

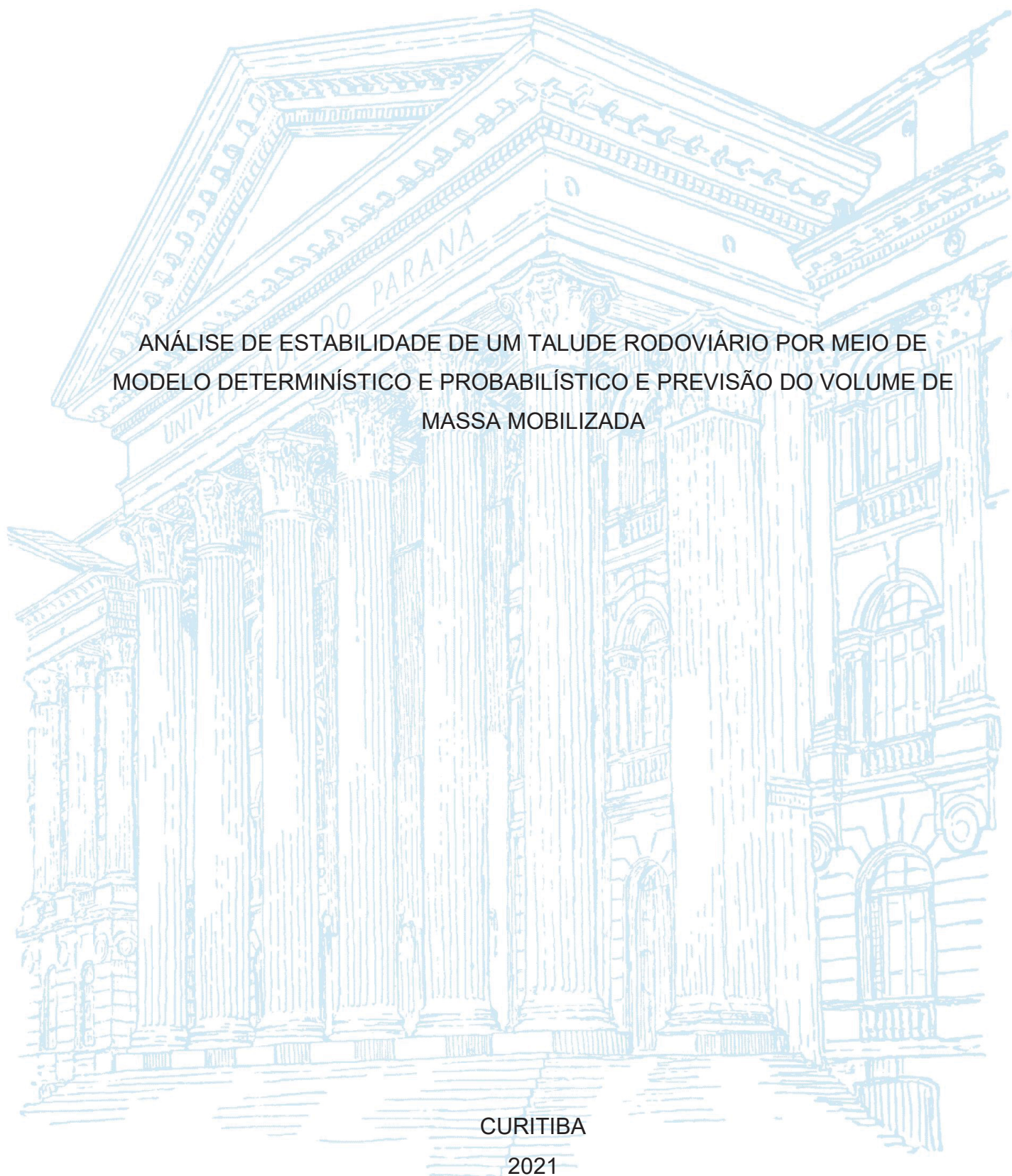
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BIANCA CRISTINE DE TONI RISELO

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE RODOVIÁRIO POR MEIO DE
MODELO DETERMINÍSTICO E PROBABILÍSTICO E PREVISÃO DO VOLUME DE
MASSA MOBILIZADA

CURITIBA

2021



BIANCA CRISTINE DE TONI RISELO

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE RODOVIÁRIO POR MEIO DE
MODELO DETERMINÍSTICO E PROBABILÍSTICO E PREVISÃO DO VOLUME DE
MASSA MOBILIZADA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, área de concentração Geotecnia, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro C. Morales Kormann

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Larissa de Brum Passini

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

R595a Riselo, Bianca Cristine de Toni
Análise de estabilidade de um talude rodoviário por meio de modelo determinístico e probabilístico e previsão do volume de massa mobilizada [recurso eletrônico] / Bianca Cristine de Toni Riselo. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

Orientador: Alessandro Christopher Morales Kormann.
Coorientadora: Larissa de Brum Passini.

1. Deslizamentos de terra. 2. Taludes. I. Universidade Federal do Paraná. II. Kormann, Alessandro Christopher Morales. III. Passini, Larissa de Brum. IV. Título.

CDD: 624.162

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BIANCA CRISTINE DE TONI RISELO** intitulada: **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE RODOVIÁRIO POR MEIO DE MODELO DETERMINÍSTICO E PROBABILÍSTICO E PREVISÃO DO VOLUME DE MASSA MOBILIZADA**, sob orientação do Prof. Dr. ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Abril de 2021.

Assinatura Eletrônica

23/04/2021 14:19:14.0

ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/04/2021 14:21:51.0

ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/04/2021 14:56:21.0

RODRIGO MORAES DA SILVEIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

A todos aqueles que se dedicam, se esforçam, vencem desafios e correm atrás dos seus sonhos, sem medo do que ainda está por vir.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida, pela saúde e força para superar as dificuldades.

Agradeço aos mestres Professor Doutor Alessandro Christopher Morales Kormann e a Professora Doutora Larissa de Brum Passini pelos conhecimentos repassados e pela confiança depositada no meu trabalho.

Aos meus pais, Elizabeth e Paulino, por todo o apoio recebido em todas as fases do meu desenvolvimento, responsáveis por tudo que eu sou hoje. Ao meu irmão Paulino Junior por me ajudar e auxiliar em momentos de dificuldades durante esta caminhada, e pela paciência para comigo na superação dos desafios.

A minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado me incentivando e me motivando.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Concessionária Arteris S.A. por possibilitar a realização deste estudo.

Agradeço a todos os professores da pós-graduação pela dedicação aos alunos e por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca com classe e vença com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante (CHARLES CHAPLIN).

RESUMO

Instabilidades em taludes rodoviários são eventos recorrentes no Brasil devido a fatores como intemperismo, chuva e alteração na forma do próprio talude. Muitas vezes, quando ocorrem estes movimentos em taludes próximos à rodovia, a massa de solo mobilizada chega a interceptar as faixas de trânsito, ocasionando acidentes e prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Esta dissertação tem como objetivo analisar a estabilidade em 2D e 3D de um talude rodoviário localizado na BR-116 SP, por meio da abordagem determinística e probabilística, incorporando cenários de sucção de 0 kPa a 120 kPa e consideração de variação de nível d'água à 6,5 m e à 7,5 m de profundidade, além da previsão do volume de massa mobilizada. O talude em estudo está localizado na Serra Pelada pertencente a cadeia de montanhas da Serra do Mar, km 551 + 600, pista sul, e apresenta aproximadamente 18 metros de altura, 37 metros de comprimento frontal e declividade média de 34°. A caracterização geológico-geotécnica teve como base ensaios de cisalhamento direto, nos níveis de tensão normal de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, e ensaios de sucção por meio do método de papel filtro, ambos os ensaios realizados por Trevizolli (2018), além de três investigações geotécnicas do tipo ensaio SPT, todos realizados em região próxima ao talude. Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidades foram ângulo de atrito interno, intercepto coesivo, peso específico natural do solo e sucção. O talude foi modelado no *software* SVSlope da SoilVision, no qual foram analisados cenários na superfície de ruptura crítica e em profundidades pré-definidas. Foram realizadas análises de estabilidade e quantificação do volume de massa mobilizada no mesmo *software* e geração de mapas de susceptibilidade com o uso de um algoritmo, no *software* ArcMap. O fator de segurança mínimo aceitável para deslizamento do talude em estudo, de acordo com a NBR 11682 (ABNT, 2009), é de 1,3. Os resultados permitiram demonstrar a variabilidade da probabilidade de ruptura, do fator de segurança e do volume de massa mobilizada de um deslizamento do talude em estudo. Observou-se que, em maioria, os resultados obtidos com a abordagem determinística apresentaram um cenário mais otimista e seguro, tanto no fator de segurança (variação entre 1,20 e 2,33) quanto no volume de massa mobilizada (variação entre 362,2 m³ a 4132,9 m³). A probabilidade de ruptura apresentou valores baixos, na maior parte das simulações, variando de 0 a 0,13, sendo este último valor na profundidade de 3,0 metros da superfície de ruptura. Ademais, percebeu-se que as análises em 3D apontaram um cenário mais seguro do que as análises em 2D, com maiores FS (variando entre 1,229 e 1,850) e menores probabilidades de ruptura (variando entre 0 e 0,0064). Já a mudança de posição do nível d'água praticamente não influenciou as condições de estabilidade do talude. Com as análises, conclui-se que o aumento da sucção superficial proporcionou uma maior segurança ao talude. Em contrapartida, para um mesmo valor de sucção superficial, o aumento da profundidade da superfície de ruptura ocasiona um aumento da probabilidade de ruptura e decréscimo do fator de segurança. Além disso, a incorporação da variabilidade dos parâmetros geotécnicos na análise de estabilidade probabilística e a modelagem 3D, permitem uma análise mais fidedigna, apresentando resultados de maior aplicabilidade em análises futuras. Por fim, acrescenta-se ainda que o talude estudado encontra-se estável quanto a sua estabilidade global para ruptura.

Palavras-chave: Deslizamentos de terra. Serra do Mar. Suceptibilidade de ruptura. Monte Carlo. Sucção.

ABSTRACT

Instabilities in road embankments are recurrent events in Brazil due to factors such as weathering, rain and changes in the shape of the slope itself. Often, when these movements occur on embankments close to the highway, the mobilized soil mass intercepts the traffic lanes, causing accidents and economic, social and environmental losses. This dissertation aims to analyse the stability in 2D e 3D of a road embankment located on BR-116 SP, through the deterministic and probabilistic approach, incorporating suction scenarios from 0 kPa to 120 kPa and considering water level variation at 6.5 m and 7.5 m in depth, in addition to volume forecasting of mobilized mass. The slope under study is located in Serra Pelada, belonging to the Serra do Mar mountain range, km 551 + 600, south lane, and is approximately 18 meters high, 37 meters long and has an average slope of 34°. The geological-geotechnical characterization was based on direct shear tests, at the normal stress levels of 50 kPa, 100 kPa and 200 kPa, and suction tests using the filter paper method, both tests performed by Trevizolli (2018), in addition to three geotechnical investigations of the SPT test type, all carried out in a region close to the slope. The geotechnical parameters used in the stability analysis were internal friction angle, cohesive intercept, natural specific weight of the soil and suction. The slope was modelled on SoilVision's SVSlope software, in which scenarios on the critical break surface and at predefined depths were analysed. Stability analysis and quantification of the mobilized mass volume were performed in the same software, and the generation of susceptibility maps using an algorithm, in the ArcMap software. The minimum acceptable safety factor for sliding the slope under study, according to NBR 11682 (ABNT, 2009), is 1.3. The results allowed to demonstrate the variability of the probability of rupture, the safety factor and the mobilized mass volume from a landslide of the slope under study. It was observed that, in most cases, the results obtained with the deterministic approach presented a more optimistic and safer scenario, both in the safety factor (variation between 1.20 to 2.33) and in the volume of mass mobilized (variation between 362.2 m³ to 4132.9 m³). The probability of rupture showed low values in most simulations, ranging from 0 to 0.13, the latter being at a depth of 3.0 meters from the rupture surface. In addition, it was noticed that the 3D analyses pointed to a safer scenario than the 2D analyses, with higher SF (ranging from 1.23 to 1.85) and lower probabilities of rupture (ranging between 0 and 0.0064). The change in position of the water level, however, practically did not influence the stability conditions of the slope. With the analyses, it is concluded that the increase in surface suction provided greater safety to the slope. In contrast, for the same surface suction value, increasing the depth of the rupture surface causes an increase in the probability of rupture and a decrease in the safety factor. Furthermore, the incorporation of the variability of geotechnical parameters in the probabilistic stability analysis and the 3D modelling, allow a more reliable analysis, presenting results of greater applicability in future analyses. Finally, it is added that the studied slope is stable as its overall stability for rupture.

Keywords: Landslides. Serra do Mar. Rupture Susceptibility. Monte Carlo. Suction.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - FUNÇÃO $f(x)$	37
FIGURA 3.1 - LOCAL DE ESTUDO	48
FIGURA 3.2 - VISTAS FRONTAIS DO TALUDE EM ESTUDO	49
FIGURA 3.3 - MAPA GEOLÓGICO DA SERRA PELADA DO KM 540 AO 555.....	50
FIGURA 3.4 - CURVAS DE NÍVEL DA REGIÃO EM ESTUDO E LOCAÇÃO DA ÁREA DO TALUDE ANALISADO E DA ÁREA DAS SONDAGENS ..	52
FIGURA 3.5 - CURVAS DE NÍVEL DA REGIÃO EM ESTUDO E LOCAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	53
FIGURA 3.6 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA 01	55
FIGURA 3.7 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA 02.....	55
FIGURA 3.8 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA 03.....	55
FIGURA 3.9 - SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO.....	57
FIGURA 3.10 - MODELAGEM DO TALUDE EM 3D	58
FIGURA 3.11 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO SVSLOPE: SUPERFÍCIE DE RUPTURA NAS ESPESSURAS ESCOLHIDAS	60
FIGURA 3.12 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO SVSLOPE: SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA	62
FIGURA 3.13 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA CUCKOO SEARCH	63
FIGURA 3.14 - SEÇÃO TRANSVERSAL COM NÍVEL D'ÁGUA À 7,5 METROS DE PROFUNDIDADE	64
FIGURA 3.15 - MODELAGEM DO TALUDE EM 3D COM NÍVEL D'ÁGUA À 7,5 METROS DE PROFUNDIDADE	64
FIGURA 3.16 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO COLUVIONAR	65
FIGURA 3.17 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO RESIDUAL	65
FIGURA 3.18 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL: DADOS DE SWCC.....	66
FIGURA 3.19 - LOCALIZAÇÃO DO MDE NO TERRITÓRIO BRASILEIRO	68
FIGURA 3.20 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	69
FIGURA 3.21 - <i>GRID</i> E ÁREA COMPUTACIONAL	70

FIGURA 3.22 - AVISO DE VALORES DE ELEVAÇÃO NO FLO 2D.....	70
FIGURA 4.1 - MAPAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA NA ANÁLISE PROBABILÍSTICA.....	73
FIGURA 4.2 - MAPAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA NA PROFUNDIDADE DE 2 METROS.....	74
FIGURA 4.3 - ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE NO SVSLOPE PARA A ESPESSURA DE 3,0 METROS.....	77
FIGURA 4.4 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE NO SVSLOPE PARA A ESPESSURA DE 3,0 METROS.....	77
FIGURA 4.5 - VISUALIZAÇÃO 2D DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	80
FIGURA 4.6 - VISUALIZAÇÃO 2D DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	81
FIGURA 4.7 - VISUALIZAÇÃO 3D DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	82
FIGURA 4.8 - VISUALIZAÇÃO 3D DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	82
FIGURA 4.9 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 2D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 6,5 METROS E SUCÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA.....	87
FIGURA 4.10 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 3D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 6,5 METROS E SUCÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA.....	88
FIGURA 4.11 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 2D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 7,5 METROS E SUCÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA.....	89
FIGURA 4.12 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 3D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 7,5 METROS E SUCÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA.....	89
FIGURA 4.13 - RESULTADO DA PROBABILIDADE DE RUPTURA DAS METODOLOGIAS 4.1 E 4.2.....	90

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - COMPOSIÇÃO DO SOLO RESIDUAL EM FUNÇÃO DA ROCHA-MÃE	26
QUADRO 2.2 - RESUMO DE RESULTADOS DE ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO DE SOLOS COLUVIONARES DE TRABALHOS DA BIBLIOGRAFIA	28
QUADRO 2.3 - CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA	30
QUADRO 2.4 - PRINCIPAIS TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL...	30
QUADRO 2.5 - NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA A PERDA DE VIDAS HUMANAS	34
QUADRO 2.6 - NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA DANOS MATERIAIS E AMBIENTAIS.....	34
QUADRO 2.7 - FATORES DE SEGURANÇA MÍNIMOS PARA DESLIZAMENTOS.....	35
QUADRO 2.8 - CORRELAÇÕES EMPÍRICAS DA DISTÂNCIA TOTAL PERCORRIDA	44
QUADRO 2.9 - <i>SOFTWARES</i> UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE PREVISÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA	44
QUADRO 2.10 - CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DOS <i>SOFTWARES</i> PARA ANÁLISE DE PREVISÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - ÍNDICE DE CONFIABILIDADE E PROBABILIDADE DE RUPTURA	.41
TABELA 2.2 - ÍNDICE DE CONFIABILIDADE E PROBABILIDADE DE RUPTURA EM FUNÇÃO DO TIPO DE OBRA EM ANÁLISE	41
TABELA 3.1 - REGISTROS DE OCORRÊNCIAS DE ESCORREGAMENTOS NA SERRA PELADA.....	47
TABELA 3.2 - INTERVALO DE VALORES DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	54
TABELA 4.1 - RESULTADOS DO SVSLOPE NAS ESPESSURAS PRÉ-DEFINIDAS	75
TABELA 4.2 - RESULTADOS DO SVSLOPE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	79
TABELA 4.3 - RESULTADOS OBTIDOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE PARA OS DOIS NÍVEIS D'ÁGUA E OS SEIS CENÁRIOS DE SUCÇÃO SUPERFICIAL	84
TABELA 4.4 - COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS DO SVSLOPE.....	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 METODOLOGIA.....	19
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 CONCEITOS	21
2.1.1 Talude	21
2.1.2 Massa.....	21
2.1.3 Viscosidade	22
2.1.3.1 Relação com as corridas de massa.....	23
2.1.4 Sucção	23
2.1.5 Probabilidade	24
2.1.6 Susceptibilidade e risco.....	24
2.2 SOLO RESIDUAL	26
2.3 SOLO COLUVIONAR.....	27
2.3.1 Valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos coluvionares	27
2.4 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSAS	28
2.5 CAUSAS DE MOVIMENTOS DE MASSAS	31
2.6 MÉTODOS PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	32
2.6.1 Análise determinística	33
2.6.2 Análise probabilística	38
2.6.3 Métodos para determinação da superfície de ruptura	41
2.6.4 Quantificação do volume de massa mobilizada	42
2.7 MODELOS DE PREVISÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA	43
2.7.1 Modelo Digital de Terreno (MDT).....	46
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
3 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 HISTÓRICO DE INSTABILIDADES NA REGIÃO	47

3.2 LOCAL DE ESTUDO	48
3.2.1 Caracterização geológico-geotécnica	49
3.2.2 Parâmetros geotécnicos.....	54
3.3 AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE 2D EM PROFUNDIDADES PRÉ- DEFINIDAS	58
3.4 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D PARA PROFUNDIDADES DE RUPTURA PRÉ-DEFINIDAS.....	59
3.5 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	61
3.6 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA IMPONDO CENÁRIOS DE SUCÇÃO E NÍVEL D'ÁGUA NO TALUDE	63
3.7 PREVISÃO DE MOVIMENTO DE MASSA MOBILIZADA COM BASE NA VISCOSIDADE DO MATERIAL.....	67
3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	72
4.1 AVALIAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE 2D EM PROFUNDIDADES PRÉ- DEFINIDAS	72
4.2 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D PARA PROFUNDIDADES DE RUPTURA PRÉ-DEFINIDAS.....	75
4.3 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	78
4.4 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA IMPONDO CENÁRIOS DE SUCÇÃO E NÍVEL D'ÁGUA NO TALUDE	83
4.5 COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS.....	90
4.6 LIMITAÇÕES DO <i>SOFTWARE</i>	95
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
5.1 CONCLUSÕES	97
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS.....	100
APÊNDICE 1 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA EM PROFUNDIDADES PRÉ-DEFINIDAS NO SVSLOPE	107

APÊNDICE 2 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA.....	110
APÊNDICE 3 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA NA PROFUNDIDADE DE NÍVEL D'ÁGUA DE 6,5 METROS.....	111
APÊNDICE 4 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA NA PROFUNDIDADE DE NÍVEL D'ÁGUA DE 7,5 METROS.....	123
ANEXO 1 – SPT'S DO KM 552 + 200 – PISTA SUL.....	135
ANEXO 2 –PERFIL GEOTÉCNICO COM BASE NOS SPT'S DO KM 552 + 200 – PISTA SUL.....	138

1 INTRODUÇÃO

Instabilidade em taludes, sejam naturais ou artificiais, causa grande impacto no ambiente em que estão inseridos, seja prejuízo econômico, como custos com manutenção, e prejuízo socioambiental, como alteração no ambiente e fatalidades na população da região. A instabilidade dos taludes em encostas, principalmente em regiões litorâneas, coloca em risco a segurança das habitações, dutos ou vias, que possam existir nas suas proximidades, podendo até gerar grandes desastres. As causas dessa instabilidade envolvem vários fatores, podendo ser eles naturais e/ou artificiais, os quais muitas vezes podem estar associados (ECKS, 2014). Dessa forma, conhecê-los possibilita ao engenheiro escolher soluções satisfatórias para o caso em questão, além de ser possível prever seu desempenho.

O Brasil é um país de clima tropical e que no verão apresenta grandes quantidades de chuvas. A chuva é um elemento que interfere na estabilidade do talude, mas não é o único. A ação do intemperismo e alteração na geometria da encosta realizada por meio de taludes de corte e aterro, também são fatores que influem na ocorrência de deslizamentos (GRANDO *et al.*, 2014).

Os gastos financeiros envolvidos com a desestabilização de um talude envolvem o custo de tentativa de resgate de possíveis sobreviventes e, dependendo da magnitude do ocorrido, investimentos em obras de emergências com a finalidade de refrear novos escorregamentos e posterior recuperação e estabilização da encosta (TONUS, 2009).

O estudo da estabilidade de taludes é uma maneira de conhecer bem as suas características e, também, os agentes perturbadores presentes no cenário. Desse modo, análises quantitativas e qualitativas são necessárias a fim de caracterizar a segurança dos taludes e entender melhor seu comportamento, além de possibilitar a identificação das variáveis que mais apresentam influência na instabilidade da massa de solo (CERCEAU DA SILVA, 2015).

Portanto, em meio a esse cenário, a análise de estabilidade com previsão do volume de massa mobilizada é muito importante pois consegue-se avaliar a possibilidade de ocorrência de acidentes bem como estimar o volume de massa a ser movimentada. A norma NBR 11682 (ABNT, 2009) prescreve os requisitos exigíveis para o controle e estudo da estabilidade de encostas, além de apresentar uma

recomendação para o valor do fator de segurança mínimo em função das perdas de vidas humanas e de danos materiais e ambientais, sendo este valor entre 1,2 e 1,5.

Neste contexto, o estudo de caso é baseado em um talude rodoviário localizado na Serra Pelada, BR-116 SP, pertencente a cadeia de montanhas da Serra do Mar, no km 551 + 600, pista sul, o qual possui a finalidade de analisar a estabilidade desse talude de forma determinística e probabilística, diante vários cenários de sucção e posição da superfície de ruptura crítica, englobando a quantificação do volume de massa mobilizada.

1.1 JUSTIFICATIVA

A malha rodoviária brasileira é o principal meio utilizado para o transporte de cargas, escoando cerca de 75% da produção do país, de acordo com o Fundação Dom Cabral em 2018. As rodovias que compõem esta malha, principalmente as rodovias da Região Sudeste, Sul e que se encontram próximas a relevos como a da Serra do Mar, são diretamente influenciados por agentes ambientais, sendo eles: precipitações, clima e vegetação. Segundo Loschi (2018), o IBGE apontou que dentre os desastres naturais que ocorrem no país, principalmente na Região Sul, os deslizamentos de terra ganham destaque, contabilizando cerca de 25% das ocorrências.

O aumento da intensidade e frequência dos eventos climáticos, juntamente com a crescente urbanização, propiciou um aumento na ocorrência de desastres naturais. Dados do Instituto Igarapé (Estarque, 2018) informam que desde 2000 ao menos 6,4 milhões de pessoas ficaram desalojadas ou desabrigadas em razão de desastres naturais no Brasil.

Os custos decorrentes de desastres, sendo os empregados como respostas a esses acontecimentos, bem como os utilizados na reconstrução de áreas afetadas, são maiores a cada ano que passa. Estudo realizado pela Confederação Nacional de Municípios (CNM) aponta um custo total de mais de R\$ 250 bilhões com esses desastres entre os anos de 2014 e 2018.

Com relação aos movimentos de massas em encostas, estes afetam diretamente a sua própria geometria e a região que está inserida, seja no âmbito ambiental quanto no âmbito social. Dessa forma, faz-se necessário entender e avaliar os movimentos de massas em encostas, a fim de garantir a segurança física do próprio

talude como a segurança de elementos que possam ser atingidos como pessoas, dutos, pontes e viadutos.

Na análise de estabilidade de taludes é de grande valia considerar as mudanças ocorridas ao longo do talude, sejam elas dimensionais ou geotécnicas. O uso de uma modelagem probabilística para tomada de decisões é algo benéfico no âmbito tecnológico, pois esta abordagem está relacionada com a possibilidade de variação dos parâmetros geotécnicos, fazendo com que seja o mais próximo da realidade. Além disso, pode-se utilizar indicadores de performance, tais como probabilidade de falha ou índice de confiabilidade, a fim de se obter resultados mais conclusivos e completos de análise de estabilidade (TREVIZOLLI, 2018).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo analisar a estabilidade em 2D e 3D de um talude rodoviário localizado na BR-116 SP, por meio da abordagem determinística e probabilística, incorporando cenários de sucção de 0 kPa a 120 kPa e consideração de variação do nível d'água à 6,5 m e à 7,5 m de profundidade, e prevendo, no caso de ruptura, o volume de massa mobilizada.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- a) Realizar a revisão bibliográfica sobre análise de estabilidade determinística e probabilística com previsão do volume de massa mobilizada em taludes rodoviários;
- b) Estabelecer a área a ser analisada dentro da Serra Pelada, na BR-116 SP;
- c) Definir os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e de sucção bem como a estratigrafia do terreno por meio do estudo de Trevizolli (2018) e de boletins de sondagens do tipo ensaio SPT;

- d) Modelar a topografia do terreno em planta no ArcMap 10.3 e modelar o talude no *software* SVSlope da SoilVision;
- e) Confeccionar um mapa de susceptibilidade da área do talude;
- f) Avaliar a estabilidade do talude em estudo pertencente à BR 116 SP.

1.3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta dissertação compreende cinco etapas fundamentais. A primeira etapa consiste no levantamento de informações a partir da realização da revisão bibliográfica, por meio de buscas na literatura nacional e internacional, sobre o seguinte tema, análise de estabilidade determinística e probabilística com previsão do volume de massa mobilizada de um deslizamento de talude rodoviário.

A segunda etapa deste trabalho compreende a escolha da área a ser estudada, a qual contenha um talude rodoviário estável, ou seja, que não está rompido. Além disso, envolve a busca dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, estratigrafia do terreno, dados de parâmetros geotécnicos, sucção e demais dados necessários para início das análises, em bibliografia e pesquisas anteriores já realizadas na mesma região.

A terceira etapa deste trabalho abrange o desenvolvimento de mapas de susceptibilidade probabilística da área em estudo baseados na análise realizada por meio do método de Monte Carlo. É utilizado um algoritmo em linguagem Python 2.7 com incorporação de sucção, o qual determina a probabilidade de ruptura do talude em espessuras de solo pré-definidas.

A quarta etapa do trabalho engloba a modelagem do talude em 2D e 3D no *software* SVSlope da Soil Vision, considerando em alguns cenários nível d'água à 6,5 metros e 7,5 metros de profundidade com base nos boletins de sondagem do tipo ensaio SPT e com a finalidade de entender o impacto desta consideração e variação nos resultados das análises. Na abordagem determinística é considerado o método de Morgenstern e Price e na abordagem probabilística é utilizado o método de Monte Carlo. Com as análises se obtém resultados de fator de segurança, probabilidade de ruptura e volume de massa mobilizada.

A quinta etapa fundamenta-se na realização das análises de todos os resultados, nas conclusões obtidas com a aplicação das metodologias bem como nas sugestões para trabalhos futuros.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, os quais apresentam:

O capítulo 1 contém a introdução, no qual realiza-se uma breve exposição sobre deslizamento de terra e análise de estabilidade, com definição dos objetivos (geral e específicos), descrição da justificativa e apresentação da metodologia seguida para a realização deste estudo, além da descrição da estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, no qual discorre-se as considerações sobre deslizamento de terra, análise de estabilidade e previsão de movimento de massa mobilizada. Apresenta uma revisão bibliográfica sobre os assuntos: conceitos importantes dentro do cenário de análise de estabilidade de talude, tipos e causas de movimentos de massa, métodos para análise de estabilidade de taludes, além de modelos de previsão de movimentos de massa.

O capítulo 3 mostra os materiais e métodos, apresentando os *softwares* utilizados no estudo bem como a descrição de todos os métodos utilizados, seja da busca de dados como a descrição das análises realizadas.

O capítulo 4 contém a apresentação dos resultados, no qual é exposto os resultados obtidos com a aplicação das metodologias. Inicia-se pelos mapas de susceptibilidade e com a quantificação de volume de massa mobilizada. Na sequência são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as análises de estabilidade determinística e probabilística na superfície de ruptura crítica. Por fim, tem-se a descrições das limitações encontradas nos *softwares* utilizados nas análises.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, no qual discorre-se sobre as conclusões das análises dos resultados e comparação dos métodos empregados, além das sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as revisões bibliográficas relevantes para o desenvolvimento deste estudo. Primeiramente, são apresentados alguns conceitos importantes para o estudo, posteriormente os tipos de movimentos de massa e possíveis causas, métodos para análise de estabilidade de taludes e modelos de previsão de movimentos de massa.

