para coesão e ângulo de atrito que resultam na ruptura da falésia ($FS < 1$). Nota-se que foi possível obter uma relação linear entre os valores dos parâmetros. O valor de beta representa a inclinação da regressão linear, ao passo que alpha é o valor interceptado no eixo y.

Nesse contexto, qualquer ponto nessa linha, entre os valores de 23° e 34°, representa um par de valores de coesão e ângulo de atrito para os quais retornam um fator de segurança de aproximadamente um.

Percebe-se para esse caso, 145 pontos que resultam na instabilização da falésia para a superfície de ruptura determinada previamente. O parâmetro coesão apresenta variação entre 57kPa e 62,5kPa, para a camada do meio inundada (borda).

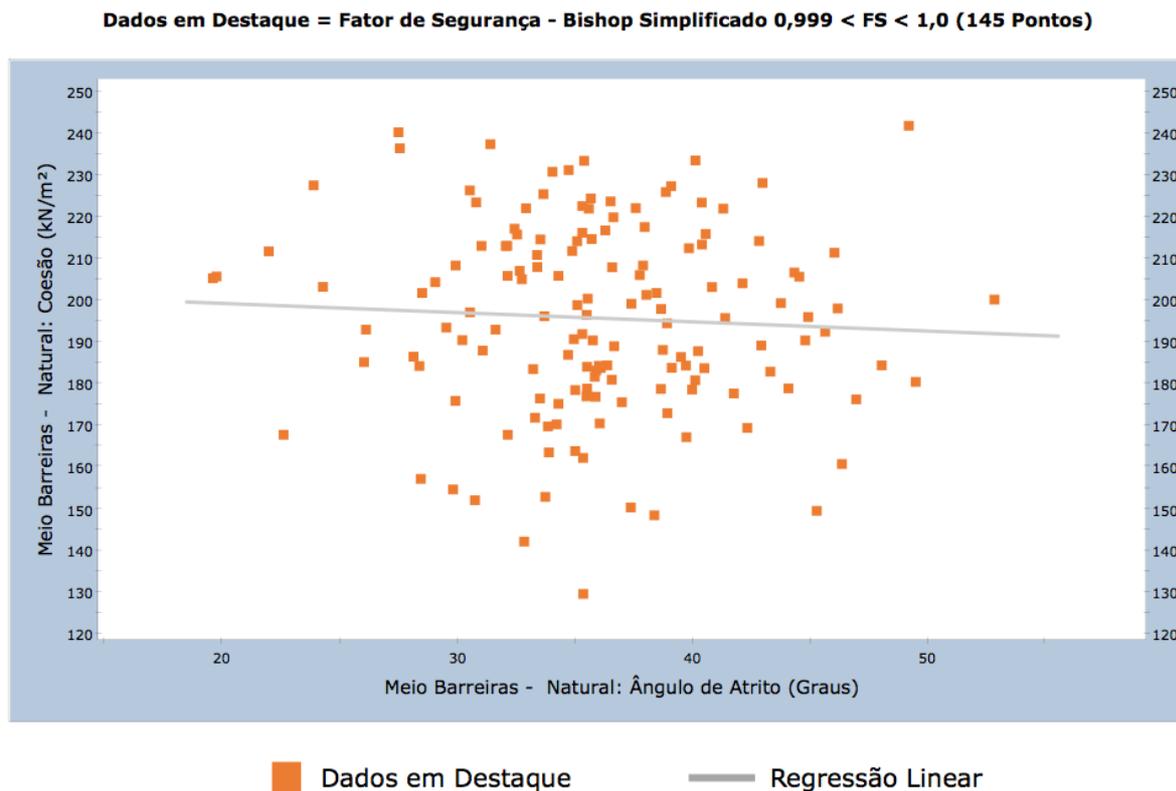


Coeficiente de Correlação=-0,9982, Alpha=73,890, Beta=-0,497 (Dados em Destaque)

Figura 6.59 – Gráfico de dispersão: Coesão x Ângulo de atrito da camada de meio, na condição inundada (hipótese 09).

A Figura 6.60 mostra os parâmetros de resistência, da camada de meio natural, que retornam fatores de segurança entre 0,999 e 1,0. Para esse material, percebe-se que não foi possível obter uma relação linear entre a coesão e ângulo de atrito. Para o ângulo de atrito foram obtidos pontos entre 20° e 50° e para a coesão a variação foi de 130kPa a 240kPa. Diante da dispersão dos dados, conjectura-se que o material que controla a ocorrência do movimento de massa é a camada de meio na condição inundada.

A Figura 6.61 exibe o histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado para a hipótese 09. Os valores mínimo e máximo obtidos para o fator de segurança são 0,20 e 1,47, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição normal. O fator de segurança médio obtido é igual a 0,783. A probabilidade de ruptura obtida para a retroanálise é de 83,53%.



Coeficiente de Correlação= $-0,0573$, Alpha= $203,55$, Beta= $-0,2204$ (Dados em Destaque)

Figura 6.60 – Gráfico de dispersão: Coesão x Ângulo de atrito da camada de meio, na condição natural (hipótese 09).

A Figura 6.62 revela a probabilidade acumulada do fator de segurança assumir valores menores do que 1. Esse gráfico apresenta outra forma de compreender a probabilidade de ruptura.

As Figuras 6.63 e 6.64 apresentam os histogramas do parâmetro coesão e ângulo de atrito da camada de meio na condição inundada. Para a coesão, a distribuição da amostra indica que a maioria dos valores abaixo de 60kPa, retornaram valores de fator de segurança menores do que um (em vermelho na Figura 6.63).

Por toda a distribuição da amostra do parâmetro ângulo de atrito, têm-se valores abaixo de um para o fator de segurança (Figura 6.64). Esse comportamento evidencia que a coesão influencia de forma mais ativa na variação do valor do fator de segurança. Em outras palavras, para a hipótese 09, independente do valor do atribuído ao ângulo de atrito, o que governa o desempenho da falésia é a coesão do solo na condição inundada

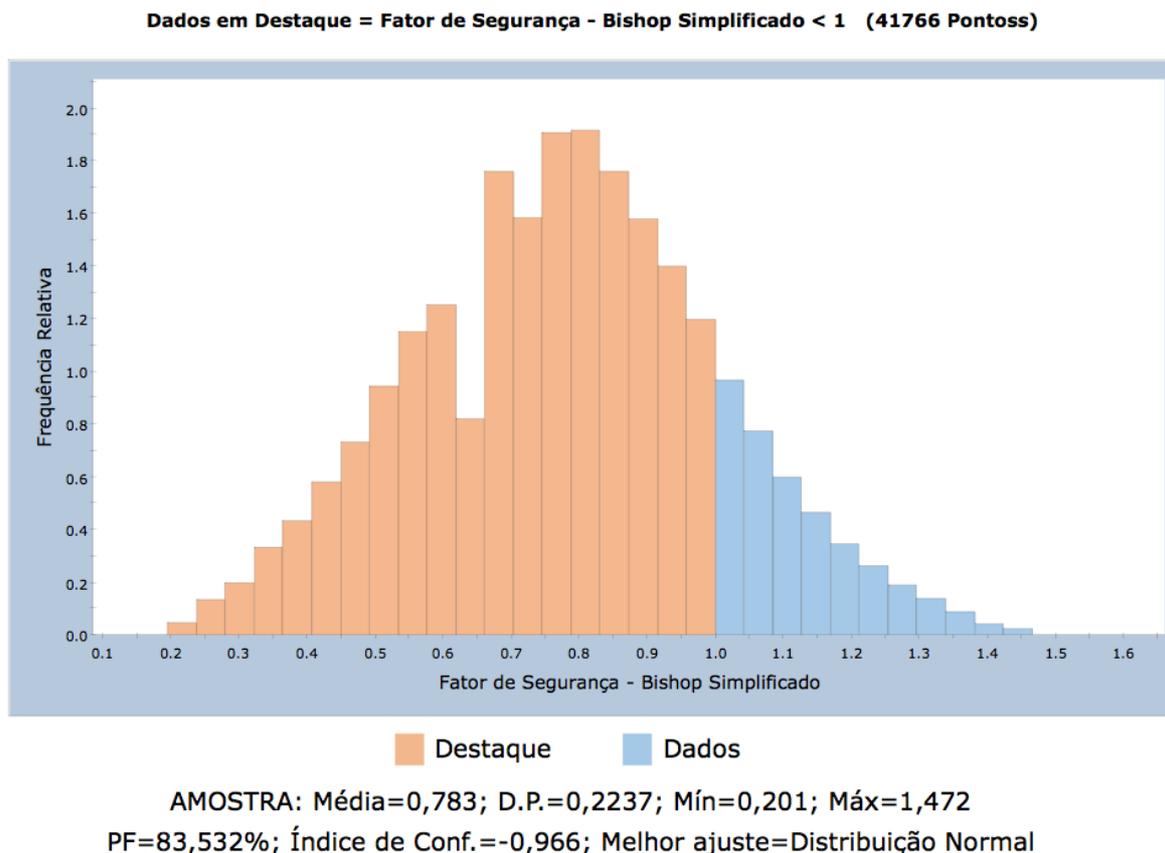


Figura 6.61 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V00).

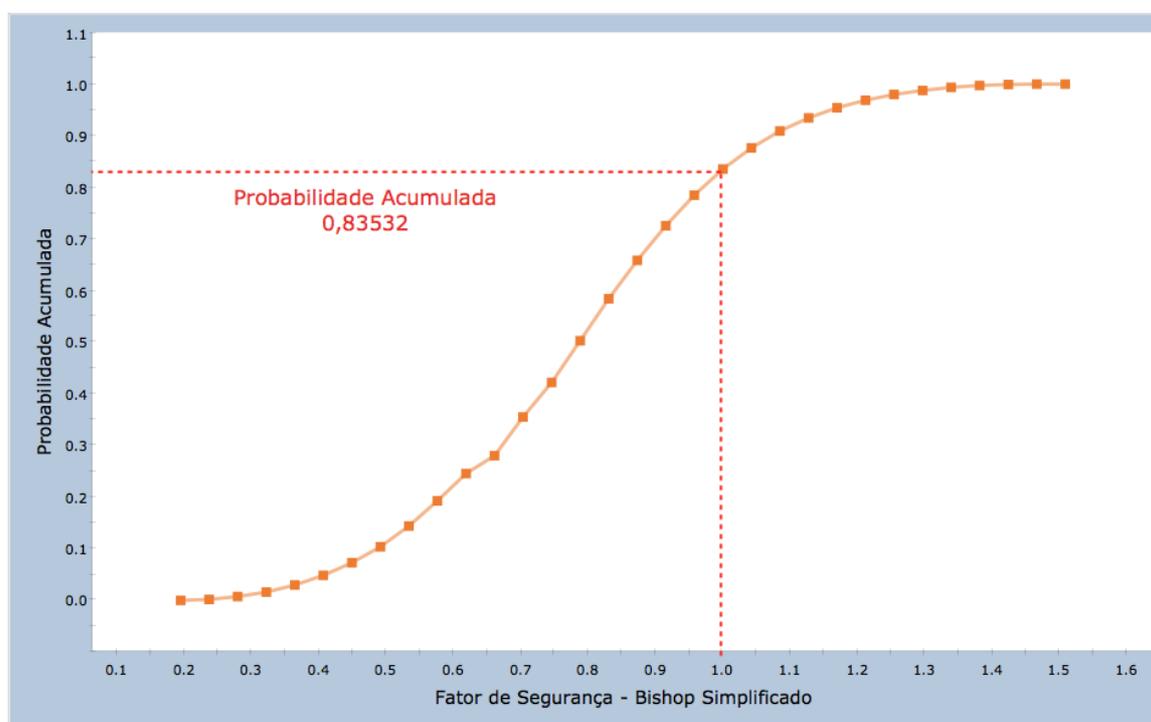


Figura 6.62 – Distribuição acumulada do Fator de Segurança (Sem variabilidade espacial). Destaque para a probabilidade acumulada até o FS = 1 (hipótese 09 V00).

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado < 1 (41766 Pontos)

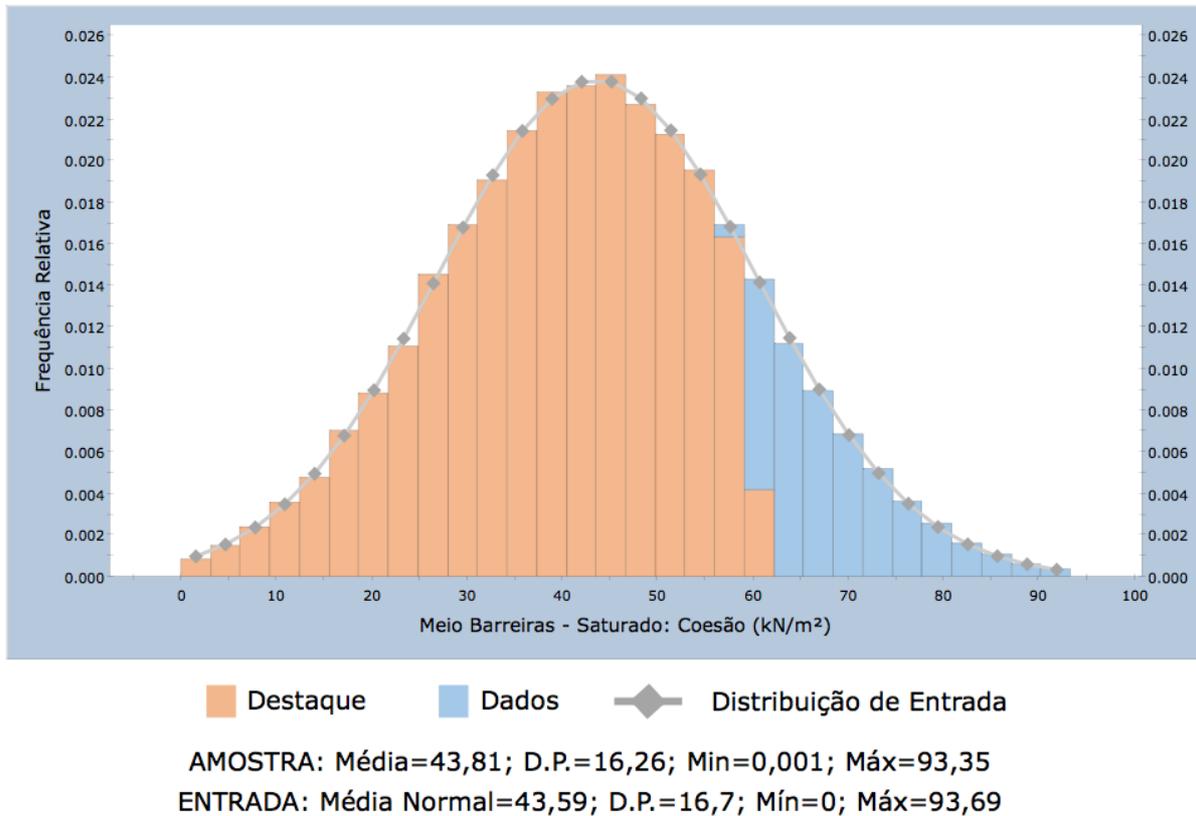


Figura 6.63 – Função distribuição de probabilidade da coesão da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 09).

Dados em Destaque = Fator de Segurança - Bishop Simplificado < 1 (41766 Pontos)

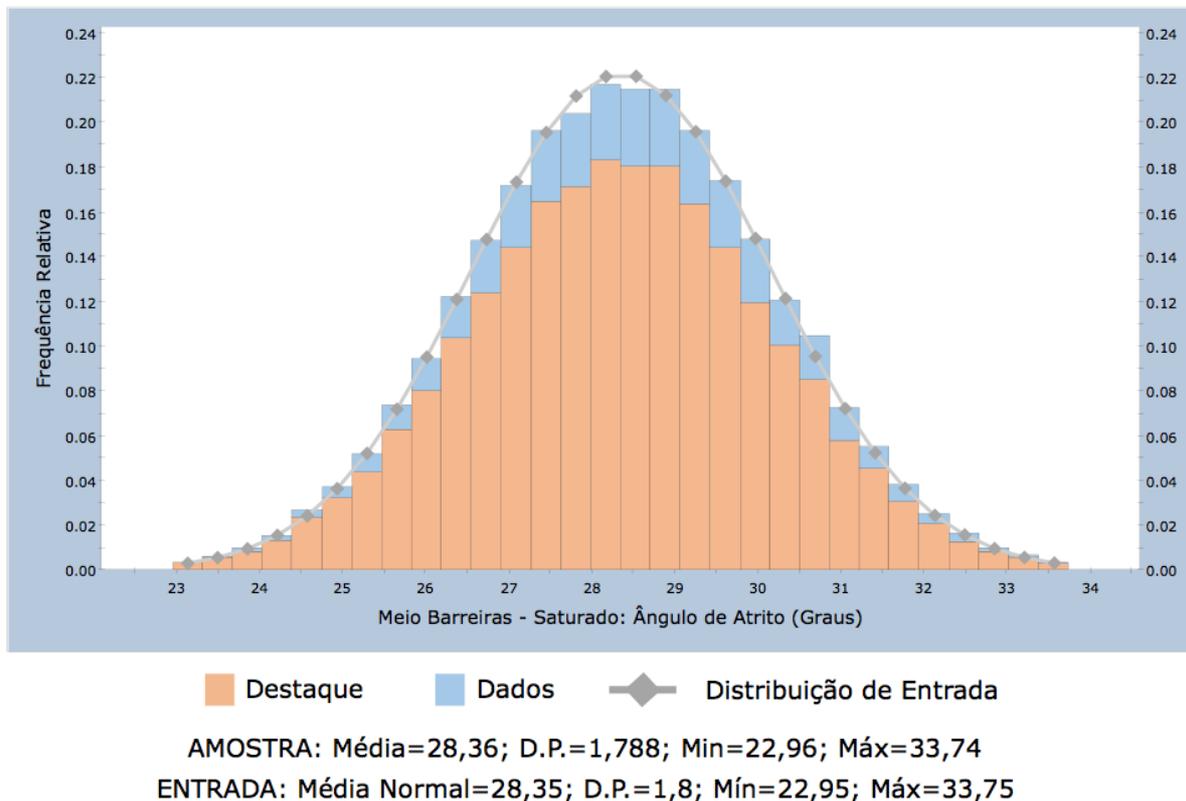


Figura 6.64 – Função distribuição de probabilidade do ângulo de atrito da camada de meio inundada. Em destaque, a faixa de valores que resultaram FS < 1 para o método de Bishop simplificado (hipótese 09).

Os resultados de todas as retroanálises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 09, estão sintetizados na Tabela 6.22. Como trata-se de uma retroanálise, o fator de segurança determinístico para todos os métodos se aproximaram de 1. A probabilidade de ruptura se aproximou de 82% para os métodos de Bishop simplificado e GLE / Morgenstern - Price. Por sua vez, através do método de Janbu corrigido a probabilidade de ruptura foi aproximadamente 53%.

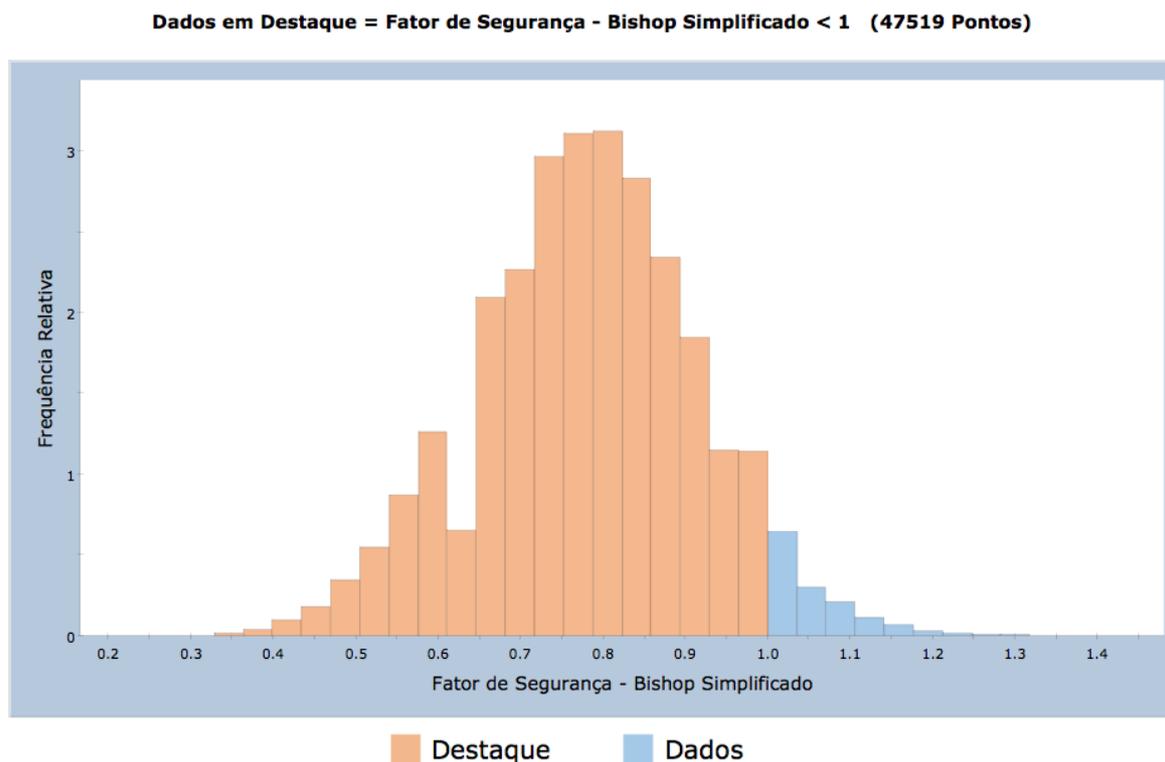
Diante desses resultados, julga-se que a falésia modelada representa bem umas das possíveis condições geotécnicas que promovem movimentos de massa. Os altos valores de probabilidade de ruptura e valores de fator de segurança médio abaixo da unidade indicam uma situação de instabilização do maciço para as condições atribuídas.

Tabela 6.22 Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Sem variabilidade).

Hipótese 09 V00 - Sem variabilidade espacial (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,320	53,063%	0,927	Janbu Corrigido
-0,966	83,532%	0,784	Bishop Simplificado
-0,428	82,268%	0,914	GLE / Morgenstern - Price

6.2.2.2 Resultados - Hipótese 09, V20 (Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$)

A hipótese 09 também foi avaliada considerando a heterogeneidade do material da falésia. O histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado, para a hipótese 09 com variabilidade espacial ($\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$) é apresentado na Figura 6.65. Os fatores de segurança mínimo e máximo obtidos são 0,27 e 1,33, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição normal. Não houve variação relacionada ao fator de segurança médio (igual a aproximadamente 0,781). A probabilidade de ruptura obtida para a retroanálise é de 95,038%.



AMOSTRA: Média=0,781; D.P.=0,1354; Mín=0,2716; Máx=1,332
 PF=95,038%; Índice de Conf.=-1,611; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.65 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V20).

A Figura 6.66 mostra duas das amostras obtidas para os parâmetros coesão e ângulo de atrito, com variabilidade espacial de 20 m nas duas direções ($\delta x = 20\text{m}$; $\delta y = 20\text{m}$). Observa-se a diferença na fronteira entre a camada do meio natural e inundada. Somente as camadas em que foram consideradas as variabilidades espaciais estão evidenciadas na figura.

Nesse caso, as amostras de número 68 e 79 retornam valores de fator de segurança entre 0,99 e 1. É nítido a predominância dos valores de coesão abaixo de 60kPa na camada do meio inundada (faixa em azul). A camada do meio na condição natural apresenta uma variação maior.

De forma geral, o ângulo de atrito da borda da falésia está em torno de 28° (faixa em verde). Na parte interna ocorre uma variação maior dos valores atribuídos para essas duas amostras.

Dentro desse contexto, a combinação da amostra 68.a (coesão), com a 68.b retorna um valor de fator de segurança próximo da unidade (Figura 6.66).

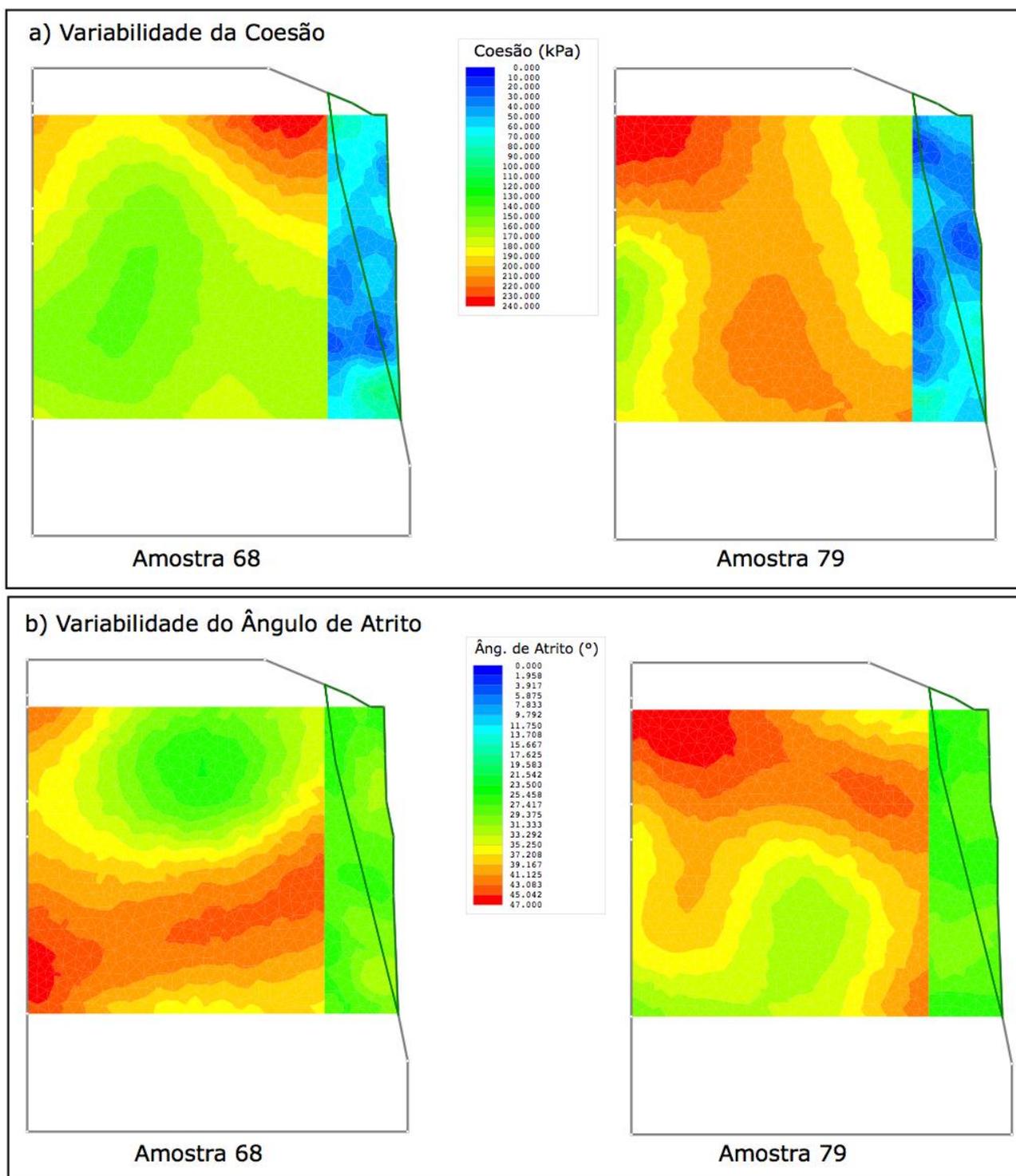


Figura 6.66 – Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\delta x = 20\text{m}$; $\delta y = 20\text{m}$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.

O resumo das retroanálises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 09 V20 ($\delta x = 20\text{m}$; $\delta y = 20\text{m}$) é exibido na Tabela 6.23. A probabilidade de ruptura se aproximou de 85% para o método de Bishop simplificado. O método de Janbu corrigido retornou a probabilidade de ruptura de aproximadamente 47%.

O método de GLE / Morgenstern - Price retornou valores equilibrados em comparação aos outros dois métodos (62,69%).

De forma geral, considerando a variabilidade espacial do material, percebe-se uma diminuição dos valores de probabilidade de ruptura. Esse fato é coerente, pois no modelo sem a variabilidade espacial, em algumas simulações toda a camadas pode assumir os menores valores dos parâmetros de resistência ao mesmo tempo.

Tabela 6.23 Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$).

Hipótese 09 V20 - Variabilidade $\delta x = 20m$; $\delta y = 20m$ (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
-0,060	47,687%	0,995	Janbu Corrigido
-1,02	84,988%	0,781	Bishop Simplificado
-0,245	62,692%	0,976	GLE / Morgenstern - Price

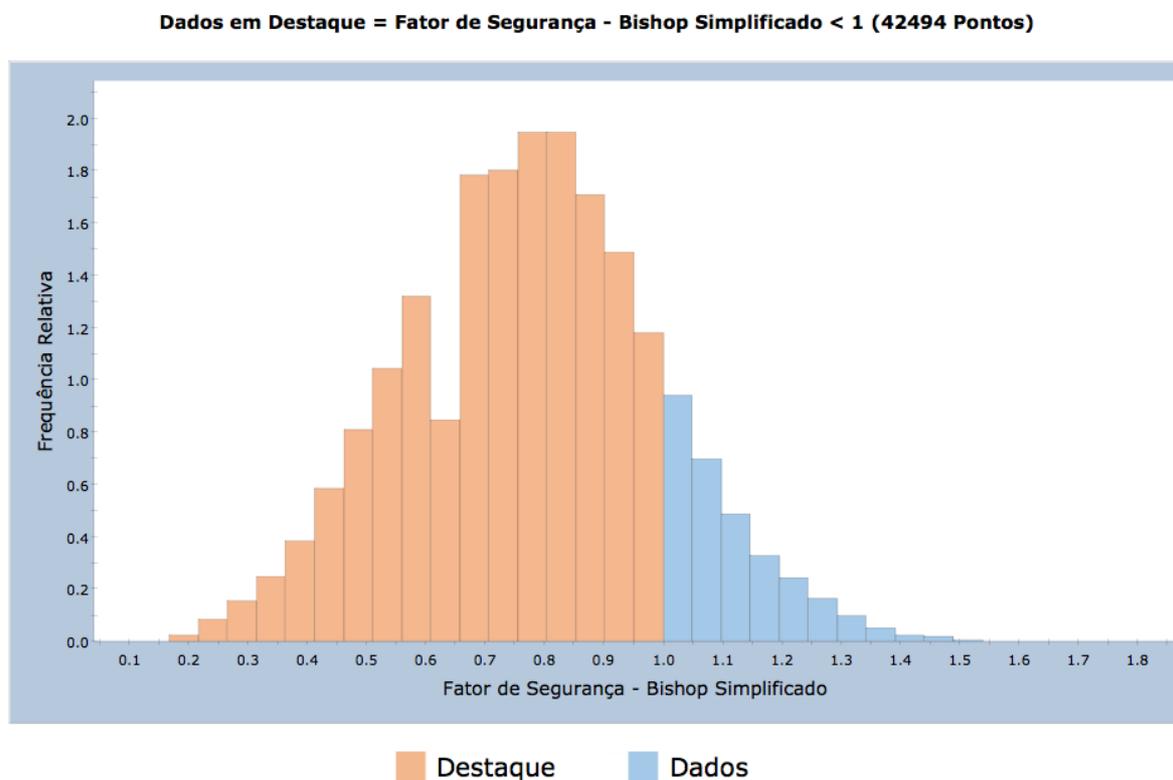
6.2.2.3 Resultados - Hipótese 09, V05 (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$).

O histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado, para a hipótese 09 V05 ($\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$) é apresentado na Figura 6.67. Os fatores de segurança mínimo e máximo obtidos são 0,17 e 1,64, respectivamente. Essa situação retornou uma dispersão maior nos resultados, com valores extremos de mínimos e máximos. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição normal. Não houve variação relacionada ao fator de segurança médio (igual a aproximadamente 0,78). A probabilidade de ruptura obtida para a retroanálise é de 84,988%.

A Figura 6.68 apresenta duas das possíveis amostras obtidas para os parâmetros coesão e ângulo de atrito, da camada do meio, com variabilidade espacial de 5m nas duas direções ($\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$). Para esse caso a variabilidade espacial do material é maior. Em outras palavras, quanto mais o valor da distância de correlação se aproxima de zero, mais heterogêneo é o solo em questão.

As amostras de número 42 e 95 retornam valores de fator de segurança entre 0,99 e 1 (Figura 6.68). Para a coesão na condição inundada, nas duas amostras, é possível perceber vários pontos em azul, ou seja, valores entre 0kPa e 70kPa. Por sua vez, esse

parâmetro na condição natural (parte interna da falésia), apresenta uma variação maior, inclusive com valores acima de 200kPa (faixa em vermelho).



AMOSTRA: Média=0,7807; D.P.=0,215; Mín=0,1758; Máx=1,645
 PF=84,988%; Índice de Conf.=-1,020; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.67 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V05).

O ângulo de atrito, para as duas amostras, apresenta uma variação próxima da média de 28° na extremidade da falésia (faixa em verde). No que tange a parte interna da falésia, a variação é maior, atingindo valores de 50° (faixa em vermelho).

Vale salientar que dentro desse contexto, a combinação das amostras do lado esquerdo da Figura 6.68 resulta numa amostra com fator de segurança entre 0,99 e 1,0. Para o lado direito da figura (amostra 95), o raciocínio segue de forma análoga.

A Tabela 6.24 apresenta o resumo das retroanálises probabilísticas, realizadas por diferentes métodos de equilíbrio limite para a hipótese 09 V05 ($\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$). No geral o padrão identificado anteriormente se repete. A maior probabilidade de ruptura foi obtida mediante o método de Bishop simplificado. Enquanto que através do método de Janbu corrigido a probabilidade de ruptura é a menor entre os três métodos. GLE / Morgenstern - Price retornou valor intermediário de probabilidade de ruptura em comparação aos outros dois métodos.

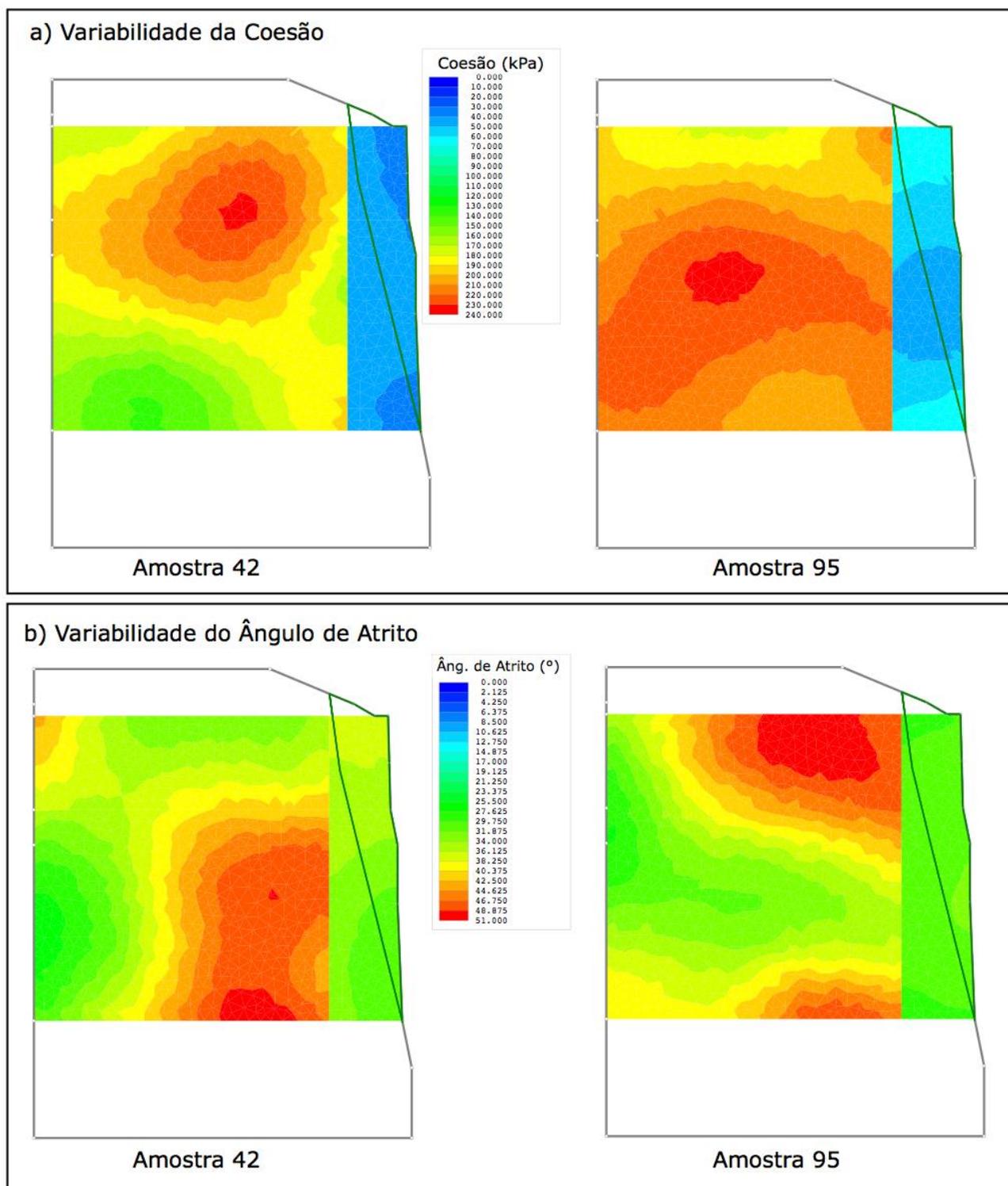


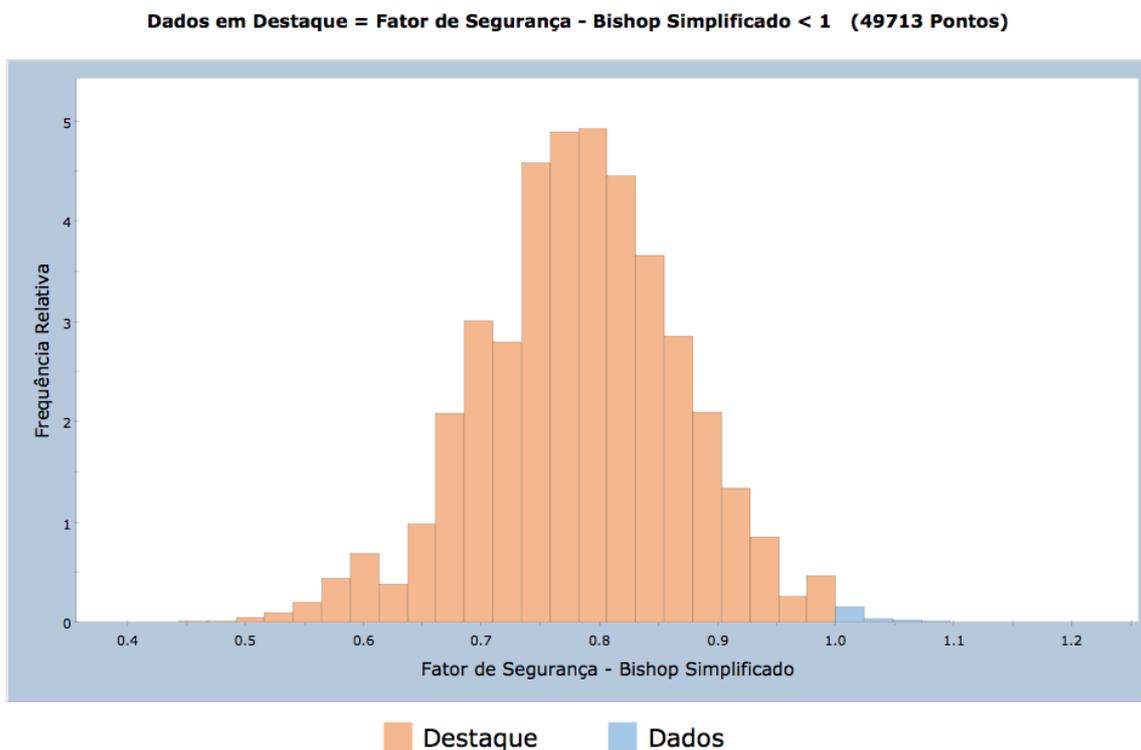
Figura 6.68 – Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\delta x = 5\text{m}$; $\delta y = 5\text{m}$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.