2.1 CONCEITOS

2.1.1 Talude

O termo talude refere-se a qualquer superfície inclinada que engloba um maciço de terra, de rocha ou de rocha e terra. Tem-se dois tipos de taludes, os naturais como as encostas, e os artificiais como os taludes de corte e aterro. As encostas, quando sujeitas a interferências externas, apresentam diferentes comportamentos com o passar do tempo, seja em razão da sua inclinação ou formação geológica (AGUIAR; SILVA FILHO; ALMEIRA, 2005).

Os taludes naturais podem apresentar em sua constituição solo residual e/ou solo coluvionar, além de rocha. O primeiro refere-se aos solos que permanecem no lugar em que foram gerados, já o segundo é gerado por meio do seu transporte pela ação da gravidade. Assim sendo, este tipo de talude está sempre suscetível a instabilidades devido as ações das forças gravitacionais, as quais, naturalmente, acabam contribuindo no desencadeamento do movimento (GERSCOVICH, 2016).

2.1.2 Massa

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2012), massa é definida como a propriedade de um corpo que relaciona uma força que age sobre ele à aceleração resultante. Já Hewitt (2009) a define como sendo a quantidade de matéria de um objeto, ou ainda como “medida da inércia ou lerdeza que um objeto apresenta em resposta a qualquer esforço feito para movê-lo, pará-lo ou alterar de algum modo o seu estado de movimento”.

2.1.3 Viscosidade

O conceito de viscosidade foi inserido por Isaac Newton em 1687, o qual o definia como sendo a resistência ao deslizamento das moléculas do fluido em razão à fricção interna (GALINDO, 2013). Para Tipler e Mosca (2009), viscosidade diz respeito a propriedade de um fluido em resistir ao escoamento.

Netto *et al.* (2012) apresentam duas possíveis definições para viscosidade, a primeira está relacionada com “a propriedade dos fluidos responsável pela sua resistência à deformação”. A segunda definição refere-se à capacidade do fluido em resistir aos esforços cortantes (cisalhamento).

De acordo com Barnes, Hutton e Walters (1989), a principal propriedade reológica de um fluido pode ser considerada a viscosidade, dado que sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa esta apresenta uma facilidade de escoar continuamente. A mesma consideração, de que este parâmetro é uma das mais importantes características de um fluido, segundo Znamensky (2001), pode ser feita em relação à *debris flow* (fluxo de detritos), em razão desta propriedade estar relacionada com a fluência e conseqüentemente com a mobilidade das massas que compõem o sistema disperso.

Pileggi (2001) dissertam que em um sistema composto por partículas sólidas e líquido, a viscosidade do fluido aumenta devido à dificuldade induzida pelas partículas ao fluxo do líquido. Os principais fatores que interferem na viscosidade de uma suspensão são: temperatura, concentração volumétrica de sólidos e característica do meio líquido, como densidade e viscosidade.

Sendo assim, aplicando este conceito em solos pode-se ter dois cenários: viscosidade baixa e viscosidade alta. No primeiro caso, solos com elevado teor de umidade e um valor baixo de viscosidade, aponta que este solo apresenta uma maior probabilidade de sofrer um processo de corrida após a sua ruptura. Já o segundo caso, o mesmo solo com elevada umidade, porém com uma viscosidade de valor mais elevado, faz com que este solo se mantenha em estado sólido após a sua ruptura, isto é, tem-se o rompimento do material, mas sem o desenvolvimento da corrida (MORAIS DE MELO, 2014).

Dados de viscosidade de solos podem ser obtidos das seguintes pesquisas:

- O'Brien e Julien, 1988
- Coussot e Piau, 1994
- Iverson, 1997
- Whipple, 1997
- Coussot *et al.*, 1998
- Morais de Melo, 2014

2.1.3.1 Relação com as corridas de massa

As corridas de massas apresentam movimentos rápidos em que seus materiais componentes possuem comportamento de fluidos altamente viscosos. Sendo assim, os solos, nestes movimentos, são classificados como fluidos viscoplásticos, os quais demonstram um comportamento sólido até que uma tensão mínima (tensão de escoamento) é superada, após isso a relação torna-se linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento (GUIDICINI; NIEBLE, 1984). Em outras palavras, de acordo com Bird *et al.* (1983, *apud* GALINDO, 2013), quando as forças de ligação entre as partículas do fluido são superadas por grandes forças externas, a estrutura do fluido entra em colapso, o que possibilita que os elementos mudem de posição irreversivelmente, ou seja, que o sólido se transforme em líquido.

Diante deste contexto percebe-se que a caracterização reológica de movimentos de massa é algo complexo. Primeiramente em razão do solo poder passar do estado sólido, com comportamento elástico, para um estado líquido, apresentado assim uma grande alteração no comportamento reológico. Segundo, porque o solo apresenta em sua constituição faixas granulométricas que interagem entre si e que, no processo de movimentação, podem ser constantemente modificadas, o que pode interferir na caracterização reológica do material (ZNAMENSKY 2001).

2.1.4 Sucção

Fredlund e Rahardjo (1993) descrevem sucção, ou poropressão negativa, como a energia relacionada com a absorção de água por um elemento poroso quando

o líquido está livre para se movimentar, ou ainda como a força com que a água é absorvida por um elemento poroso. Para Vivian (2008), sucção refere-se a uma pressão isotrópica originada da interação entre o gás e o líquido nos poros do solo. Já Marinho (1994), a define como a pressão isotrópica instituída pelo poro do solo com a finalidade de absorver mais água.

A sucção é dividida em duas partes, a sucção matricial e a sucção osmótica. A primeira está relacionada com o tipo de partículas e seu arranjo estrutural, além da relação com a quantidade de água presente no solo, sendo resultado das forças de adsorção, as quais mantêm a água aderida às partículas sólidas. A segunda é associada à composição química da água do solo, ou seja, em função dos solutos presentes no meio que se encontra. Diante disso, a fim de facilitar o entendimento do tipo de sucção considerado neste estudo, o termo sucção quando mencionado refere-se somente a sucção matricial (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

É fundamental o efeito da sucção no comportamento dos solos não saturados, sendo este efeito fortemente relacionado com a densidade, mineralogia e umidade do solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

2.1.5 Probabilidade

A NBR 31000 (ABNT, 2018) aponta a probabilidade como a chance de algo acontecer. Segundo Oliveira (2004), probabilidade manifesta o quanto provável é que um determinado evento aconteça, sendo obtida pela relação de ocorrência de um determinado evento que ocasiona consequências indesejáveis e a totalidade dos eventos prováveis. É representada por um número positivo, que varia entre 0 e 1, em que 0 refere-se à impossibilidade de ocorrência do evento e 1 que a ocorrência do evento é dada como certa.

O termo probabilidade dentro do contexto de análise de risco de deslizamentos de terra, refere-se à probabilidade de ocorrência de um determinado escorregamento em um dado período, sendo geralmente um ano (COSTA, 2005).

2.1.6 Susceptibilidade e risco

Julião *et al.* (2009) definem susceptibilidade como a incidência espacial de um determinado perigo. Representa a predisposição de uma área ser afetada por um

perigo em específico, em um tempo indeterminado, não contemplando o período de retorno. Girão, Rabelo e Zanella (2018) complementam que susceptibilidade está associada ao quão provável um fenômeno em particular pode acontecer independentemente dos fatores sociais, porém tendo a sociedade como elemento que acaba interferindo no processo, sendo da forma de retardamento ou aceleração deste acontecimento. Além disso, os autores apontam que a susceptibilidade é específica a um determinado fenômeno, sendo, neste estudo, relativo a um deslizamento de terra em uma área em específico.

Aplicado ao contexto do estudo, Montoya (2013) define susceptibilidade como a facilidade relativa de um talude ser afetado por um movimento de massa. Já Costa (2005) a descreve como a possibilidade de ocorrência de um escorregamento em uma determinada área baseado nas condições do terreno local.

O conceito de susceptibilidade pode ser utilizado na estimativa de risco. Segundo a ONU (1984, *apud* GIRÃO; RABELO; ZANELLA, 2018) risco refere-se ao grau de perda esperada em razão de um fenômeno natural em específico, devido tanto ao risco natural quanto a vulnerabilidade. Tominaga *et al.* (2004) complementam que risco diz respeito as perdas esperadas, sejam vidas, moradias, lesões de vítimas, danos ambientais ou interrupção de atividades, resultantes da interação entre perigos naturais, vulnerabilidade e potencial de dano do elemento em risco. De acordo com Crozier e Glade (2004), este conceito pode ser calculado pela seguinte Equação:

$$\text{Risco} = \text{Susceptibilidade} \times \text{Vulnerabilidade} \times \text{Elementos em risco} \quad (2.1)$$

Onde:

Susceptibilidade = probabilidade de ocorrência de um deslizamento nocivo

Vulnerabilidade = fator de dano esperado

Elementos em riscos = atributos valorizados

Aplicando o conceito de risco ao cenário de escorregamento de terra, o mesmo aborda a probabilidade de consequências prejudiciais em um determinado local sujeito a escorregamentos, sendo estas consequências pessoas feridas, interrupção das atividades econômicas ou extensão dos danos a propriedade ou sistemas ecológicos (FELL, 1994; VARNES, 1984).

2.2 SOLO RESIDUAL

O solo residual, de acordo com Aguiar, Silva Filho e Almeida (2005), refere-se ao solo resultante do intemperismo de uma rocha matriz que permanece no seu local de origem e não é removido por algum agente transportador como água, vento e ação da gravidade. O tipo de solo resultante é definido em função da natureza da rocha matriz, da topografia, do clima, dos processos orgânicos e das condições de drenagem (TONUS, 2009). O conhecimento da rocha originária do solo é muito importante pois a rocha interfere nas propriedades do solo sendo elas: plasticidade, planos de fraqueza, composição granulométrica, características estruturais e grau de intemperismo (JOLY, 2018). O Quadro 2.1 apresenta exemplos de tipos de rochas e os produtos de intemperismo relativos a cada uma.

QUADRO 2.1 - COMPOSIÇÃO DO SOLO RESIDUAL EM FUNÇÃO DA ROCHA-MÃE

Rocha	Tipo de solo
Basalto	Argiloso
Quartzito	Arenoso
Filito	Argiloso
Granito	Arenoargiloso (micáceo)
Calcário	Argiloso
Gnaisse	Siltoso e micáceo

FONTE: Gerscovich (2016).

Em função da evolução do processo de intemperismo que evolui da superfície até as regiões mais profundas, o solo residual pode conter diferentes horizontes em seu perfil, sendo eles (GERSCOVICH, 2016):

- Solo residual maduro: camada superficial que apresenta alto grau de intemperismo e sem características provenientes da rocha-mãe;
- Solo saprolítico ou de alteração de rocha: solo com menor grau de intemperismo que o solo residual maduro e com características estruturais e minerais preservadas da rocha-mãe;
- Rocha alterada: é identificada em função do avanço do intemperismo ao longo das fraturas ou regiões com minerais menos resistentes;
- Rocha sã: rocha sem interferência do intemperismo, intacta.

O solo residual é muito encontrado em regiões quentes e úmidas as quais são favoráveis ao intemperismo químico, e com vegetação que mantenha os produtos do intemperismo, evitando seu transporte. No Brasil a profundidade dos solos residuais geralmente varia de 10 m a 25 m, podendo em alguns casos chegar até 100 m (SILVA, 2019).

2.3 SOLO COLUVIONAR

O solo coluvionar consiste em solo residual transportado sob ação exclusiva da gravidade, de ocorrência localizada e encontrado, geralmente, ao pé de encostas naturais. Constituem-se de solo misturado com blocos de rocha com composição definida em função do tipo de rocha existente nas áreas mais elevadas, sendo então composto de materiais permeáveis, inconsolidados e sujeitos a movimentos de massa gravitacionais (CHIOSSI, 1979; MASSAD, 2010).

O modo de ruptura do solo coluvionar está associado ao seu processo de formação. A massa de solo que dá origem ao colúvio apresenta movimentação lenta e contínua ao longo da encosta, porém pode ser substituída por um movimento mais acelerado após períodos de chuvas intensas, tentando a acelerar quando ocorre infiltração de água no interior do talude causando aumentos significativos de poropressão. Sendo assim, esta movimentação é responsável por dispor as camadas de solo coluvionar no talude, no entanto, quando se tem o rompimento do equilíbrio, o movimento rápido da massa de solo constitui o modo de ruptura do talude (SILVEIRA, 2003).

O contato do solo coluvionar com o solo residual (limite inferior) pode ser definido por um estrato ou camada de pedregulho, conhecida como linha de seixos, ou também por uma camada argilosa de transição que apresenta elevada plasticidade e baixa permeabilidade (SILVA, 2019).

2.3.1 Valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos coluvionares

Os solos coluvionares podem apresentar diferentes valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento como intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, em função do tipo de rocha matriz originária do solo, intemperismo, clima, entre outros. Sendo assim, a fim de comparar os valores utilizados nas análises desta dissertação

com os valores de literatura, elaborou-se um quadro resumo (Quadro 2.2) com base na pesquisa de Silveira (2003), o qual elencou diversos trabalhos da literatura que realizaram ensaios de laboratórios do tipo cisalhamento direto para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos coluvionares.

QUADRO 2.2 - RESUMO DE RESULTADOS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE SOLOS COLUVIONARES DE TRABALHOS DA BIBLIOGRAFIA

Autor	Ano	Localização	Corpos de prova inundado/ Sem inundação	Tensões de ensaio (kPa)	Valores de pico/ Residual	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Lacerda e Silveira	1992	Soberbo (RJ)	Inundado	12,8 a 100	Pico	12	29,4 - 31,5
			Sem inundação	50 a 100		9	31
Perazzolo	2003	Canela (RS)	-	25 a 100	Pico	17	29
		Bento Golçalves (RS)		25 a 100	Pico	16	32
Pinheiro <i>et al.</i>	1997	Faxinal do Soturno (RS)	-	25 a 105	Pico Residual	4 - 9 0	38 - 39 18,2 - 23,7
Bressani e Bica	1998	Teutônia (RS)	-	-	Pico	4	29
Clementino e Lacerda	1992	Rio de Janeiro (RJ)	Inundado	-	Pico	9,1 - 20,2	30 - 35
			Sem inundação		Residual	3,8 - 6,4	31 - 39
Soares <i>et al.</i>	2001	Santa Maria (RS)	Inundado	15 a 200	Pico	3,5 - 25,5	21,2 - 28,5
Fonseca <i>et al.</i>	2002	Bananal (SP)	Inundado	25 a 100	Pico	6,8 - 31,7	36,2 - 36,5
Ferreira	2013	Caraguatatu ba (SP)	Inundado	-	Pico	0 - 11,1	25,8 - 36,8
Trevizolli	2018	Serra Pelada (SP)	Inundado	50 a 200	Pico	14,1 - 16,8	27,5 - 30
					Residual	4,7 - 9,9	17,8 - 18,8
González <i>et al.</i>	2019	Serra do Mar Paranaense (PR)	Inundado	30 a 90	Pico	8,2 - 14,8	26 - 37,9

FONTE: Adaptado de Silveira (2003).

2.4 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSAS

Na literatura existem diversas classificações de movimentos de massa. Segundo Augusto Filho e Virgili (1998) estas classificações são definidas por meio da combinação de alguns critérios como:

- Natureza do material instabilizado;
- Geometria das massas movimentadas;
- Velocidade, direção e recorrência dos deslocamentos;
- Modalidade de deformação do movimento;
- Textura, estrutura e conteúdo de água dos materiais.

Magalhães Freire (1965 *apud* GUIDICINI; NIEBLE, 1984) divide os movimentos de massas em três grupos, escoamentos, escorregamentos e subsidências:

- a) Escoamentos: referem-se as deformações ou movimentos contínuos, que apresentam ou não uma superfície de movimentação definida. Em função do movimento são classificados em rastejo (escoamento plástico) e corrida (escoamento fluido-viscoso);
- b) Escorregamentos: diz respeito ao deslocamento finito sobre uma superfície bem definida. Classifica-os de acordo com a forma sendo rotacional e translacional;
- c) Subsidências: são os deslocamentos finitos ou deformações contínuas de direção, em maioria, vertical. Subdividem-se em subsidência, recalque e desabamento/quedas.

Já, Varnes (1978) classificou os movimentos de massa por meio do critério de natureza do material estabilizado. O Quadro 2.3 apresenta esta classificação. Por fim, com base na classificação de Varnes (1978), Augusto Filho (1992) reuniu em um quadro (Quadro 2.4) os principais tipos de movimentos de massa que frequentemente ocorrem no Brasil.

QUADRO 2.3 - CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Tipo de movimento		Tipo de material		
		Rocha	Solo (engenharia)	
			Grosseiro	Fino
Quedas		De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos		De rocha	De detritos	De terra
Escorregamentos	Rotacional	De rocha	De detritos	De terra
	Translacional			
Expansões laterais		De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos		De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
			(Rastejo de solo)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos				

FONTE: Varnes (1978).

QUADRO 2.4 - PRINCIPAIS TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo (<i>creep</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Vários planos de deslocamento (internos); - Velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade; - Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; - Solo, depósitos, rocha alterada e/ou fraturada; - Geometria indefinida.
Escorregamentos (<i>slides</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos planos de deslocamento (externo); - Velocidades médias (m/h) e 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.
Quedas (<i>falls</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Sem plano 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.
Corridas (<i>flows</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); - Movimento semelhante a um líquido viscoso; - Desenvolvimento ao longo de drenagens; - Velocidades médias a altas; - Mobilização de solo, rocha, detritos e água; - Grandes volumes de material; - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

FONTE: Augusto Filho (1992).

2.5 CAUSAS DE MOVIMENTOS DE MASSAS

O processo de deslizamento de terra pode ocorrer em função de vários fatores. Cha e Kim (2011) os classificam em naturais, tais como topografia, formação geológica, condição do solo, qualidade da rocha e precipitação; e em artificiais, como escavação e aterro. Os parâmetros morfológicos do terreno são os que apresentam maior destaque entre os possíveis fatores de escorregamento, pois são eles que controlam diretamente o equilíbrio das forças no talude e, indiretamente, a dinâmica hidrológica dos solos (FERNANDES *et al.*, 2001).

Brasil (2007) divide os fatores naturais em agentes predisponentes e agentes efetivos. Os primeiros referem-se as características intrínsecas do meio físico natural, tais como perfil e espessura do solo, comportamento e resistência das rochas às ações do meio ambiente, vegetação e ação da gravidade. Já os agentes efetivos dizem respeito aos agentes que agem de forma direta na iniciativa do movimento de massa, sendo eles subdivididos em imediatos (chuva intensa, vibração e terremotos) e preparatórios (pluviosidade, erosão, umidade, ação de fontes e mananciais).

Já, Morles (2009) identifica as ações de fatores internos e externos como causa da ocorrência dos deslizamentos. Os fatores internos estão relacionados aos fatores que diminuem a resistência dos materiais sem mudar a tensão, como processos de intemperismo e erosão, mudanças nas características do material, nas forças intergranulares e na estrutura, e transformação dos materiais através de movimentos progressivos por expansão lateral e fissuras. Os fatores externos referem-se aos fatores que ocasionam um aumento na tensão mas não na resistência dos materiais. Como exemplo tem-se mudanças no regime hidrológico (duração e intensidade das precipitações), tensões transitórias naturais e artificiais (vibrações e sismos) e mudanças geométricas e de peso nos taludes devido a erosão, cortes, escavações e deslizamentos prévios (MORLES, 2009).

Massad (2010) cita como principais causas de movimentos de massa o aumento de peso do talude, a infiltração de água que aumenta as pressões neutras e reduz a resistência do solo, e o desmatamento e a poluição ambiental que contribuem para que ocorra uma desestabilização nos taludes, já que a vegetação absorve parte das águas e as raízes proporcionam um reforço na resistência ao cisalhamento do solo.

A possibilidade de instabilidade surge quando ocorre um conjunto destes fatores resultando em alterações nos parâmetros de resistência, aumento da saturação do solo, alívio de tensões e carregamentos, e variações de poropressões. Para acontecer a instabilidade, basicamente, precisa-se que a resistência ao cisalhamento do material do talude seja igual às tensões cisalhantes que atuam na provável superfície de ruptura (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Teoricamente, um talude é uma massa de solo que está submetida a três forças: forças devidas ao escoamento da água, ao peso dos materiais e à resistência ao cisalhamento do solo. A análise de estabilidade avalia se é possível ou não o escorregamento dessa massa de solo em meio a este cenário de forças, seja de um talude natural ou construído (PEREIRA, 2013).

Nas análises de risco as causas a serem consideradas, de acordo com Montoya (2013), são:

- Morfológicas: erosão superficial ou subterrânea, expansão e contração, assoreamento e elevação vulcânica ou tectônica.
- Geológicas: materiais fracos, sensitivos, alterados, fissurados ou descontínuos; contraste entre rigidez ou permeabilidade dos materiais; e orientação desfavorável.
- Antrópicas: carregamento do talude ou da sua crista, desmatamento, escavação dos taludes ou dos seus pés, irrigação, mineração e vibrações artificiais.

A susceptibilidade do talude sensibilizado por movimentos de massa pode ser determinada por meio do conhecimento destes fatores e características, no entanto para ocorrer estes movimentos é necessário ter um agente detonante ou deflagrante, o qual vem a induzir o processo de deslizamento. Atividades vulcânicas e antrópicas, além de chuvas e sismos, são considerados os principais agentes (MONTROYA, 2013).

2.6 MÉTODOS PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A análise de estabilidade apresenta o objetivo de avaliar a possibilidade de ocorrência de um deslizamento de solo presente em um talude natural ou artificial (GERSCOVICH, 2016). É dividida em dois tipos: análise determinística e análise

probabilística. A primeira refere-se à uma análise quantitativa baseada em um fator de segurança e que apresenta duas possibilidades de métodos: baseados no deslocamento e baseados em estado de equilíbrio limite (DUNCAN; WRIGHT, 2005). Já na segunda é possível levar em consideração a variação dos parâmetros geotécnicos bem como calcular a probabilidade de ruptura e, também, a confiabilidade do talude. Vale ressaltar que as análises probabilísticas utilizam de métodos determinísticos nos cálculos, dessa forma, faz-se necessário utilizar ambos no processo de análise de estabilidade de taludes (TONUS, 2009).

2.6.1 Análise determinística

A análise determinística é baseada na comparação das tensões cisalhantes mobilizadas (τ_{mob}) com a resistência ao cisalhamento do solo (τ_f), sendo então definido o fator de segurança (FS), conforme Equação 2.2 (GERSCOVICH, 2016).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (2.2)$$

A resistência ao cisalhamento do solo (τ_f) depende dos componentes intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, além da tensão normal efetiva na superfície de ruptura, sendo definida pela Equação 2.3 (DAS, 2007).

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.3)$$

Onde:

c' = intercepto coesivo

σ' = tensão normal efetiva na potencial superfície de ruptura

ϕ' = ângulo de atrito interno na condição drenado

Gerscovich (2016) considera que uma obra é estável quando o FS é maior que 1, sendo que FS igual a 1 ocorre a ruptura da obra e FS menor que 1 não apresenta significado físico.

A norma NBR 11682 (ABNT, 2009) prescreve os requisitos exigíveis para o controle e estudo da estabilidade de encostas e de taludes de cortes e aterros.

Determina que, dependendo dos riscos envolvidos no contexto, deve-se enquadrar o projeto nas classificações de segurança em função das perdas de vidas humanas (Quadro 2.5) e de danos materiais e ambientais (Quadro 2.6).

QUADRO 2.5 - NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA A PERDA DE VIDAS HUMANAS

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

FONTE: ABNT (2009).

QUADRO 2.6 - NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA DANOS MATERIAIS E AMBIENTAIS

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

FONTE: ABNT (2009).

Após o nivelamento do projeto nas duas classificações a NBR 11682 (ABNT, 2009) apresenta uma recomendação para o valor do fator de segurança admissível (FS_{adm}) (Quadro 2.7). O FS_{adm} de uma obra refere-se a um valor mínimo e varia em razão da vida útil e do tipo de obra (GERSCOVICH, 2016).

QUADRO 2.7 - FATORES DE SEGURANÇA MÍNIMOS PARA DESLIZAMENTOS

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

FONTE: ABNT (2009).

Alves de Lima (2014) comenta que o FS é considerado o fator pelo qual pode-se reduzir os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, tornando o talude em estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície de ruptura. Ressalta também que se deve considerar na determinação do FS: sobrecargas, as condições atuais do talude, o uso futuro da área em questão, cortes na base, desmatamento e infiltração excessiva.

A análise determinística de estabilidade de taludes pode ser feita com base em métodos baseados em estado de equilíbrio limite e em métodos baseados na análise de deslocamentos. (ALVES DE LIMA, 2014).

Os métodos de equilíbrio limite consideram a hipótese de equilíbrio em uma massa de solo (corpo rígido) na instância de entrar em movimento. Esta massa pode ser delimitada por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de geometria qualquer. Além disso, o método considera que a ruptura ocorre ao longo desta superfície e que todos os elementos presentes nesta superfície atingem conjuntamente a mesma condição de FS (GERSCOVICH, 2016). Já os métodos baseados na análise de deslocamentos referem-se as análises de tensão × deformação do solo fundamentado nos métodos dos elementos finitos ou das diferenças finitas, o qual não está no escopo deste estudo (ALVES DE LIMA, 2014).

A forma da superfície de ruptura é definida em função da geometria do problema, das características dos materiais envolvidos, da estratigrafia do terreno e dos métodos de cálculo disponíveis para a análise (USACE, 2003).

Os métodos de equilíbrio limite consistem em fixar uma superfície de ruptura potencial considerando o solo que está acima desta superfície como corpo livre. Então, divide-se o maciço em fatias e calcula-se o equilíbrio por meio da estática ($\sum F = 0, \sum M = 0$) em cada fatia. Por meio da análise obtém-se a tensão cisalhante mobilizada de forma que o maciço de solo esteja em equilíbrio limite. O FS encontrado

é comparado com o obtido pela Equação 2.2, sendo que para se obter o FS mínimo é necessário realizar várias iterações (ALVES DE LIMA, 2014).

Segundo Krahn (2003), os métodos de equilíbrio limite são bem similares, o que os difere são as equações de estáticas, as forças entre fatias incluídas e a relação entre as forças cisalhantes e normal entre fatias, consideradas nas análises. No entanto o número de equações limites disponíveis é menor que o número de incógnitas existentes, sendo necessário adotar algumas hipóteses para tornar o problema determinado.

Dentre os diferentes métodos de equilíbrio limite que podem ser utilizados na análise de estabilidade, no presente trabalho foi selecionado o método de Morgenstern e Price para ser aplicado ao estudo na análise de estabilidade na superfície de ruptura crítica. Para a análise de estabilidade em profundidades pré-definidas considerou-se a formulação de Fiori e Carmignani para o cálculo do fator de segurança.

Fiori e Carmignani (2009) descrevem o fator de segurança, em rupturas translacionais (talude infinito), em função das mecânicas e das propriedades físicas do solo, escoamento hídrico, relevo e tipos de cobertura vegetal.

O FS resultante significa a razão das forças favoráveis ao movimento de deslizamento pelas forças resistentes ao movimento. A Equação 2.4 contém a expressão empregada por Fiori e Carmignani (2009).

$$FS = \frac{C_s + \left[\left(\gamma_{sat} - \frac{h_w}{h} \gamma_w \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \phi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad (2.4)$$

Onde:

FS = fator de segurança;

C_s = coesão do solo (kPa);

ϕ = ângulo de atrito interno do solo (graus);

γ_{sat} = peso específico do solo saturado (kN/m³);

γ_{nat} = peso específico do solo natural (kN/m³);

γ_w = peso específico da água (kN/m³);

h_w = altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente (m);

h = espessura do solo, perpendicular à vertente (m);

i = inclinação da vertente (adimensional);

σ_a = pressão do peso das árvores sobre a vertente (kPa);

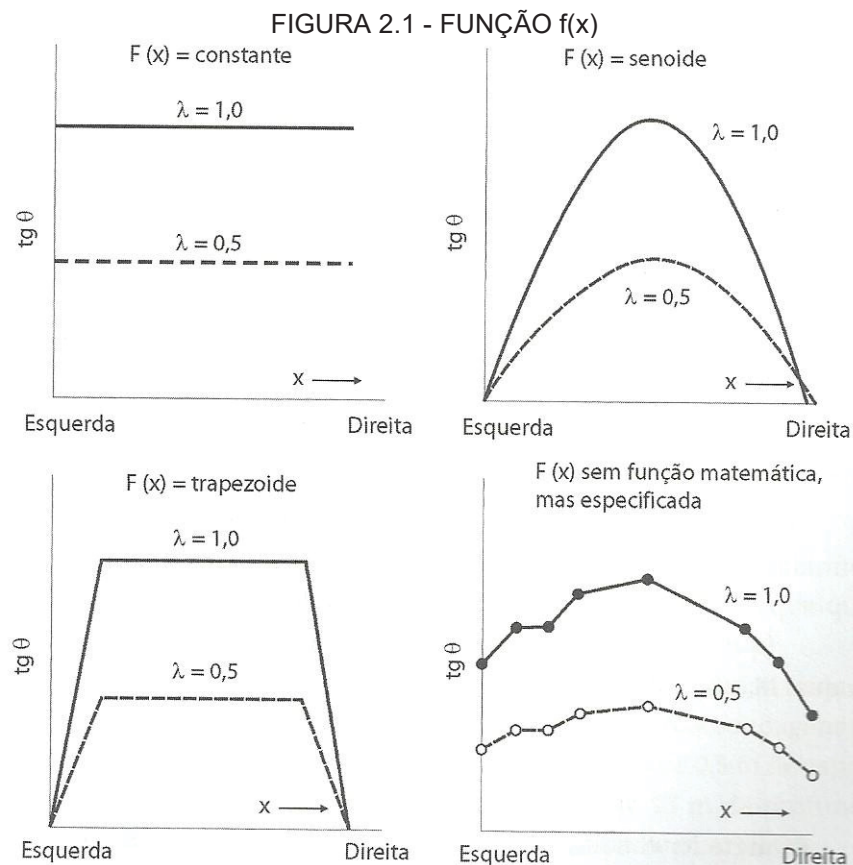
σ_{ve} = pressão exercida pelo vento sobre a cobertura vegetal (kPa).