Tabela 6.24 Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$).

Hipótese 09 V05 - Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$ (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
0,106	48,083%	1,003	Janbu Corrigido
-1,612	95,038%	0,782	Bishop Simplificado
-0,543	66,488%	0,986	GLE / Morgenstern - Price

6.2.2.4 Resultados - Hipótese 09, V02 (Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$)

O histograma do fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado, para a hipótese 09 V02 ($\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$) é apresentado na Figura 6.69. Os fatores de segurança mínimo e máximo obtidos são 0,43 e 1,165, respectivamente. O melhor ajuste obtido para o histograma foi por meio da distribuição normal.



AMOSTRA: Média=0,7838; D.P.=0,085; Mín=0,439; Máx=1,165
 PF=99,426%; Índice de Conf.= -2,521; Melhor ajuste=Distribuição Normal

Figura 6.69 – Histograma de frequência do fator de segurança considerando obtida pelo método de Bishop simplificado. Melhor ajuste obtido por meio da distribuição normal (hipótese 09 V05).

A Figura 6.70 apresenta duas das possíveis amostras obtidas para os parâmetros coesão e ângulo de atrito, com variabilidade espacial de 2m nas duas direções ($\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$).

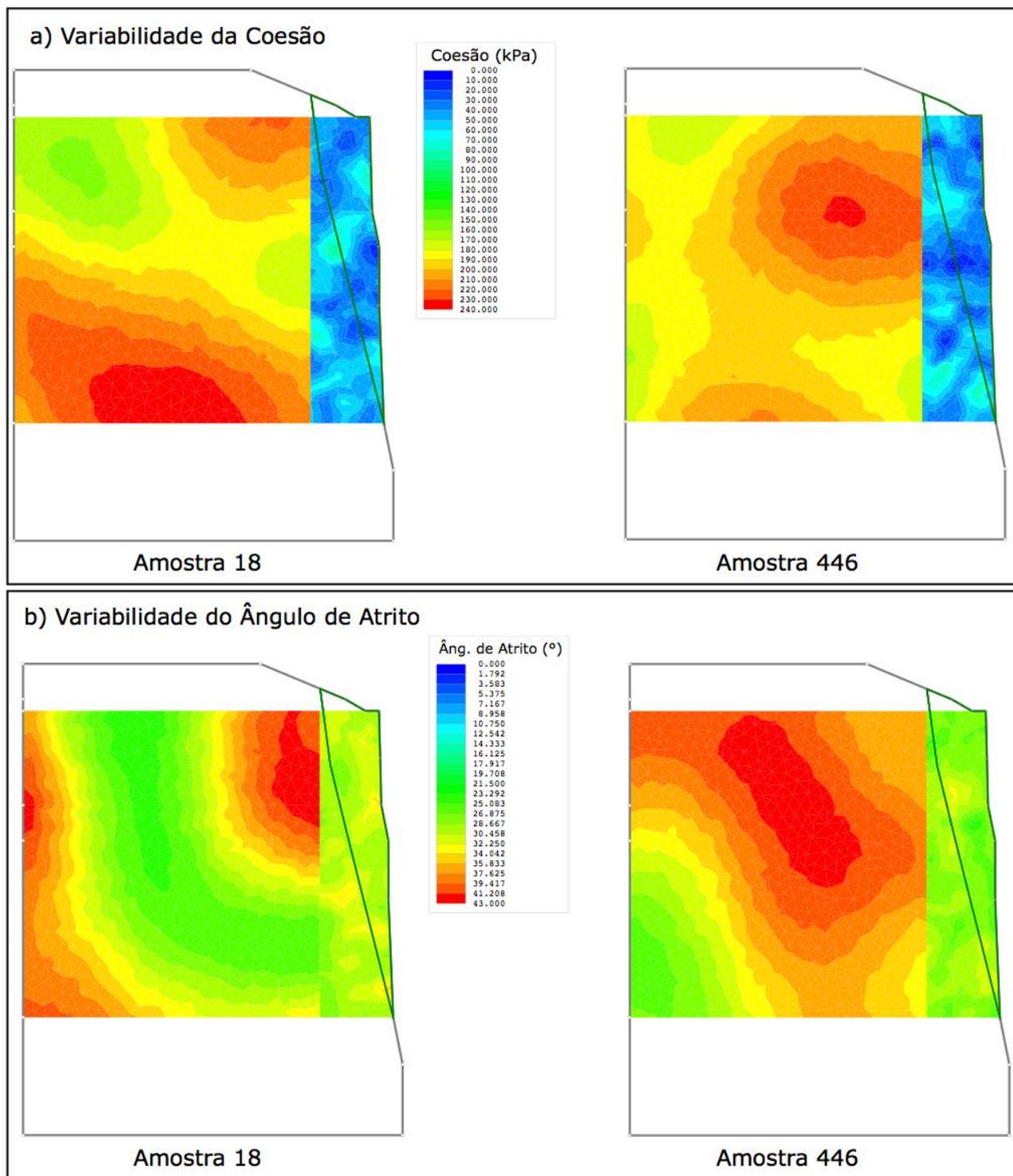


Figura 6.70 – Variabilidade espacial dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da camada de meio (Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$). Duas das possíveis amostras obtidas que resultam fatores de segurança entre 0,99 e 1.

Com a distância de correlação em 2m, o material apresenta maior heterogeneidade. As amostras de número 18 e 446 retornam valores de fator de segurança entre 0,99 e 1. Os gráficos do lado esquerdo da Figura 6.70 (coesão), apresenta vários pontos em azul (0kPa e 60kPa) nas bordas. Conforme os exemplos anteriores, a parte interna da falésia apresenta uma variação maior, com valores mais expressivos de coesão. Os gráficos do ângulo de atrito demonstram comportamento similar. Nas bordas, os valores são mais baixos e próximos à média do parâmetro. Enquanto que na parte interna (condição natural) o ângulo de atrito apresenta quantidade expressiva de valores acima da média (pontos em vermelho).

A combinação da amostra 18.a (coesão), com a 18.b (ângulo de atrito) retorna um valor de fator de segurança próximo entre 0,99 e 1. Segue essa mesma lógica a amostra número 446 (Figura 6.70). Apesar de a maioria dos valores dos parâmetros de resistência distribuídos na camada do meio, situarem-se na média ou acima, essas simulações retornam condições de instabilidade.

A Tabela 6.25 exibe o resumo das retroanálises probabilísticas, realizadas por três métodos de equilíbrio limite para a hipótese 09 V02 ($\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$). De forma geral, o padrão relacionado às probabilidades de ruptura para os três métodos se repete.

Tabela 6.25 Hipótese 09: Resumo dos resultados obtidos nas retroanálises probabilísticas (Variabilidade $\delta x = 5m$; $\delta y = 5m$).

Hipótese 09 V02 - Variabilidade $\delta x = 2m$; $\delta y = 2m$ (Superfície Não Circular)			
Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura (%)	FS - Média (Probabilístico)	Método Determinístico
0,149	45,937%	1,004	Janbu Corrigido
-2,522	99,426%	0,784	Bishop Simplificado
-0,478	64,121%	0,988	GLE / Morgenstern - Price

6.2.3 Síntese dos Resultados Obtidos nas Retroanálises Probabilísticas

As retroanálises probabilísticas executadas permitiram determinar os possíveis valores dos parâmetros de resistência, os quais resultariam em altas probabilidades de ruptura da falésia localizada na praia de Barra de Tabatinga/RN. Ressalta-se que para isso ocorrer, as condições geotécnicas locais precisariam se encontrar especificamente como estabelecido nas hipóteses 08 e 09.

A faixa de valores foi obtida para os cenários em que cada camada de solo foi considerada homogênea. Para a hipótese 08 foi obtida a seguinte relação linear entre coesão e ângulo de atrito da camada do meio (equação 4.1):

$$\text{Coesão} = -0,6 \times \text{Ângulo de atrito} + 84,58 \quad (4.1)$$

Em que o ângulo de atrito varia de 24° a 33° e coesão de 64kPa a 70kPa. Dessa forma, qualquer par de valores na equação 4.1, dentro do intervalo definido, resulta num fator de segurança entre 0,99 e 1,0.

De forma análoga, na hipótese 09 também foi possível obter uma relação linear entre os parâmetros de resistência para a camada de meio na condição inundada, conforme segue (equação 4.2):

$$\text{Coesão} = -0,5 \times \text{Ângulo de atrito} + 73,89 \quad (4.2)$$

Em que o ângulo de atrito varia de 23° a 34° e coesão de 57kPa a 62,5kPa. Dessa forma, qualquer par de valores na equação 4.2, dentro do intervalo definido, resulta num fator de segurança entre 0,99 e 1,0.

Diante desses resultados, nota-se que os valores de coesão são mais baixos na hipótese 09 do que na hipótese 08. Essa constatação é razoável, uma vez que foi adotado para a hipótese 08 que toda a camada do meio encontra-se na condição inundada. Diferentemente ao aplicado na hipótese 09, em que existe parcela da camada do meio na condição natural contribuindo para a estabilização da falésia.

As retroanálises probabilísticas também proporcionaram resultados da probabilidade de ruptura da falésia, de acordo com a superfície de ruptura adotada. O resumo dos resultados de todas as retroanálises realizadas, considerando diferentes características dos materiais e o perfil identificado na área que ocorreu o movimento de massa na praia de Barra de Tabatinga, é apresentado nas Figuras 6.71 e 6.72. Diante dos resultados nota-se uma diferença significativa nos resultados de probabilidade de ruptura entre os métodos.

Todos os diferentes cenários, relacionados à variabilidade dos solos, modelados para a hipótese 08, retornaram probabilidades de ruptura entre 42% a 99%. Esses valores de probabilidade de ruptura são elevados e, portanto, constata-se que a falésia tem grandes possibilidades de romper (Figura 6.71).

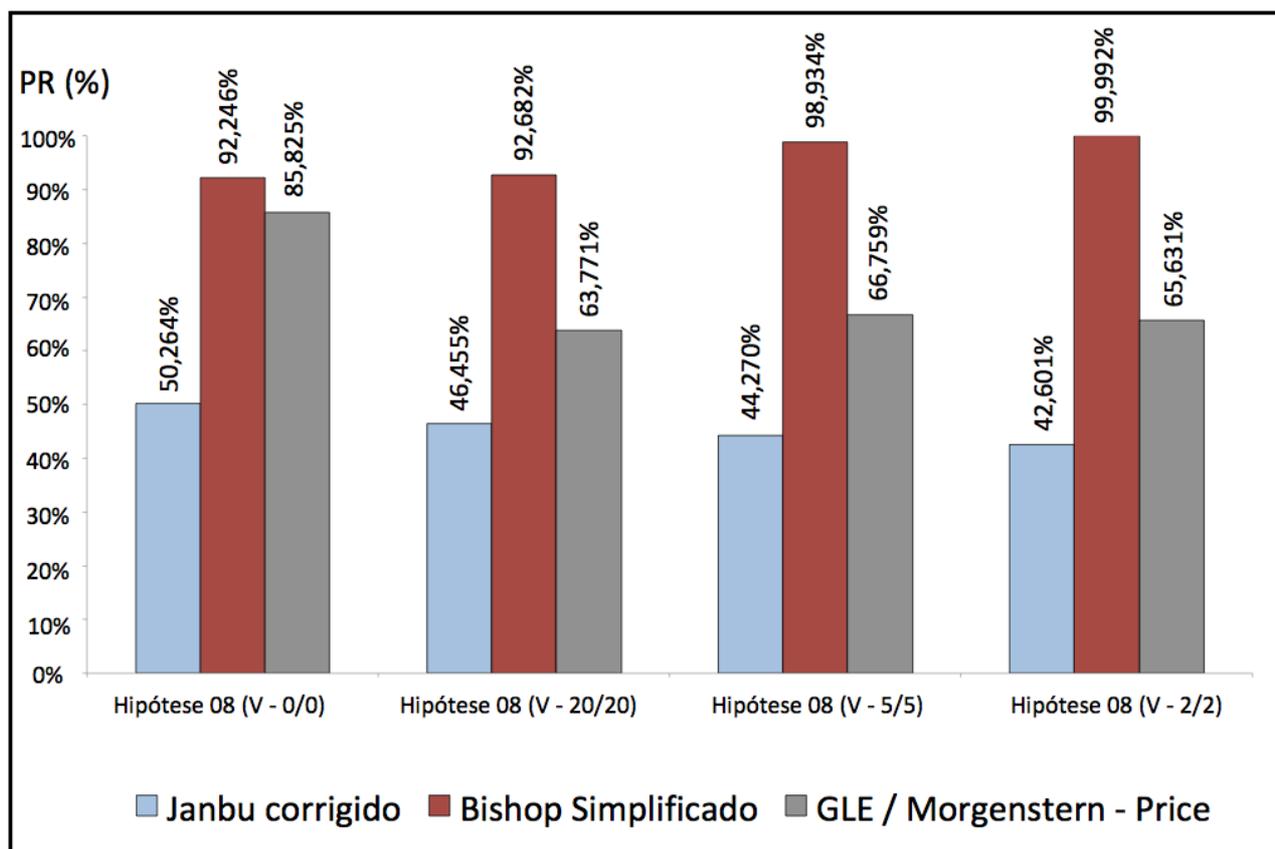


Figura 6.71 – Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as retroanálises da hipótese 08.

No tocante à hipótese 09, os resultados alcançados mostram situação similar. As probabilidades de ruptura variam de 45% a 99%. Dessa forma, a probabilidade de instabilização da falésia modelada é expressiva (Figura 6.72).

De forma geral, para as duas hipóteses, o método de Bishop simplificado resultou nas maiores probabilidades de ruptura. Por outro lado, o método de Janbu corrigido retornou os valores mais baixos de probabilidade de ruptura. O método de GLE / Morgenstern – Price resultou em valores intermediários de probabilidade de ruptura. Ademais, não foi identificado nenhum padrão na variação das probabilidades de ruptura associadas à variabilidade espacial dos solos.

A evolução da probabilidade de ruptura obtida para a hipótese 08, através do método de Janbu corrigido, demonstra o padrão mais próximo do esperado (Figura 6.71). Em outros termos, a probabilidade de ruptura mais alta ocorre para a falésia sem variabilidade do solo e, à medida que a distância de correlação se aproxima de zero, a probabilidade diminui. Exceto para o método de Bishop simplificado, essa diminuição na probabilidade de ruptura é perceptível na transição da hipótese sem variabilidade para a com variabilidade de 20m nas duas direções ($\delta x = 20\text{m} / \delta y = 20\text{m}$).

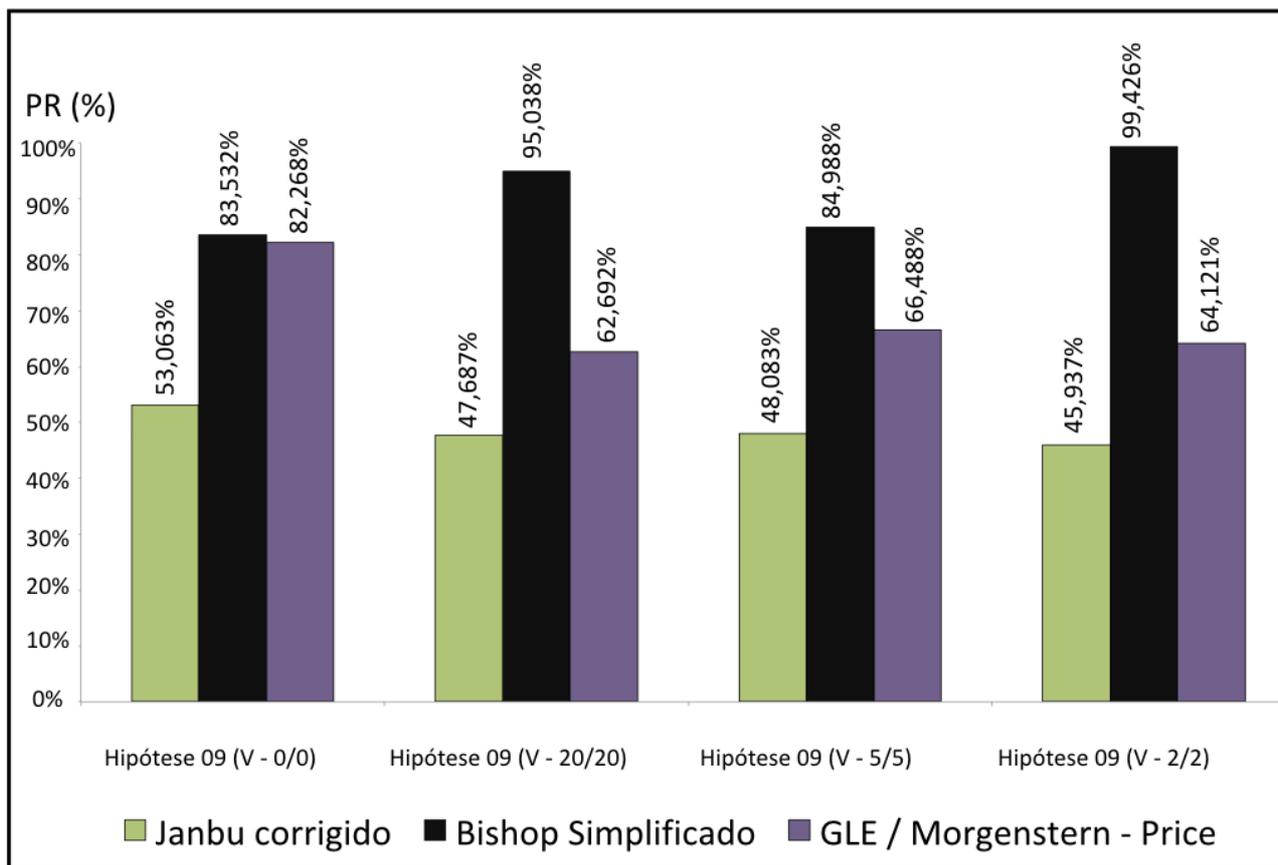


Figura 6.72 – Resumo das probabilidades de ruptura obtidas para as retroanálises da hipótese 09.

Com relação aos fatores de segurança médios por método, não foi observado variações significativas, conforme ocorre a alteração da variabilidade do solo. Porém, comparando-se os 3 métodos, a variação do fator de segurança é considerável, sobretudo entre Bishop simplificado e os outros dois. O método de Bishop simplificado retorna sempre valores mais baixos de fator de segurança para as hipóteses analisadas.

Ressalta-se que apesar das duas hipóteses retornarem valores altos de probabilidade de ruptura, não significa que necessariamente a falésia nessa mesma condição romperia. Esse fato revela que para condições similares as chances de ocorrer movimentos de massa são grandes, conforme ocorreu para esse caso.

As condições geotécnicas atribuídas para essas duas hipóteses são plausíveis de se encontrar em campo, sobretudo a apresentada através da hipótese 09.

A forma das superfícies de ruptura indicadas nas hipóteses 01 e 04 são muito profundas e englobam os solos das camadas de topo até a base. Entretanto, esse comportamento é incompatível com a realidade das falésias localizadas no litoral do Rio Grande do Norte. Inclusive, esse fato é constatado através de observações de campo e análises de estabilidade realizadas em trabalho anteriores, em outras áreas de falésias no

litoral do estado (Severo, 2005; Souza Jr., 2013; Ribeiro, 2015; Silva *et al.*, 2016; Taquez *et al.*, 2016; Barbosa, 2017; Taquez, 2017). Não existem registros de movimentos de massa com uma superfície de ruptura de grande profundidade. Esse argumento reforça que dentro das condições geotécnicas atribuídas para as hipóteses analisadas, as probabilidades de essas falésias romperem são baixas.