O método de Morgenstern e Price, conforme Freitas (2011), é considerado rigoroso, pois satisfaz todas as condições de equilíbrio e pode ser aplicada para qualquer superfície de ruptura. Segundo o mesmo autor, para o cálculo por meio desse método é realizado o equilíbrio de momentos em relação ao ponto médio da fatia, resultando na Equação 2.5, e o equilíbrio de forças (Equação 2.6). No entanto, estas equações diferenciais apresentam três incógnitas, as forças interlamelares (E , X) e a linha de pressão (y_t), assim, foi elaborada uma relação entre E e X (Equação 2.7), na qual λ é um parâmetro escalar e $f(x)$ uma função arbitrária (Figura 2.1).

$$X = E \cdot \frac{dy}{dx} - (y - y_t) \cdot \frac{dE}{dx} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{c'}{FS} \cdot [1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)] + \frac{\operatorname{tg}(\Phi')}{FS} \cdot \left\{ \frac{dW}{dx} + \frac{dX}{dx} - \frac{dE}{dx} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - u \cdot [1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)] \right\} \\ = \frac{dE}{dx} + \left(\frac{dX}{dx} + \frac{dW}{dx} \right) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (2.7)$$



FONTE: Gerscovich (2016).

2.6.2 Análise probabilística

Ao contrário da análise determinística, a qual adota o valor médio para os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, a análise probabilística considera as variações destes parâmetros, ou seja, além da média, cada parâmetro possui um desvio padrão, permitindo assim a sua variação ao longo do talude em estudo (TONUS, 2009).

Ao ser levado em consideração o desvio padrão das variáveis é possível obter inúmeros valores de fator de segurança do talude, por meio dos quais se tem o índice de confiabilidade e a probabilidade de ruptura do talude associado ao fator de segurança da situação considerada (TORRES FILHO; ANDRADE, 2015).

Dentro da Geotecnia a análise de estabilidade probabilística possui diversas aplicações, as principais, segundo Whitman (1984), são:

- Otimização do projeto em face das incertezas, principalmente relativo às cargas e comportamento do solo;
- Otimização da pesquisa e melhoria das análises advindas de ensaios de laboratórios;
- Avaliação da segurança dos componentes, instalações ou subestruturas, por meio da teoria da confiabilidade;
- Avaliação de risco por meio do método da árvore de eventos e da árvore de falhas, aplicados a instalações ou estruturas com variados componentes e modos de falha.

Em resumo, em razão das análises probabilísticas considerarem quantitativamente as várias origens de incertezas, consegue-se proporcionar análises de desempenho mais prováveis com a realidade. Além disso, é possível melhorar o conhecimento dos riscos envolvidos e suas origens, permitindo assim uma análise mais apurada e uma comparação racional da confiabilidade das alternativas de projeto (ARAÚJO, 2013).

Os métodos probabilísticos utilizam algum método determinístico em seus cálculos, então em razão da escolha do método determinístico tem-se uma diferença nos resultados obtidos das análises probabilísticas (TONUS, 2009).

Diversos métodos probabilísticos foram criados para gerar a distribuição de funções de variáveis dependentes, entre eles (MONTROYA, 2013):

- Métodos “exatos”;
- Aproximação da série de Taylor da variável dependente;
- Método das Estimativas Pontuais.

Os métodos “exatos” necessitam que inicialmente sejam conhecidas as funções de distribuição de probabilidade de todas as variáveis independentes. Caso não as sejam pode-se assumir uma distribuição normal, ou lognormal, ou até uniforme. Tem-se o método de Monte Carlo como o principal desta categoria. A segunda classe de métodos contempla os vários métodos baseados na aproximação da série de Taylor da variável dependente, sendo o método de Primeira Ordem Segundo Momento (FOSM) um exemplo. Por fim, tem-se o método das Estimativas Pontuais, o qual, inicialmente, dispensa o conhecimento das funções de distribuição das variáveis independentes, e considera a média mais um desvio padrão e média menos o desvio padrão de cada variável (MONTROYA, 2013). Dentre as opções dos métodos, o método “exato” de Monte Carlo foi o escolhido para as análises do presente estudo por ser um dos mais utilizados e estar disponível nas análises dos *softwares* utilizados no estudo, além da escolha de distribuição normal, a qual é a mais simples entre as citadas e muito utilizada em problemas geotécnicos.

O Método de Monte Carlo apresenta a ideia de simular a flutuação aleatória dos parâmetros de entrada do sistema, tais como intercepto coesivo e ângulo de atrito interno do solo, ao longo de uma análise de estabilidade (ARAÚJO, 2013). Ainda, o método possibilita o cálculo da probabilidade de falha (ruptura do talude) de uma determinada situação que, de acordo com Lemaire, Chateauneuf e Mitteau (2005), utiliza a seguinte formulação para o cálculo:

$$P_f = E[I_{Df}] \approx \tilde{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N I_{Df}^r \quad (2.8)$$

Onde:

E = esperança matemática

I_{Df} = domínio de falha; $I_{Df} = 1$ se $H_{(uk)} \leq 0$; $I_{Df} = 0$ se $H_{(uk)} > 0$

\tilde{P}_f = estimativa de P_f

N = número de tiragens aleatórias

O método de Monte Carlo é uma técnica de amostragem, o que a torna sujeita a erros. Os erros diminuem com o aumento do número de elementos da amostra utilizada, tornando assim a solução mais exata e fiel a realidade conforme este número tende ao infinito. Sendo assim, é necessário utilizar um grande número de análises determinísticas para se ter uma solução adequada (RIBEIRO, 2008).

O índice de confiabilidade (β) indica o número de desvios-padrão que separa a média dos fatores de segurança (FS) do fator de segurança crítico (FS = 1,0). Pode-se calculá-lo tanto para distribuição normal quanto para a lognormal dos resultados do FS (ARAÚJO, 2013). Segundo Christian, Ladd e Baecher (1994), em uma distribuição normal do fator de segurança, o índice de confiabilidade é definido como:

$$\beta = \frac{|\overline{FS} - 1.0|}{\sigma_{FS}} \quad (2.9)$$

Onde:

β = índice de confiabilidade

\overline{FS} = fator de segurança médio computado

σ_{FS} = desvio padrão do fator de segurança

A probabilidade de ruptura pode ser calculada através do índice de confiabilidade quando o FS apresenta distribuição de probabilidade que corresponda à distribuição normal e lognormal (ARAÚJO, 2013). Sendo assim, a probabilidade de ruptura refere-se à probabilidade de o FS real ser menor que 1, além de indicar o nível esperado da estabilidade de um talude. Este parâmetro pode apresentar duas interpretações: o percentual de taludes rompidos caso taludes equivalentes fossem construídos ou o nível de confiança atribuído a obra. A primeira é considerável em situações em que um mesmo talude seja construído várias vezes, já a segunda é considerável em obras realizadas apenas uma vez (COSTA, 2005).

Não existe uma norma que indique qual seria um valor adequado para o índice de confiabilidade e para a probabilidade de ruptura para cada tipo de obra, porém inúmeros autores sugeriram alguns valores. A USACE (1999) aponta valores de índice de confiabilidade (β) e de probabilidade de ruptura em função do nível de desempenho esperado (Tabela 2.1), sendo um nível aceitável o índice de confiabilidade 4,0 e probabilidade de ruptura de 3×10^{-5} .

TABELA 2.1 - ÍNDICE DE CONFIABILIDADE E PROBABILIDADE DE RUPTURA

Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de ruptura	Nível de desempenho esperado
1,0	0,16	Perigoso
1,5	0,07	Insatisfatório
2,0	0,023	Fraco
2,5	0,006	Abaixo da média
3,0	0,001	Acima da média
4,0	0,00003	Bom
5,0	0,0000003	Alto

FONTE: USACE (1999).

Já Dell'Avanzi e Sayão (1998) relacionam o índice de confiabilidade e a probabilidade de ruptura em função da obra em análise, conforme Tabela 2.2.

TABELA 2.2 - ÍNDICE DE CONFIABILIDADE E PROBABILIDADE DE RUPTURA EM FUNÇÃO DO TIPO DE OBRA EM ANÁLISE

Caso	Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Ruptura
Fundações	2,3 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}
Taludes de mineração	1,0 a 2,3	10^{-1} a 10^{-2}
Barragens	3,5 a 5,0	10^{-3} a 10^{-5}
Estruturas de contenção	2,0 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}

FONTE: Dell'Avanzi e Sayão (1998).

2.6.3 Métodos para determinação da superfície de ruptura

Em ambas as metodologias de análise de estabilidade (determinística e probabilística) é necessário definir o método utilizado para a determinação da superfície de ruptura. Dentro dos *softwares* disponíveis no mercado têm-se uma variedade de metodologias sendo normalmente divididas em função da forma da superfície de ruptura: circular, circular composta ou não-circular. Na primeira divisão

têm-se como exemplos o método grade e tangente, entrada e saída, grade e linha, e, também, grade e ponto. Já na segunda divisão têm-se como exemplos o método *Block Search*, *Greco Method*, *Path Search* e, também, *Cuckoo Search Method* (BENTLEY, 2019).

O método Cuckoo Search, utilizado no estudo, desenvolvido por Xin-She Yang na Universidade de Cambridge e Suash Deb no C. V. Raman College of Engineering em 2009, refere-se a um algoritmo de otimização metaheurística inspirado na natureza pois é baseado no comportamento parasita da ninhada de algumas espécies de cuco. As considerações do método são as seguintes (BENTLEY, 2019):

1. Qualquer superfície de deslizamento não circular 2D pode ser expressa por uma polilinha com n pontos, o fator de segurança ao longo desta superfície é descrito como uma função desses pontos como $F(P)$, no qual P são as coordenadas dos pontos $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})$.
2. Na pesquisa da superfície de deslizamento do elipsoide 3D, o fator de segurança ao longo desta superfície é descrito como uma função de $F(P)$, na qual P é a coordenada do ponto central do elipsoide (x_0, y_0, z_0) e o raio do elipsoide (r_x, r_y, r_z) .

2.6.4 Quantificação do volume de massa mobilizada

De um modo geral o volume é definido como sendo o espaço ocupado pela massa mobilizada, a qual está localizada acima da superfície de ruptura. Além disso, o volume de massa mobilizada em uma deslizamento pode ser estimado em função da forma da superfície de ruptura. No caso de escorregamentos rotacionais a maioria das superfícies de ruptura podem ser aproximadas em metade de um elipsoide. Sendo assim, o volume pode ser determinado pela Equação 2.10 (CRUDEN; VARNES, 1996).

$$V = \frac{1}{6}\pi D_r W_r L_r \quad (2.10)$$

Onde:

V = volume de massa mobilizada

D_r = profundidade da superfície de ruptura

W_r = largura da superfície de ruptura

L_r = comprimento da superfície de ruptura

Hoje muitos dos *softwares* de análise de estabilidade já fornecem como resultados de suas análises a quantificação do volume de massa mobilizada, como é o caso do *software* SVSlope da SoilVision, utilizado nesta dissertação.

2.7 MODELOS DE PREVISÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

A modelagem de previsão de movimentos de massa pode ser desenvolvida por meio de modelos empíricos ou por meio de modelos analíticos, que seriam os modelos de simulação (GOMES, 2006).

Os modelos empíricos apresentam tempo reduzido e necessitam de apenas alguns parâmetros iniciais, sendo que estes modelos analisam a dinâmica do material transportado em função de parâmetros morfométricos (GOMES, 2006). Estes parâmetros, segundo Benda e Cundy (1990), referem-se à inclinação do terreno e ao ângulo de junção entre os canais tributários, sendo o último o ângulo entre linhas tangentes criadas da intersecção de dois caminhos percorridos pelo movimento de massa.

Correlações empíricas também podem ser utilizadas para estimar alguns parâmetros referentes ao assunto, como a distância de alcance da massa mobilizada (L). Este parâmetro é definido na literatura por meio da relação entre o desnível entre o início e o fim do movimento de massa (H_e) e o volume total (V). Rickenmann (1999) apresenta a seguinte expressão para o cálculo da distância total percorrida (Equação 2.11).

$$L = 1,9V^{0,16}H_e^{0,83} \quad (2.11)$$

Outras correlações da distância total percorrida pela massa mobilizada são apresentadas no Quadro 2.8.

QUADRO 2.8 - CORRELAÇÕES EMPÍRICAS DA DISTÂNCIA TOTAL PERCORRIDA

Autores	Equação
Polanco (2010)	$L = 106,61 \cdot V^{0,2591}$
Motta (2014)	$L = \left(\frac{H_e}{3,55}\right)^{1/0,69}$

FONTE: Adaptado de Pelizoni (2014).

Os valores calculados pelas correlações apenas fornecem uma ordem de grandeza, dessa forma vale do senso crítico e atenção na utilização destas relações (CONTERATO, 2014).

Já os modelos analíticos de previsão de movimentos de massa baseiam-se nas leis da física da dinâmica dos sólidos e dos fluxos (MORLES, 2009). Têm-se desenvolvido vários *softwares* que buscam avaliar e entender a estrutura interna e externa do movimento de massa, sendo muitos deles baseados na dinâmica dos meios contínuos para análise de fluxos de detritos (*debris flows*), a fim de aumentar a qualidade da reprodução dos fenômenos reais além da sua possível previsão (PELIZONI, 2014). No Quadro 2.9 lista-se *softwares* presentes no mercado que realizam estes tipos de análises, sendo que para todos é necessário ter o conhecimento do modelo constitutivo dos materiais presentes na simulação.

QUADRO 2.9 - *SOFTWARES* UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE PREVISÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Programa	Dimensão	Referência	Método	Reologia
FLO-2D	2D	O'Brien <i>et al.</i> (1993)	Euler	Voellmy
DAN-W	1D	Hungr (1995)	Lagrange	Frictional, Voellmy, Bingham
TITAN2D	2D	Pitman & Le. (2005)	Lagrange	Atrito
DAN3D	3D	McDougall e Hungr (2009)	Lagrange	Frictional, Voellmy, Bingham
MADFLOW	3D	Chen & Lee (2000)	Lagrange	Atrito
KANAKO 1	2D	Nakatani <i>et al.</i> (2007)	Lagrange	Atrito
RAMMS	3D	WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF (2010)	Lagrange	Voellmy
MassMov2D	3D	Beguiria <i>et al.</i> (2009)	Euler	Voellmy, Bingham

FONTE: Pelizoni (2014).

As variáveis principais que auxiliam na escolha de qual *software* utilizar na análise de fluxo de detritos, em razão do comportamento e características do caso, são apresentadas no Quadro 2.10.

QUADRO 2.10 - CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DOS SOFTWARES PARA ANÁLISE DE PREVISÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Modelo	Elementos necessários e algumas vantagens	Casos modelados
FLO-2D	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrogramas de chuva que são modelados com reologia quadrática - Permite modelagem de eventos de precipitação - Forças de impacto e pressões podem ser obtidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Selvetta, Itália, 2008 - Tresenda, Itália, 2002
DAN-W	<ul style="list-style-type: none"> - Modelagem de fluxo confinado - Pode ser escolhida a reologia do material 	<ul style="list-style-type: none"> - Tessitore <i>et al.</i>, 2011
DAN3D	<ul style="list-style-type: none"> - Pode ser considerado mais de um material durante a modelagem - Diferentes reologias podem ser selecionadas numa mesma modelagem - A erosão pode ser modelada - Todos os parâmetros de saída, são acompanhados de valores a cada instante de tempo considerado na modelagem e também os máximos - Resultados apresentados em mapas e formado GRD e de texto - Permite exporta resultados a outros programas (CAD, Excel, Surfer) 	<ul style="list-style-type: none"> - Peringalam, India, 2004; - Frank, Alberta, Canada, 1903 - Facun <i>Debris-Flow</i>, 2003
Ramms	<ul style="list-style-type: none"> - Interface amigável para a modelagem - A erosão pode ser modelada - Reologia de Voellmy - Resultados apresentados em gráficos e mapas - Permite exporta resultados a outros programas (ESRI, Google Earth) 	<ul style="list-style-type: none"> - Faucon, França, 2003;
MassMov2D	<ul style="list-style-type: none"> - Diferentes reologias podem ser modeladas - A erosão pode ser modelada - Resultados apresentados em mapas, gráficos e formatos de texto - Interface amigável - Computacionalmente eficiente - Podem ser simulados vários arquivos ao mesmo tempo 	<ul style="list-style-type: none"> - Peringalam, India, 2004; - Faucon, França, 2003 - Tresenda, Itália, 2002
KANAKO 1	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo 1D - Modelagem de fluxo confinado - A erosão pode ser modelada 	nd

FONTE: Pelizoni (2014).

2.7.1 Modelo Digital de Terreno (MDT)

O Modelo Digital de Terreno é muito importante neste estudo pois é a base utilizada na modelagem de previsão de movimentos de massa, seja para os modelos empíricos quanto para os modelos analíticos. Refere-se a uma representação matemática, reproduzida em coordenadas X, Y e Z, de uma superfície terrestre e que pode conter a configuração altimétrica do terreno, além de outros fenômenos de distribuição contínua no espaço (ROCHA, 2007).

O nome Modelo Digital de Elevação (MDE) é dado ao MDT específico de altimetria do terreno, no qual a variável numérica altimétrica pode ser representada por uma grade regular retangular (GRID) ou uma rede irregular triangular (TIN). A confiabilidade do MDE gerado é dada em função da sua resolução espacial, que é o tamanho do pixel utilizado, e dos métodos de interpolação utilizados no desenvolvimento do modelo (WOOD, 1996). Basicamente, o modelo é criado por meio de três etapas: aquisição de dados, edição de dados e geração do modelo propriamente dito.

As aplicações do Modelo Digital do Terreno são diversas dentre elas tem-se o cálculo de declividade e volumes, visibilidade de pontos, visualização tridimensional, área de contribuição e determinação da orientação das encostas (aspecto) (GOMES, 2006).

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão bibliográfica sobre o tema de análise de estabilidade de taludes e previsão de movimento de massa apresenta as principais considerações sobre o assunto. Conceitos importantes são reportados, assim como métodos para análise de estabilidade de taludes e modelos de previsão de movimentos de massa. O objetivo principal deste capítulo foi proporcionar o embasamento necessário para a execução dos trabalhos desta dissertação, tanto no que se refere a manipulação dos *softwares* como na análise dos resultados das metodologias aplicadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo aborda o histórico de instabilidades na região, o local de estudo com a caracterização geológico-geotécnica, incluso os parâmetros geotécnicos de resistência mecânica característicos da região de estudo. Também são apresentados os métodos utilizados na geração do mapa de susceptibilidade, análises de estabilidade e previsão de movimento de massa mobilizada.

3.1 HISTÓRICO DE INSTABILIDADES NA REGIÃO

A região da Serra Pelada, especificamente a região da Rodovia Régis Bittencourt, apresenta um histórico de instabilidades que são registrados pela APRB (2019). Este registro contém informações desde 2010 sobre ocorrências de desprendimento e/ou deslocamento de blocos, solapamento e/ou recalque de taludes de aterro, e erosão e/ou instabilização de taludes naturais, contabilizando um total de 101 ocorrências registradas sendo 93 do tipo escorregamento de talude e destas últimas 9 ocorridas na Serra Pelada. A Tabela 3.1 apresenta estes 9 registros com indicação da localização e data de ocorrência. Observa-se que o km 551 + 750, pista sul, e o km 551 + 900, pista sul, são próximos ao local em estudo (km 551 + 600, pista sul) e apresentaram registros de escorregamentos nos anos de 2017 e 2018, dessa forma corrobora com a necessidade de estudo do local escolhido a fim de analisar a segurança atual do talude.

TABELA 3.1 - REGISTROS DE OCORRÊNCIAS DE ESCORREGAMENTOS NA SERRA PELADA

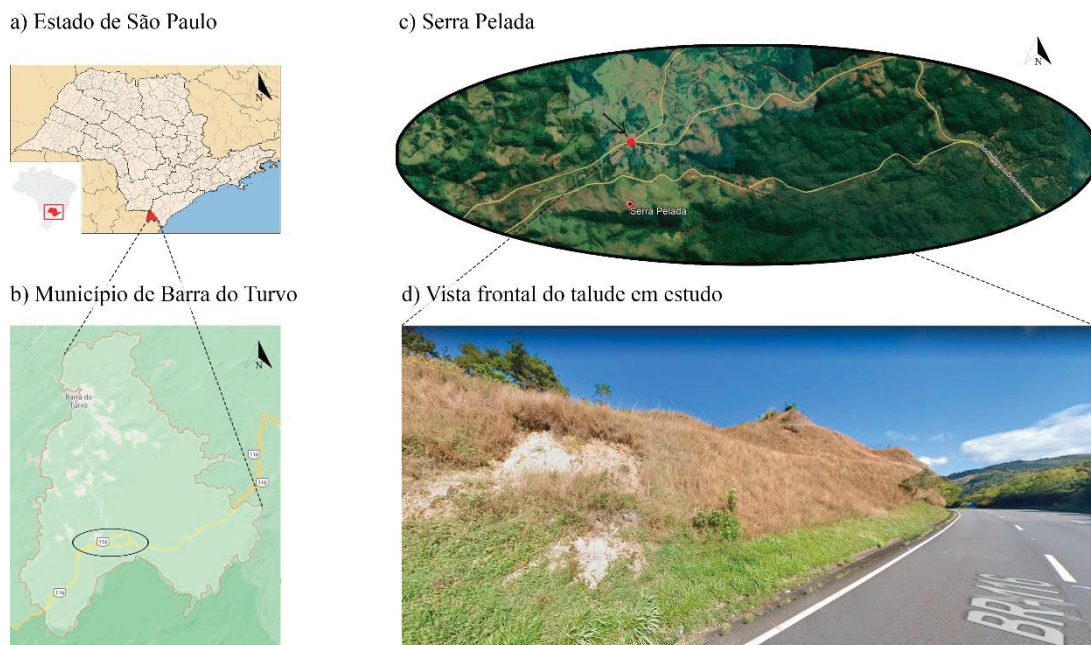
km	Pista	Data de ocorrência
550+300	Norte	11/01/2010
551+400	Sul	30/12/2017
551+450	Norte	23/01/2010
551+750	Sul	18/10/2017
551+900	Sul	15/02/2018
552+200	Norte	01/03/2011
552+200	Sul	23/01/2010
554+600	Sul	23/01/2010
555+900	Norte	23/01/2010

FONTE: Adaptado de APRB (2019).

3.2 LOCAL DE ESTUDO

O talude em estudo está localizado na Serra Pelada que pertence a cadeia montanhosa da Serra do Mar. A região está situada no estado de São Paulo, próximo à divisa com o estado do Paraná, no município de Barra do Turvo. A Serra Pelada é atravessada pela rodovia Régis Bittencourt, a qual está sob concessão da Autopista Régis Bittencourt, BR-116. A área a ser analisada nesta dissertação está localizada especificamente no km 551 + 600, pista sul (Figura 3.1).

FIGURA 3.1 - LOCAL DE ESTUDO



FONTE: Google imagens (2020).

A região em estudo, pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape, apresenta uma precipitação média anual de 1.400 mm/ano e um clima tropical úmido, sendo subtropical úmido com verão quente em 50% da bacia, subtropical úmido com verão fresco em 45% da bacia, e, por fim, tropical úmido sem estação seca em 5% da bacia (FEHIDRO, 2018).

O talude escolhido possui aproximadamente 18 metros de altura, 37 metros de comprimento frontal e declividade média de 34°. A Figura 3.2 contempla as vistas frontais do talude, ou seja, seu início e término. A escolha do local de análise foi baseada no estudo desenvolvido por Batista (2019), a qual desenvolveu metodologias de mensuração econômica dos impactos dos movimentos de massa em encostas

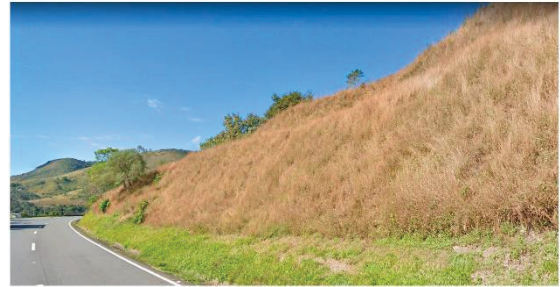
rodoviárias, com aplicação em análises de risco. A autora, no estudo relativo à Serra Pelada, apontou a presente região como a de maior risco econômico, sendo então a mais crítica em suas análises de risco.

FIGURA 3.2 - VISTAS FRONTAIS DO TALUDE EM ESTUDO

a) Início do talude



b) Término do talude



FONTE: Google imagens (2020).

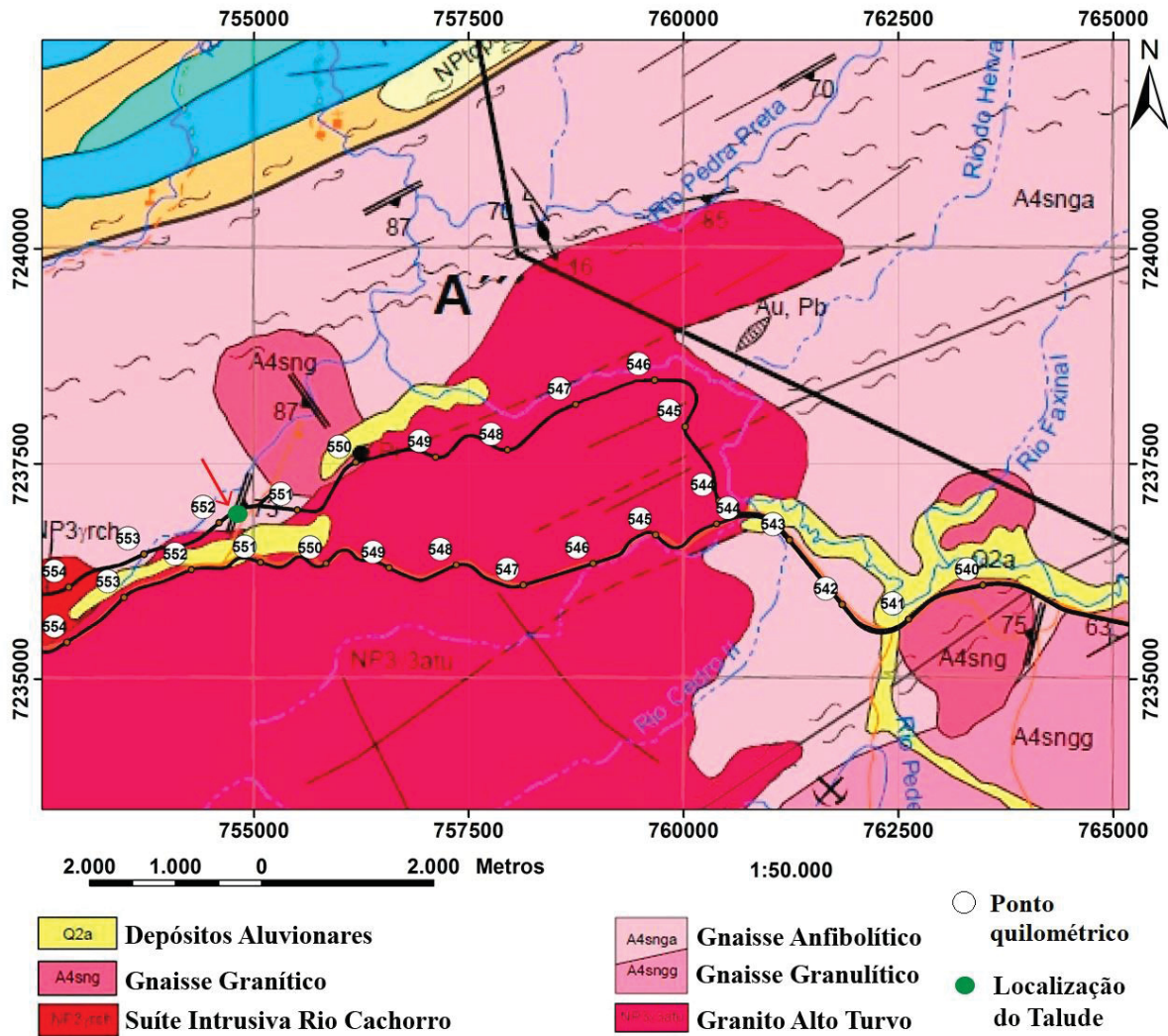
Por meio da Figura 3.2 é possível observar que o talude é muito próximo à rodovia, não apresenta faixa de acostamento e nem área de recuo entre o maciço e a rodovia, além de possuir uma considerável declividade, dessa forma, qualquer deslizamento que possa vir a ocorrer atingira as faixas de trânsito.

3.2.1 Caracterização geológico-geotécnica

A Serra Pelada é composta predominantemente pela formação geológica Granito Alto Turvo, na qual as rochas apresentam granulometria fina a média e localmente grosseira, de cor rósea amarronzada, equigranular, com 5% a 15% de minerais máficos disseminados, dominados por hornblenda e biotita. Além disso, pode-se observar matacões de diversas formas e tamanhos em algumas encostas, o que, em caso de desprendimento e rolamento destes materiais, pode colocar em risco algumas regiões da rodovia (TREVIZOLLI, 2018).

O maciço, no entanto, apresenta localmente um litotipo caracterizado como Gnaisse Anfíbolítico, de acordo com o mapa geológico da CPRM (2013) (Figura 3.3). É representado pela hornblenda gnaisse básico migmatítico retrometamorfizado e anfíbolito (metagabroide), com leucossomas tonalíticos a graníticos, camadas de meta-anortosito e enclaves metassedimentares, formações ferríferas e gondito.