As hipóteses 02, 03, 05, 06, 07 e as retroanálises (08 e 09), mostram superfícies de ruptura mais rasas, abrangendo somente as camadas saturadas e situadas mais próximas do topo das falésias. Todos esses modelos apresentaram altas probabilidades de ruptura e fatores de segurança abaixo da unidade. Essas análises estão em concordância com o comportamento observado em campo e também com os resultados apresentados nos trabalhos realizados por Severo (2005), Taquez *et al.* (2016), Taquez (2017).

Dentro desse contexto, apesar de as análises não considerarem os movimentos de massa dos tipos quedas e tombamentos, os quais ocorrem com maior frequência na área de estudo, os resultados apresentados estão de acordo com que se observa na prática. Além disso, as retroanálises probabilísticas de Monte Carlo representam uma forma mais ampla de avaliação das condições de estabilidade. Outrossim, esse método retorna de forma mais completa os possíveis pares de valores de coesão e ângulo de atrito que resultam na ruptura da falésia ($FS < 1$).

CAPÍTULO 7

Conclusões e Recomendações

7.1 Conclusões e contribuições

O processo de recuo costeiro observado na área de estudo é cíclico e dinâmico. Através dos processos erosivos devidos tanto às chuvas quanto ao impacto das ondas na base das falésias.

A ação das ondas e das chuvas podem ser consideradas os principais mecanismos identificados no litoral Oriental do Estado do RN. Observa-se que os movimentos de massa ocorrem principalmente pelo aumento da inclinação das falésias e surgimento de esforços de tração na borda da falésia, devido à ação direta das ondas. Esse fato é somado com a frente de umedecimento do material através das chuvas, onde a parcela de coesão do material, derivada da sucção é eliminada e diminui a capacidade resistente das falésias. Ainda existe a influência das fendas de tração observadas nas bordas das falésias. Essas fendas quando preenchidas com água resulta em cargas de tração no interior do maciço de solo. Por isso, a maioria dos movimentos de massa ocorre nos períodos chuvosos.

A taxa de ocorrência desse processo dependerá de diversos fatores correlacionados, que contribuem para a ocorrência dos movimentos de massa, tais como: resistência dos materiais, morfologia das falésias, ação das águas das chuvas e marés, ocorrência da vegetação e ação antrópica. À medida que os processos erosivos e movimentos de massa ocorrem, a influência dos parâmetros de controle muda. Os modos de ruptura identificados na área de estudo são principalmente quedas e tombamentos.

O presente trabalho realizou a análise e tratamento estatístico dos dados, obtidos anteriormente, referentes aos parâmetros de resistência dos solos da Formação Barreiras do litoral do Rio Grande do Norte. Os dados foram separados por camadas constituintes das falésias, segundo critérios adotados nesse estudo. Foram adotadas distribuições de probabilidade do tipo normal para as variáveis aleatórias adotadas (coesão e o ângulo de atrito). A função normal foi utilizada devido a sua versatilidade e facilidade de aplicação,

além de representar uma boa solução para casos em que não existem muitos dados relacionados aos parâmetros.

Por meio das análises de estabilidade probabilísticas, foi possível verificar que a probabilidade de ruptura é elevada para a maioria das hipóteses avaliadas (02, 03, 05, 06, 07, 08). Mesmo para os casos em que a maior parte dos solos se encontra na condição natural, existe probabilidade de ruptura associada (hipóteses 01 e 04). Para esses casos, comparando-se as probabilidades de ruptura com valores propostos na literatura, a falésia apresenta desempenho de aceitável à pobre / abaixo da média.

O aumento das probabilidades de ruptura conforme ocorre a evolução da frente de umedecimento na camada de topo da falésia, evidencia a intensificação de casos de movimentos de massa em chuvas longas.

As superfícies de ruptura mais próximas da realidade observada em campo foram obtidas nas análises que consideraram os solos na condição inundada. As hipóteses que resultaram em formas superfícies de ruptura mais profundas retornaram valores de probabilidades de ruptura próximas de zero (0,17% a 0,42%).

No que se refere aos resultados de fatores de segurança determinístico e médio, de forma geral, a variação não é expressiva. Os valores do fator de segurança determinístico e médio para a superfície de ruptura não circular são ligeiramente menores, quando comparados com os valores obtidos para superfícies circulares.

Nas retroanálises probabilísticas obtiveram-se os valores dos parâmetros de resistência no instante da ruptura ($0,99 < FS < 1,0$). Os pares obtidos foram relativamente próximos para as duas hipóteses avaliadas. Ambos os casos resultaram numa relação linear entre a coesão e o ângulo de atrito. Para a hipótese 08, o ângulo de atrito encontrado varia de 24° a 33° e a coesão de 64kPa a 70kPa. De forma semelhante, para a hipótese 09, o ângulo de atrito encontrado varia de 23° a 34° e a coesão de 57kPa a 62,5kPa. Destaca-se que as condições geotécnicas atribuídas para essas duas situações são plausíveis de se encontrar em campo, sobretudo a apresentada através da hipótese 09.

As retroanálises probabilísticas também proporcionaram resultados da probabilidade de ruptura da falésia, de acordo com a superfície de ruptura adotada. Diante dos resultados nota-se uma diferença significativa nos resultados de probabilidade de ruptura obtidos mediante os 3 métodos. As probabilidades de ruptura variam de forma geral de 42% a 99%, para os dois cenários modelados. Considerando uma situação de

encosta com fenda de tração preenchida com água, esse estudo mostra que as probabilidades de ruptura variam de 45% a 99% (hipótese 09). Esse resultado evidencia que em condições similares a probabilidade de ocorrer um movimento de massa nessa falésia é alta.

Os resultados obtidos através das hipóteses considerando a variabilidade espacial dos solos não são conclusivos. O comportamento esperado, na transição do cenário sem variabilidade dos solos para a situação com variabilidade, ficou evidente somente para os métodos de Janbu corrigido e GLE/Morgenstern - Price.

De forma geral, para as duas hipóteses, o método de Bishop simplificado resultou nas maiores probabilidades de ruptura. Por outro lado, o método de Janbu corrigido retornou os valores mais baixos de probabilidade de ruptura. O método de GLE / Morgenstern – Price resultou em valores intermediários de probabilidade de ruptura. Ademais, não foi identificado nenhum padrão na variação das probabilidades de ruptura associadas à variabilidade espacial dos solos.

Em geral, as análises de sensibilidade indicaram uma influência mais acentuada associada ao parâmetro coesão, sobretudo da camada na condição saturada.

A análise de estabilidade de taludes é função de diversos fatores. A variabilidade inerente das propriedades dos solos, como coesão, ângulo de atrito, representam incertezas que não são levadas em consideração no cálculo tradicional. A utilização dos métodos determinísticos em conjunto com uma abordagem probabilística, proporciona um critério mais confiável para avaliação das condições de estabilidade. A principal contribuição desse estudo é o aperfeiçoamento das análises de estabilidade das falésias da Formação Barreiras, através de fatores de estabilidade probabilísticos. Porém, é importante salientar que nem todas as incertezas são computadas nessas análises probabilísticas. A parcela relacionada às mudanças temporais nas condições do ambiente é difícil de prever.

Outra contribuição desse estudo é o tratamento estatístico dos dados da Formação Barreiras, o qual constitui importante referência local para estudos futuros e aplicações práticas, localizados em encostas da Formação Barreiras com características semelhantes.

Identificar condições limites de estabilidade para as falésias da Formação Barreiras, baseadas nas mudanças do ambiente e dos principais parâmetros que controlam o processo, representa um importante passo para auxiliar no controle de riscos

costeiros e políticas de uso e ocupação do solo. Além disso, estudos dessa natureza colaboram para a avaliação das implicações práticas do crescimento desordenado de áreas costeiras.

7.2 Recomendações

Com a realização do tratamento estatístico dos dados foi verificado grande dispersão nos parâmetros de resistência. Essa dispersão foi intensificada devido à pequena quantidade de dados, após a divisão das camadas constituintes da falésia. Dessa forma, sugere-se que esse banco de dados seja constantemente atualizado, mediante a adição de novos resultados de ensaios em pesquisas futuras.

Em face dos resultados não conclusivos relacionados às retroanálises considerando a variabilidade espacial dos solos, recomenda-se novos estudos em análises de estabilidade através dessa abordagem. Adicionalmente, sugere-se a realização de estudo com vistas a determinar, de forma aproximada, a variabilidade espacial dos parâmetros de resistência dos solos da Formação Barreiras.

Diante das análises probabilísticas realizadas sem considerar a presença de fluxo de água, recomenda-se também, a avaliação das condições de estabilidade das falésias da Formação Barreiras, levando-se em consideração o avanço da frente de umedecimento (fluxo transiente), mediante a utilização da abordagem probabilística.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009). **NBR 11682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2009 .
- ALONSO, E. (1976). **Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays**. *Geotechnique*, 26(3), 453–472.
- AMARO, V. E., SANTOS, M. S. T., SOUTO, M. V. S. (2012). **Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. Versão do Autor, 120p. book, ISBN 978-85-913746-0-1.
- AUGUSTO FILHO, O. (1992). **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas. Anais... Rio de Janeiro, V. 2. P. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. (1998). **Estabilidade de Taludes**. Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo, 243-269.
- BARBOSA, N. M. (2017). **Estabilidade das falésias da Barreira do Inferno – RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- BISHOP, A. W. (1955). **The use of the slip circle in the stability analysis of slopes**. *Geotechnique*, Great Britain, v. 5, n.1, p.7-17.
- BRAGA, K.G. (2005). **O uso de checklist na identificação de processos erosivos costeiros**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- CASSIDY, M. J., UZIELLI, M., E LACASSE, S. (2008). **Probability risk assessment of landslides: A case study at Finneidfjord**. *Can. Geotech. J.*, 45(9), 1250–1267.
- CHO S.E. (2010). **Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties**. *J Geotech Geoenviron Eng (ASCE)* 2010;136(7):975–84.
- CHOWDHURY, R., E XU, D. (1995). **Geotechnical system reliability of slopes**. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 47(3), 141–151.
- CHOWDHURY, R., E FLENTJE, P. (2003). **Role of slope reliability analysis in landslide risk management**. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 62(1), 41–46.
- CHRISTIAN, J., LADD, C., E BAECHER, G. (1994). **Reliability applied to slope stability analysis**. *J. Geotech. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733 -9410(1994)120:12(2180), 2180–2207.

- COLLINS, B. D.; SITAR, N. (2011). **Stability of steep slopes in cemented sands**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 137, n. 1, p. 43-51.
- CORPS OF ENGINEERS (1997). **Engineering and Design Introduction to Probability and Reability Methods for Use in Geotechnical Engineering**. Engineering Technical Letter N 1110-2-547, Department of the Army, U. S., Washington, DC.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. (1996). **Landslides types and processes**. Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247: 36-75.
- DEGROOT, D. J.; BAECHER, G. B. (1993). **Estimating autocovariance of in-situ soil properties**. Journal of Geotechnical Engineering - ASCE 119 (1), 147 - 166.
- DEUTSCH, C. V. (1996). **Constrained modeling of histograms and cross plots with simulated annealing**. Technometrics, 38, (3): 266-274.3
- DINIZ, R. F. (2002). **A Erosão Costeira ao Longo do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte: Causas, Consequências e Influências nos Processos de Uso e Ocupação da Região Costeira**. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências – UFBA, Salvador.
- DUNCAN, J. (2000). **Factors of safety and reliability in geotechnical engineering**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)1090 -0241(2000)126:4(307),307–316.
- EL-RAMLY, H. (2001). **Probabilistic Analyses of Landslide Hazards and Risks: Bridging Theory and Practice**. PhD. Thesis, University of Alberta, Canada.
- EL-RAMLY, H., MORGENSTERN, N., E CRUDEN, D. (2002). **Probabilistic slope stability analysis for practice**. Can. Geotech. J., 39(3), 665–683.
- FELLENIUS, W. (1936). **Calculation of stability of earth dams**. Congress on Large Dams, 2. v. 4, Washington, p.445-463.
- GAO, W. (2015). **Slope stability analysis based on immunised evolutionary programming**. Environmental Earth Sciences, 3357–3369.
- GEO. (2000). **HIGHWAY SLOPE MANUAL**. Hong Kong: Hong Kong SAR Government.
- GERSCOVICH, D. (2012). **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos.
- GONG W.P., WANG L., KHOSHNEVISAN S., JUANG C.H., HUANG H.W., E ZHANG J. (2015). **Robust geotechnical design of earth slopes using fuzzy sets**. J Geotech Geoenviron Eng (ASCE) 2015;141(1):1–9.
- GRIFFITHS, D., E FENTON,G.A. (2004). Probabilistic slope stability analysis by finite elements. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)1090 -0241(2004)130:5(507),507–518.
- GRIFFITHS, D. V., HUANG, J., FENTON, G. A. (2009). **Influence of Spatial Variability on Slope Reliability Using 2-D Random Fields**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 10.

- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M (1983). **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blucher.
- HASSAN A.M., E WOLFF TF. (1999). **Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes**. *J Geotech Geoenviron Eng (ASCE)*;125(4):301–8.
- HUANG, J., LYAMIN, A. V., GRIFFITHS, D. V., KRABBENHOFT, K., AND SLOAN, S. W. (2013). **Quantitative risk assessment of landslide by limit analysis and randomfields**. *Comput. Geotech.*, 53, 60–67.
- HUNGR, O.; LEROULEIL, S.; PICARELLI, L (2014). **The Varnes classification of landslide types, an update**. *Landslides*, v. 11, n. 2, p. 167-194.
- HUTCHINSON, J. N. (1968). **Mass movement**. In: *Encyclopedia of Geomorphology*. Nova York: Fairbridge Reinhold Book.
- JAHANFAR, A., GHARABAGHI, B., MCBEAN, E. A., E DUBEY, B. K. (2017). **Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: A Probabilistic Approach**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(8), 4017035.
- JI, J.; ZHANG, C.; GAO, Y.; KODIKARA, J. (2017). **Effect of 2D spatial variability on slope reliability: A simplified FORM analysis**. *Geoscience Frontiers* (1-9).
- JIANG, S. H., LI, D. Q., CAO, Z. J., ZHOU, C. B., E PHOON, K. K. (2014). **Efficient System Reliability Analysis of Slope Stability in Spatially Variable Soils Using Monte Carlo Simulation**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(2), 1–13.
- JIMENEZ-RODRIGUEZ R., SITAR N., CHACÓN J. (2006). **System reliability approach to rock slope stability**. *Int J Rock Mech Min Sci* 2006;43(6):847–59.
- JONES, D. R. V. E DIXON, N. (2003). **Stability of Landfill Lining Systems: Literature Review**. Environment Agency Research and Development Project P1-385, Report 1, 219 pp.
- LIANG, R., NUSIER, O., E MALKAWI, A. (1999). **A reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dams**. *Eng. Geol.*, 54(3), 271–285.
- LADD, C. C.; DASCAL, O.; LAW, K. T.; LEFEBRVE, G.; LESSARD, G.; MERSI, G.; TAVENAS, F. (1983). **Report of the subcommittee on embankment stability-annex II**. Committee of Specialists on Sensitive Clays on the NBR Complex. Society d’Energie de la Base James, Monstreal, Quebec, Canada.
- LI, A. J., CASSIDY, M. J., WANG, Y., MERIFIELD, R. S., E LYAMIN, A. V. (2012). **Parametric Monte Carlo studies of rock slopes based on the Hoek–Brown failure criterion**. *Comput. Geotech.*, 45, 11–18.
- LI D.Q., JIANG S.H., CHEN Y.F., E ZHOU C.B. (2011). **System reliability analysis of rock slope stability involving correlated failure modes**. *KSCE J Civ Eng* 2011;15 (8):1349–59.

- LI D.Q., JIANG S.H., CAO Z.J., ZHOU W., ZHOU C.B., E ZHANG L.M. (2015). **A multiple response surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties.** *Eng Geol* 2015;187:60–72.
- LI, L., WANG, Y., CAO, Z., AND CHU, X. (2013). **Risk de-aggregation and system reliability analysis of slope stability using representative slip surfaces.** *Comput. Geotech.*, 53(Sep), 95–105.
- LI L., WANG Y., E CAO Z. (2014). **Probabilistic slope stability analysis by risk aggregation.** *Eng Geol* 2014;176:57–65.
- LI, D. Q., YANG, Z.Y., CAO, Z.J., AU, S.K., E PHOON, K.-K. (2017). **System reliability analysis of slope stability using generalized Subset Simulation.** *Applied Mathematical Modelling*, 46, 650–664.
- LI, D. Q., ZHANG, F. P., CAO, Z. J., ZHOU, W., PHOON, K. K., E ZHOU, C. B. (2015). **Efficient reliability updating of slope stability by reweighting failure samples generated by Monte Carlo simulation.** *Computers and Geotechnics*, 69, 588–600.
- LI, D.Q., XIAO, T., CAO, Z.J., PHOON, K.K., E ZHOU, C.B. (2016). **Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis.** *Applied Mathematical Modelling*, 40(9–10), 5216–5229.
- LI, K.S., E LUMB P. (1987). **Probabilistic design of slopes.** *Can Geotech J.* 1987; 24(4):520–35.
- LI, L., E CHU, X. (2016). **Locating the Multiple Failure Surfaces for Slope Stability Using Monte Carlo Technique.** *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(5), 1475–1486.
- LI L., WANG Y., E CAO Z. (2014). **Probabilistic slope stability analysis by risk aggregation.** *Eng Geol* 2014;176:57–65.
- LI, L., WANG, Y., CAO, Z., AND CHU, X. (2013). **Risk de-aggregation and system reliability analysis of slope stability using representative slip surfaces.** *Comput. Geotech.*, 53(Sep), 95–105.
- LI, L., WANG, Y., E CAO, Z. (2014). **Aggregation of landslide occurrence probability in spatially variable soil.** *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (1), 2435–2439.
- LIM, K., CASSIDY, M. J., LI, A J., & LYAMIN, A V. (2017). **Mean Parametric Monte Carlo Study of Fill Slopes.** *International Journal of Geomechanics*, 17(4), 4016105.
- LIU, L.L., E CHENG, Y.M. (2016). **Efficient system reliability analysis of soil slopes using multivariate adaptive regression splines-based Monte Carlo simulation.** *Computers and Geotechnics*, 79, 41–54.
- LOW, B., GILBERT, R., E WRIGHT, S. (1998). **Slope reliability analysis using generalized method of slices.** *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:4(350), 350–362.

- LOW B.K., ZHANG J., E TANG W.H. (2011). **Efficient system reliability analysis illustrated for a retaining wall and a soil slope**. *Comput Geotech* 2011;38(2):196–204.
- LOW B.K. (2005). **Reliability-based design applied to retaining walls**. *Geotechnique* 2005;55(1):63–75
- MORGENSTERN, N.R., PRICE, V. E. (1965). **The analysis of the stability of general slip surfaces**. *Geotechnique*, n. 15 v. 1, p. 79-93.
- MUEHE, D. (2006). **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. book, ISBN 85-7738-028-9, 476p.
- NASCIMENTO, K. C. (2009). **Monitoramento por DGPS e análise dos processos erosivos da linha de costa na praia de Pirangi do Norte - Parnamirim/RN**. Dissertação de Mestrado. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal*.
- OZELIM, L. C. DE S. M., CAVALCANTE, A. L. B., PACHECO DE ASSIS, A., & RIBEIRO, L. F. M. (2015). **Analytical Slope Stability Analysis Based on Statistical Characterization of Soil Primary Properties**. *International Journal of Geomechanics*, 15(2), 6014018.
- PIÉRRRI, G.C.S. (2008). **Análise de Risco à Erosão Costeira na Região de Tibau do Sul/RN Através de Mapeamento Geoambiental e Análise Morfodinâmica**. Tese de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- RIBEIRO, J. R. C. (2015). **Análise paramétrica da estabilidade de falésias e estudo de caso da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul/RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- ROCSCIENCE - SLIDE 7.0 (2016). **A guide to search methods in Slide 7.0** - RocNews Spring. Toronto, Ontário, Canadá. *In: <https://www.rocscience.com/rocnews/497-rocnews-spring-2016>*.
- ROCSCIENCE - **SLIDE V.7.0 TUTORIAL MANUAL**. Tutorial 9 - Sensitivity Analysis. Toronto, Ontário, Canadá. *In: https://www.rocscience.com/help/slide/webhelp7/tutorials/Slide_Tutorials.htm*
- RODRIGUES, M.A., ZUCCOLO, P.L., SANTOS, M.G.C., SILVA, J.L. (2016). **Probabilidade de Falha de Muro de Solo Envelopado com Geogrelha**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H. R., DOMINGUEZ, J. M. L. (2013). **Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil**. *Earth-Science Reviews* Vol. 123 (p. 87-112).
- SANTOS JR., O. F.; AMARAL, R. F.; SCUDELARI, A. C. (2006). **Failure mechanisms of a coastal cliff in Rio Grande do Norte State, NE, Brazil**. *Journal of Coastal Research*, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), 629-632. Itajaí, SC, Brazil, ISSN 0749-0208.

- SANTOS JR., O. F.; SEVERO, R. N. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARAL, R. F. (2008). **Processo de instabilização em falésias: Estudo de Caso no Nordeste do Brasil**. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, SPG, ABMS, ABGE. n. 114, pp. 71-90.
- SANTOS JR., O. F.; SCUDELARI, A. C.; COSTA, A. C.; COSTA, C. M. (2011). **Sea Cliff retreat mechanisms in northeastern Brazil**. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.
- SANTOS JR., O. F.; COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F., (2015). **Propriedades geotécnicas dos sedimentos da Formação Barreiras no Litoral do Rio Grande do Norte - Brasil**. Geotecnia 134, p.87 - 108.
- SCUDELARI, A. C.; BRAGA, K. G.; COSTA, F. A. A.; SANTOS JR., O. F. (2005). **Erosive processes study that affecting Pipa beach - RN**. In: Braz. J. Aquat. Sci. Technol. 9(1): 31-37. ISSN 1808-7035.
- SENGUPTA, A. (2012). **Numerical Study of a Failure of a Reinforced Earth Retaining Wall**. Geotechnical and Geological Engineering 30:1025-1034.
- SPENCER, E. (1967). **A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slices forces**. Geotechnique, n. 17, p. 11-26.
- SEVERO, R. N. F. (2005). **Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa-RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SEVERO, R. N. F. (2011). **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**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. UFPE. Recife.
- SHAMEKHI, E. (2014). **Probabilistic assessment of rock slope stability using response surfaces determined from finite element models of geometric realizations**. University of British Columbia, DOI: 10.14288/1.0074360.
- SILVA, B. M. F.; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; BARBOSA, N. M.; FRANÇA, F. A. N.; ARAÚJO, E. E. B. (2016). **Stability Evolution with Basal Erosion Increase in Cliffs on the Coast of Rio Grande do Norte, Brazil**. In Applied Mechanics and Materials, ISSN: 1662-7482, Vol. 858, pp 342-347.
- SILVA, W. DE S. (2003). **Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul - Litoral Oriental do RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SOULIE, M.; MONTES, P.; SILVESTRI, V. (1990). **Modeling Spatial Variability of soil parameters**. Canadian Geotechnical Journal, 27: 617-630.
- SOUSA, R. A. (2018). **Resistência e Compressibilidade de Solos da Formação Barreiras da Região de Natal/RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

- SOUZA JÚNIOR, C. (2013). **Análise de estabilidade de falésias na zona costeira de Baía Formosa-RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- TAQUEZ, D. E. D.; BARBOSA; SILVA, B. M. F; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F (2016). **Estabilidade de Falésias no Litoral do RN Submetidas a Fendas de Tração e Incisão Basal**. XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.
- TAQUEZ, D. E. D. (2017). **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**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- VARNES, D. J. (1958). **Landslides types and processes**. In: EKEL, E. B. (Org.) Landslides and engineering practice. Washington: National Academy of Sciences. Cap. 2.
- VARNES, D. J. (1978). **Landslides, analysis and control**. Special Report 176, National Academy of Sciences, Cap. II.
- VITAL, H., SANTOS NETO, F., PLÁCIDO JÚNIOR, J. S. (2008). **Morfodinâmica de um canal de maré tropical: Estudo de caso na costa norte rio grandense, Nordeste do Brasil**. Revista da Gestão Costeira, v. 8, n. 2, p. 113 - 126.
- WANG Y. (2013). **MCS-based probabilistic design of embedded sheet pile walls**. Georisk 2013;7(3):151–62.
- WHITMAN, R. V. (1984). **Evaluating calculated risk in geotechnical engineering**. J. Geotech. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110: 2(143),143–188.
- XU C.J., WANG L., TIEN Y.M., CHEN J.M., JUANG C.H. (2014). **Robust design of rock slopes with multiple failure modes: modeling uncertainty of estimated parameter statistics with fuzzy number**. Environ Earth Sci 2014;72(8):2957–69.
- XU, B., E LOW, B. (2006). **Probabilistic stability analyses of embankments based on finite-element method**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1444), 1444–1454.
- YOO, C., E JUNG, H. (2007). **Case History of Geosynthetic Reinforced**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 12.
- ZHANG J., ZHANG L.M., E TANG W.H. (2011). **New methods for system reliability analysis of soil slopes**. Can Geotech J 2011;48(7):1138–48.

Apêndice A – Análise Probabilística

1. Etapa - Definição da geometria do problema

1.1. Após a inicialização do *software Slide 7.0* da *Rocscience*, adicione as coordenadas correspondentes à geometria do problema. A melhor forma de executar essa etapa é através de uma tabela de coordenadas.

Boundaries → *Add External Boundaries* → Botão direito do mouse → *Coordinate Table* (Figuras A.1 e A.2).

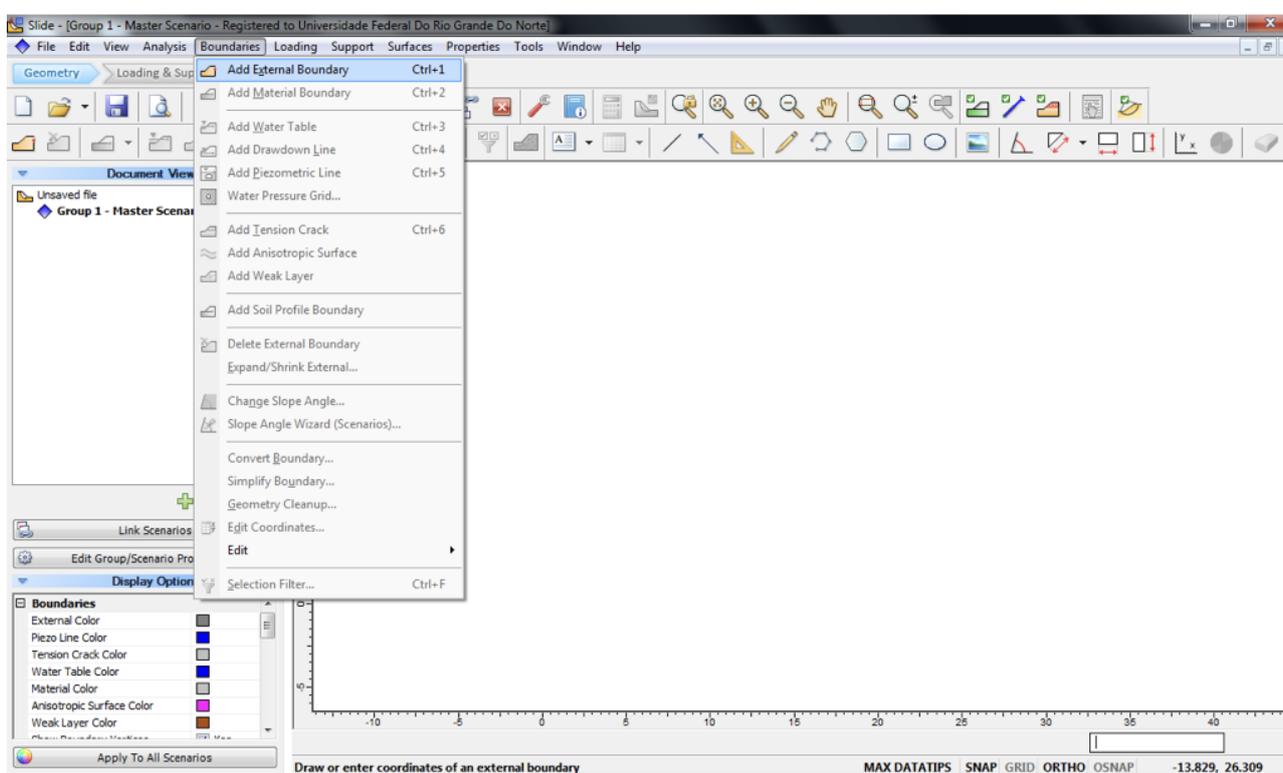


Figura A.1 – Definição da geometria externa.

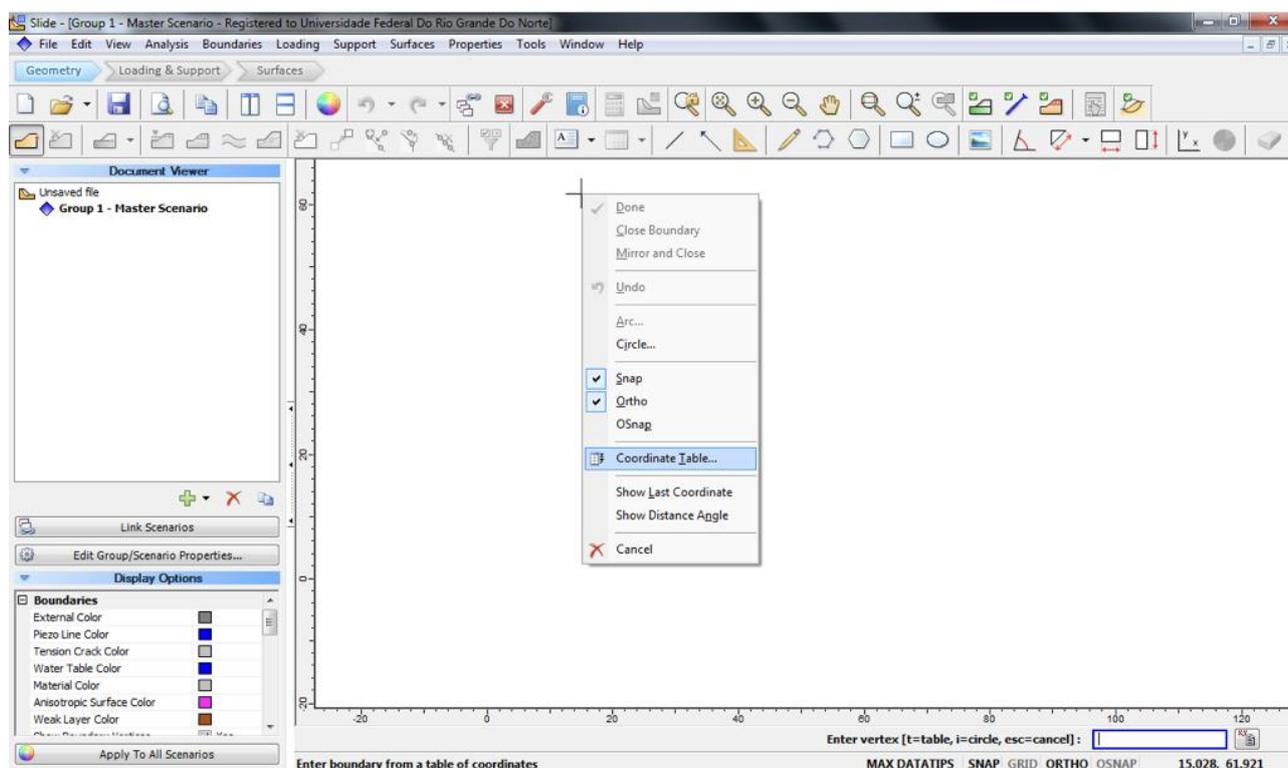


Figura A.2 – Tabela de coordenadas.

1.2. De forma análoga, defina os limites dos materiais constituintes da modelagem.

Boundaries → *Add Material Boundary* → Botão direito do mouse → *Coordinate Table* (Figura A.3).

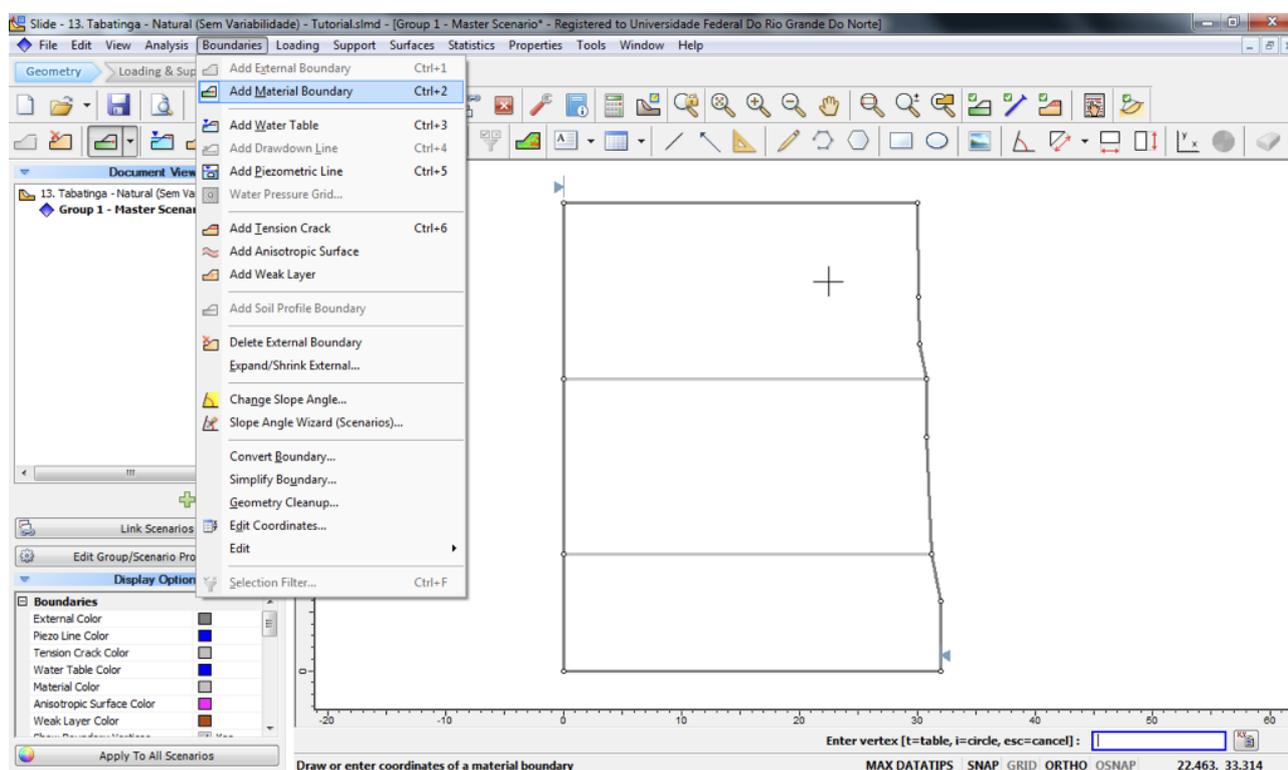


Figura A.3 – Definição dos limites de cada material do problema.

2. Etapa – Definição do tipo de análise.

Project Settings → *Methods* → Escolher os métodos determinísticos → *Statistics* (Figuras A.4 a A.6).

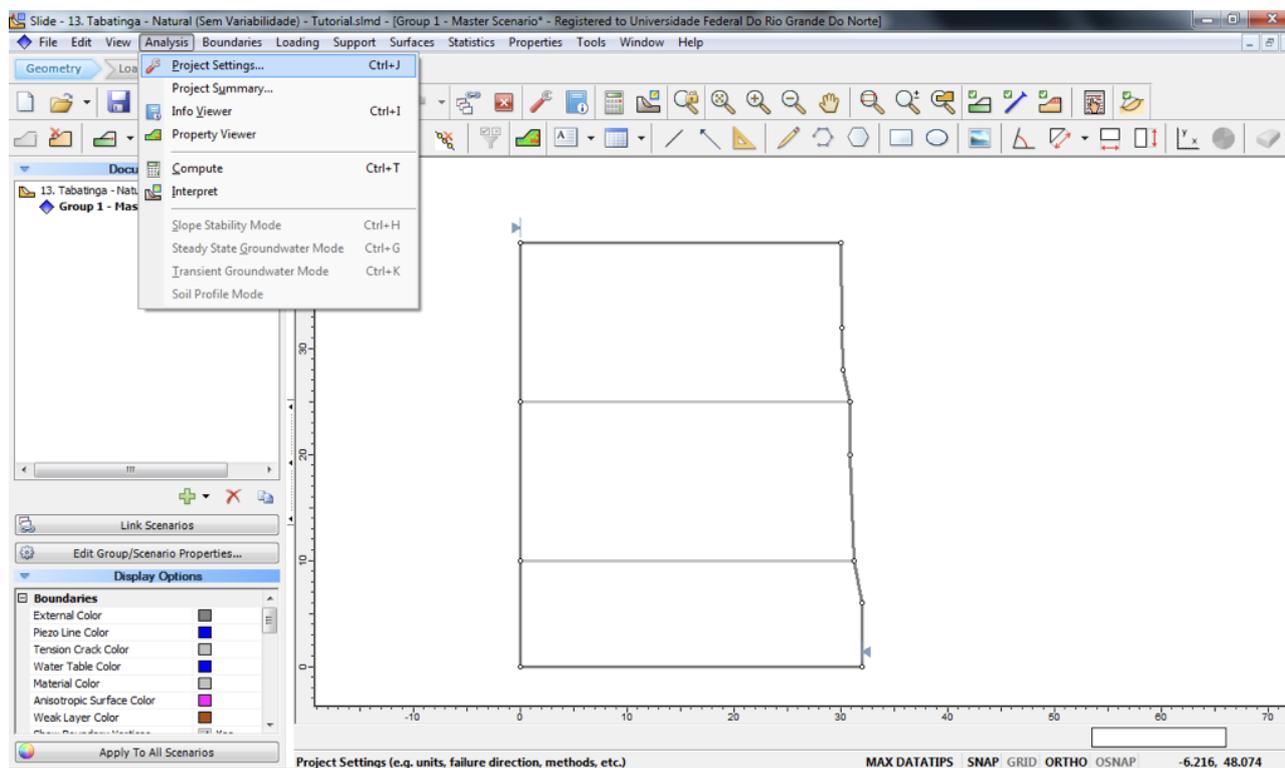


Figura A.4 – Definição geral da modelagem.

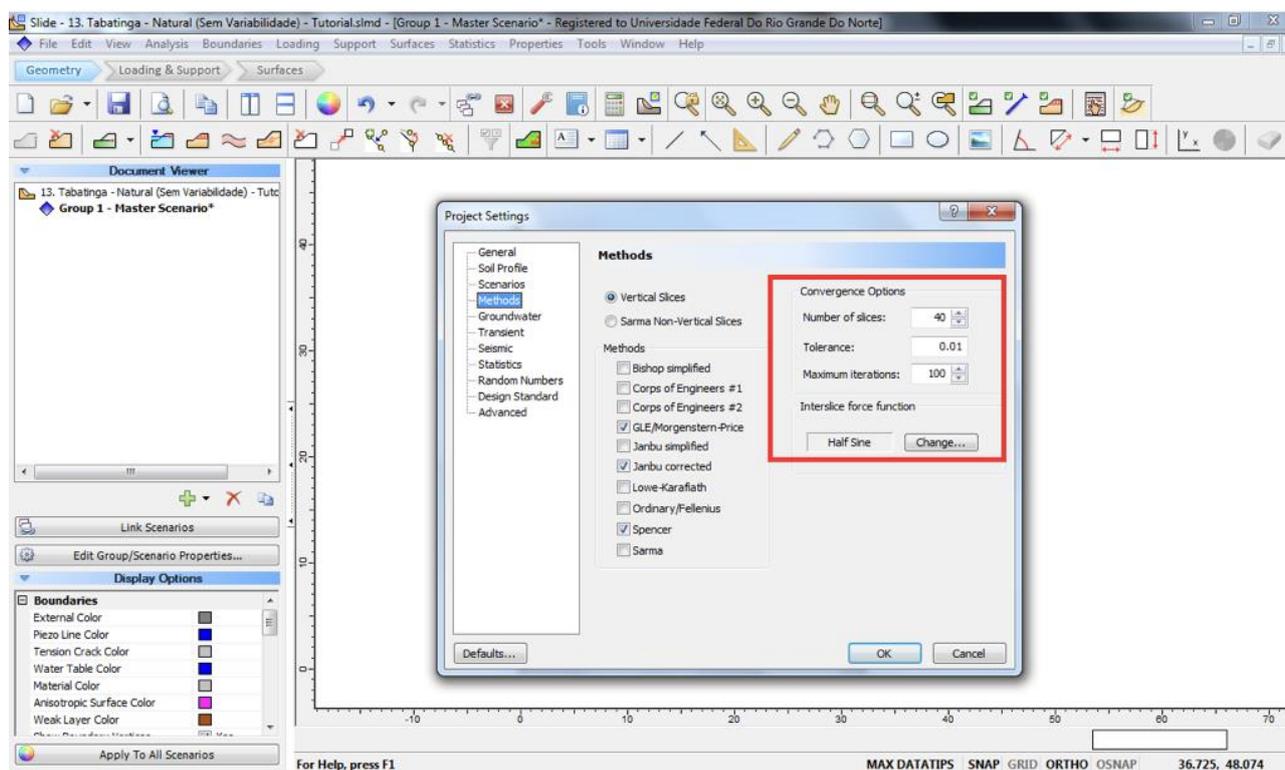


Figura A.5 – Definição dos métodos determinísticos (atenção para a definição do número de fatias considerado, tolerância no FS e número de iterações).