FIGURA 3.3 - MAPA GEOLÓGICO DA SERRA PELADA DO KM 540 AO 555



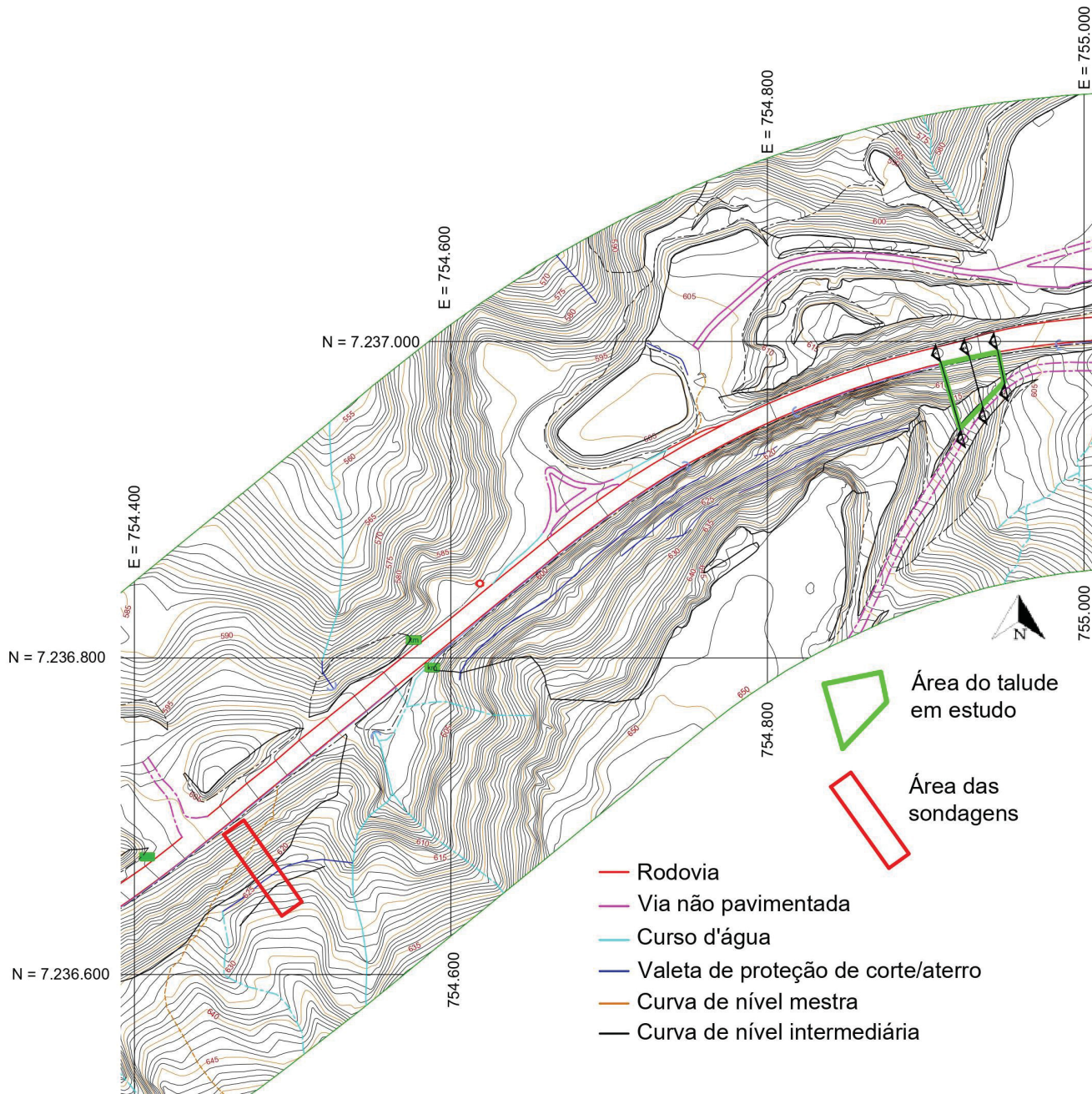
FONTE: Adaptado de CPRM (2013).

O perfil de solo do talude foi construído com base em três investigações geotécnicas do tipo ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) (Anexo 1) realizadas em região próxima ao local de estudo (km 552 + 200, pista sul), atingindo profundidades de 5,45 m, 6,45 m e 8,45 m. Verifica-se por meio do mapa geológico, nesta escala da Figura 3.3, que os pontos das sondagens utilizadas para a análise (km 552 + 200, pista sul) estão 600 metros à frente do talude em estudo, podendo talvez estar em outro litotipo (Granito Alto Turvo). No entanto as incertezas são inerentes ao processo devido à pequena escala do mapa geológico, tanto o talude como os pontos de sondagens estão próximos à uma região de mudança de litotipo, e, também, devido à ausência de sondagens no ponto exato do talude e as sondagens utilizadas serem as mais próximas do local analisado, optou-se por utilizar estas sondagens para

caracterizar os materiais presentes na região bem como uma estimativa das suas respectivas espessuras médias.

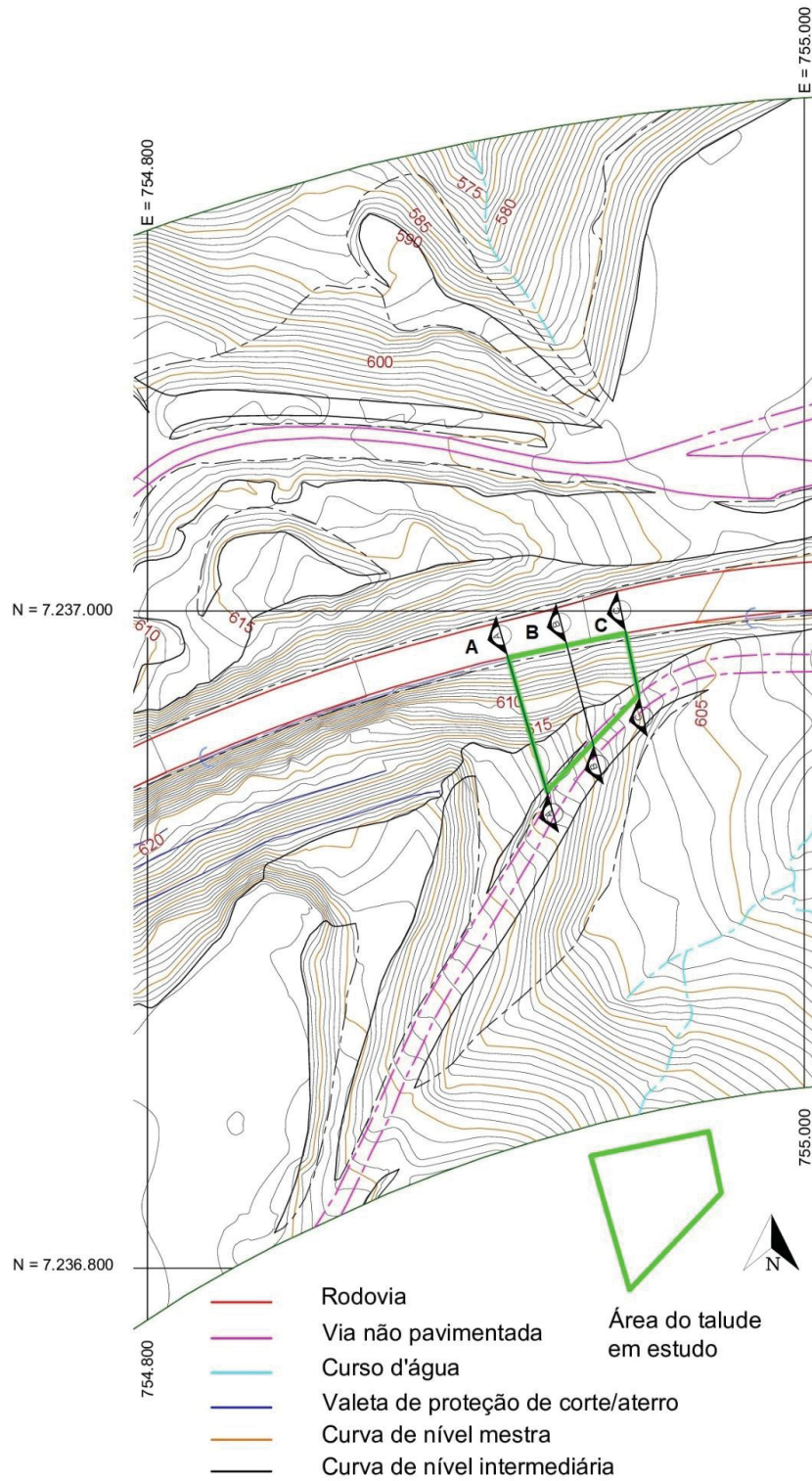
O perfil de solo no local pode ser descrito em três camadas: 1,5 metros de camada superficial de colúvio, 4,5 metros de um solo residual composto por silte arenoso e o restante de uma alteração de rocha (saprólito). As sondagens apontaram o nível d'água abaixo de 7,0 metros, em função disso, por ser uma profundidade considerável e profunda, optou-se por não considerar, inicialmente, o nível d'água na modelagem do talude já que as possíveis superfícies de ruptura não chegariam a atingir esta profundidade. O item 3.6 descreve e apresenta a metodologia relativa à consideração do nível d'água no talude. O perfil geotécnico traçado com base nos boletins de sondagens do talude próximo está no Anexo 2. As informações topográficas tais como, altura, comprimento e declividade do talude foram extraídas das curvas de nível da região em estudo, fornecidas pela prefeitura do município de Barra do Turvo – SP, por meio de um arquivo DWG. Sendo assim, com base nas curvas de níveis, foi possível determinar a seção transversal do talude (A) e todas as coordenadas de pontos necessárias para a modelagem do talude em *software* específico, sendo 31 pontos na dimensão 2D e 81 pontos na dimensão 3D. Vale ressaltar que o talude analisado não possui monitoramento e nem instrumentação. A Figura 3.4 contempla as curvas de nível e a localização do talude em estudo bem como a localização da área das sondagens utilizadas nas análises. Já a Figura 3.5 apresenta uma visualização focada na área de estudo com indicação das posições das seções transversais do talude.

FIGURA 3.4 - CURVAS DE NÍVEL DA REGIÃO EM ESTUDO E LOCAÇÃO DA ÁREA DO TALUDE ANALISADO E DA ÁREA DAS SONDAGENS



FONTE: Prefeitura do município de Barra do Turvo (2016)

FIGURA 3.5 - CURVAS DE NÍVEL DA REGIÃO EM ESTUDO E LOCAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS



FONTE: Prefeitura do município de Barra do Turvo (2016)

3.2.2 Parâmetros geotécnicos

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, tais como ângulo de atrito interno e intercepto coesivo, dos solos coluvionar e residual, foram retirados de Trevizolli (2018). Embora exista a incerteza de estar trabalhando em um litotipo distinto, conforme comentado anteriormente no que se refere aos pontos da sondagem em relação ao ponto do talude, verifica-se que o ponto analisado por Trevizolli (2018), km 552 + 000, pista norte, é o ponto de coleta de amostras mais próximo do local de estudo.

Trevizolli (2018) realizou ensaios saturados de cisalhamento direto, em blocos indeformados, em três níveis de tensão normal: 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, em um talude localizado no km 552 + 000, pista norte, muito próximo ao talude em estudo. A Tabela 3.1 apresenta os intervalos de valores para os parâmetros geotécnicos, ângulo de atrito interno (Φ) e intercepto coesivo (c'), dos dois tipos de solos utilizados na análise probabilística de estabilidade de talude. O limite superior da faixa de dados refere-se aos valores dos parâmetros de resistência de pico enquanto o limite inferior da faixa de dados refere-se aos valores dos parâmetros de resistência residual. Vale salientar que as tensões envolvidas nas análises são tensões equivalentes aos níveis de tensões obtidos por Trevizolli (2018) nos ensaios de cisalhamento direto com solo na condição saturada.

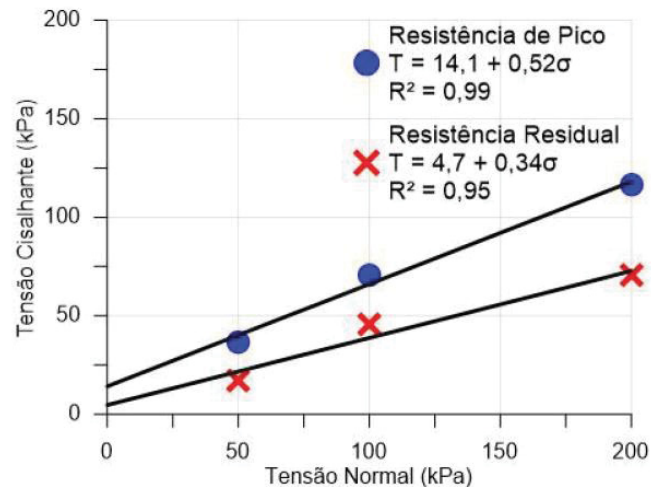
TABELA 3.2 - INTERVALO DE VALORES DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Material	Solo Coluvionar			Solo Residual		
	γ_{nat} (kN/m ³)	Φ (°)	c' (kPa)	γ_{nat} (kN/m ³)	Φ (°)	c' (kPa)
Valor médio	16,0	23,5	11,4	18,00	26,0	7,8
Limite inferior	-	17,8	4,7	-	21,8	5,1
Limite superior	-	30,0	16,8	-	30,2	10,4

FONTE: Adaptado de Trevizolli (2018).

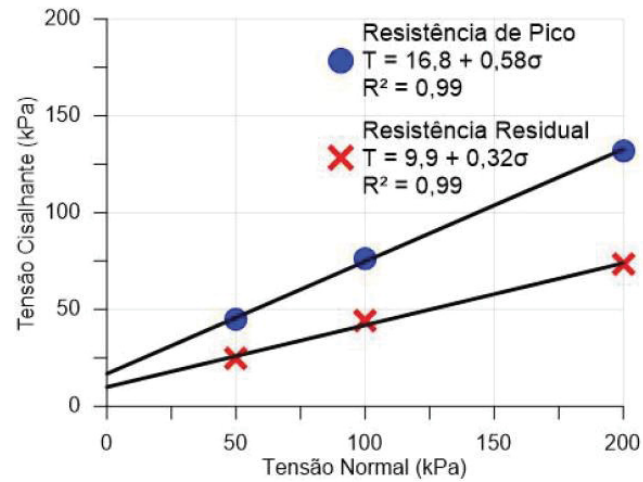
As Figuras 3.6 a 3.8 apresentam as envoltórias de ruptura ajustadas aos pontos experimentais de pico e residual de resistência ao cisalhamento obtidas por Trevizolli (2018). Vale salientar que as amostras 01 e 02 referem-se ao solo coluvionar, já a amostra 03 diz respeito ao solo residual.

FIGURA 3.6 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA 01



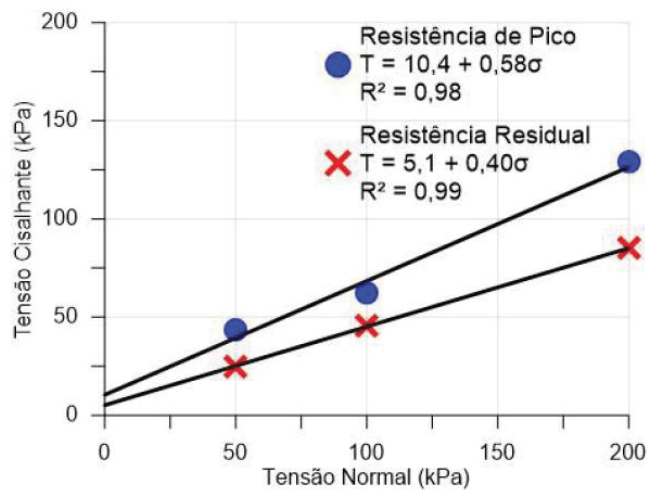
FONTE: Trevizolli (2018).

FIGURA 3.7 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA 02



FONTE: Trevizolli (2018).

FIGURA 3.8 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA 03



FONTE: Trevizolli (2018).

Percebe-se que os valores apresentados na bibliografia geotécnica para os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo coluvionar (Quadro 2.2), mostrado no capítulo anterior, tem grande variação, o ângulo de atrito interno apresentou valores entre $18,2^\circ$ a $39,0^\circ$ e o intercepto coesivo entre 0 kPa e 42,9 kPa. Dessa forma, os valores considerados nas análises com base nos dados de Trevizolli (2018) (Tabela 3.2) estão praticamente dentro desses intervalos, o que possibilita a utilização destes dados no estudo.

Na realização das análises determinísticas foram apenas considerados os valores médios dos parâmetros geotécnicos, peso específico natural do solo, ângulo de atrito interno e intercepto coesivo. Já nas análises probabilísticas, além dos valores médios dos parâmetros geotécnicos, foram considerados os limites inferiores e superiores, apresentados na Tabela 3.2, para os solos coluvionar e residual. Para o saprólito, terceira camada do solo, apenas considerou-se o valor médio de seus parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, em razão da sua localização estar a uma profundidade mínima de 6 metros, sendo considerado o valor médio de 39° para o ângulo de atrito interno e 10,4 kPa para o intercepto coesivo.

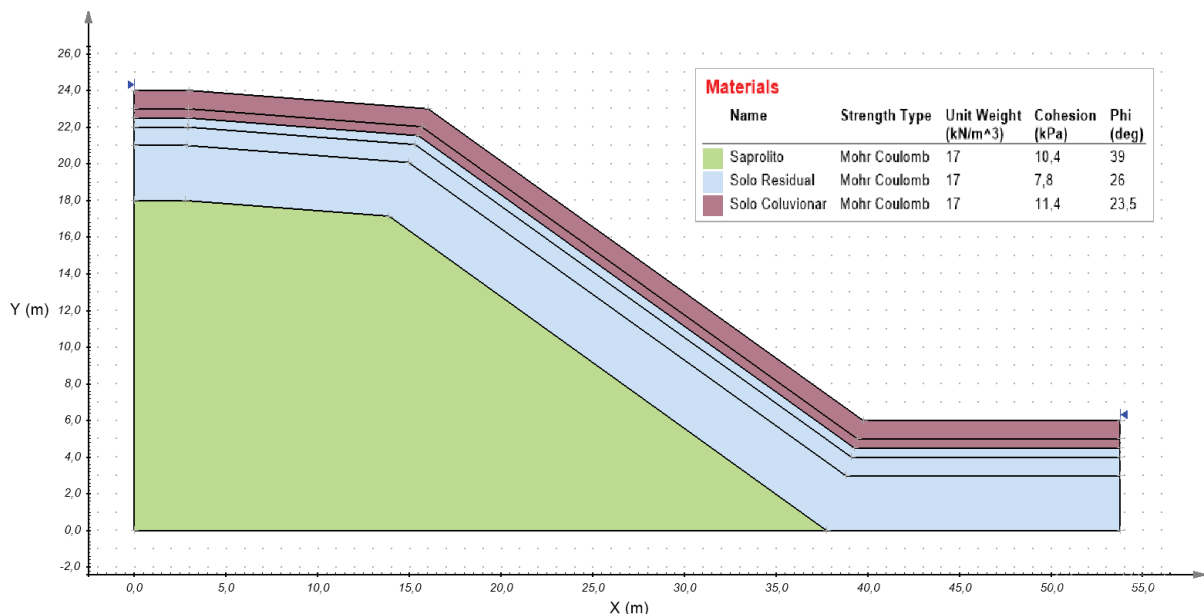
No que diz respeito ao parâmetro geotécnico peso específico natural do solo na Tabela 3.2 está indicado o valor deste parâmetro determinado por Trevizoili (2018) para o solo coluvionar e residual, porém foi considerado um valor constante de 17 kN/m³ para os dois solos e para o saprólito, devido a este parâmetro apresentar pouca influência na análise de estabilidade do talude, ou seja, baixa interferência na variação do fator de segurança, devido à pequena variação de valores do peso específico natural entre os solos.

Com relação a estes parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos verificou-se que não há necessidade de realizar análises paramétricas, visto que o intercepto coesivo apresenta uma variabilidade maior que o ângulo de atrito interno em função de fatores como por exemplo o intemperismo e sensibilidade aos ensaios e amostragem, e, dessa forma, na análise de equilíbrio limite, o intercepto coesivo tem uma maior relevância na alteração do FS e na probabilidade de ruptura quando comparado ao ângulo de atrito interno. Em concordância, Acevedo (2017) aponta em seu estudo que “dentre os parâmetros que influenciam a variação do fator de segurança, o intercepto coesivo é quem apresenta maior peso”. Também Costa (2005) indica que o intercepto coesivo é o principal parâmetro que interfere na probabilidade de ruptura e no índice de confiabilidade”.

A seção transversal (A) modelada do talude está contemplada na Figura 3.9, sendo que a escolha de utilizar “camadas” de solos paralelas ao longo do perfil se deve aos seguintes motivos:

1. Não ter uma sondagem no ponto de interesse;
2. Os mapas de susceptibilidade desenvolvidos consideram, no algoritmo de análise probabilística, a espessura da camada do solo por trabalhar com a metodologia de talude infinito, o que não possibilita a variação desta espessura, sendo então considerado a mesma ao longo da camada de cada solo;
3. Ao considerar uma geometria mais complexa o número de pontos na modelagem aumenta consideravelmente. Dessa forma, foi simplificado a parte superficial inclinada do talude pois verificou-se, por meio de pré-testes, que pequenos abaulamentos na superfície não apresentam diferenças consideráveis nos resultados das análises.

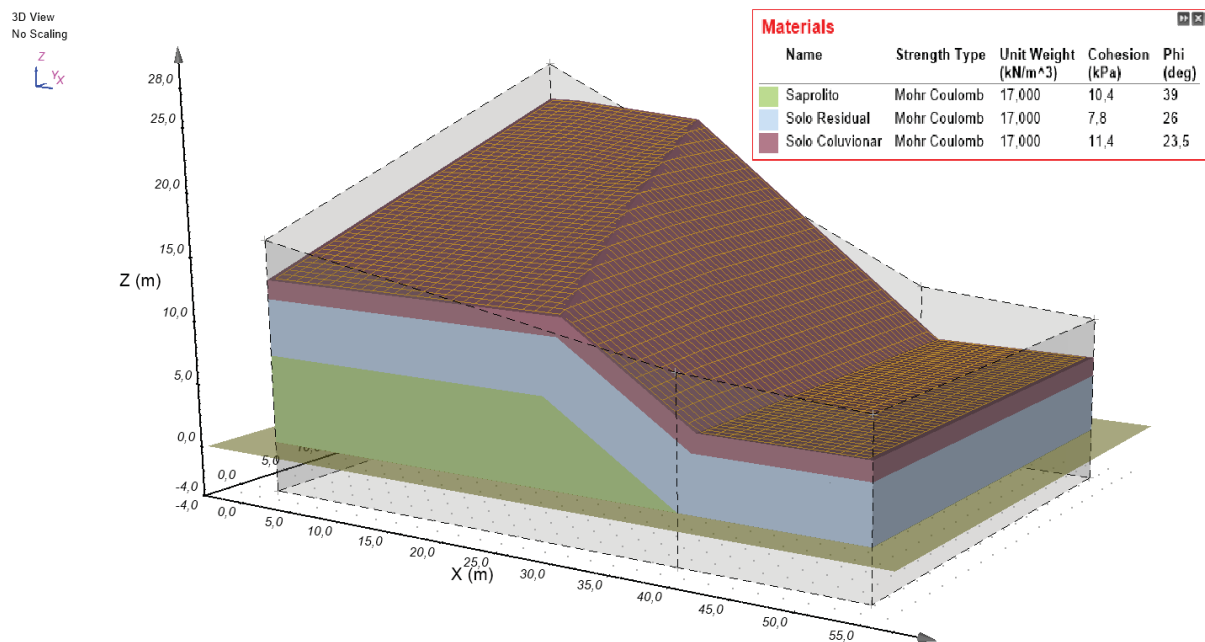
FIGURA 3.9 - SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO



FONTE: A autora (2020).

A representação da perspectiva do talude em estudo em 3D, baseada em três seções transversais (A, B e C), está apresentada na Figura 3.10.

FIGURA 3.10 - MODELAGEM DO TALUDE EM 3D



FONTE: A autora (2020).

Devido a possibilidade de infiltração de água no talude pela chuva, optou-se por incorporar a sucção nas profundidades pré-definidas (1,0 m; 1,5 m; 2,0 m e 3,0 m), na análise probabilística dos mapas de susceptibilidade, a qual, com base no estudo e análises de Trevizolli (2018), apresenta o intervalo de valores entre 0 e 120 kPa, ou seja, nesta análise foi considerado este intervalo de valores como *input* para todas as profundidades. A perda de sucção (e da coesão aparente) é considerada um dos mecanismos de instabilização das encostas, já que ocorre o aumento da umidade do solo em função do avanço da frente de infiltração, fazendo com que a ruptura do maciço ocorra sem que seja alcançada a condição de saturação do solo (FREDLUND, 1987).

3.3 AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE 2D EM PROFUNDIDADES PRÉ-DEFINIDAS

A primeira avaliação realizada no talude foi uma avaliação de susceptibilidade 2D, a qual foi realizada por meio de uma análise probabilística de ruptura do maciço fundamentada na Metodologia de Monte Carlo com 5000 iterações. A análise foi realizada com base no algoritmo elaborado por APRB (2019) em linguagem Python 2.7 dentro do *software* ArcMap 10.3, sendo inserido no algoritmo os intervalos de

valores dos parâmetros: intercepto coesivo, ângulo de atrito interno e sucção. Nesta análise não foi considerado a presença de nível d'água.

O fator de segurança (FS) foi calculado com base na formulação de Fiori e Carmignani (2009) para talude infinito, adaptada para incorporar o efeito da sucção do solo nas profundidades pré-definidas. Esta formulação está contemplada no algoritmo criado por APRB (2019), o qual calcula o FS de cada pixel do mapa. A análise probabilística foi feita considerando a variabilidade dos parâmetros de entrada na formulação do fator de segurança.

Na Serra do Mar, segundo Acevedo (2017), os escorregamentos do tipo translacional possuem pouca profundidade de espessura, não sendo maior que 2 metros, dessa forma, as espessuras escolhidas foram de 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m e 3,0 m com o objetivo de simular com que a ruptura ocorra no solo coluvionar, entre o solo coluvionar e o solo residual e, nas duas últimas profundidades, no solo residual. Verifica-se que foram impostas espessuras de solo acima do nível d'água, conforme verificado nas sondagens.

A distribuição e análise dos valores de probabilidade de ruptura foram baseados no que foi apresentado pela USACE (1999) – Tabela 1 – a qual indica que uma probabilidade de ruptura maior que 0,1 compromete a instabilidade do talude tornando o nível de desempenho esperado em perigoso.

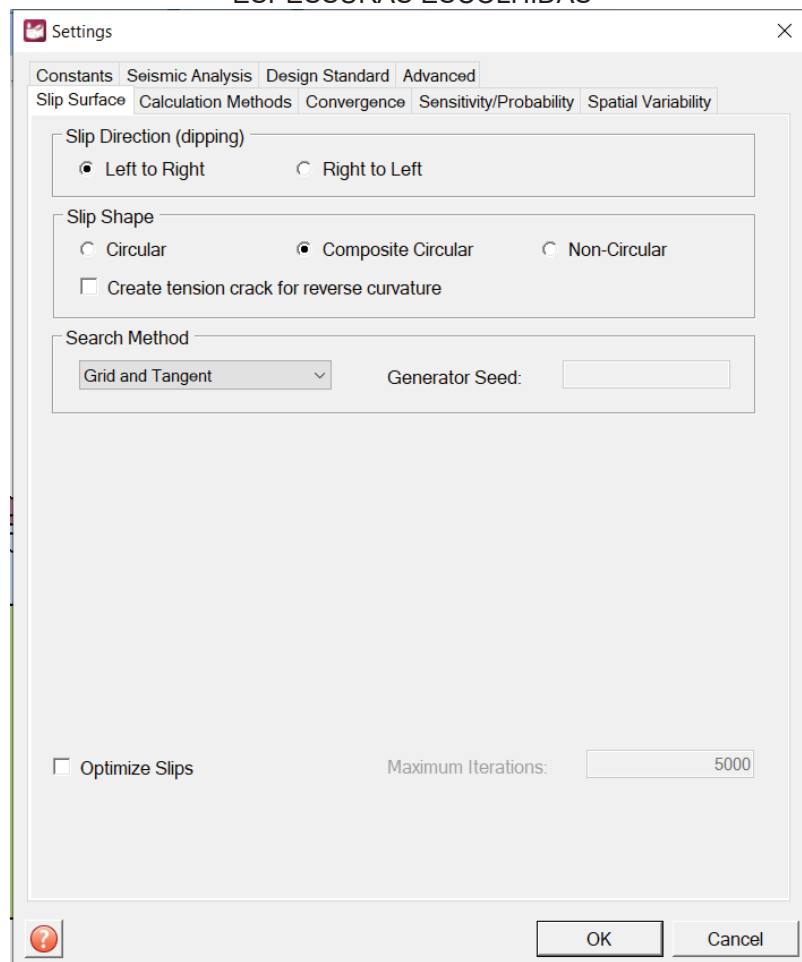
3.4 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D PARA PROFUNDIDADES DE RUPTURA PRÉ-DEFINIDAS

Para a obtenção da estimativa do volume de massa de solo mobilizado com a ruptura do talude, foi realizado análises determinística e probabilística 2D de estabilidade do perfil da encosta no *software* SVSlope da SoilVision. O talude foi modelado no *software* com a delimitação das três camadas de materiais (Figura 3.9), sem considerar nível d'água. Para cada camada é inserido os valores dos parâmetros: peso específico natural do solo, intercepto coesivo e ângulo de atrito interno. As variáveis aleatórias (intercepto coesivo, ângulo de atrito interno e sucção) e o método de Monte Carlo na análise probabilística com 5000 iterações foram os mesmos considerados no algoritmo, apenas com o acréscimo da utilização do método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price devido ao *software* não contemplar a formulação

de Fiori e Carmignani (2009) para talude infinito, e também, por ser considerado um método rigoroso e possuir as equações de equilíbrio de forças e momentos.

Para esta metodologia, a superfície de ruptura foi definida como circular composta e o método de pesquisa foi o de Grade e Tangente, pois fixou-se a profundidade da superfície de ruptura nas quatro espessuras escolhidas (1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; 3,0 m). A área de busca da tangente foi compreendida entre a superfície inclinada do talude até uma reta paralela a esta superfície, de espessura pré-definida. Nesta área foram sobrepostas 40 linhas paralelas, ou seja, incrementou-se 40 possibilidades de tangentes à inclinação do talude desde a superfície até a espessura escolhida para a análise. Já a grade foi desenhada em formato retangular na dimensão 40 × 40, acima da altura do talude. A Figura 3.11 apresenta o menu “configuração” do SVSlope, na aba “superfície de ruptura”, na qual define-se o método de pesquisa desta superfície.

FIGURA 3.11 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO SVSLOPE: SUPERFÍCIE DE RUPTURA NAS ESPESSURAS ESCOLHIDAS



FONTE: A autora (2020).

O fator de segurança e a probabilidade de ruptura do talude, além do volume de massa mobilizada, são fornecidos diretamente como resultado da análise para as quatro profundidades escolhidas da localização da superfície de ruptura.

3.5 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA

O talude em estudo foi modelado em dimensão 2D e 3D, sendo em ambas realizadas as análises determinística e probabilística de estabilidade, com indicação do fator de segurança, probabilidade de ruptura, além da quantificação do volume de massa mobilizada.

A modelagem 2D foi a mesma elaborada na seção 3.2.2, já a modelagem 3D foi baseado em três seções transversais (A, B e C) obtidas por meio das curvas de níveis de topografia em arquivo formato CAD. Em ambas as modelagens não foi considerado nível d'água e nem incorporado sucção no solo.

Primeiramente, para a modelagem 3D, foram definidos sete superfícies de pontos, as quais foram inseridas no *software* SVSlope da SoilVision, manualmente, e indicavam a base do talude e as mudanças de camada. Posteriormente, com base nestas superfícies indicou-se o material presente entre cada intervalo de superfície, definindo assim o modelo completo.

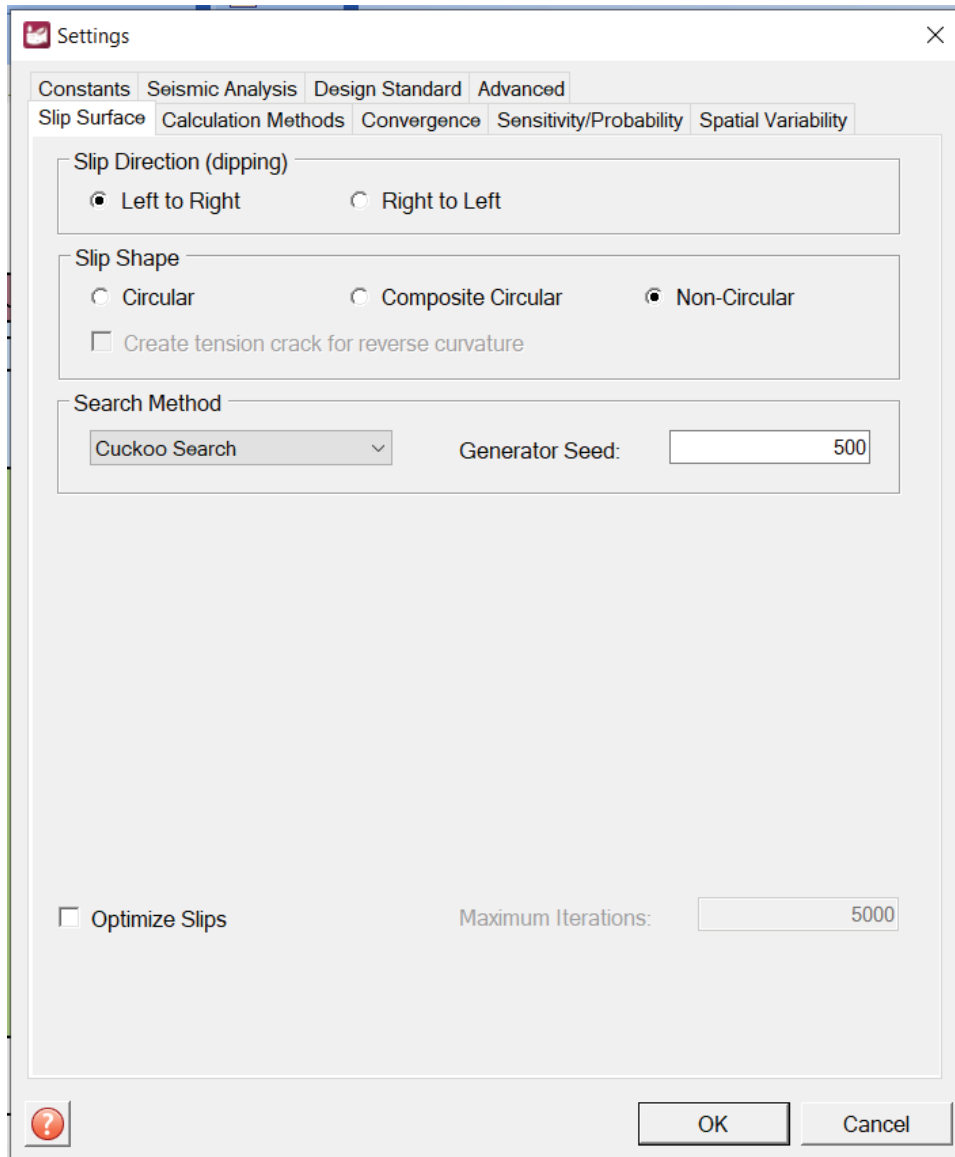
A análise de estabilidade determinística e probabilística foi realizada no mesmo *software* da modelagem. Na primeira utilizou-se o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price para o cálculo do fator de segurança (FS) e na segunda, além do método anterior, foi fundamentada na Metodologia de Monte Carlo com 5000 iterações. Os dados da Tabela 3.2 foram inseridos no *software*, sendo que para a análise determinística utilizou-se do valor médio.

A superfície de ruptura foi definida como não circular e o método de pesquisa desta foi, para estas análises, a de Cuckoo Search, pois representa uma superfície não circular além de estar disponível tanto na análise 2D quanto na 3D. Considerou-se no método 50 ninhos (*neests*), 350 interações e 500 vértices.

Sendo assim, determinou-se a superfície de ruptura crítica para o talude em estudo, ou seja, não se limitou a profundidade desta superfície, o *software* que determinou a sua posição com base no menor fator de segurança calculado na análise. A Figura 3.12 apresenta o menu “configuração” do SVSlope, na aba

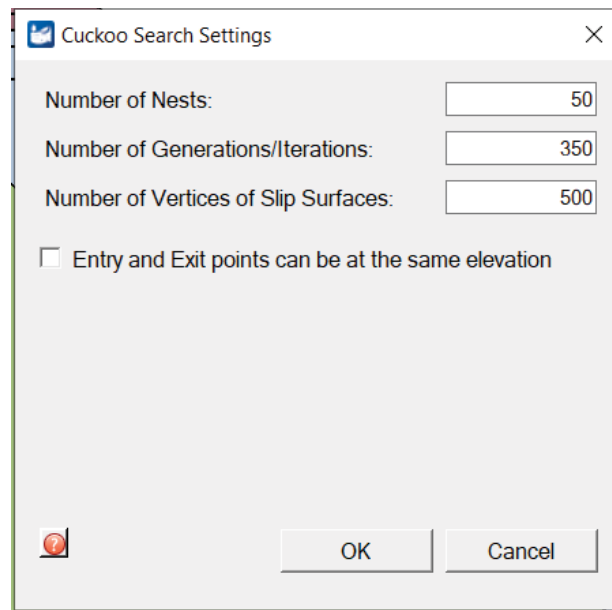
“superfície de ruptura”, na qual define-se o método de pesquisa desta superfície. Já a Figura 3.13 contém a janela de edição das configurações do método de pesquisa Cuckoo Search, disponível no menu “*slipes*”.

FIGURA 3.12 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO SVSLOPE: SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 3.13 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA CUCKOO SEARCH



FONTE: A autora (2020).

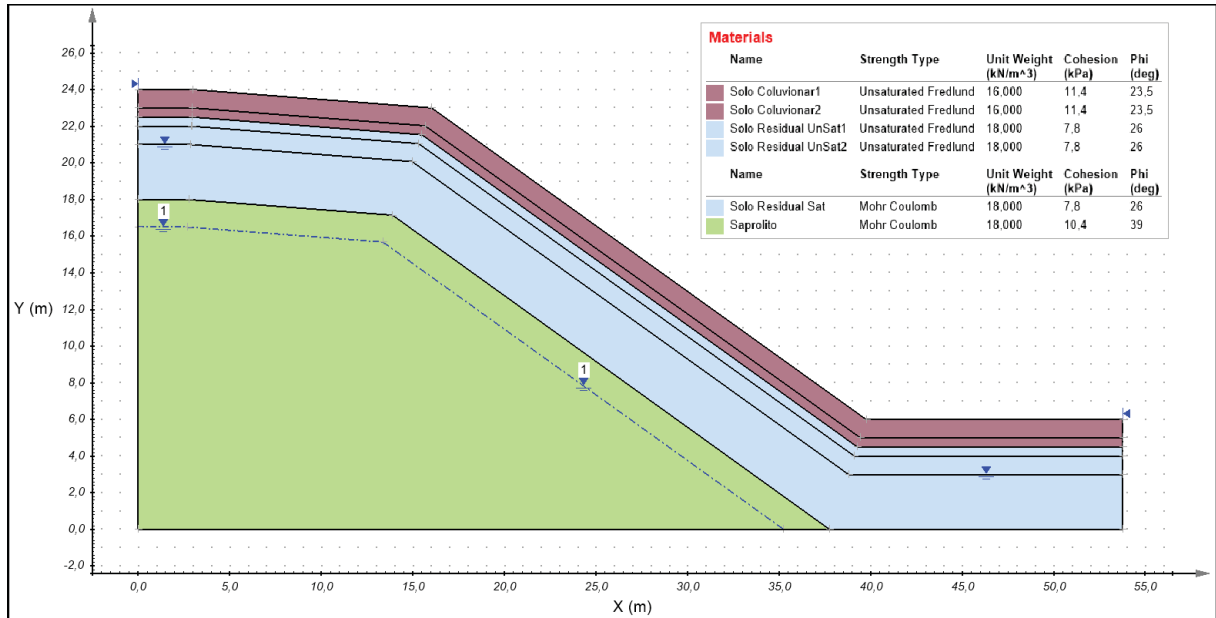
Além do FS, dados como volume de massa mobilizada e probabilidade de ruptura, sendo este último apenas na análise probabilística, foram obtidos diretamente como resultados da aplicação desta metodologia de análise determinística e probabilística de estabilidade na superfície de ruptura crítica.

3.6 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA IMPONDO CENÁRIOS DE SUCÇÃO E NÍVEL D'ÁGUA NO TALUDE

A fim de avaliar a influência do nível d'água no talude em estudo e nos resultados, para esta análise, considerou-se na modelagem da Figura 3.9 e 3.10 a presença de nível d'água em duas profundidades distintas, 6,5 metros da superfície e 7,5 metros. A profundidade de 7,5 metros foi obtida pelos dados das investigações geotécnicas e a de 6,5 metros foi escolhida para analisar a interferência da posição do nível d'água nos resultados de fator de segurança, probabilidade de ruptura e volume de massa mobilizada. A seção transversal do talude (2D) desta análise está contemplada na Figura 3.14, já a representação da perspectiva (3D) está apresentada na Figura 3.15. Vale ressaltar que a primeira linha azul que está indicada nas Figuras 3.14 e 3.15, à 3,0 metros de profundidade, refere-se a linha de 0 kPa de

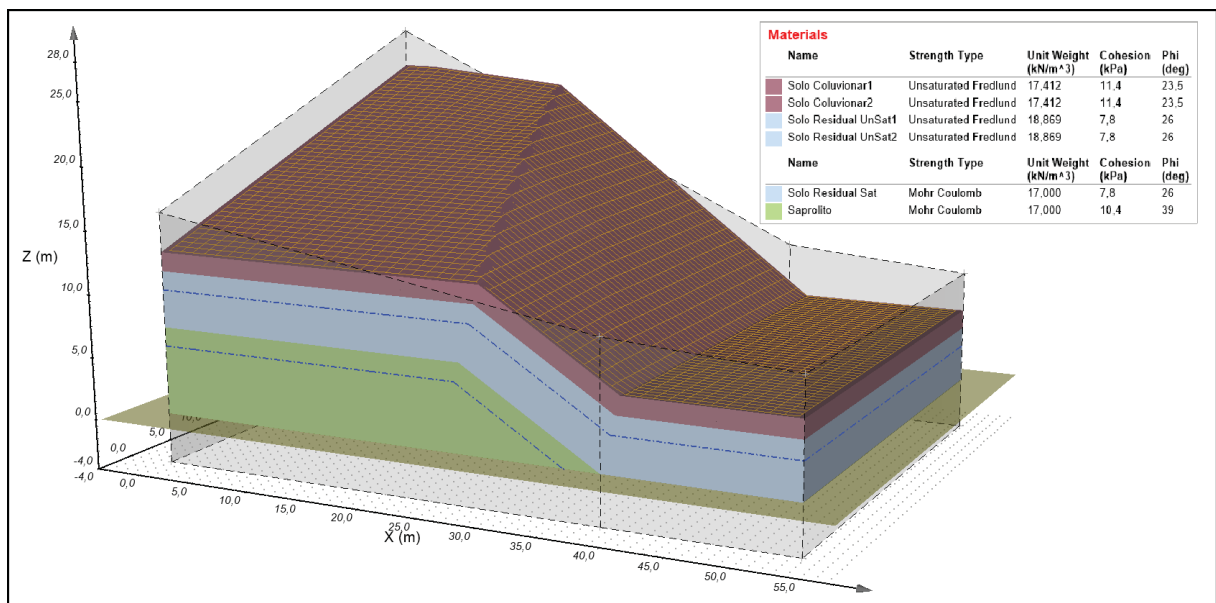
sucção já que é o final do solo não saturado e, além disso, o software solicita que a mesma seja definida e a identifica similarmente a linha de nível d'água.

FIGURA 3.14 - SEÇÃO TRANSVERSAL COM NÍVEL D'ÁGUA À 7,5 METROS DE PROFUNDIDADE



FONTE: A autora (2020).

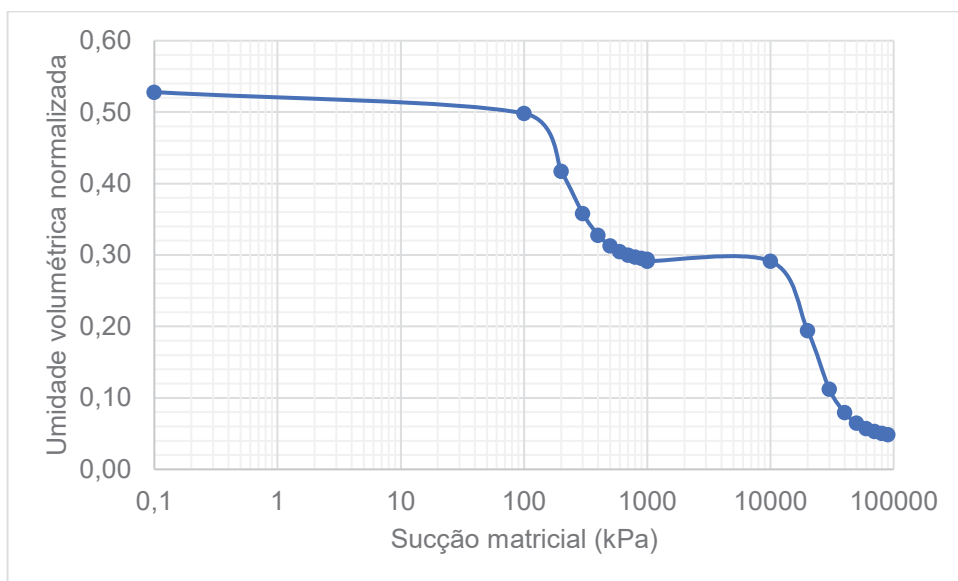
FIGURA 3.15 - MODELAGEM DO TALUDE EM 3D COM NÍVEL D'ÁGUA À 7,5 METROS DE PROFUNDIDADE



FONTE: A autora (2020).

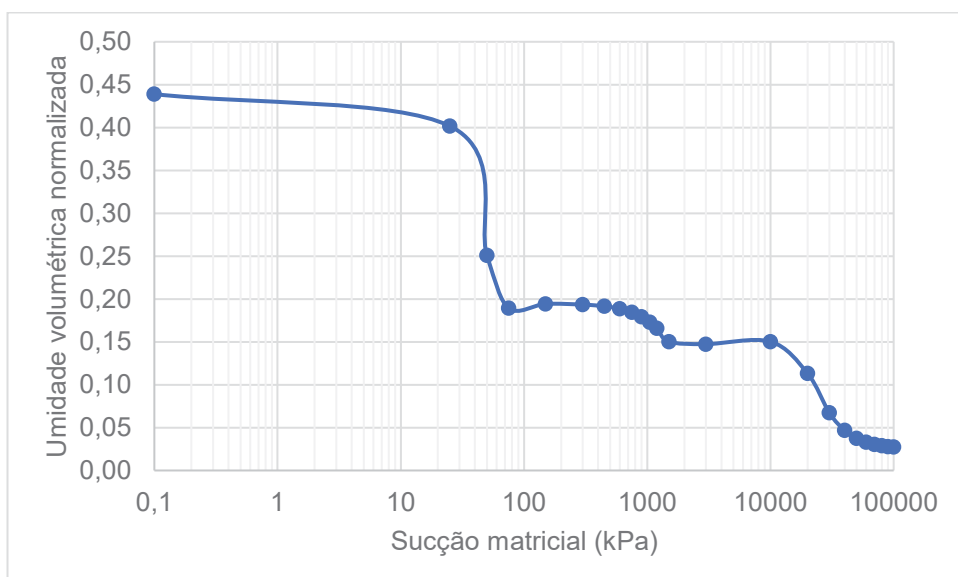
Para os três primeiros metros de profundidade definiu-se os solos coluvionar e residual como solos não saturados. Cada solo apresenta sua curva característica de retenção de água, sendo definidas com base no conjunto de pontos experimentais obtidos por Trevizolli (2018), por meio da metodologia de ensaio do papel filtro, normalizada pela ASTM D 5298 – 03, e posteriormente ajustadas. A Figura 3.16 apresenta a curva característica de retenção de água do solo coluvionar e a Figura 3.17 a curva do solo residual.

FIGURA 3.16 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO COLUVIONAR



FONTE: Adaptado de Trevizolli (2018).

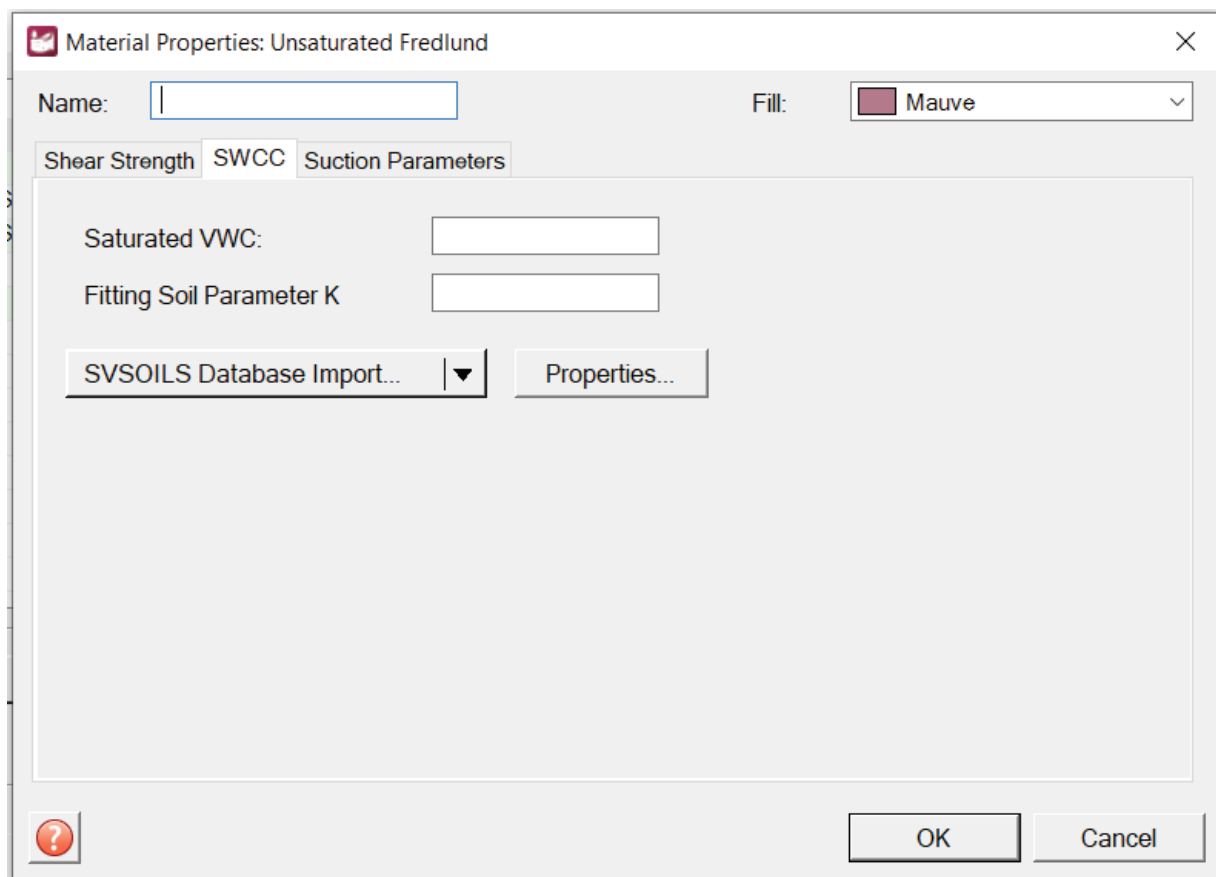
FIGURA 3.17 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO RESIDUAL



FONTE: Adaptado de Trevizolli (2018).

Para o solo coluvionar obteve-se uma curva característica de retenção de água com formato bi-modal e para o solo residual uma curva com formato tri-modal. As curvas ajustadas foram inseridas no *software* SVSlope por meio do conjunto de pontos referente a cada uma. Os valores de umidade residual foram extraídos das curvas, sendo 20% para o solo residual e 30% para o solo coluvionar. A Figura 3.18 apresenta a aba “SWCC” das propriedades do material, na qual define-se estes dados relativos aos solos não saturados, sendo SWCC o conteúdo de água volumétrica saturada do material.

FIGURA 3.18 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL: DADOS DE SWCC



FONTE: A autora (2020).

Além do nível d'água incorporou-se no talude a sucção nos três primeiros metros de camada superficial, sendo 1,50 m de solo coluvionar seguido de 1,50 m de solo residual. Adotou-se então, para a sucção total na superfície do solo, o intervalo de 20 a 120 kPa com base no estudo e análises de Trevizolli (2018), variando-a em cada simulação de 20 kPa e 20 kPa. Estes níveis de sucção foram inseridos

considerando o valor máximo analisado na superfície e no final dos 3 m superficiais, que são a profundidade do solo não saturado, como 0 kPa, ou seja, o valor da sucção decresce linearmente dentro do solo não saturado.

Para esta metodologia o peso específico natural dos solos coluvionar, residual e do saprólito foi definido com base nos valores de Trevizolli (2018), sendo 16 kN/m³ para o solo coluvionar, 18 kN/m³ para o solo residual e 18 kN/m³ para o saprólito. Como já mencionado anteriormente, este parâmetro apresenta pouca influência no valor do fator de segurança na análise de estabilidade devido à pequena variação de valores do peso específico natural entre os solos, sendo assim não invalida uma comparação de resultados com as outras metodologias. Os demais parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizados nas análises estão contemplados na Tabela 3.2.

Após incorporado o nível d'água e a sucção superficial nos três primeiros metros realizou-se análises de estabilidade determinística e probabilística, no mesmo *software* da modelagem (SVSlope), com determinação do fator de segurança, probabilidade de ruptura e volume de massa mobilizada. Assim como a metodologia anterior, considerou-se na análise determinística de estabilidade o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price para o cálculo do fator de segurança (FS) e na análise probabilística a Metodologia de Monte Carlo com 5000 iterações. A superfície de ruptura crítica foi definida como não circular optando-se pelo método de pesquisa de Cuckoo Search, também como a metodologia anterior, sendo considerado 50 ninhos (*nests*), 350 interações e 500 vértices na superfície crítica.

3.7 PREVISÃO DE MOVIMENTO DE MASSA MOBILIZADA COM BASE NA VISCOSIDADE DO MATERIAL

Para realizar o estudo da previsão do movimento de massa mobilizada foi escolhido, entre os *softwares* citados nos Quadros 2.9 e 2.10, o FLO 2D pois foi o único que apresentou como um dos *inputs* o parâmetro de viscosidade, além de possuir uma versão básica gratuita.

Para iniciar a modelagem foi necessário ter o Modelo Digital de Elevação (MDE) contendo a configuração altimétrica do local de estudo. Este modelo foi obtido de duas fontes, NASA e TOPODATA, pois o *software* somente aceitava MDE com formatos de arquivos específicos e que possuísse, internamente ao arquivo, os pontos

das altitudes do terreno, não aceitando o formato de curvas de níveis do CAD, por exemplo. Vale ressaltar que ambas as fontes foram indicadas nos tutoriais do *software* para obtenção do MDE. Entre os dois modelos optou-se pelo da TOPODATA pois apresentou uma melhor visibilidade do mapa da região, o da NASA, principalmente na região do estudo, possuía interferência externa na imagem, como nuvens que dificultavam a percepção da altimetria do terreno. A Figura 3.19 apresenta a localização do MDE no território brasileiro, facilitando a visualização do mesmo e evidenciando a escala do modelo, pois ele contempla muito mais que a Serra Pelada, a qual equivale a menos de 1/100 do território do mapa.

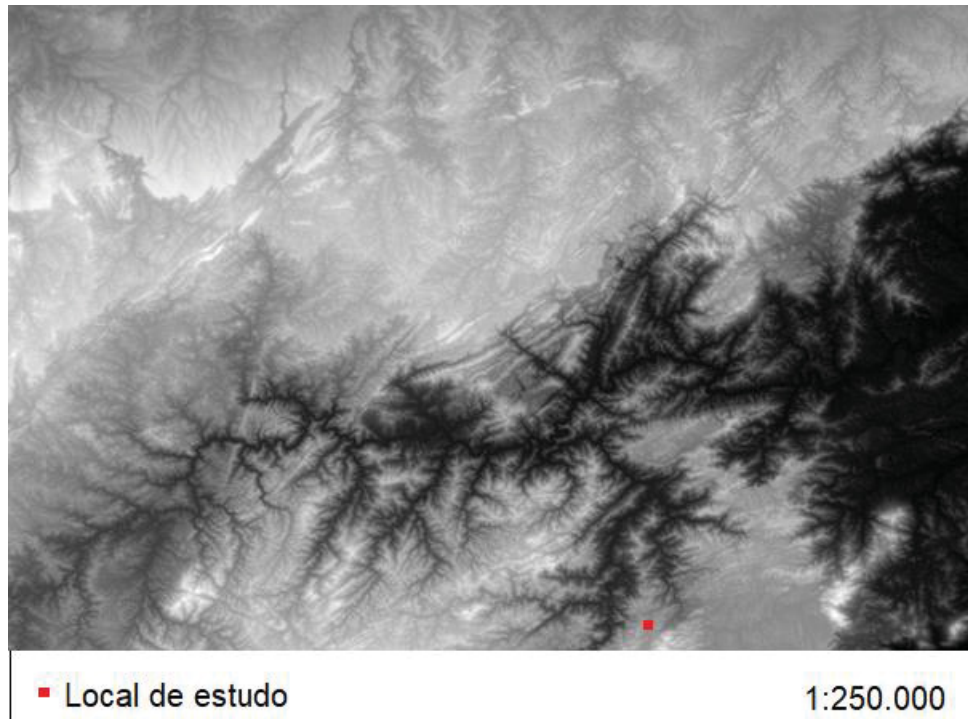
FIGURA 3.19 - LOCALIZAÇÃO DO MDE NO TERRITÓRIO BRASILEIRO



FONTE: TOPODATA (2020).

A Figura 3.20 apresenta o Modelo Digital de Elevação da TOPODATA utilizado como base na modelagem de previsão de movimento de massa, com a indicação do local de estudo.

FIGURA 3.20 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO



FONTE: TOPODATA (2020).

Após inserido o MDE no software foi necessário determinar o *grid* e a área computacional na região em estudo. O primeiro refere-se a uma malha de um sistema bidimensional, formada por um conjunto de linha verticais e horizontais que formam retângulos. O segundo diz respeito a delimitação da área que será realizada as análises, ou seja, a área em que o talude está localizado. Interceptando essas informações foi obtido o *grid* atuando somente na área computacional, evitando que as análises sejam feitas também fora da área do talude e diminuindo o tempo de processamento dos cálculos. Sendo assim, a Figura 3.21 mostra o *grid* aplicado na área computacional do talude em estudo. Os pontos em vermelho identificam os pontos de encontro das linhas verticais e horizontais do *grid*.

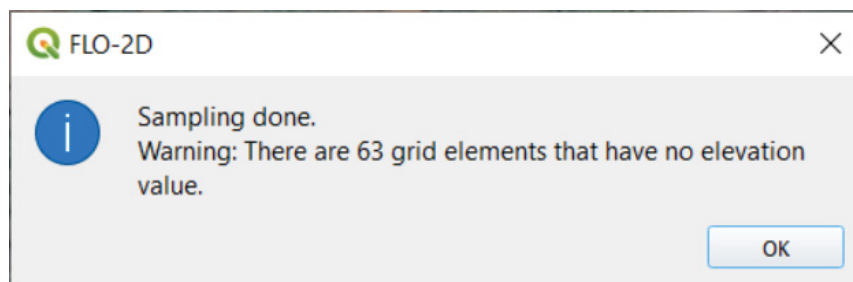
FIGURA 3.21 - GRID E ÁREA COMPUTACIONAL



FONTE: A autora (2020).

O próximo passo foi cruzar os dados do MDE com o *grid* da área computacional, ou seja, estabelecer valores de elevação aos pontos do *grid*. No entanto ao realizar esta ação o *software* mostrou um aviso, conforme Figura 3.22.

FIGURA 3.22 - AVISO DE VALORES DE ELEVAÇÃO NO FLO 2D



FONTE: A autora (2020).

Este aviso identificou que 63 elementos de *grid* não possuíam valores de elevação, ou seja, apresentavam valores nulos. Interpretando essa informação quer dizer que o *software* está considerando que a área computacional onde atua o *grid* é plana, o que contradiz totalmente com a realidade pois é o local do talude, da rodovia e da região próxima, os quais não são planos. A fim de contornar esse problema foi mudado o MDE para o da NASA e repetido o mesmo processo, porém o *software* mostrou o mesmo aviso. O que pode ter ocorrido é que por se tratar de uma área muito específica e minúscula quando comparado a área total do MDE, ou seja, toda a área computacional é menor que um pixel quando localizado no MDE, o *software* não consegue buscar pontos com valores de elevação e dessa forma considera toda área com a mesma elevação.

Foram levantadas alternativas de solução e uma delas foi a mudança do *software*, contudo os demais apresentados nos Quadros 2.9 e 2.10 não possuíam o *input* de viscosidade, além do que todos eles, inclusive o FLO 2D, são *softwares* mais adequados para fluxo de detritos e não para um deslizamento convencional, que é o foco deste estudo. Dessa forma utilizando qualquer um deles não teríamos uma boa modelagem.