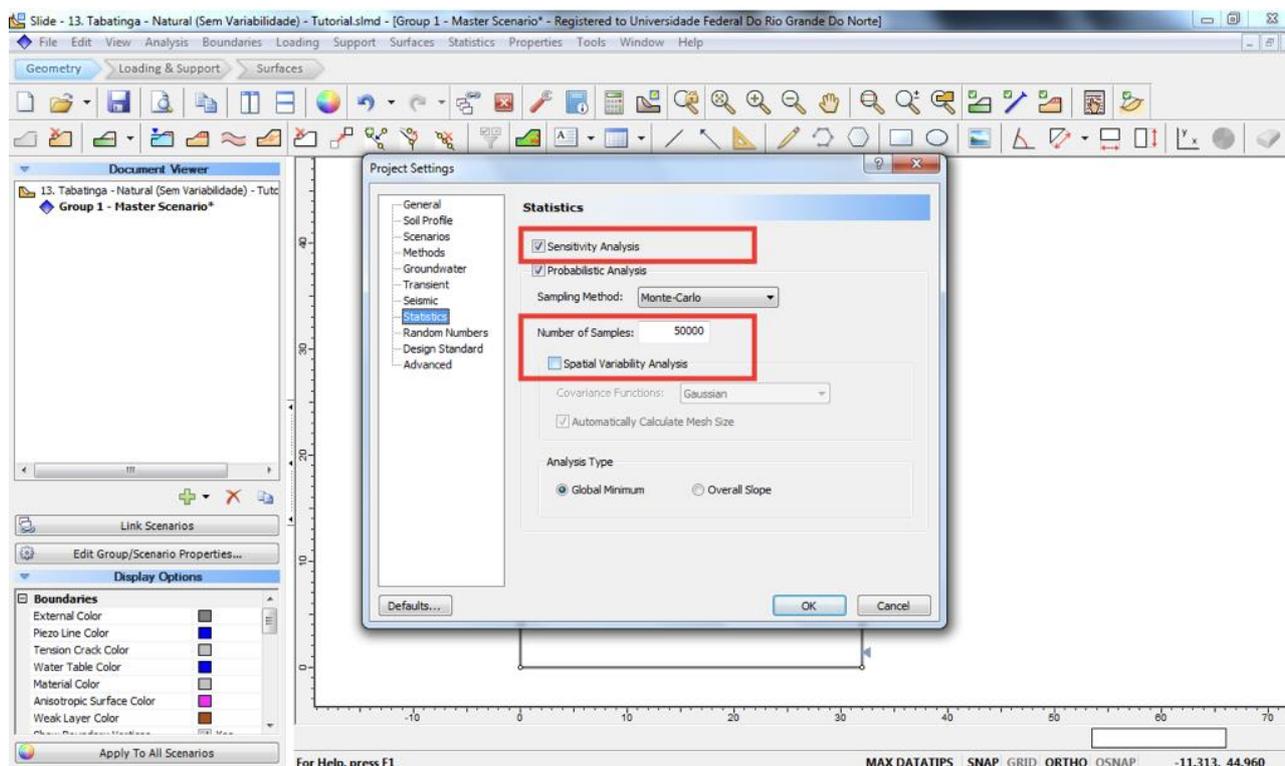


Figura A.6 – Definição do método probabilístico (atenção para o número de amostras simuladas, bem como a necessidade de análise de sensibilidade e variabilidade espacial dos solos).

3. Etapa – Definição das propriedades dos materiais (coesão, ângulo de atrito e peso específico)

3.1. Determine os materiais que serão variáveis aleatórias ou não do problema e defina a distribuição estatística.

Properties → *Define Materials* → *Statistics* → Definir os parâmetros que serão variáveis aleatórias do problema → Definir a distribuição estatística, média, desvio padrão e os limites relativos máximos e mínimos → *Ok*. (Figuras A.7 a A.9).

* Observação: As colunas *Rel. Min* e *Rel. Max* representam os valores que serão subtraídos ou somados com a média definida. Os valores obtidos na operação matemática serão os valores mínimo e máximo da função distribuição de probabilidade (Figura A.9).

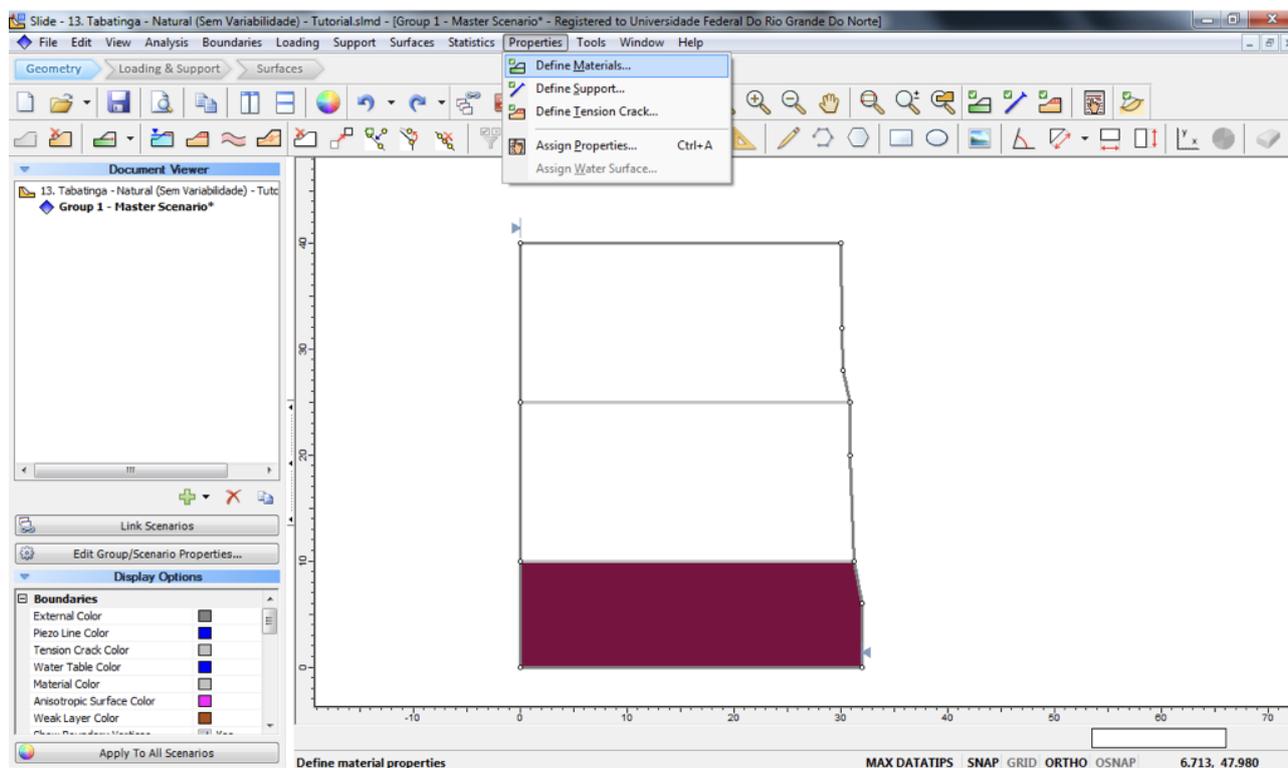


Figura A.7 – Definição das propriedades dos materiais como coesão, ângulo de atrito e peso específico.

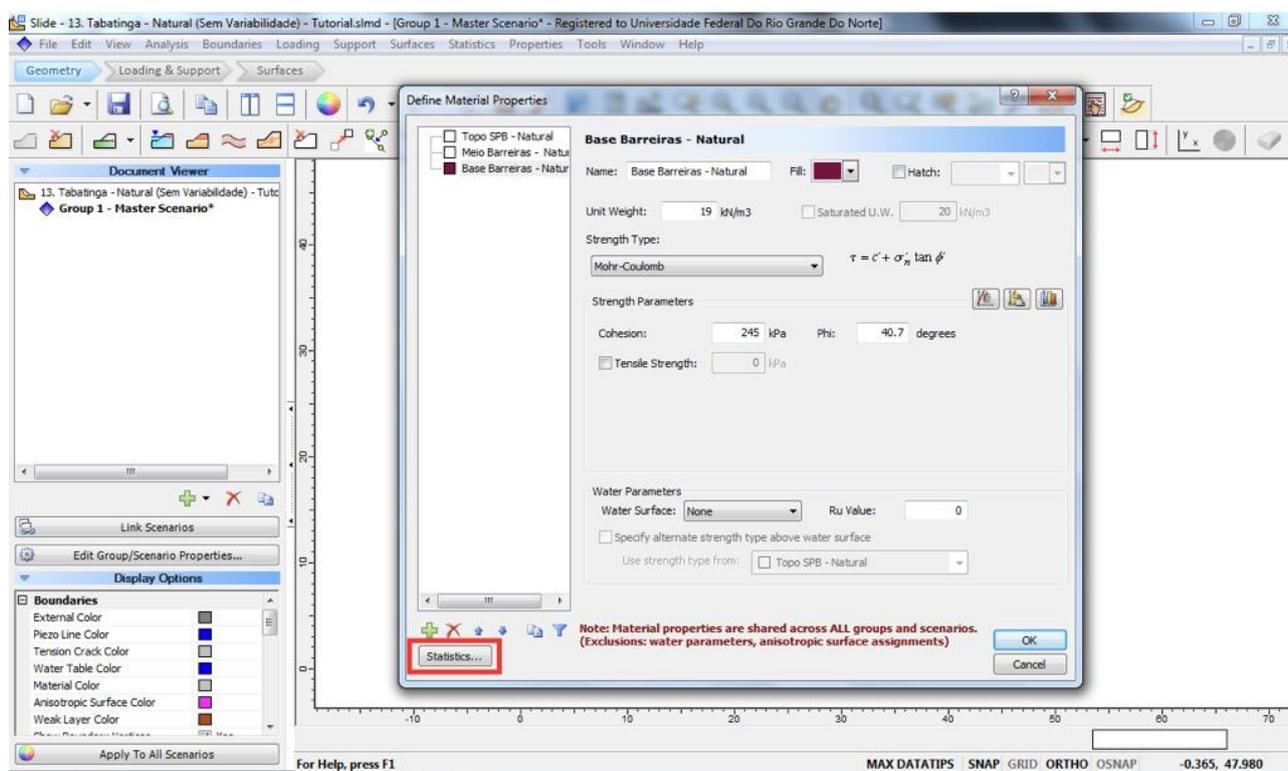


Figura A.8 – Definição dos parâmetros estatísticos de entrada. (Ver observação).

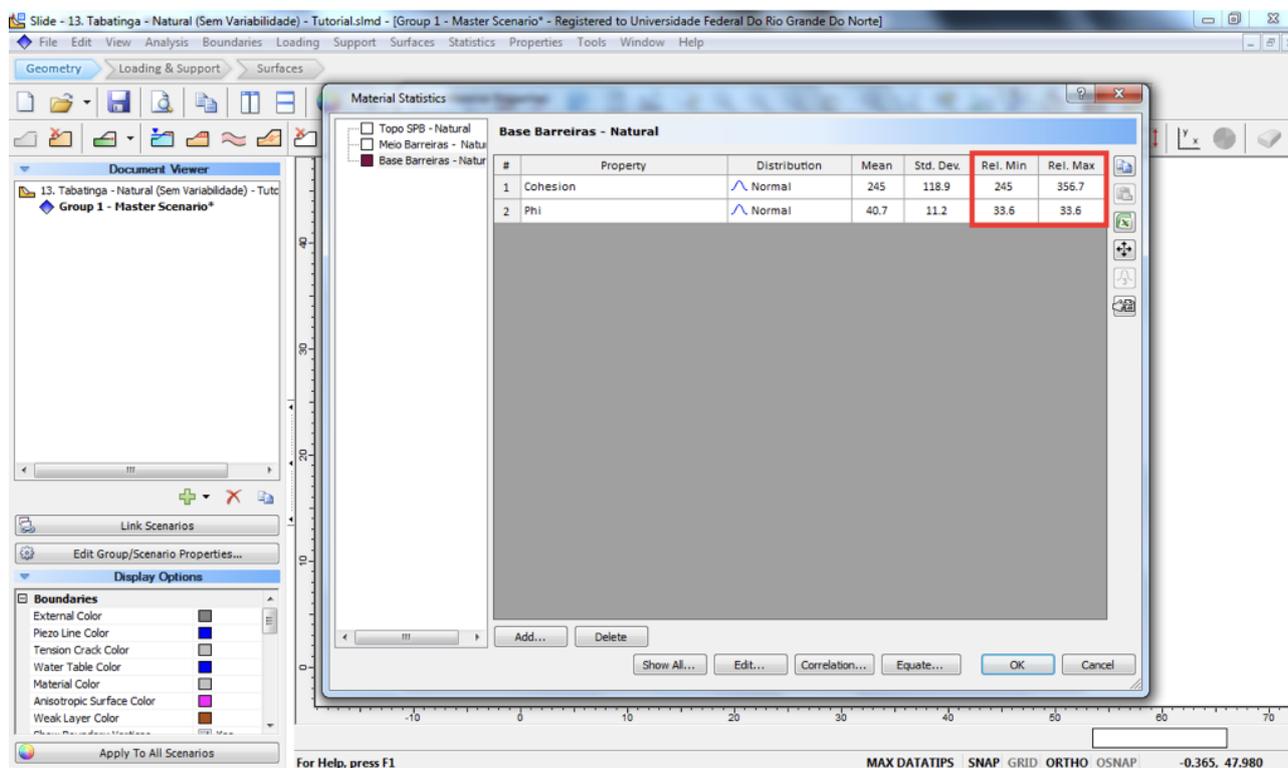


Figura A.9 – Definição dos parâmetros estatísticos de entrada (atenção para a os campos a serem preenchidos com os valores relativos máximos e mínimos).

3.2. Aplique as propriedades dos solos nas respectivas regiões do talude definidas anteriormente no item 1.2.

Properties → *Assign Properties* → Escolha o material → Clique na região pretendida (Figuras A.10 a A.11).

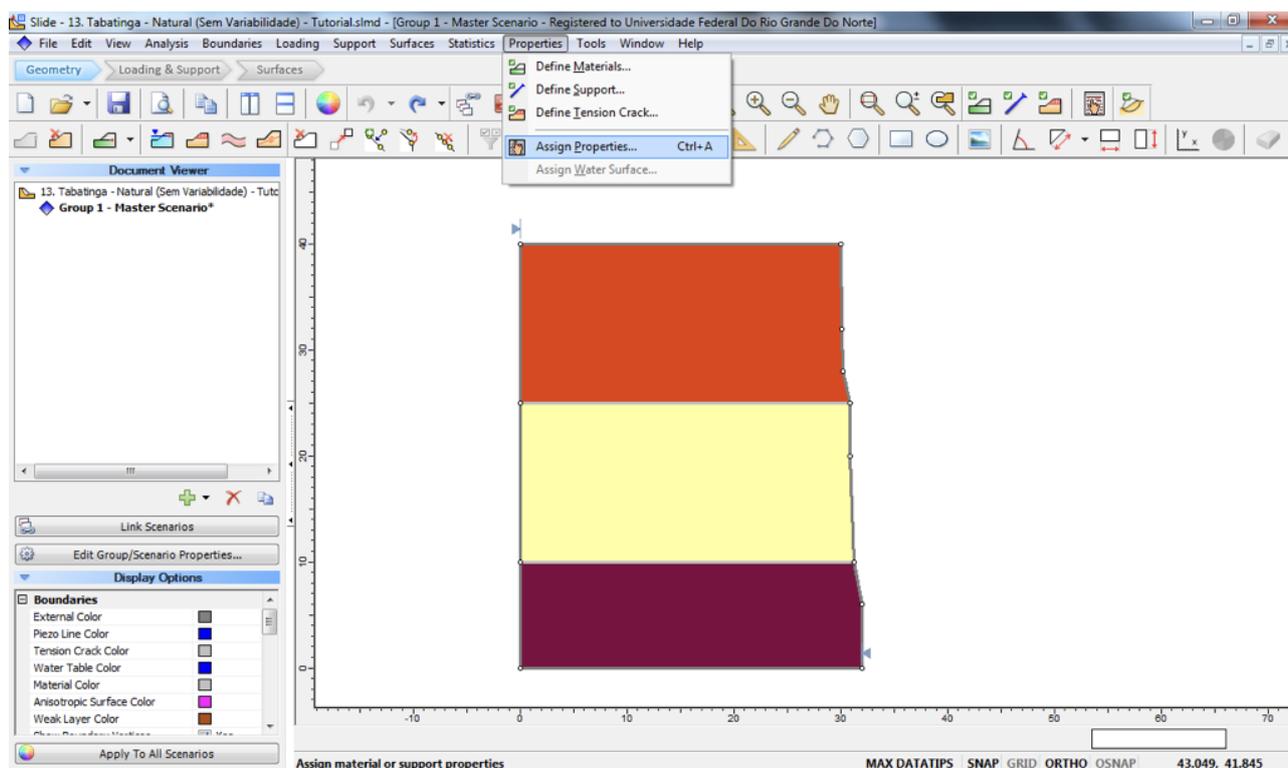


Figura A.10 – Propriedades dos materiais.

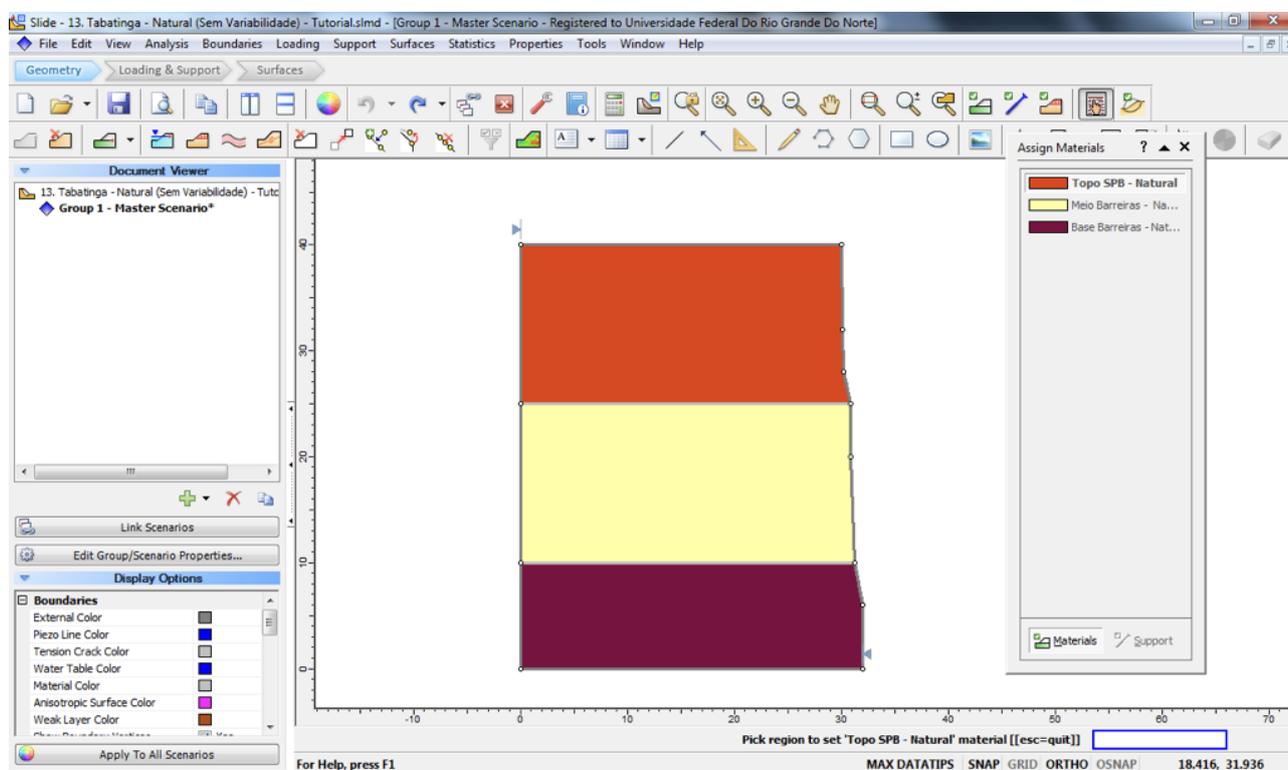


Figura A.11 – Definição de todas as camadas do problema modelado.