Portanto, devido ao insucesso e ao tempo hábil que demandaria para encontrar, ter acesso, testar e realizar as análises em outros *softwares* que trabalhem somente com deslizamento convencional, foi decidido que a parte relativa à previsão de movimento de massa não será contemplada nesta dissertação. O intuito era incorporar dados de viscosidade na previsão de movimento de massa, porém devido ao insucesso desta metodologia foi decidido apenas deixar indicado na revisão bibliográfica as pesquisas em que este dado pode ser encontrado.

Por fim, o objetivo deste relato é auxiliar trabalhos futuros neste tema, indicando o que foi tentado fazer e os problemas e dificuldades encontrados no decorrer do desenvolvimento desta metodologia.

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da apresentação dos materiais e métodos que compõem esta pesquisa de dissertação de mestrado, incluindo os parâmetros e dados utilizados, os *softwares* e descrição da metodologia utilizada para cada análise, é possível prosseguir para a apresentação e análise dos resultados.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia contemplando os dados da avaliação de susceptibilidade e das análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade, com a quantificação do volume de massa mobilizada, para os cenários propostos. Por fim, apresenta as limitações dos *softwares* utilizados no estudo.

4.1 AVALIAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE 2D EM PROFUNDIDADES PRÉ-DEFINIDAS

A aplicação da metodologia mencionada no item 3.3, análise probabilística fundamentada na metodologia de Monte Carlo através de um algoritmo dentro do *software* ArcMap 10.3, considerando a variação dos parâmetros ângulo de atrito interno, intercepto coesivo e sucção, resultou nos mapas de probabilidade de ruptura para as profundidades de 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m e 3,0 m (Figura 4.1), conforme apresentado a justificativa da escolha dessas profundidades no item 3.3.

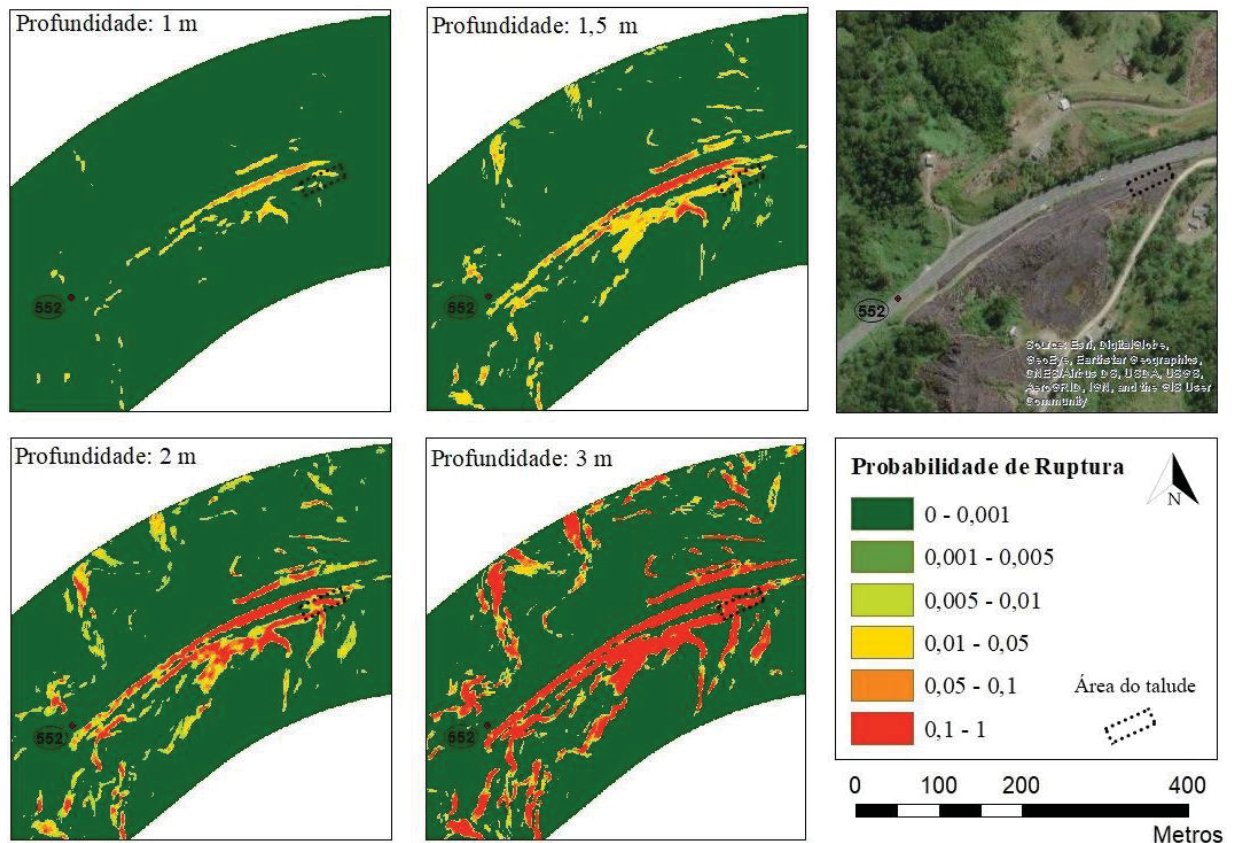
Por meio da análise dos mapas de probabilidade de ruptura constatou-se que com o aumento da profundidade da superfície de ruptura tem-se um aumento da probabilidade de ruptura. Sendo assim, percebe-se que a sucção contribuiu menos na resistência ao cisalhamento do solo com o aumento da profundidade.

Além disso, é possível perceber que as áreas que apresentam declividade mais acentuada são suscetíveis a superfícies de ruptura mais rasas pois apresentaram maiores probabilidades de ruptura no que nas demais.

A formulação de Fiori e Carmignani (2009) de equilíbrio limite para talude infinito, referente ao fator de segurança, leva em consideração a inclinação do talude a qual é a principal variável. A probabilidade de ruptura analisa este fator de segurança em diversos cenários. Portanto, a inclinação do talude pode apresentar influência na probabilidade de ruptura.

Botero, Carvajal e Aristizábal (2015) realizaram um estudo semelhante em uma região montanhosa utilizando a mesma formulação do FS e os resultados apresentaram o mesmo comportamento com relação a inclinação da encosta, ou seja, a probabilidade de ruptura é maior nas inclinações mais acentuadas.

FIGURA 4.1 - MAPAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA NA ANÁLISE PROBABILÍSTICA



FONTE: A autora (2020).

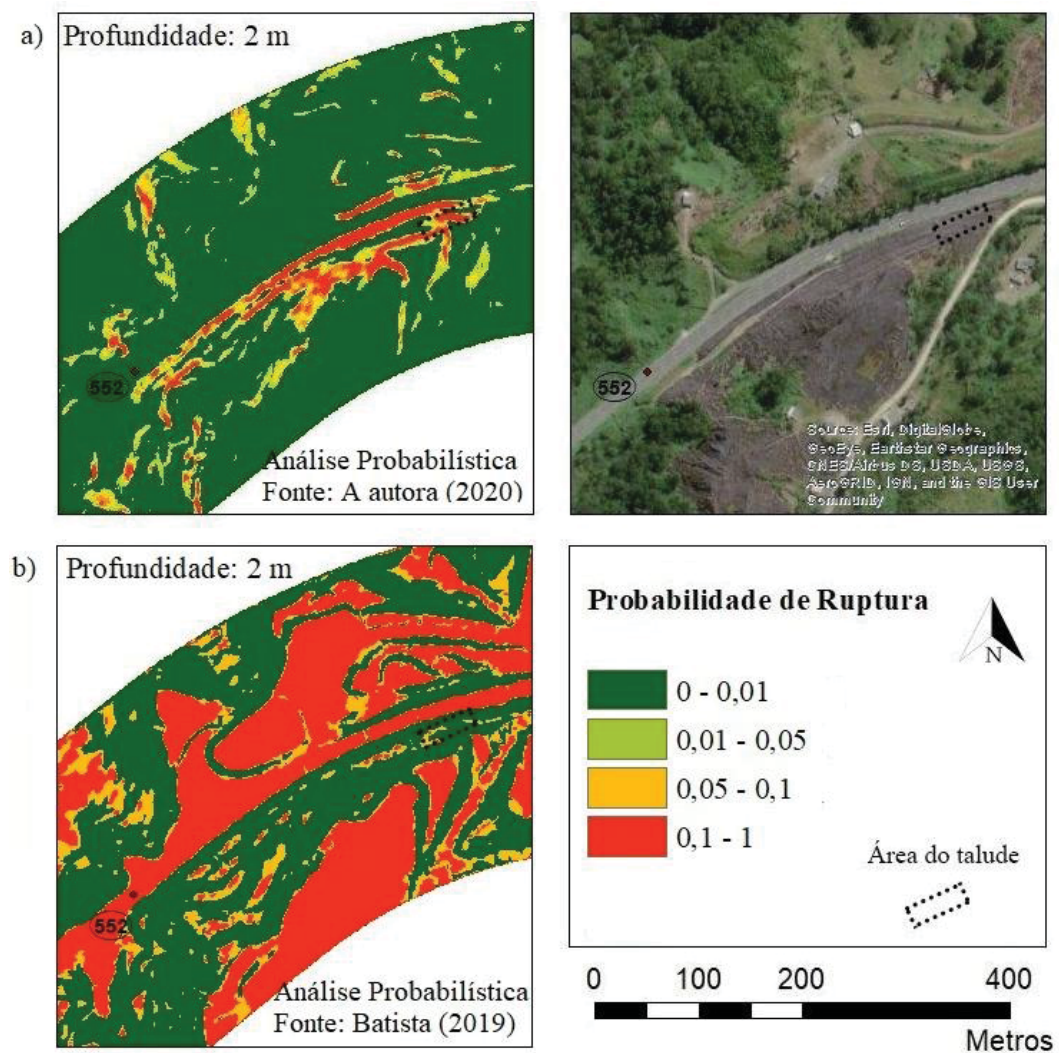
Dentre os quatro cenários o de profundidade de 1,0 m foi o que obteve menor probabilidade de ruptura, apresentando, segundo a classificação da USACE (1999), um nível estável de desempenho esperado, diferentemente dos demais, os quais indicam um nível fraco à perigoso. Além disso, é possível constatar que a extensão das áreas críticas (probabilidade de ruptura maior que 0,1) aumenta com o aumento das profundidades e a região em que estas áreas ocorrem permanecem praticamente as mesmas, isto é, o ponto base é semelhante, ocorrendo apenas um espreadimento da extensão das áreas críticas com o aumento da profundidade da superfície de ruptura.

Em seu estudo, Batista (2019) realizou uma análise de estabilidade probabilística para toda a Serra Pelada, considerando a ruptura à 2,0 m de profundidade, e a partir disso elaborou um mapa de susceptibilidade. Inicialmente a autora determinou e modelou o fator de segurança utilizando a equação de Fiori e Carmignani (2009) de equilíbrio limite para talude infinito. Posteriormente calculou a probabilidade de ruptura por meio do método de Fiori e Carmignani (2009) indicado

em seu trabalho, em função do valor do fator de segurança calculado anteriormente e do seu desvio padrão. Nesta segunda etapa a autora utilizou um método diferente para o cálculo da probabilidade de ruptura, método de Fiori e Carmignani, enquanto nesta análise este parâmetro foi calculado pelo método de Monte Carlo.

Com o intuito de comparar o resultado obtido anteriormente com a metodologia de Monte Carlo, para a profundidade de 2,0 m, com o obtido por Batista (2019), elaborou-se o mapa apresentado na Figura 4.2, em termos de probabilidade de ruptura, da região em análise. Para facilitar a visualização e comparação de ambos os resultados, o mapa contempla tanto o resultado obtido na Figura 4.1, para a profundidade específica, como o desenvolvido por Batista (2019).

FIGURA 4.2 - MAPAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA NA PROFUNDIDADE DE 2 METROS



FONTE: A autora (2020).

Observando os valores de probabilidade de ruptura encontrados por Batista (2019) na análise probabilística por meio do método de Fiori e Carmignani (Figura 4.2b) e os comparando com os obtidos nesta dissertação por meio do método de Monte Carlo (Figura 4.2a), percebe-se que a análise da autora obteve um cenário mais otimista na área em estudo, estando a probabilidade de ruptura na faixa de 0 a 0,01 nos resultados da análise. Os valores apresentados indicam, segundo a classificação da USACE (1999), um nível abaixo da média de desempenho esperado, sendo quase fraco, ou seja, com pouca probabilidade de ruptura.

4.2 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D PARA PROFUNDIDADES DE RUPTURA PRÉ-DEFINIDAS

Por meio da análise determinística do método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, e da análise probabilística do método de Monte Carlo, em 2D, realizadas no *software* SVSlope, quantificou-se o volume de solo mobilizado previsto com o deslizamento, além do fator de segurança e da probabilidade de ruptura para os quatro cenários de profundidade da superfície de ruptura circular (1,0 m; 1,5 m; 2,0 m e 3,0 m). A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para as quatro profundidades. O resultado volume (m^3/m) refere-se ao volume considerado na seção transversal para 1,0 m de extensão do talude, já o resultado do volume (m^3) diz respeito a volumetria total para a extensão de 37 m do talude.

TABELA 4.1 - RESULTADOS DO SVSLOPE NAS ESPESSURAS PRÉ-DEFINIDAS

Espessura (m)	Probabilidade de ruptura	Fator de Segurança (FS)		Volume (m^3/m)		Volume (m^3)	
		Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.
1	0	2,33	2,28	9,79	13,25	362,23	490,25
1,5	0,01	1,80	1,75	18,70	24,18	691,90	894,66
2	0,01	1,44	1,40	29,78	36,81	1101,86	1361,97
3	0,13	1,20	1,18	57,91	64,43	2142,67	2383,91

FONTE: A autora (2020).

- Probabilidade de ruptura

As probabilidades de ruptura das três primeiras profundidades analisadas (1,0 m, 1,5 m e 2,0 m), de acordo com a classificação da USACE (1999), estão

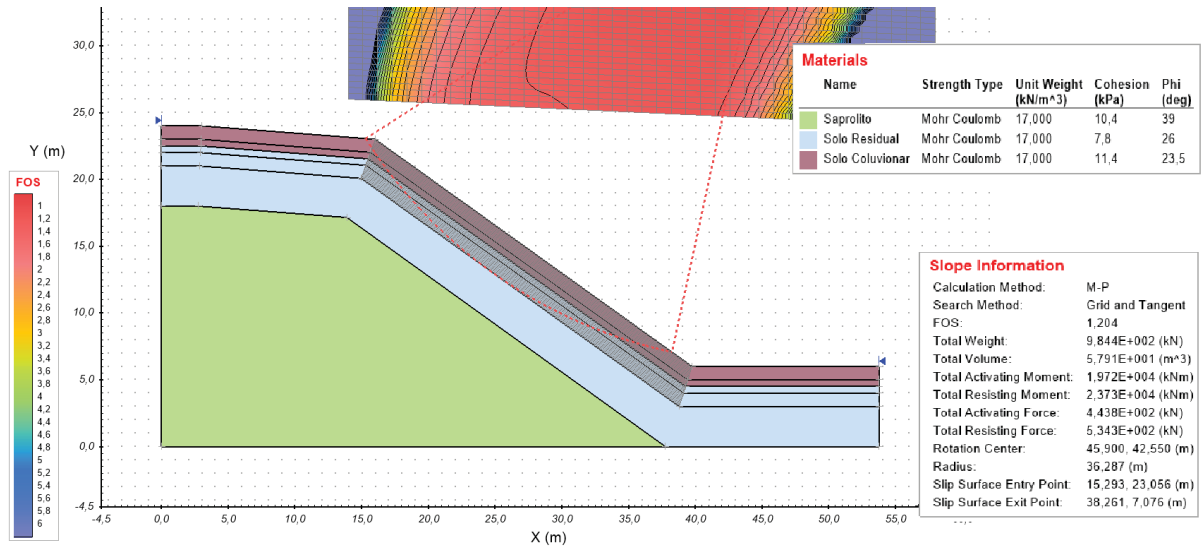
adequadas em razão da baixa susceptibilidade de ocorrência de deslizamento, indicando um nível alto de desempenho esperado para a profundidade de 1,0 m, e um nível abaixo da média de desempenho esperado para as profundidades de 1,5 m e 2,0 m. Diferentemente da profundidade de 3,0 metros que possui uma probabilidade de ruptura maior que 0,1, apresentando assim um nível fraco de desempenho esperado, ou seja, uma situação crítica que compromete a estabilidade do talude.

- Comparação FS determinístico com o FS probabilístico

O fator de segurança calculado, para os dois métodos de análise de estabilidade, também identifica a profundidade de 3,0 metros como uma situação crítica pois apresenta um valor de 1,20 na análise determinística e 1,18 na análise probabilística. De acordo com o Quadro 2.3, apresentado na NBR 11682 (ABNT, 2009), e considerando o nível de segurança contra danos a vidas humanas como médio e o nível de segurança contra danos materiais e ambientais como baixo, o fator de segurança mínimo para deslizamento do talude em estudo seria de 1,3. Sendo assim, este resultado corrobora com o observado anteriormente.

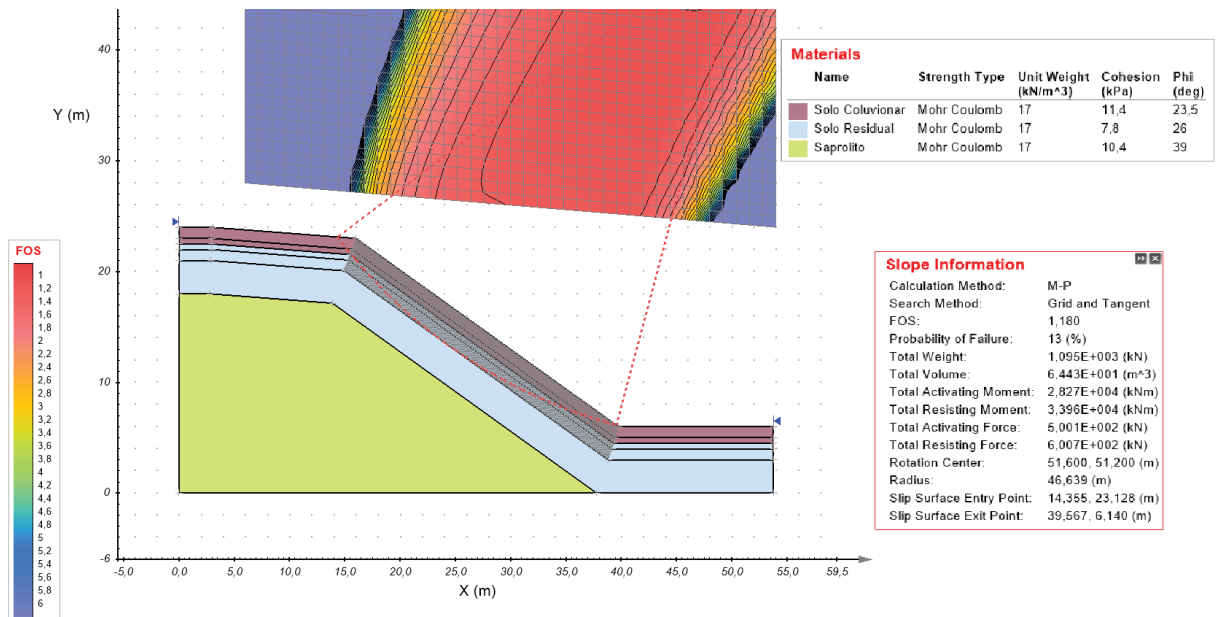
A Figura 4.3 exemplifica uma das análises determinísticas e a Figura 4.4 uma das análises probabilísticas, ambas realizadas no *software* SVSlope, e os resultados obtidos, sendo neste caso, para espessura de 3,0 metros de profundidade. Pode-se constatar que a superfície de ruptura tangenciou a profundidade de 3,0, um dos objetivos desta análise, e se concentrou na parte inclinada do talude. Além disso, a superfície apresentou formato semelhante nas abordagens determinística e probabilística, neste caso, com diferença apenas na quantificação do volume, sendo 57,91 m³/m na primeira abordagem e 64,43 m³/m na segunda.

FIGURA 4.3 - ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE NO SVSLOPE PARA A ESPESSURA DE 3,0 METROS



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 4.4 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE NO SVSLOPE PARA A ESPESSURA DE 3,0 METROS



FONTE: A autora (2020).

As outras imagens das análises, tanto determinística quanto probabilística, para as demais profundidades (1,0 m; 1,5 m e 2,0 m) estão demonstradas no Apêndice 1. Nestas análises pode-se perceber que todas as superfícies de ruptura tangenciaram a profundidade pré-definida e se concentraram na parte inclinada do talude. Além disso, as superfícies apresentaram o formato similar nas duas

abordagens de estabilidade, com exceção das análises na profundidade de 1,0 m, pois o raio de curvatura da superfície de ruptura, na abordagem determinística, apresentou comprimento de praticamente metade (29,49 m) do da abordagem probabilística (56,44 m), resultando assim em diferentes superfícies.

- Comparação geral entre as abordagens determinística e probabilística

Ao comparar os resultados de fator de segurança e volume obtidos com as duas abordagens de análise de estabilidade, determinística e probabilística, para o mesmo talude, percebe-se que na determinística tem-se maiores fatores de segurança além de menores volumes de massa mobilizada, nas quatro profundidades analisadas. Sendo assim, resultou em uma condição mais otimista e com menores quantidades de volumes que possam vir a interditar as faixas de trânsito. Já a abordagem probabilística indicou um cenário mais desfavorável com fator de segurança mais baixo e maiores quantidades de volume de massa mobilizada. Isto se deve ao fato de a abordagem probabilística considerar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, analisando assim vários cenários possíveis dentro dos intervalos de valores destes parâmetros, e indicando o mais crítico entre eles.

4.3 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA

Os resultados obtidos com as análises determinística e probabilística de estabilidade, no *software* SVSLOPE, considerando a superfície de ruptura crítica não circular, ou seja, a superfície livre que indicou o menor fator de segurança, são exibidos na Tabela 4.2. O resultado volume (m^3/m) refere-se ao volume considerado na seção transversal para 1,0 m de extensão do talude, já o resultado volume (m^3) diz respeito a volumetria total para a extensão de 37 m do talude. Notam-se valores de fatores de segurança menores que 1,3 em todas as análises, além de um grau de diferença no volume de massa da análise 2D para a análise 3D, sendo a última com os menores valores.

TABELA 4.2 - RESULTADOS DO SVSLOPE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA

Análise	Probabilidade de ruptura	Fator de Segurança (FS)		Volume (m ³ /m)		Volume (m ³)	
		Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.
2D	0,0124	1,21	1,19	111,70	86,59	4132,90	3203,83
3D	0,00640	1,27	1,23	26,45	38,97	978,60	1442,00

FONTE: A autora (2020).

- Comparação entre as abordagens determinística e probabilística

Neste estudo, a abordagem determinística apresentou um cenário mais otimista do que a abordagem probabilística em função do fator de segurança calculado ser maior. No entanto, ambos quando comparados com o fator de segurança mínimo para deslizamento do talude em questão, determinado pela NBR 11682 (ABNT, 2009), no valor de 1,3, são menores. Com relação ao volume de massa mobilizada não se teve um comportamento padrão quando comparada ambas as abordagens pois enquanto na análise 2D a abordagem determinística obteve maior volume (4132,90 m³ comparado a 3203,83 m³ da abordagem probabilística), na análise 3D foi ao contrário (978,60 m³ na abordagem determinística e 1442,00 m³ na abordagem probabilística).

- Probabilidade de ruptura

As probabilidades de ruptura calculadas na abordagem probabilística, de acordo com a classificação da USACE (1999), apresentam um nível abaixo da média de desempenho esperado, tanto na análise 2D quanto na 3D, dessa forma indicam que o talude rodoviário em estudo possui baixa probabilidade de ocorrência de deslizamento, o que o torna mais estável.

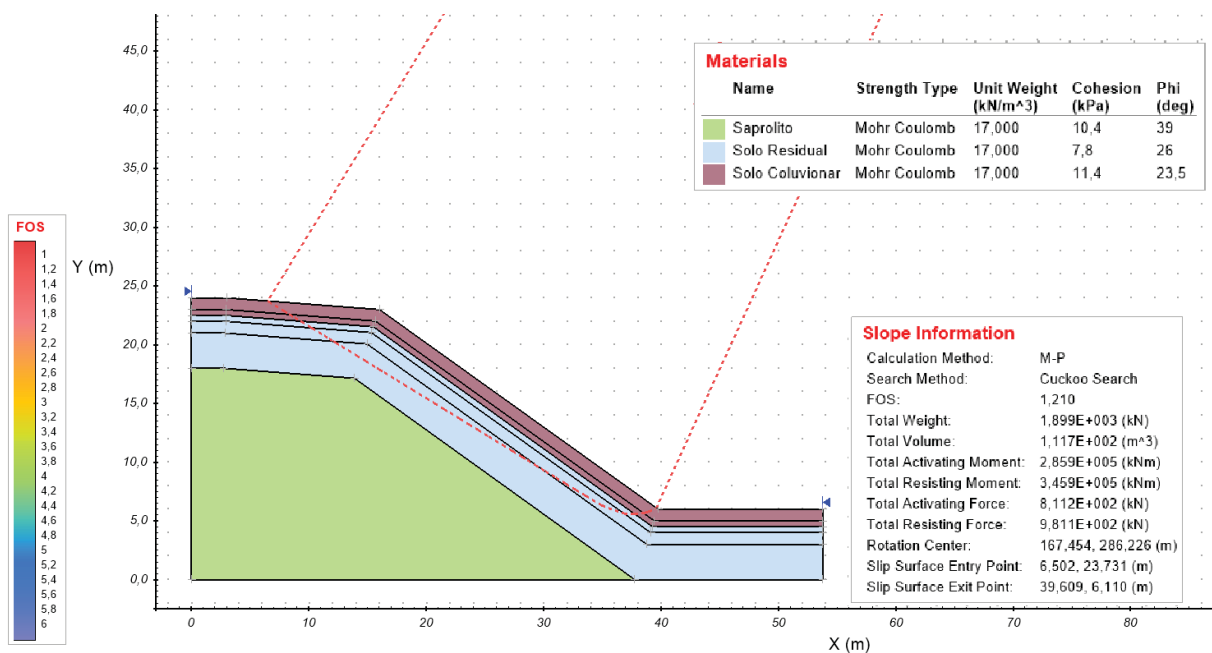
- Comparação entre os resultados da análise 2D e 3D

Com relação aos dois tipos de análises de visualização, 2D e 3D, percebeu-se que a 3D contemplou um cenário mais otimista pois a probabilidade de ruptura foi menor que na outra, apresentou um maior fator de segurança além de menores volumes de massa mobilizada, isto nas duas abordagens. Este último resultado, volume de massa mobilizada, foi o que mais diferiu entre ambas as análises (2D e

3D), sendo, na 3D, cerca de 76% menor na abordagem determinística e 55% menor na abordagem probabilística. Isto se deve ao fato de que na visualização 2D este volume é estimado a partir da área acima da superfície de ruptura crítica do talude e multiplicada pelo comprimento longitudinal, ou seja, toda esta área ao longo do comprimento do talude é considerada como a massa a ser deslocada com o possível deslizamento. Já na visualização 3D, é possível detalhar melhor este volume, não o considerando contínuo ao longo do comprimento, e sim mais concentrado, com bordas definidas e diferentes profundidades de localização da superfície de ruptura crítica, além do que a modelagem da encosta incorpora várias seções transversais e não apenas uma.

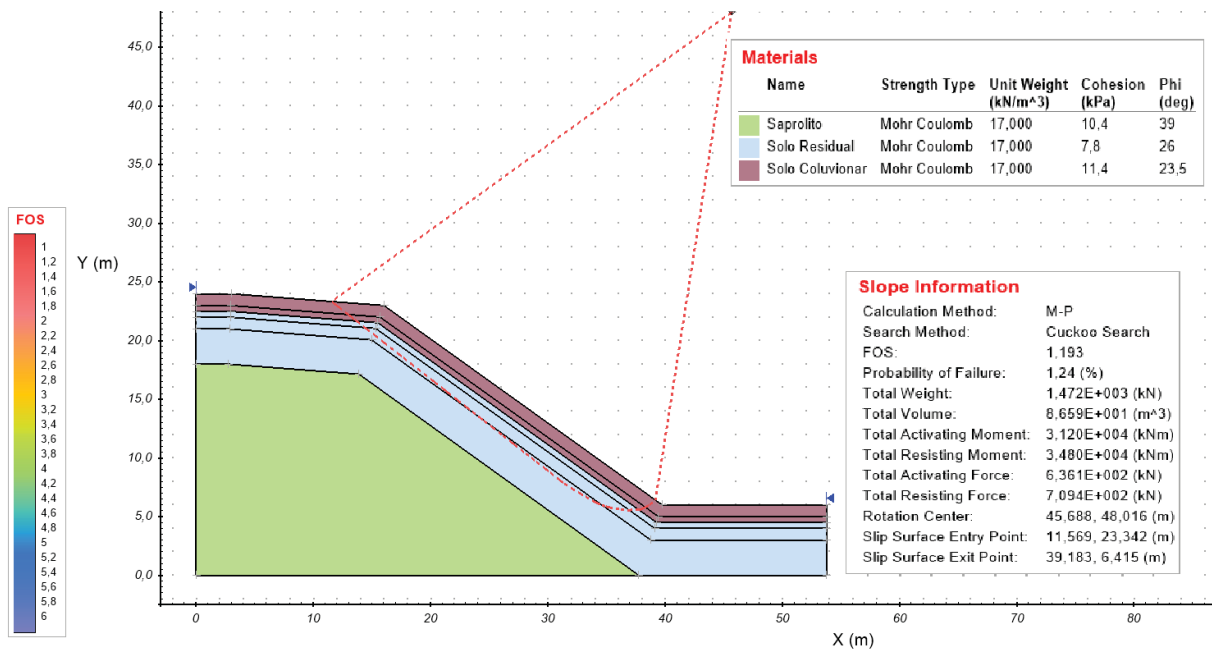
As Figuras 4.5 e 4.6 exemplificam as análises 2D na abordagem determinística e probabilística, respectivamente, além dos resultados obtidos. Nota-se que a superfície de ruptura se concentrou na parte inclinada do talude e em sua crista. Além disso, na abordagem determinística, a superfície chegou até uma profundidade de aproximadamente 4,0 m, diferente da abordagem probabilística que quase tangenciou a profundidade de 3,0 m.

FIGURA 4.5 - VISUALIZAÇÃO 2D DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 4.6 - VISUALIZAÇÃO 2D DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA

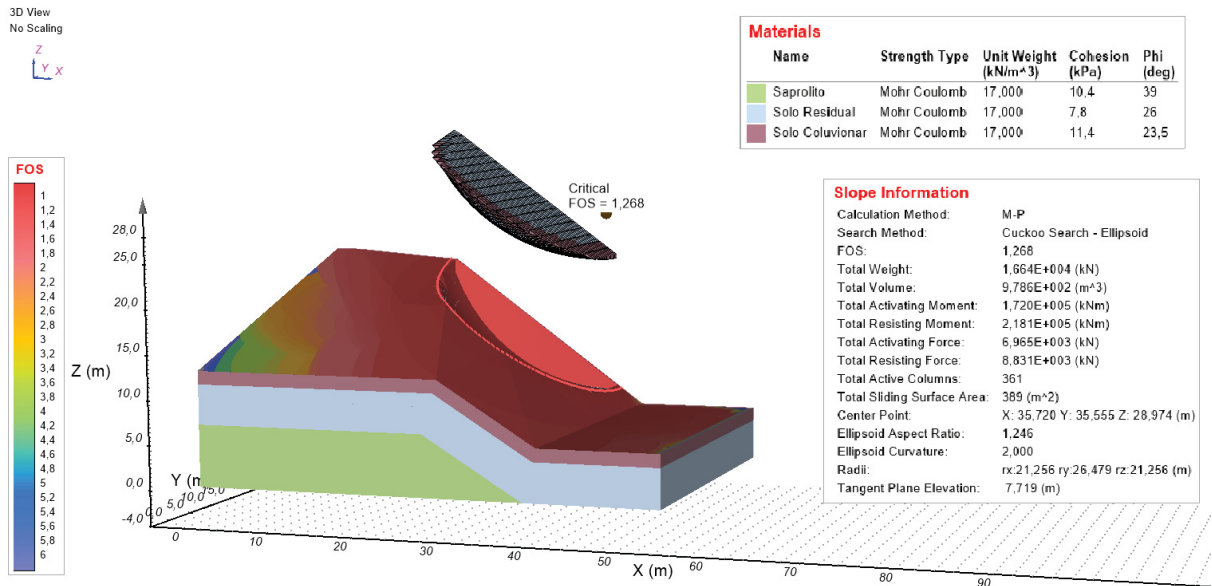


FONTE: A autora (2020).

Já as Figuras 4.7 e 4.8 exemplificam as análises 3D na abordagem determinística e probabilística, respectivamente, além dos resultados obtidos com o deslocamento visual do volume de massa mobilizada. Pode-se constatar que visualmente e quantitativamente os volumes obtidos pelas duas abordagens, determinística e probabilística, apresentam grande diferença, cerca de 463 m³, sendo que na segunda abordagem apresentou uma superfície de ruptura maior que na primeira, resultando assim em maior volume. Além disso, em ambas as abordagens a ruptura ocorreu na extremidade de maior altura, se estendendo, até no máximo, ao meio do talude.

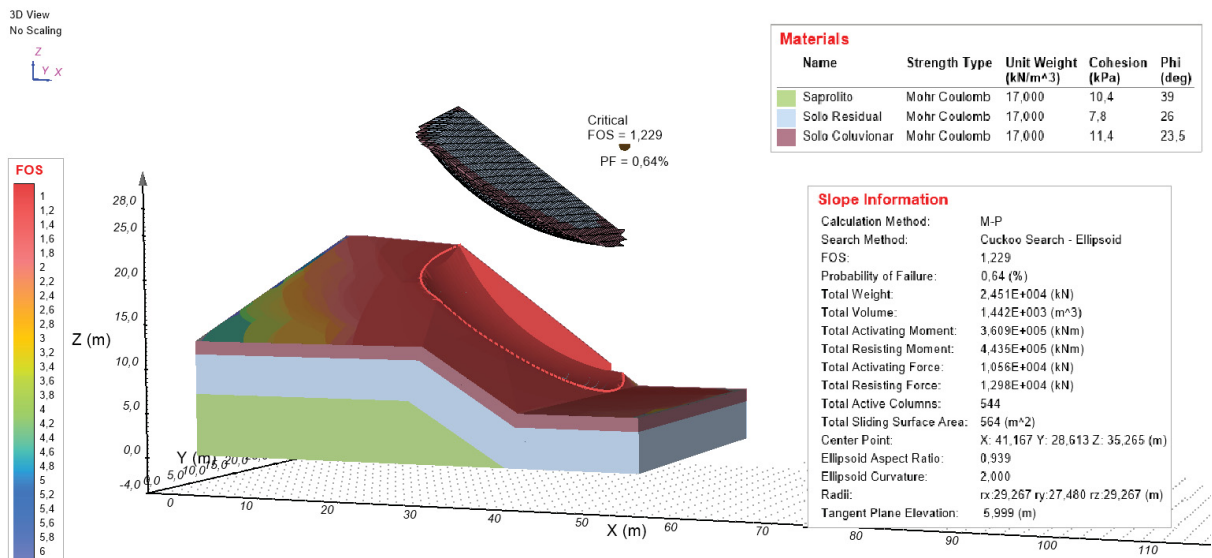
As outras imagens elaboradas de ambas as análises (determinística e probabilística), na modelagem 3D, demonstram os mesmos dados que as Figuras 4.7 e 4.8, porém sem o volume deslocado, e estão demonstradas no Apêndice 2.

FIGURA 4.7 - VISUALIZAÇÃO 3D DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 4.8 - VISUALIZAÇÃO 3D DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA



FONTE: A autora (2020).

4.4 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA IMPONDO CENÁRIOS DE SUCCÃO E NÍVEL D'ÁGUA NO TALUDE

Os resultados obtidos por meio das análises de estabilidade determinística e probabilística foram o fator de segurança (FS), a probabilidade de ruptura do talude e os volumes de massa de solo mobilizados pela ruptura do talude, todos eles para as duas situações de posição do nível d'água, a 6,5 metros e 7,5 metros de profundidade. A Tabela 4.3 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a superfície de ruptura crítica para os dois níveis d'água e os seis cenários de sucção superficial (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa, 100 kPa e 120 kPa), sendo que ambas as abordagens (determinística e probabilística) tiveram o mesmo resultado. O resultado volume (m^3/m) refere-se ao volume considerado na seção transversal para 1 m de extensão do talude, já o resultado volume (m^3) diz respeito a volumetria total para a extensão de 37 m do talude.

TABELA 4.3 - RESULTADOS OBTIDOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE PARA OS DOIS NÍVEIS D'ÁGUA E OS SEIS CENÁRIOS DE SUCÇÃO SUPERFICIAL

NÍVEL D' ÁGUA À 6,5 METROS								
Análise	Sucção (kPa)	Prob. de ruptura (%)	FS		Volume (m³/m)		Volume (m³)	
			Det	Prob	Det	Prob	Det	Prob
2D	20	0,28	1,25		159,90	5916,30		
	40	0,04	1,29					
	60	0,02	1,33					
	80	0,00	1,36					
	100	0,00	1,38					
	120	0,00	1,39					
3D	20	0,00	1,44		40,89	1513,00		
	40		1,46		35,30	1306,00		
	60		1,52		31,81	1177,00		
	80		1,68		49,59	1835,00		
	100		1,77		41,78	1546,00		
	120		1,85		58,05	2148,00		
NÍVEL D' ÁGUA À 7,5 METROS								
Análise	Sucção (kPa)	Prob. de ruptura (%)	FS		Volume (m³/m)		Volume (m³)	
			Det	Prob	Det	Prob	Det	Prob
2D	20	0,28	1,25		159,90	5916,30		
	40	0,04	1,29					
	60	0,02	1,33					
	80	0,00	1,36					
	100	0,00	1,38					
	120	0,00	1,39					
3D	20	0,00	1,36		36,57	1353,00		
	40		1,53		47,05	1741,00		
	60		1,54		42,30	1565,00		
	80		1,61		23,43	867,00		
	100		1,65		48,05	1778,00		
	120		1,71		51,38	1901,00		

FONTE: A autora (2020).

- Comparação da probabilidade de ruptura entre cenários

Neste estudo a probabilidade de ruptura apresentou maior valor, 0,28%, no cenário de sucção superficial de 20 kPa, nas análises 2D, indicando um nível de desempenho esperado acima da média, de acordo com a classificação da USACE (1999). Já os demais valores de probabilidade de ruptura obtidos nos cenários de sucção superficial da visualização 2D de 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa, 100 kPa e 120 kPa (0,04%; 0,02% e 0%) e os obtidos na visualização 3D para todos os cenários de

sucção superficial (0%) indicam um nível de desempenho esperado bom e alto no caso de 0%. Dessa forma, o talude apresenta-se estável devido à baixa probabilidade de ocorrência de deslizamento.

- Comparação do FS entre cenários

Com relação aos valores obtidos de fator de segurança (FS), notam-se valores menores que 1,3 apenas nos cenários de sucção superficial de 20 kPa e 40 kPa na análise 2D, em ambas as posições de nível d'água. Nos demais cenários em 2D e em todos os cenários em 3D o talude é considerado seguro, sem possibilidade de vir a deslizar, além do que o aumento da sucção superficial proporcionou um aumento do FS, garantindo assim maior segurança ao talude. O menor valor do FS (1,25) é inferior ao FS mínimo exigido pela NBR 11682 (ABNT, 2009), porém em termos de probabilidade de ruptura tem-se um nível de desempenho esperado acima da média, ou seja, por mais que o fator de segurança seja baixo nem sempre indica que o talude vai romper, como é o caso deste talude que foi considerado como estável em todos os cenários simulados.

- Comparação do volume de massa mobilizada entre cenários

Na análise 2D a quantificação do volume de massa mobilizada foi a mesma em todos os cenários simulados considerando a sucção superficial, em razão da superfície de ruptura crítica ser a mesma em todas as simulações realizadas. Já na análise 3D, por se tratar de três dimensões, o volume foi diferente de um cenário para o outro. Em cada cenário simulado a superfície de ruptura crítica foi diferente pois ela foi analisada em toda a extensão do talude e não apenas em uma seção transversal em específico. Teve-se situações em que a superfície de ruptura esteve localizada na extremidade mais alta do talude, como também situações em que esteve localizada no meio dele, resultando assim em diferentes valores de volume de massa mobilizada.

Vale observar que o aumento da sucção superficial não necessariamente proporcionou o aumento do volume, como é observado no cenário de sucção superficial de 60 kPa do nível d'água a 6,5 metros da análise 3D, como também no cenário de sucção superficial de 80 kPa do nível d'água a 7,5 metros da análise 3D, não podendo ser estabelecido nenhuma relação. Além disso, o volume apresentou

valor total de 5916,30 m³ na análise 2D e variou entre 867 m³ e 2148 m³ na análise 3D.

- Comparação entre os resultados da análise 2D e 3D

No que se refere aos resultados obtidos com as visualizações 2D e 3D percebe-se uma diferença entre eles. Na análise 3D, a probabilidade de ruptura apresentou um cenário mais seguro (menores valores) já que nesta análise foi possível considerar todas as possibilidades de deslizamentos nas três dimensões, diferentemente da análise 2D que ficou limitada apenas a duas dimensões. O fator de segurança também apresentou maiores valores na análise 3D, o que pode ser justificado pelo mesmo motivo anterior, consegue-se analisar mais possibilidades de superfícies de ruptura crítica ao longo de toda a extensão do talude, além de diferentes formas de superfícies, obtendo-se assim uma superfície de ruptura mais fiel ao que poderia ocorrer na realidade, apresentando, neste caso em 3D, um cenário mais seguro. Do mesmo modo, os volumes de massa mobilizada foram distintos entre as análises 2D e 3D, sendo bem menores na 3D, o que pode ser justificado em razão da visualização 2D estimar o volume a partir da área da superfície de ruptura crítica do talude e multiplicar pelo comprimento longitudinal. No entanto, na visualização 3D é possível detalhar melhor este volume, não o considerando contínuo ao longo do comprimento, e sim mais pontual, com bordas definidas e diferentes profundidades de localização da superfície de ruptura crítica ao longo das várias seções transversais.

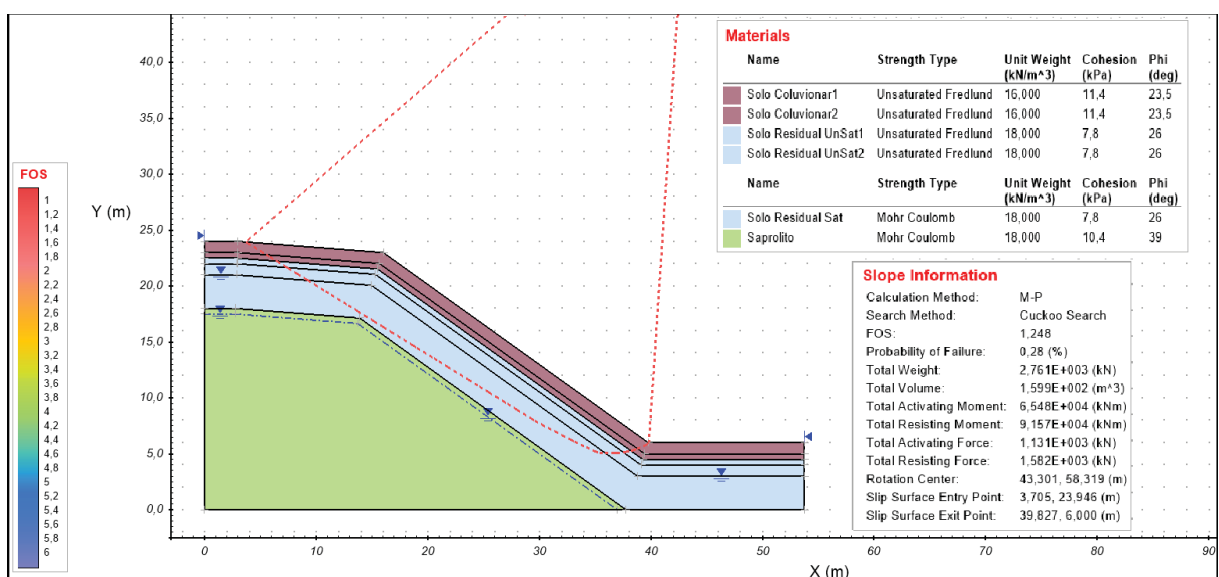
- Comparação entre os resultados da posição do nível d'água à 6,5 m de profundidade e à 7,5 m de profundidade

Com relação aos resultados obtidos com as duas posições de nível d'água, a 6,5 m e 7,5 m de profundidade, observou-se proximidade entre eles. Na visualização 2D os resultados foram os mesmos para ambos os níveis d'água, ou seja, a mudança do nível d'água, que está localizado no saprólito, não interferiu no comportamento dos solos acima, coluvionar e residual, mantendo assim os resultados em termos de fator de segurança, probabilidade de ruptura volume de massa mobilizada. Na visualização 3D a mudança da posição do nível d'água apresentou pouca interferência. A profundidade de 6,5 m teve maiores valores de FS, em sua maioria, quando

comparado aos valores de FS da profundidade de 7,5 m, para o mesmo cenário de sucção superficial, porém os volumes de massa mobilizada, além de não apresentarem um padrão de comportamento com o aumento da sucção superficial, foram variados quando comparados em termos da profundidade do nível d'água, dessa forma, não apresentou um modelo de comportamento, com relação ao volume, nas duas análises de resultados.

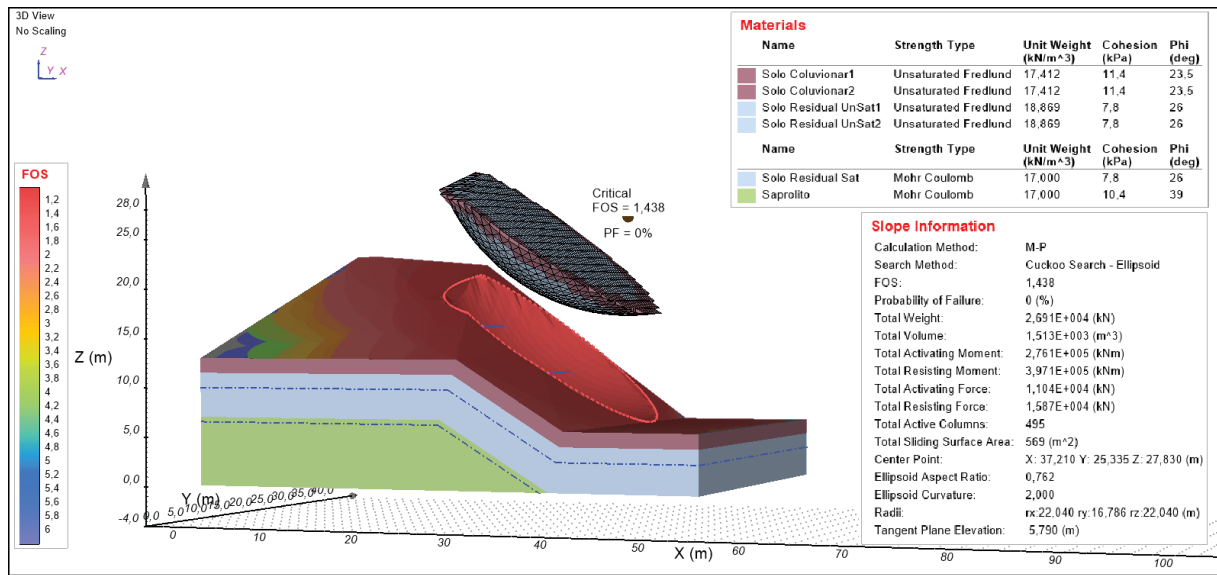
As Figuras 4.9 e 4.10 exemplificam uma das análises probabilísticas realizadas no *software* SVSlope e os resultados obtidos na visualização 2D e 3D, respectivamente, para a profundidade de nível d'água a 6,5 m e sucção superficial de 20 kPa. Nota-se que na visualização 2D a superfície de ruptura crítica quase intercepta o material saprólito e está acima do nível d'água, além de localizada na parte inclinada do talude e em sua crista. Na visualização 3D a região de ruptura ocorreu nos solos coluvionar e residual, sendo mais próxima da extremidade de maior altura, se estendendo até o meio do talude, sendo possível visualizar toda a sua área de abertura quando observado de cima. Além do que, visualmente, é muito perceptível que a área rompida quando analisada na seção transversal do talude é menor que a área rompida mostrada na visualização 2D, indicando assim menores volumes.

FIGURA 4.9 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 2D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 6,5 METROS E SUCÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA



FONTE: A autora (2020).

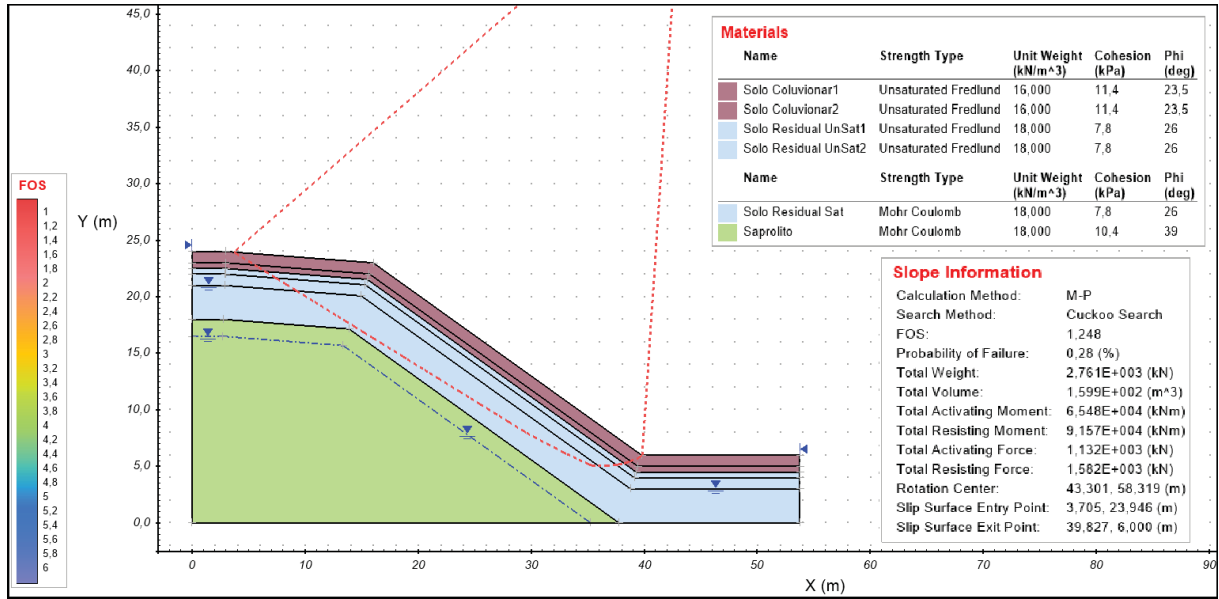
FIGURA 4.10 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 3D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 6,5 METROS E SUÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA



FONTE: A autora (2020).

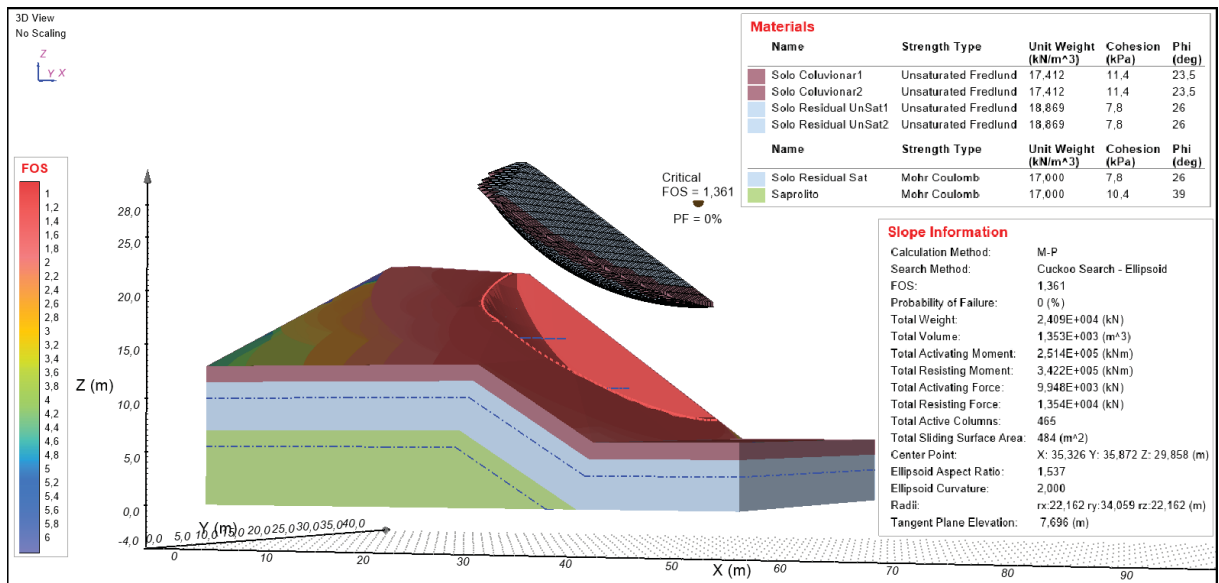
Já as Figuras 4.11 e 4.12 exemplificam uma das análises probabilísticas realizadas no *software* SVSlope e os resultados obtidos na visualização 2D e 3D, respectivamente, para a profundidade de nível d'água a 7,5 metros e sucção superficial de 20 kPa. Nota-se que a visualização 2D é a mesma apresentada pela Figura 4.9, apenas diferencia a posição do nível d'água que está à um metro de distância. Na visualização 3D a região de ruptura ocorreu também nos solos coluvionar e residual, mais próxima da extremidade de maior altura, se estendendo até o meio do talude, porém a área de abertura da região de ruptura é cortada nesta extremidade mais alta, diferentemente da Figura 4.10. Além disso, também, visualmente, é muito perceptível que a área rompida quando analisada na seção transversal do talude é menor que a área rompida mostrada na visualização 2D, indicando assim menores volumes.

FIGURA 4.11 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 2D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 7,5 METROS E SUÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 4.12 - ANÁLISE PROBABILÍSTICA 3D NO SVSLOPE COM NÍVEL D'ÁGUA A 7,5 METROS E SUÇÃO SUPERFICIAL DE 20 KPA



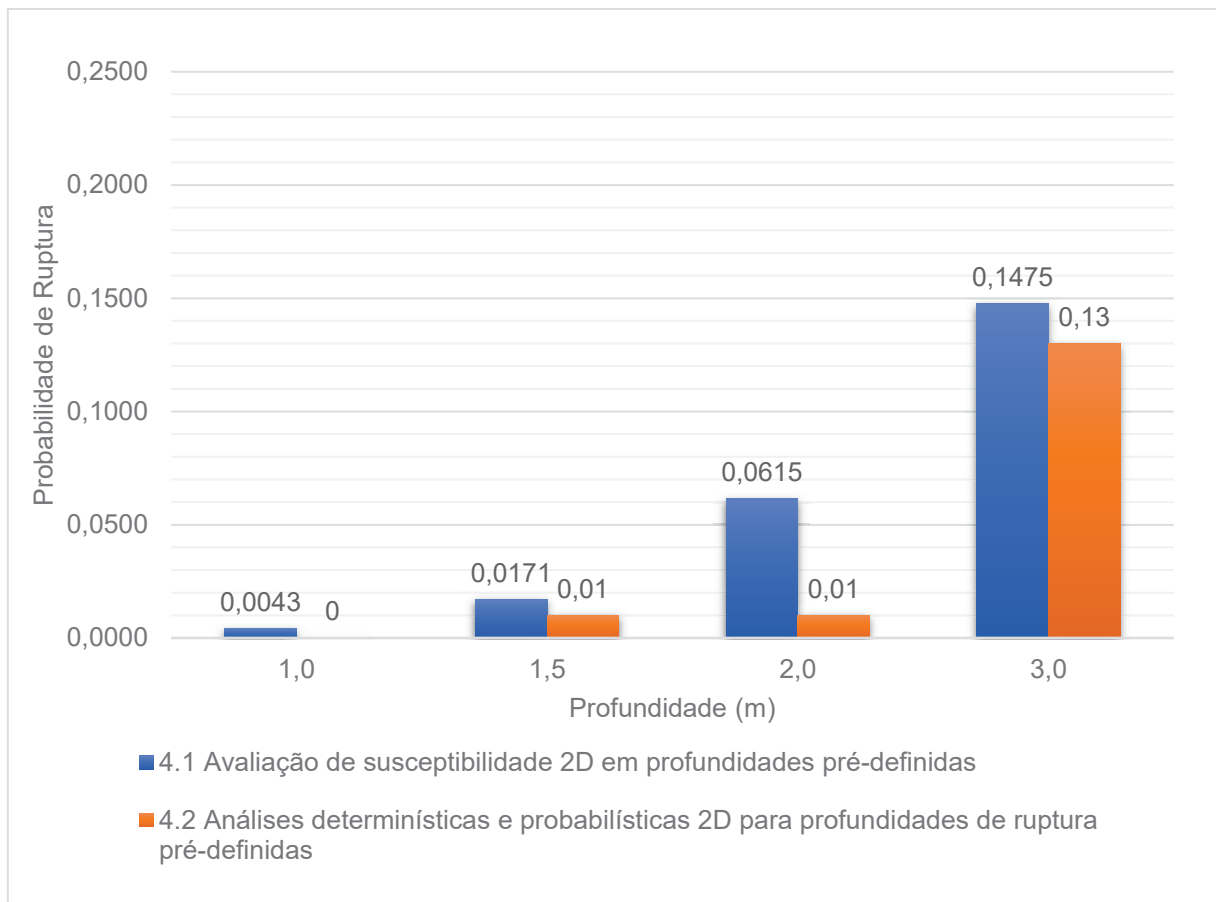
FONTE: A autora (2020).

As demais imagens, de ambas as análises (determinística e probabilística), na modelagem 2D e 3D, para os demais cenários de sucção superficial e, também, para as duas posições de nível d'água estão demonstradas no Apêndice 3.

4.5 COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS

A fim de centralizar os resultados obtidos com as metodologias aplicadas elaborou-se, primeiramente, a Figura 4.13, a qual contempla as seguintes informações.

FIGURA 4.13 - RESULTADO DA PROBABILIDADE DE RUPTURA DAS METODOLOGIAS 4.1 E 4.2



FONTE: A autora (2020).

As probabilidades de ruptura calculadas na metodologia 4.1 (avaliação de susceptibilidade 2D em profundidades pré-definidas) corroboram com as obtidas na metodologia 4.2 (análises determinísticas e probabilísticas 2D para profundidades de ruptura pré-definidas), já que os valores encontrados, em sua grande maioria, são parecidos, o que valida os dados obtidos em ambas as análises. A profundidade de 2,0 m foi a que apresentou, graficamente, maior diferença de valores, porém analisando numericamente equivale a uma diferença de 0,0515, valor este pequeno, além do que ambos os valores de probabilidade de ruptura, quando classificados, de

acordo com a classificação da USACE (1999), apresentam um nível abaixo da média de desempenho esperado. Sendo assim, considera-se que as probabilidades de ruptura para a profundidade de 2,0 m são similares nas duas metodologias.

Em geral, as três primeiras profundidades analisadas (1,0 m, 1,5 m e 2,0 m), de ambas as metodologias, estão adequadas, em razão da baixa susceptibilidade de ocorrência de deslizamento, diferentemente da profundidade de 3,0 metros que possui uma probabilidade de ruptura maior que 0,1, sendo considerado um nível fraco de desempenho esperado, de acordo com a classificação da USACE (1999), apresentando assim uma situação crítica que compromete a estabilidade do talude.

Na sequência, tem-se a Tabela 4.4 que apresenta os resultados das demais metodologias, as quais foram realizadas no *software* SVSlope da SoilVision.