4. Etapa – Busca pelas superfícies de ruptura

4.1. Determine o tipo de superfície de ruptura que será analisada, ou seja, superfície circular ou não circular.

Surfaces → *Surface Options* → Definir o tipo de superfície de ruptura e método de busca → *Apply* → *Ok*. (Figuras A.12 e A.13).

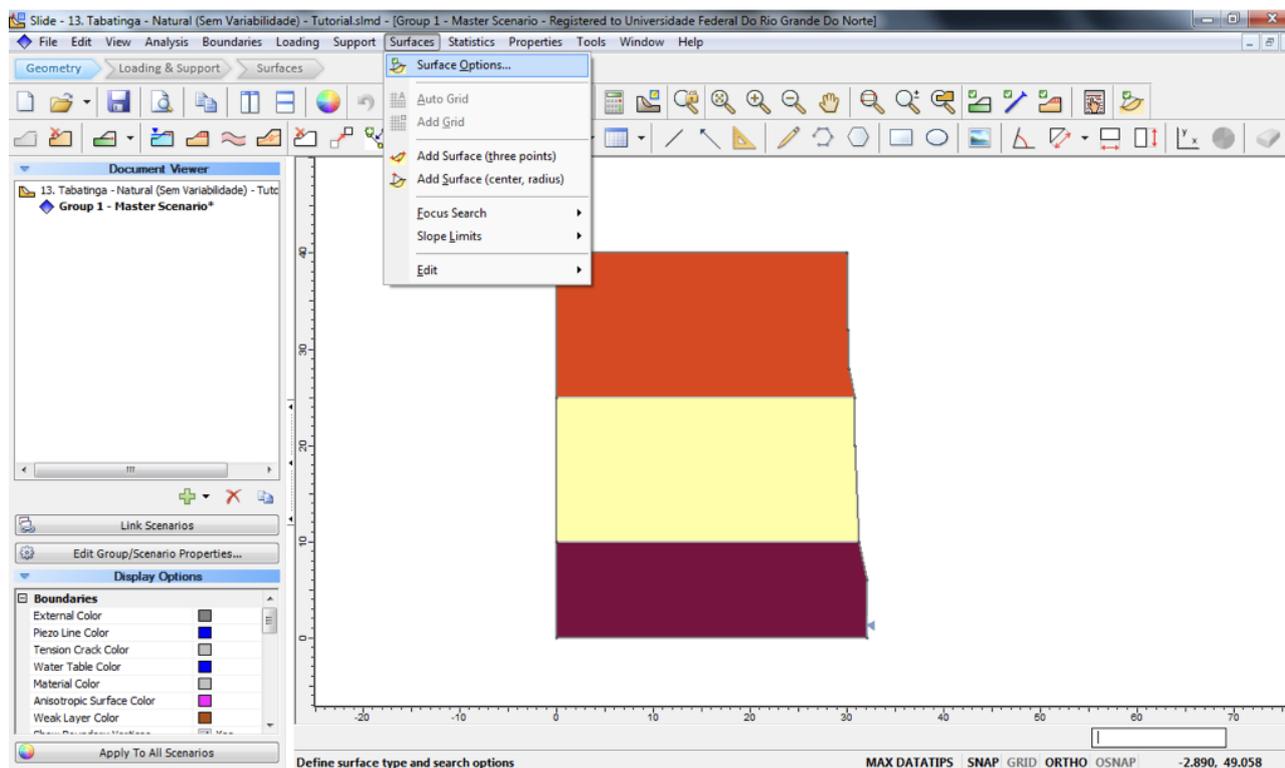


Figura A.12 – Opções de análise de Superfície de Ruptura.

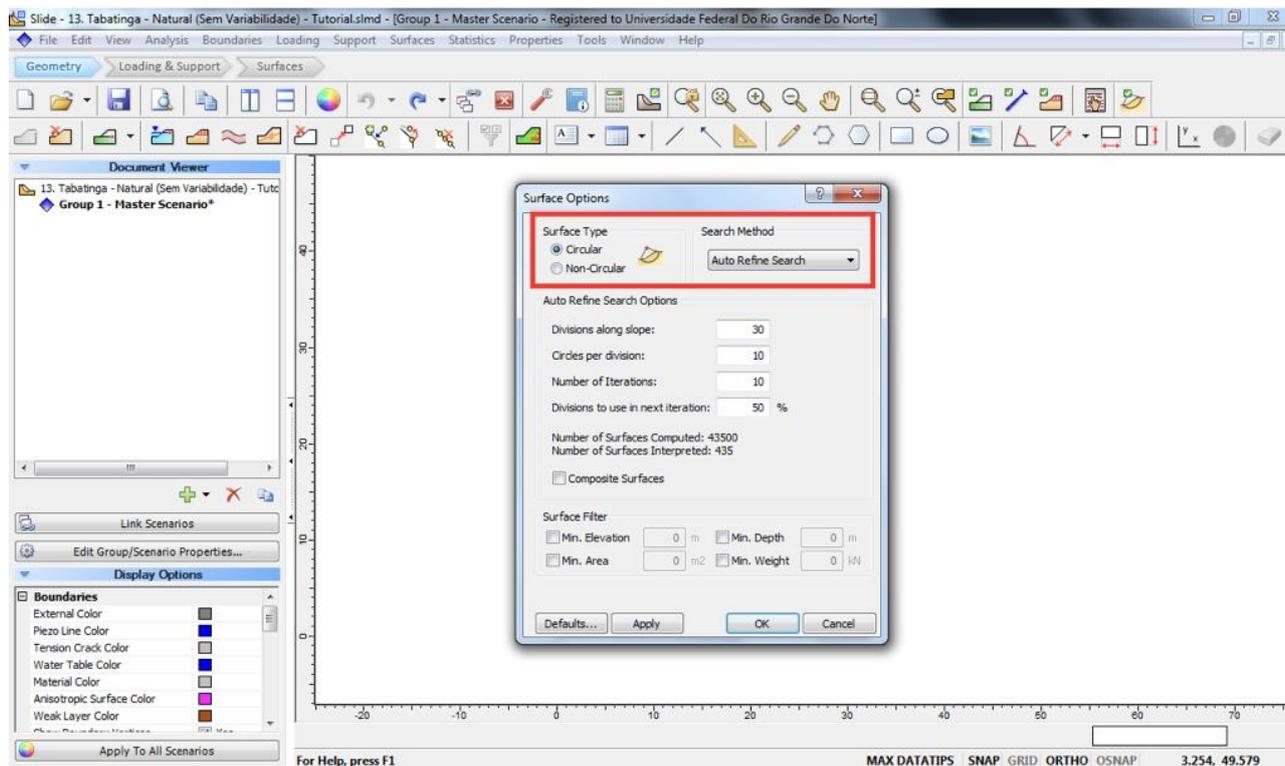


Figura A.13 – Definição de parâmetros de busca da Superfície de Ruptura.

4.2. Determine a região em que a será realizada a busca pela superfície de ruptura.

Surfaces → *Slope Limits* → *Define Limits* → *Apply* → *Ok*. (Figura A.14).

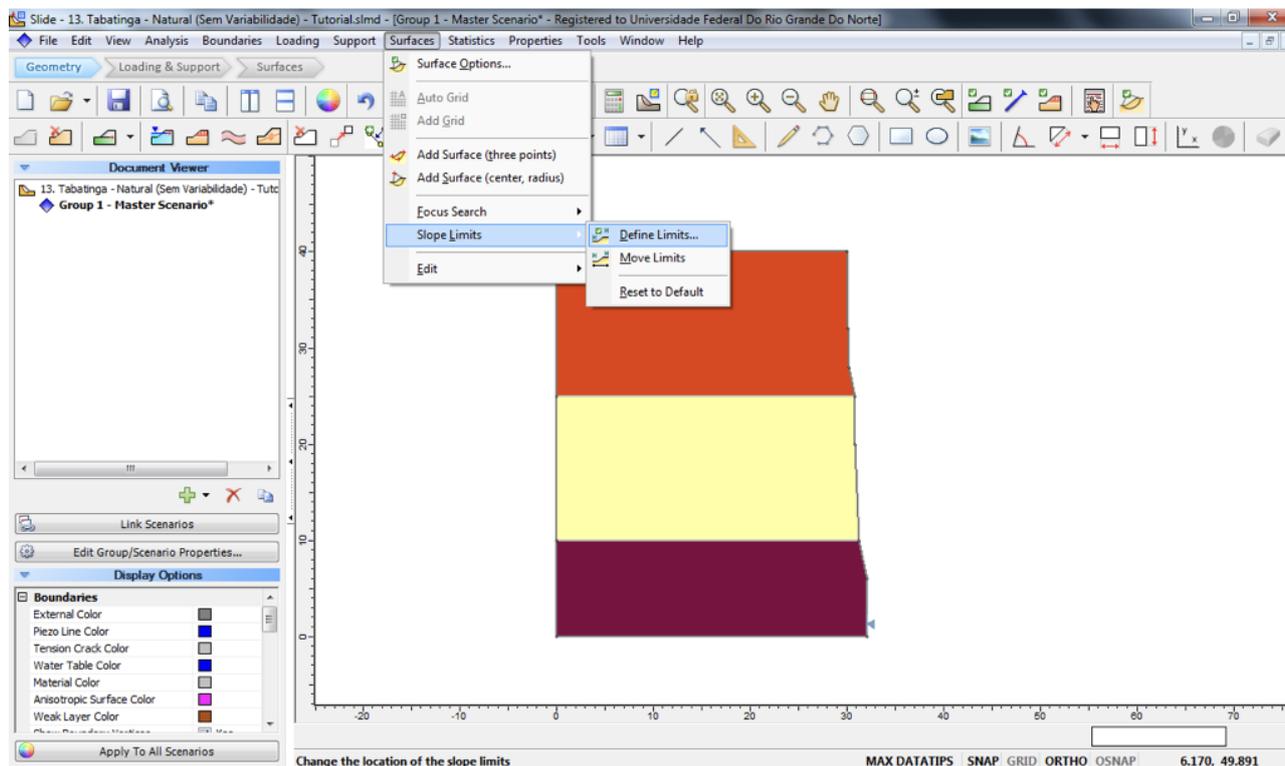


Figura A.14 – Definição dos limites de busca da Superfície de Ruptura.

OU

Surfaces → *Slope Limits* → *Move Limits* → Mover os limites indicados no programa através de uma seta (Figura A.15).

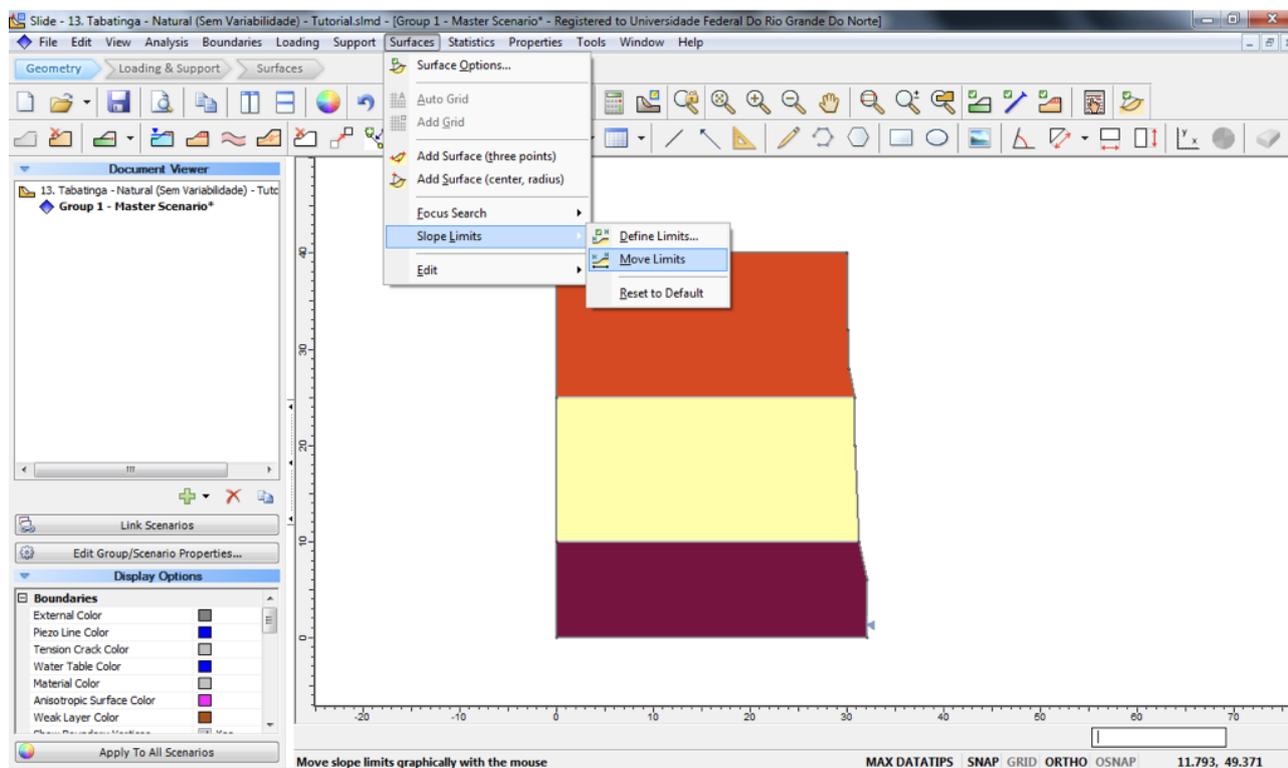


Figura A.15 – Mover os limites de busca da Superfície de Ruptura manualmente.

5. Resultados e Ferramentas importantes.

5.1. O próximo passo após a conclusão das etapas anteriores é colocar o programa para calcular os resultados.

Analysis → *Compute* (Figura A.16).

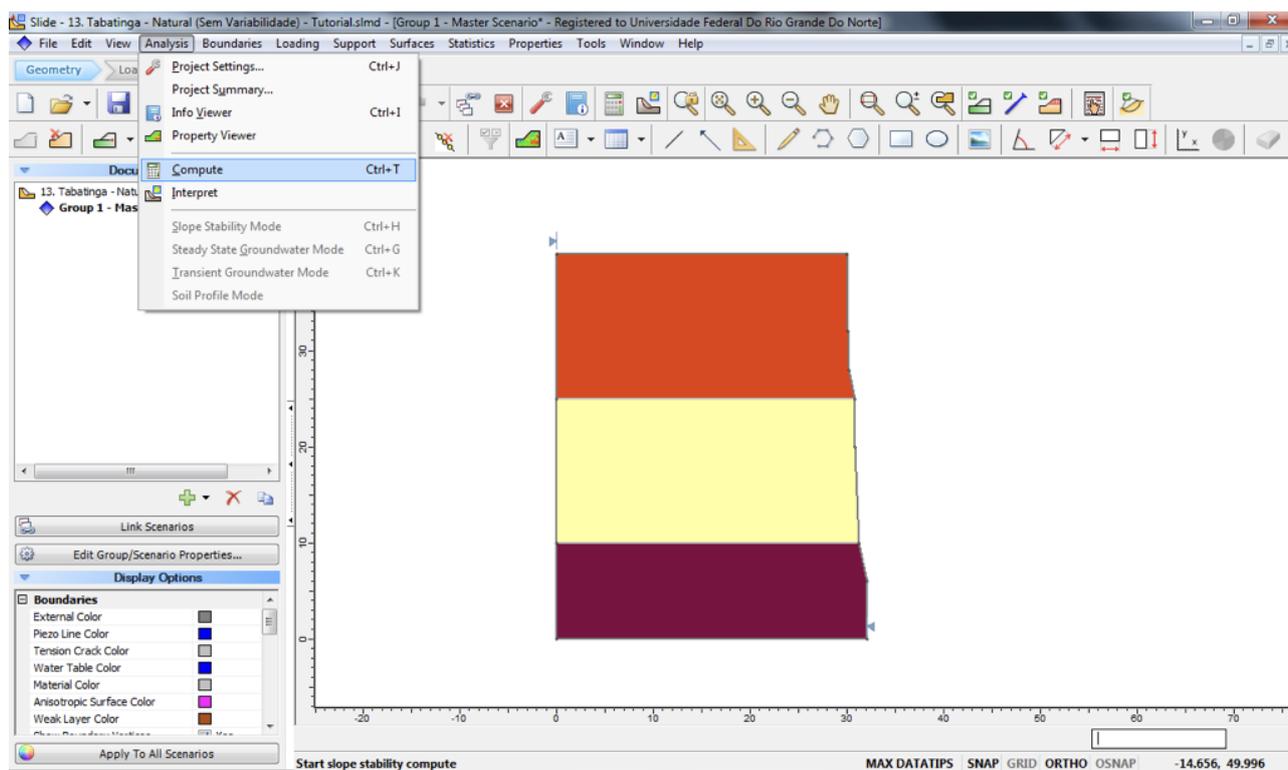


Figura A.16 – Calcular os Resultados.

5.2. Para interpretar os resultados e analisar ferramentas importantes constantes no programa, siga os próximos passos.

Analysis → *Interpret* (Figura A.17).

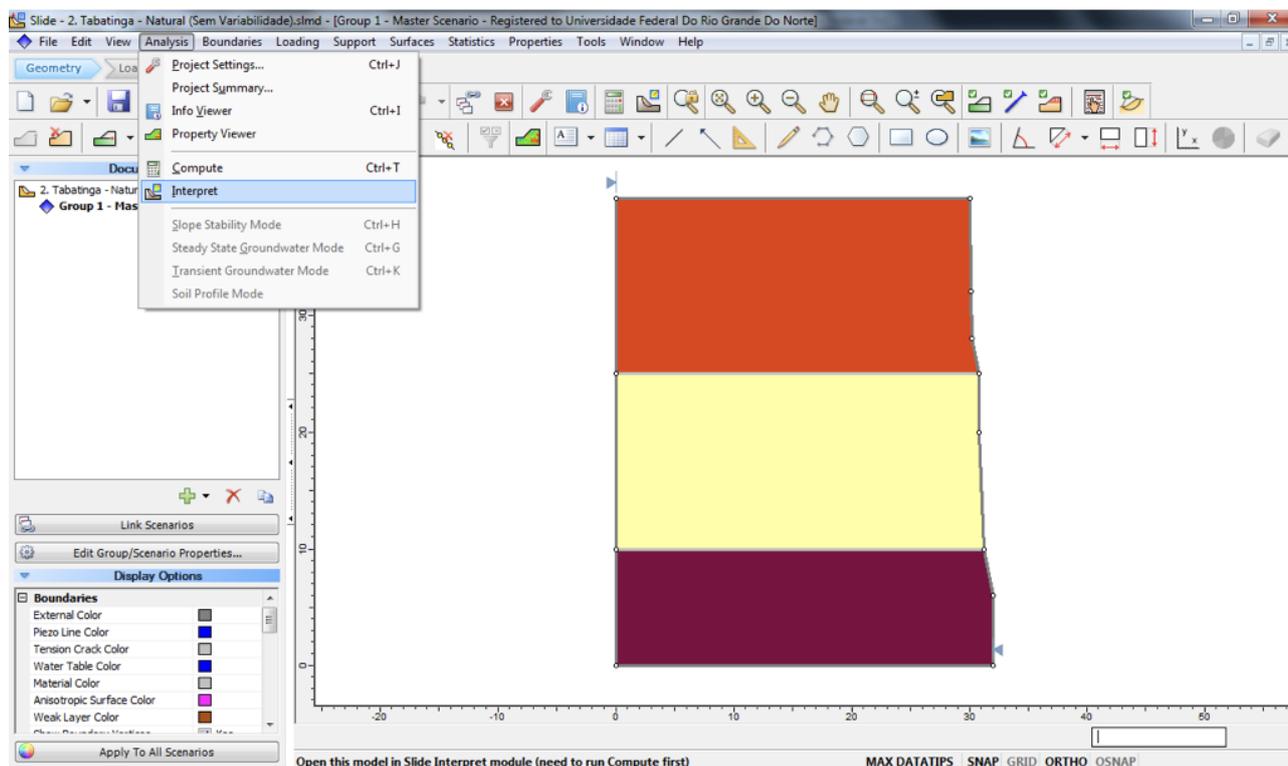


Figura A.17 – Interpretação dos Resultados.

5.3. Para gerar os principais gráficos de resultados, como análises de sensibilidade, histogramas de frequência do Fator de Segurança, gráfico acumulado do Fator de Segurança e o gráfico de convergência (Figura A.18).

Statistics → *Sensitivity Plot* → Escolha o método de análise e os parâmetros pretendidos → *Plot*.

Statistics → *Histogram Plot* → Escolha o parâmetro a ser analisado e quais dados deverão ser destacados → *Plot*.

Statistics → *Cumulative Plot* → Escolha o parâmetro a ser analisado → *Plot*.

Statistics → *Convergence Plot* → Escolha o método de análise e deixe os dados em termos de probabilidade de ruptura → *Plot*.

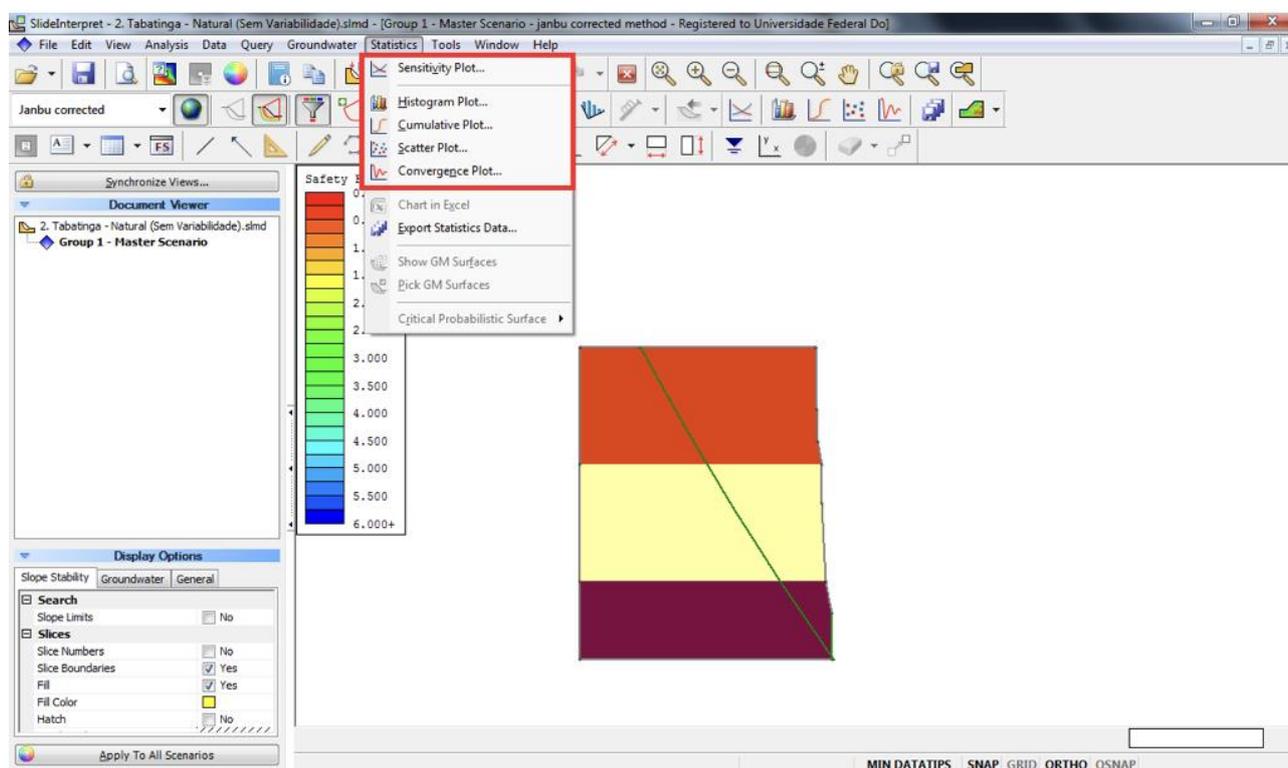


Figura A.18 – Ferramentas importantes para melhor interpretação dos resultados.

Apêndice B – Retroanálise Probabilística

1. Etapa - Definição da geometria do problema

Essa etapa segue de forma análoga ao apresentado anteriormente no apêndice A.

2. Etapa – Definição do tipo de análise.

Essa etapa segue de forma análoga ao apresentado anteriormente no apêndice A.

* Observação: Nessa etapa, o usuário pode optar por uma análise considerando a variabilidade espacial dos solos (Figura B.1).

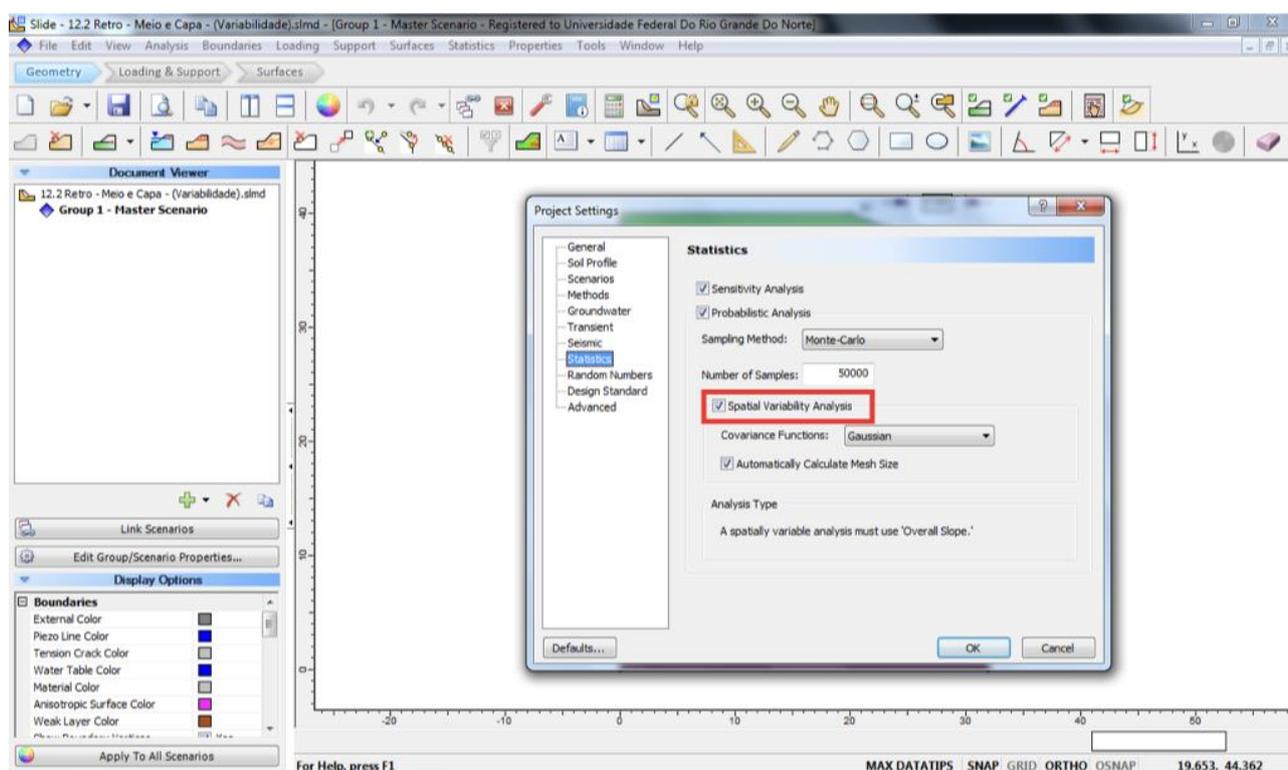


Figura B.1 – Variabilidade Espacial dos solos.

3. Etapa – Definição das propriedades dos materiais (coesão, ângulo de atrito e peso específico).

Essa etapa segue de forma análoga ao apresentado anteriormente no apêndice A.

* Observação: Se o usuário optar pela utilização da variabilidade espacial dos solos, é necessário definir as distâncias de correlação no eixo x e y.

Properties → *Define Materials* → *Statistics* → Definir as distâncias de correlação

4. Etapa – Adicionar a Superfície de Ruptura a ser retroanalizada.

4.1. Determine a superfície de ruptura a ser retroanalizada. A melhor forma de executar essa etapa é através de uma tabela de coordenadas.

Surfaces → *Add Surface* → Botão direito do mouse → *Coordinate Table* (Figura B.2).

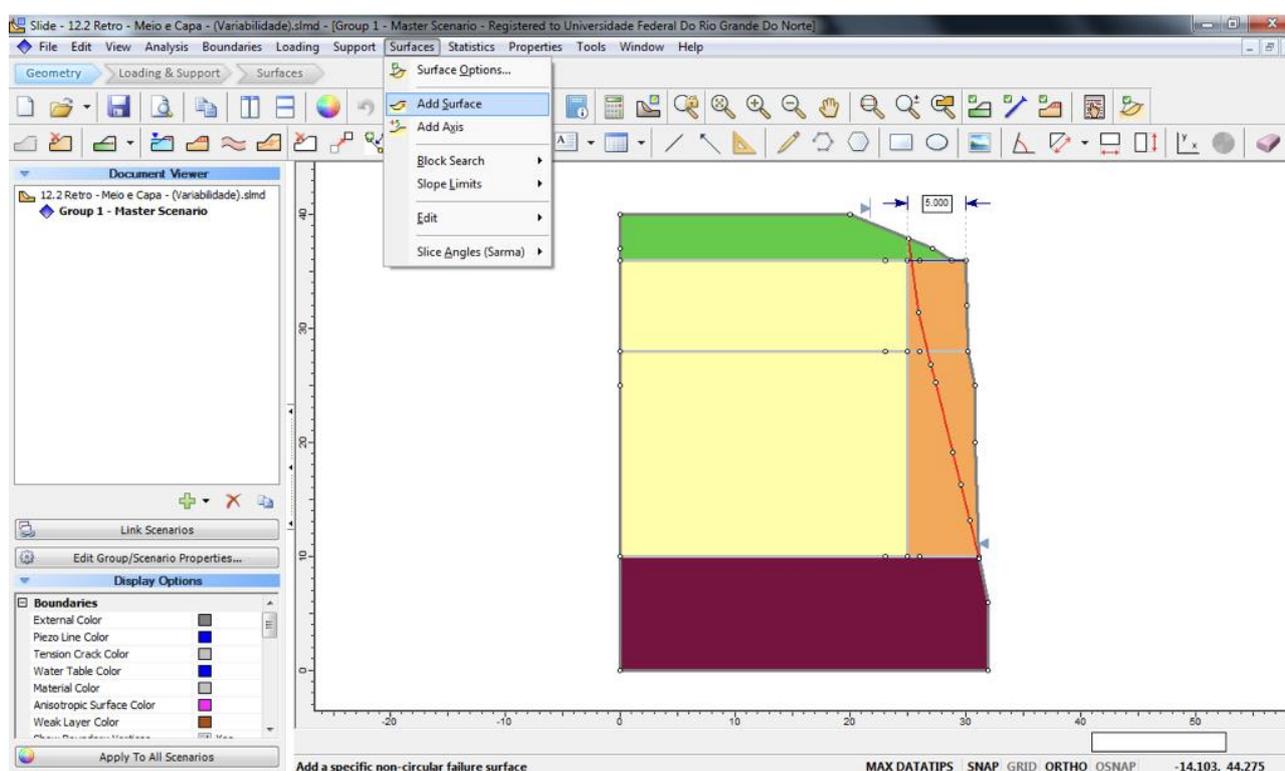


Figura B.2 – Definição da Superfície de Ruptura.

5. Resultados e Ferramentas importantes.

Essa etapa segue de forma análoga ao apresentado anteriormente no apêndice A.

6. Utilização do Gráfico de dispersão para definição da curva coesão x ângulo de atrito (Figura B.3).

Statistics → *Scatter Plot* → Escolha os parâmetros pretendidos para a análise → *Plot* → Botão direito do mouse → *Highlighted Data Only*.

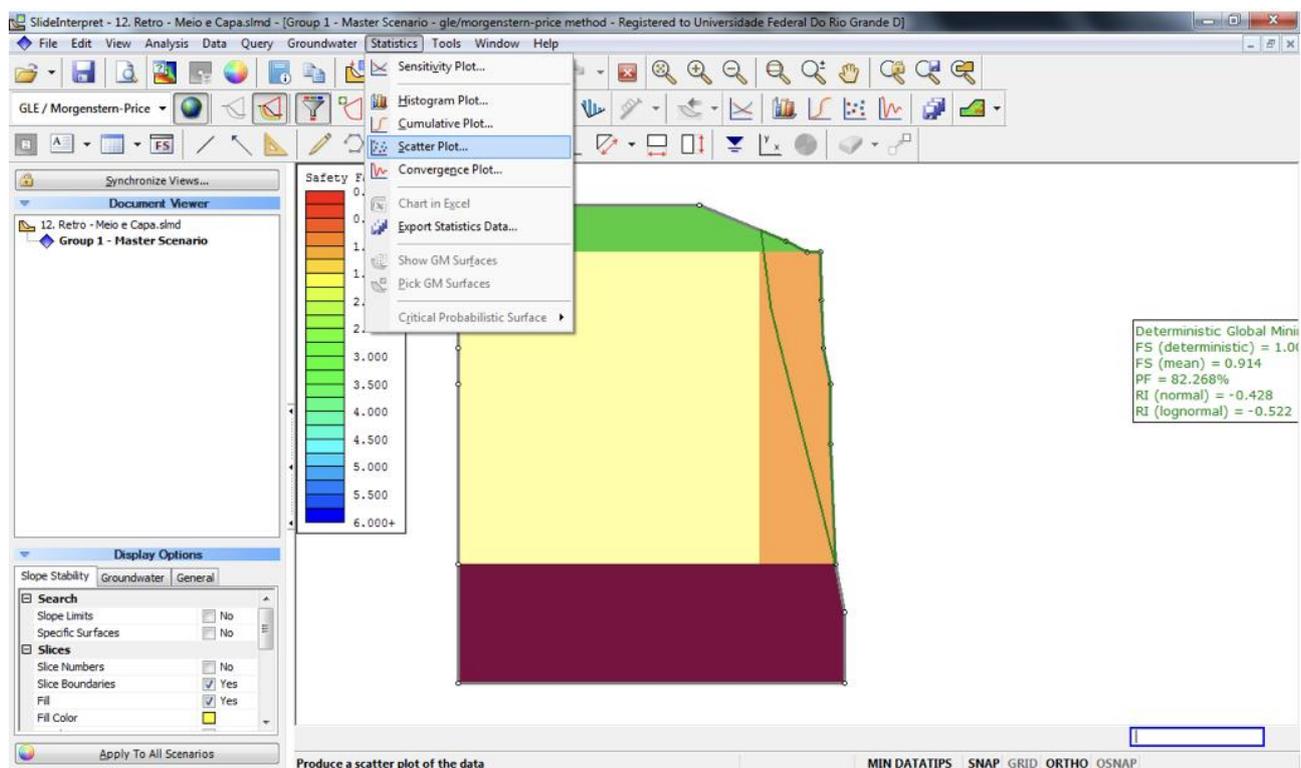


Figura B.3 – Gráfico de dispersão.

* Observação: Esse gráfico representa uma ótima ferramenta para determinar os pares de valores de coesão e ângulo de atrito que ocasionam a ruptura do talude. Na Figura B.4 é possível verificar que foi definida uma faixa de valores (entre 0,999 e 1) para simular o momento da ruptura.

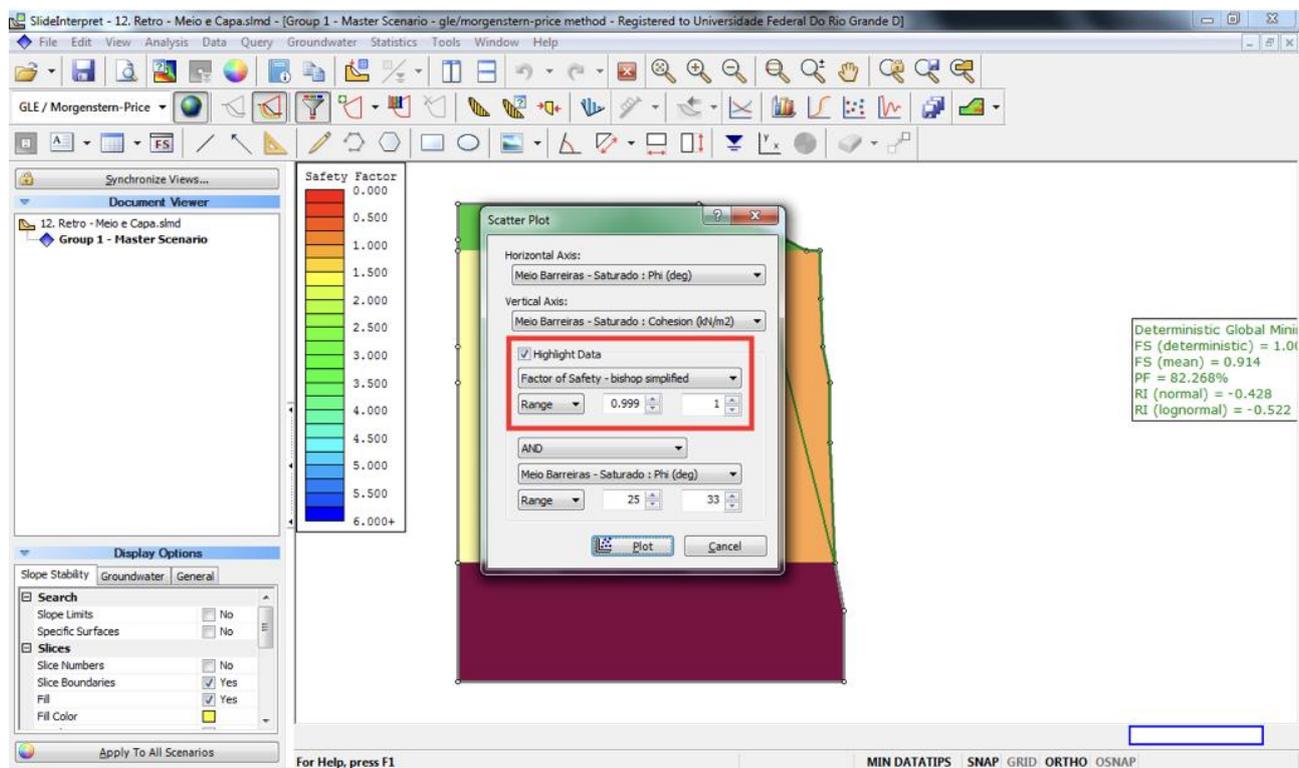


Figura B.4 – Pares de valores de Coesão e ângulo de atrito no momento da ruptura.