TABELA 4.4 - COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS DO SVSLOPE

4.2 – ANÁLISE DET. E PROB. DE ESTABILIDADE 2D PARA PROFUNDIDADES DE RUPTURA PRÉ-DEFINIDAS									
Análise	Espessura	Sucção (kPa)	Prob. de ruptura (%)	FS		Volume (m³/m)		Volume (m³)	
				Det	Prob	Det	Prob	Det	Prob
2D	1	0 a 120	0	2,33	2,28	9,79	13,25	362,23	490,25
	1,5		1	1,79	1,75	18,70	24,18	691,90	894,66
	2		1	1,44	1,40	29,78	36,81	1101,86	1361,97
	3		13	1,20	1,18	57,91	64,43	2142,67	2383,91
4.3 - ANÁLISE DET. E PROB. DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUP. DE RUPTURA CRÍTICA									
Análise	Espessura	Sucção (kPa)	Prob. de ruptura (%)	FS		Volume (m³/m)		Volume (m³)	
				Det	Prob	Det	Prob	Det	Prob
2D	Crítica	0	1,24	1,21	1,19	111,70	86,59	4132,90	3203,83
3D			0,64	1,27	1,23	26,45	38,97	978,60	1442,00
4.4 - ANÁLISE DET. E PROB. DE ESTABILIDADE 2D E 3D NA SUP. DE RUPTURA CRÍTICA IMPONDO CENÁRIOS DE SUCCÃO E NÍVEL D'ÁGUA NO TALUDE									
NÍVEL D' ÁGUA À 6,5 METROS									
Análise	Espessura	Sucção (kPa)	Prob. de ruptura (%)	FS		Volume (m³/m)		Volume (m³)	
				Det	Prob	Det	Prob	Det	Prob
2D	Crítica	20	0,28	1,25		159,90		5916,30	
		40	0,04	1,29					
		60	0,02	1,33					
		80		1,36					
		100	0,00	1,38					
		120		1,39					
3D	Crítica	20		1,44		40,89		1513,00	
		40		1,46		35,30		1306,00	
		60	0,00	1,52		31,81		1177,00	
		80		1,68		49,59		1835,00	
		100		1,77		41,78		1546,00	
		120		1,85		58,05		2148,00	
NÍVEL D' ÁGUA À 7,5 METROS									
Análise	Espessura	Sucção (kPa)	Prob. de ruptura (%)	FS		Volume (m³/m)		Volume (m³)	
				Det	Prob	Det	Prob	Det	Prob
2D	Crítica	20	0,28	1,25		159,90		5916,30	
		40	0,04	1,29					
		60	0,02	1,33					
		80		1,36					
		100	0,00	1,38					
		120		1,39					
3D	Crítica	20		1,36		36,57		1353,00	
		40		1,53		47,05		1741,00	
		60	0,00	1,54		42,30		1565,00	
		80		1,61		23,43		867,00	
		100		1,55		48,05		1778,00	
		120		1,71		51,38		1901,00	

FONTE: A autora (2020).

- Comparação da probabilidade de ruptura da metodologia 4.2 com a da metodologia 4.3

Ao compararmos as probabilidades de ruptura da metodologia 4.3 (análise determinística e probabilística de estabilidade 2D e 3D na superfície de ruptura crítica), com a obtida na metodologia 4.2 (análise determinística e probabilística 2D para profundidades de ruptura pré-definidas), para a profundidade de 3,0 m, já que a profundidade apresentada para a superfície crítica ficou perto deste valor, percebe-se que são mais otimistas pois apresentaram valores bem menores que 0,1 (10%) ao contrário da outra análise (item 4.2) que obteve uma probabilidade de ruptura de 0,13. O formato da superfície de ruptura bem como o método de pesquisa desta superfície podem acabar interferindo neste parâmetro indiretamente.

- Comparação dos resultados da abordagem probabilística 2D da metodologia 4.2 com a da metodologia 4.3

Se compararmos os resultados obtidos da abordagem probabilística da metodologia 4.3 (análise determinística e probabilística de estabilidade 2D e 3D na superfície de ruptura crítica), com os resultados da metodologia 4.2 (análise determinística e probabilística 2D para profundidades de ruptura pré-definidas), para a espessura de 3 metros, observa-se que o fator de segurança foi similar, sendo 1,19 na primeira e 1,18 na segunda. Já o volume mobilizado apresentou certa diferença, sendo 86,59 m³/m na metodologia 4.3 e 64,43 m³/m na profundidade pré-definida de 3 metros da metodologia 4.2. Isto se deve ao fato de a área relacionada a mobilização ser maior na primeira análise do que na segunda.

- Comparação dos resultados da metodologia 4.4 com as metodologias 4.2 e 4.3

Ao compararmos os resultados da metodologia 4.4 (análise determinística e probabilística de estabilidade 2D e 3D na superfície de ruptura crítica impondo cenários de sucção e nível d'água no talude), com as outras metodologias, 4.2 (análise determinística e probabilística de estabilidade 2D para profundidades de ruptura pré-definidas) e 4.3 (análise determinística e probabilística de estabilidade 2D e 3D na superfície de ruptura crítica), percebe-se, primeiramente, que os resultados

obtidos com a metodologia 4.2 apresentou um cenário mais crítico de estabilidade para o talude em estudo. Considerando a profundidade de 3 m para a superfície de ruptura, a qual apresenta o cenário mais grave dos quatro propostos (1,0 m; 1,5 m; 2,0 m e 3,0 m), têm-se valores de probabilidade de ruptura de 13% e fator de segurança de 1,18, conforme Tabela 4.4, valores estes menos seguros que os apresentados na metodologia 4.4, probabilidade de ruptura de 0,28% e fator de segurança de 1,25 do menor cenário de sucção superficial. No que se refere ao volume de massa mobilizada a primeira metodologia (4.2) obteve menores valores (máximo de 2383,91 m³) enquanto a metodologia 4.4 apresentou o valor máximo de 5916,30 m³. Esta grande diferença de valores se justifica na diferença da posição da superfície de ruptura crítica pois na primeira metodologia foi considerado até 3,0 m de profundidade, já na segunda, por se tratar da superfície de ruptura crítica, buscou superfícies mais profundas chegando quase passar pelo material saprólito que está no mínimo a 6 metros de profundidade. Sendo assim, percebe-se que a consideração da sucção na superfície do talude contribuiu para o ganho de resistência na estabilidade do talude, tanto em termos de probabilidade de ruptura quanto em FS. Com relação a inserção da consideração do nível d'água no talude pode ser que tenha interferido indiretamente no ganho de resistência de estabilidade, porém afirmações não podem ser feitas em função do mesmo estar localizado profundamente (mínimo 6,5 m) e dentro do terceiro material do talude, saprólito.

- Comparação dos resultados da metodologia 4.3 com a metodologia 4.4

Comparando os resultados da metodologia 4.3 (análise determinística e probabilística de estabilidade 2D e 3D na superfície de ruptura crítica), com a metodologia 4.4 (análise determinística e probabilística de estabilidade 2D e 3D na superfície de ruptura crítica impondo cenários de sucção e nível d'água no talude), observou-se que os resultados apresentaram um cenário mais arriscado do que os resultados da metodologia que considera a sucção superficial e presença de nível d'água. Na análise 2D os resultados são parecidos em termos de probabilidade de ruptura (1,24% na metodologia 4.3 e 0,28% na metodologia 4.4), já o fator de segurança é maior no primeiro cenário de sucção superficial (1,25) do que na outra metodologia (1,19), confirmando um cenário mais otimista na análise da metodologia 4.4. Na análise 3D também se percebeu que a sucção superficial colabora com um

talude mais seguro pois na Tabela 4.4, da metodologia 4.3, têm-se uma probabilidade de ruptura de 0,64% e fator de segurança de 1,23, enquanto na outra metodologia (4.4), Tabela 4.4, têm-se 0% de probabilidade de ruptura e 1,36 de fator de segurança. Além disso, a sucção superficial está presente nos três primeiros metros do talude, região está que faz parte do volume de massa mobilizada pois está acima da superfície de ruptura crítica. Os volumes, em ambas as visualizações das duas metodologias, apresentam valores diversos pois são definidos em função da posição da superfície de ruptura crítica, não podendo ser feita nenhuma relação entre eles, como também da interferência da consideração do nível d'água, o qual está muito profundo e localizado no material saprólito, não exercendo interferência direta nos resultados.

4.6 LIMITAÇÕES DO SOFTWARE

No decorrer do desenvolvimento das análises percebeu-se que um dos *softwares* utilizados apresenta algumas limitações em seu uso em função do tipo de licença disponível pela Universidade Federal do Paraná. No SVSlope da SoilVision somente é possível realizar análise probabilística de estabilidade de taludes em 2D, não podendo ser feita em 3D. Diante disso, por meio do contato por e-mail com a empresa responsável pelo *software*, conseguiu-se um código de treinamento temporário de apenas 10 dias para o uso avançado da licença, sendo possível então realizar esta análise em 3D.

Além disso, na modelagem 3D, em específico na área definida para a pesquisa da superfície de ruptura, para o método de busca grade e tangente, o *software* aceita apenas linhas horizontais para a delimitação do cubo de busca para a superfície, não sendo possível delimitar estas linhas na parte inclinada do talude, na qual tem-se a divisão das camadas do solo em linhas inclinadas, diferentemente da modelagem 2D que possibilita no método de busca grade e tangente, que a tangente possa ser horizontal ou inclinada. Sendo assim, a análise probabilística de estabilidade para os mapas de susceptibilidade foi feita somente em modelagem 2D, além da quantificação do volume de massa mobilizada.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da apresentação e análise dos resultados das metodologias aplicadas de análise de estabilidade de um talude rodoviário, realizadas nesta pesquisa de mestrado, é possível prosseguir para as conclusões deste trabalho, o qual teve como objetivo a análise de estabilidade em 2D e 3D de um talude rodoviário localizado na BR-116 SP, por meio da abordagem determinística e probabilística, incorporando cenários de sucção e consideração de nível d'água, e prevendo, no caso de ruptura, o volume de massa mobilizada.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação contemplou a análise de estabilidade determinística e probabilística de um talude rodoviário localizado na BR-116 SP, na Serra Pelada, região que apresenta altas declividades e um histórico de instabilidades. A análise de estabilidade envolveu o desenvolvimento de mapas de susceptibilidade e simulação de cenários com e sem a incorporação da sucção nas camadas superficiais e consideração de nível d'água.

5.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação, nas situações em que possuíam valores distintos, tanto na modelagem 2D quanto na 3D, a abordagem determinística apresentou um cenário mais otimista do que a abordagem probabilística, em função do fator de segurança calculado ser maior. No entanto, os fatores de segurança das duas abordagens, quando comparados com o fator de segurança mínimo para deslizamento do talude em estudo (1,3), determinado pela NBR 11682/2009, são menores. Nas demais situações, em que a abordagem determinística apresentou os mesmos valores que a abordagem probabilística, percebeu-se fatores de segurança entre 1,25 e 1,85. Os cenários com a incorporação da sucção superficial, com exceção da sucção superficial de 20 kPa e 40 kPa na análise 2D, considerando a superfície de ruptura crítica, apontaram o talude como seguro.

As análises de estabilidade probabilísticas são uma importante ferramenta de apoio na tomada de decisão pelos engenheiros geotécnicos pois considera em seus cálculos a variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, diferentemente das análises de estabilidade determinísticas que apenas consideram o valor médio destes parâmetros.

Aferiu-se probabilidades de ruptura mais fidedignas com a área em estudo, apresentando, em sua grande maioria, valores baixos nas simulações dos diferentes cenários, caracterizando assim uma baixa probabilidade de ocorrência de um deslizamento. O único cenário que indicou uma probabilidade de ruptura maior que 0,1 (0,13), valor este considerado comprometedor à instabilidade do talude, foi para uma profundidade de 3,0 metros da superfície de ruptura, ou seja, na espessura pré-definida de 3,0 metros dos mapas de susceptibilidade.

Nota-se que a posição da superfície de ruptura interferiu, indiretamente, no fator de segurança e na probabilidade de ruptura do talude. Ao deixar a superfície de ruptura livre faz com que a mesma busque a sua pior situação, ou seja, a mais crítica para aquele cenário, sendo esta a situação que se almeja quando se está analisando a estabilidade global do talude.

Quanto ao volume de massa mobilizada, nenhuma relação pode ser estabelecida já que seus resultados foram diversos e não apresentaram um padrão de comportamento em nenhum cenário simulado. O único ponto a ser ressaltado é com relação à divergência de valores de volume de massa mobilizada entre as análises 2D e 3D, sendo bem menores na 3D, o que pode ser justificado em razão da análise 2D estimar este volume a partir da área acima da superfície de ruptura do talude e multiplicar pelo comprimento longitudinal. Já na análise 3D o volume é melhor detalhado, com bordas definidas, pois é mais pontual e não contínuo ao longo do comprimento, apresentando diversas profundidades de localização da superfície de ruptura ao longo de várias seções transversais.

Em relação aos resultados das análises na superfície de ruptura crítica com incorporação da sucção, observa-se que o aumento da sucção superficial proporcionou uma maior segurança ao talude devido ao aumento do fator de segurança e decréscimo da probabilidade de ruptura. Em contrapartida, ao aumentar a profundidade da superfície de ruptura, ou seja, quando impomos profundidades pré-definidas para esta superfície, ocorre um aumento da probabilidade de ruptura e diminuição do fator de segurança. Dessa forma, em situações em que são comparadas a mesma superfície de ruptura, o aumento da sucção contribui na resistência ao cisalhamento do solo, diferentemente da situação em que são comparadas as superfícies de ruptura em profundidades diferentes, neste caso a sucção contribuiu menos na resistência ao cisalhamento do solo com o aumento da profundidade.

Outra conclusão relevante é que a modelagem 3D proporciona uma representação mais real do talude devido a consideração de várias seções transversais, tornando-a mais fidedigna. Além disso, a modelagem em três dimensões permite ampliar espacialmente a busca da superfície de ruptura crítica, resultando em volumes de massa mobilizada mais pontuais e semelhantes com os que possam vir a acontecer na realidade. Sendo assim, as simulações em 3D, nesta dissertação, apontaram um cenário mais seguro quando comparado com as simulações em 2D.

Quando se analisou a mudança de posição do nível d'água no talude, as condições de estabilidade pouco tiveram influência, sendo que na análise 2D teve-se os mesmos resultados para ambas as posições, ou sejam, nenhuma influência. Esta pouca diferença entre os resultados pode ser justificada em razão da superfície de ruptura crítica não atingir os dois níveis d'água impostos e, também, por ambos os níveis estarem localizados no saprólito, o qual apresenta fraturamento que dificulta a passagem de água para os solos mais superficiais.

Por fim, diante de todo o estudo, conclui-se que o talude rodoviário localizado na BR-116 SP, na Serra Pelada, km 551 + 600 (pista sul), encontra-se estável quanto a sua estabilidade global para ruptura.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando-se pesquisas futuras fundamentadas nos estudos desenvolvidos e apresentados nessa dissertação, sugerem-se os seguintes tópicos sobre o tema:

- Realização de ensaios laboratoriais, em específico ensaios de cisalhamento direto, a fim de refinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo utilizados e realizar análises de estabilidade probabilísticas com parâmetros obtidos diretamente da área estudada;
- Execução de sondagens no talude em estudo com o intuito de melhorar e tornar a estratigrafia do terreno mais próxima da realidade;
- Consideração da precipitação por meio da realização de análises de estabilidade considerando os efeitos de fluxo;
- Utilização do método PEM (Point Element Method) em *software* específico para a realização da previsão de movimento de massa.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, A. M. G. **Simulação geológico-geotécnica para avaliação de estabilidade de taludes a partir de técnicas de geoprocessamento**. 245 f. Tese (Dourado em Geologia Ambiental) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- AGUIAR, M. F. P.; SILVA FILHO, F. C.; ALMEIRA, M. S. S. Análise de Movimentos em Encostas Naturais Através de Monitoramento por Instrumentação – Caso Coroa Grande – RJ. **Revista Tecnologia**, v. 26, n. 1, p. 46-71, jun. 2005.
- ALVES DE LIMA, C. **Avaliação da estabilidade de taludes em áreas de risco de movimento de massa por meio de ensaios de campo na área urbana de Viçosa – MG**. 183 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- ARAÚJO, F. R. de. **Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de taludes da barragem Olho d'Água no estado do Ceará**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11682**: Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 31000**: Gestão de riscos. Rio de Janeiro, 2018.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (1º COBRAE), Anais, ABMS/ABGE, v. 2, p. 721-733, Rio de Janeiro, 1992.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de taludes. In: Oliveira, A.M.S., Brito, S.N.A. Geologia de Engenharia, ed. 1, p. 15-38, São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- AUTOPISTA RÉGIS BITTENCOURT (APRB). **Gestão da segurança dos taludes rodoviários da rodovia régis bittencourt, trecho da serra do mar PR-SP**: estudos probabilísticos e monitoramento geológico-geotécnico para mensuração de riscos através de critérios econômicos. Relatório Final de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico, Curitiba, 2019.
- BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Amsterdam: Elsevier Science, 1989.
- BATISTA, E. F. **Metodologias de mensuração econômica e avaliação da vulnerabilidade com aplicação em trechos da rodovia Régis Bittencourt, São Paulo-SP**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2019.

BENDA, L. E.; CUNDY, T. W. *Predicting deposition of debris flows in mountain channels*. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, p. 409–417, 1990.

BENTLEY SYSTEMS TEAM. SVOFFICE 5 Help Manual – 5/15/2019. Saskatoon – Canadá: SoilVision Systems Ltd, 2019, 1636 p.

BOTERO, E. M.; CARVAJAL, H. E. M.; ARISTIZÁBAL, E. F. G. Aplicação de métodos probabilísticos na previsão espacial de escorregamentos deflagrados por chuvas – estudo de caso: Pajarito, Medellín, Colômbia. *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, p. 2876–2883, IOS Press, 2015.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília, 2007

CERCEAU DA SILVA, C. **Análise de estabilidade de um talude cava de Alegria utilizando abordagem probabilística**. 136 f. Dissertação (Mestrado de Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), 2015.

CHA, K. S.; KIM, T. H. *Evaluation of slope stability with topography and slope stability analysis method*. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 15, n. 2, p. 251-256, 2011.

CHRISTIAN, J. T.; LADD, C. C.; BAECHER, G. B. *Reliability applied to slope stability analysis*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, p. 2180-2207, 1994.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Geologia e Recursos Minerais da Folha Eldorado Paulista, escala 1:100.000. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/pgb/mapa_eldorado_paulista.pdf>. Acesso em: 09 de out. 2020.

CONTERATO, L. **Uso do programa RAMMS na modelagem de corridas de detritos e previsão de áreas atingidas** – estudo de caso de Quitite-Papagaio. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

COSTA, E. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes**. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

COUSSOT, P.; PIAU, J. M. *A large-scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions*. **Journal Rheology**, n. 39, 1994.

COUSSOT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct determination of rheological characteristics of debris flow*. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 124, n. 8, 1998.

CROZIER, M. J.; GLADE T. *Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach*. In: GLADE, T., ANDERSON, M., CROZIER, M. J., (Ed.). **Landslide Hazard and Risk**. England, John Wiley & Sons Ltd, 2012. ISBN. 0471486639, 2004.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. *Landslides: investigation and mitigation*. Chapter 3 – Landslide types and processes. In: Transportation research board special report, n. 247, 1996

DAS, B. M. *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. 6 ed. Thonson – United States, 2007.

DELL'AVANZI, E.; SAYÃO, A. S. F. J. Avaliação da probabilidade de ruptura de taludes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), Anais, v. 2, p. 1289-1295, Brasília, 1998.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

ECKS, J. **Aplicação da teoria do equilíbrio-limite na análise de estabilidade de taludes: estudo de caso**. 70 f. Monografia de graduação (Bacharel em Geologia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ESTARQUE, M. Política de prevenção de desastres naturais definha no país. **Instituto Igarapé**, 2018. Disponível em: <<https://igarape.org.br/politica-de-prevencao-de-desastres-naturais-definha-no-pais/>>. Acesso em: 09 de dez. de 2019.

ESTUDO da CNM mostrado no Bom Dia Brasil aponta R\$ 250 bilhões de gastos com desastres. **Agência CNM de Notícias**, São Paulo, 04 de out. de 2018. Disponível em: < <https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/estudo-da-cnm-mostrado-no-bom-dia-brasil-aponta-r-250-bilhoes-de-gastos-com-desastres>>. Acesso em: 17 de set. de 2020.

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

FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; VIEIRA, B. C. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2ª. ed. Editora UFPR: Curitiba, 604 p, 2009.

FREDLUND, D. G. *Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction*. In: Anderson, M.G.; Richards, K.S. (eds). Slope Stability. John Wiley & Sons, p. 113-144, 1987.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, Inc. Canadá, 1993.

FREITAS, M. A. C. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia**. 146 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.

FUNDO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (FEHIDRO). **Elaboração do Plano de Bacias da UGRHI 11** – Relatório II. Projeto FEHIDRO 2014 – RB – 278, 2018.

GALINDO, M. S. V. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Determinação da Viscosidade de Solos**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos – SP, 2016.

GIRÃO, I. R. F.; RABELO, D. R.; ZANELLA, M. E. Análise teórica dos conceitos: Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Susceptibilidade. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 71-83, 23 mai. 2018.

GOMES, R. A. T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir de combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa**. 180 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GONZÁLEZ, A. A. M.; PASSINI, L. B.; BOSZCZOWSKI, R. B.; KORMANN, A. C. M.; FIORI, A. P. *Geological - geotechnical characterization of slopes belonging to the Serra do Mar Paranaense, Brazil*. **Soil and Rocks**, São Paulo, v. 42, n. 2, p.139-154, mai./ago. 2019.

GRANDO, A.; CORDEIRO, R. F.; TEIXEIRA, V. H.; REGINATTI, G. M. P.; SANTOS, G. I. T.; MACCARINI, M. Análise geológica e geotécnica da instabilidade de um talude. Estudo de caso da BR-476/PR. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE SOLO E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 9., set. 2014, Goiânia.

GUIDICINI, G.; NIEBLE C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Editora Blucher, 1984.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: mecânica**. Vol. 1, 9 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2012.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

IVERSON, R. M. *The physics of debris flows*. **Geophysics**, n. 35, p. 245-296, 1997.

JOLY, N. H. **Análise do efeito das chuvas no desenvolvimento das porpressões: estudo de caso para um talude contido na Serra do Mar**. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2018.

JULIÃO, R. P. NERY, F.; RIBEIRO, J. L.; BRANCO, M. C.; ZÊZERE, J. L. **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal**. Portugal: Autoridade Nacional de Proteção Civil, 93 p, 2009.

KRAHN, J. ***Stability modeling with SLOPE/W: an engineering methodology***. Canada: GEO-SLOPE International Ltd, 2003.

LEMAIRE, M.; CHATEAUNEUF, A.; MITTEAU, J. C. Fiabilité des structures: Couplage mécano-fiabiliste statique. In: **European Journal of Computational Mechanics**, vol. 15, n. 7-8, p. 989-992, 2005.

LOSCHI, M. Desastres naturais: 59,4% dos municípios não têm plano de gestão de riscos. **IBGE**, 2018. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/21633-desastres-naturais-59-4-dos-municipios-nao-tem-plano-de-gestao-de-riscos>>. Acesso em: 09 de dez. de 2019.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método de papel filtro. In: **X Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, p. 515-522, 1994.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MONTOYA, C. A. H. **Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas**. 273 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MORAIS DE MELO, D. F. **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. 277 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MORLES, M. S. **Modelación de flujos de derrubios empleando el método SPH: aplicación a casos reales**. 505 f. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.

NETTO, J. M. de A. FERNANDEZ, M. F. y; ARAUJO, R. de.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2012.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. *Laboratory analysis of mudflow properties*. **Journal of hydraulic engineering**, vol. 114, n. 8, p. 877-887, 1988.

OLIVEIRA, L. C. D. **Análise quantitativa de risco de movimentos de massa com emprego de estatística bayesiana**. 509 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PELIZONI, A. B. **Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PEREIRA, T. S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra.** 78 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2013.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** 187 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2001.

RIBEIRO, R. C. H. **Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas.** 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

RICKENMANN, D. *Empirical relationships for debris flows.* **Natural Hazards**, n. 19, p. 47-77, 1999.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar.** 3 ed. do Autor. Juiz de Fora, MG, 2007.

SILVA, M. **Caracterização geológico-geotécnica e análise de estabilidade de uma encosta na BR-376 – Serra do Mar Paranaense.** 145 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

SILVEIRA, R. M. **Propriedades geotécnicas dos solos coluvionares do gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul (SC).** 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros.** Vol 1, 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2009.

TOMINAGA, L. K. FERREIRA; C. J.; VEDOVELLO, R. TAVARES, R. SANTORO, J.; SOUZA, C. R. de G. Cartas de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo: conceitos e técnicas. In: 5º SEMINÁRIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E AMBIENTAL, São Carlos, 2004.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense.** 147 f. Dissertação (Mestrado de Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2009.

TORRES FILHO, R. J. de A.; ANDRADE, V. C. de. **Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso.** 83 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

TREVIZOLLI, M. N. B. **Proposta de modelo para avaliação de risco de deslizamentos baseado em cenários de eventos pluviométricos: aplicação em um talude da Serra do Mar no trecho PR/SP.** 197 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). ***Risk-based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies***. ETL 1110-2-556. Washington, 1999.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). ***Slope stability***. EM 1110-2-1902. Washington, 2003.

VARNES, D. J. *Slope movement types and processes*. Landslides, Analysis and Control. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Ed.). **Transportation Research Board – Commission on Sociotechnical Systems – National Research Council**, National Academy of Sciences, Washington, USA, p. 11-33, 1978.

VARNES, D. J.; INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY; COMMISSION ON LANDSLIDES AND OTHER MASS MOVEMENTS ON SLOPES. *Landslides hazard zonation: a review of the principles and practice*. **Natural Hazards Series**. Paris: UNESCO, n. 3, 63 f., 1984.

VIVIAN, J. B. **Utilização do método do papel filtro para a determinação das curvas características de um solo coluvionar não saturado contaminado com óleo diesel**. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WHIPPLE, K. X. *Open-channel flow of Bingham fluids: applications in debris-flow research*. **The Journal of Geology**, v. 105, p. 243-262, 1997.

WHITMAN, R. V. *Evaluating calculated risk in geotechnical engineering*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 110, n. 2, 18569, feb. 1984.

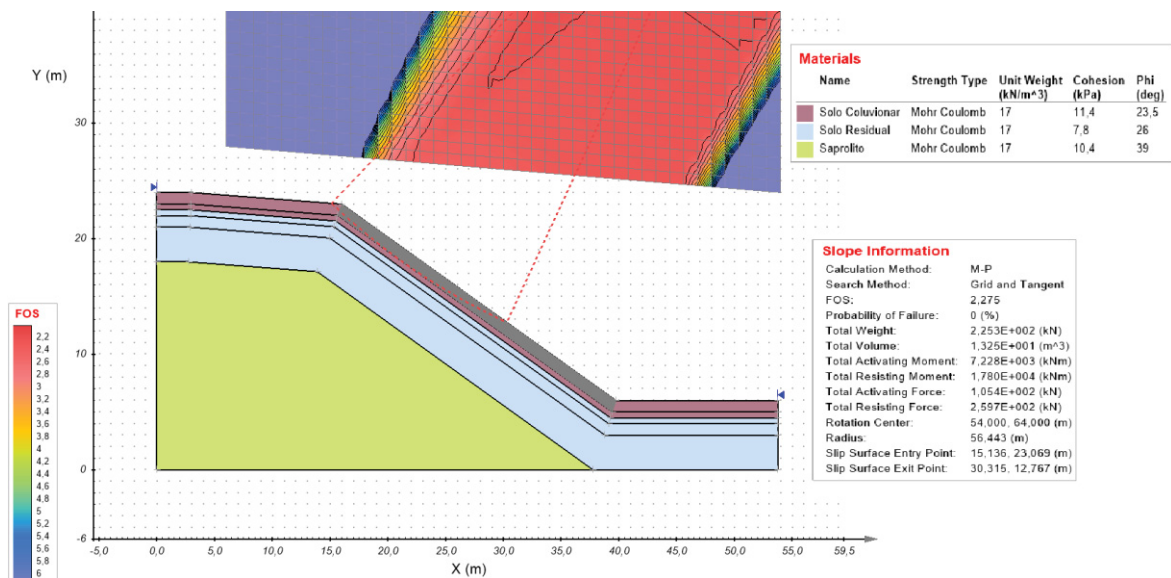
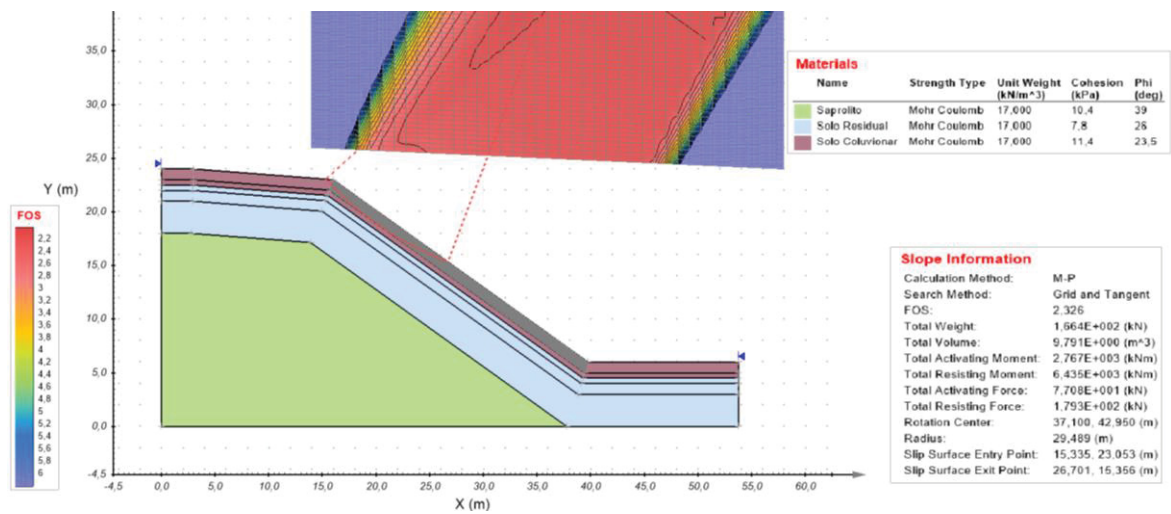
WOOD, J. ***The geomorphological characterisation of digital elevation models***. 185 f. Tese (PhD) – Departamento de Geografia, Universidade de Leicester, UK, 1996.

ZNAMENSKY, D. **Corridas de detritos ou “debris flows”**: avaliação de parâmetros. D105, p. 243-262, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

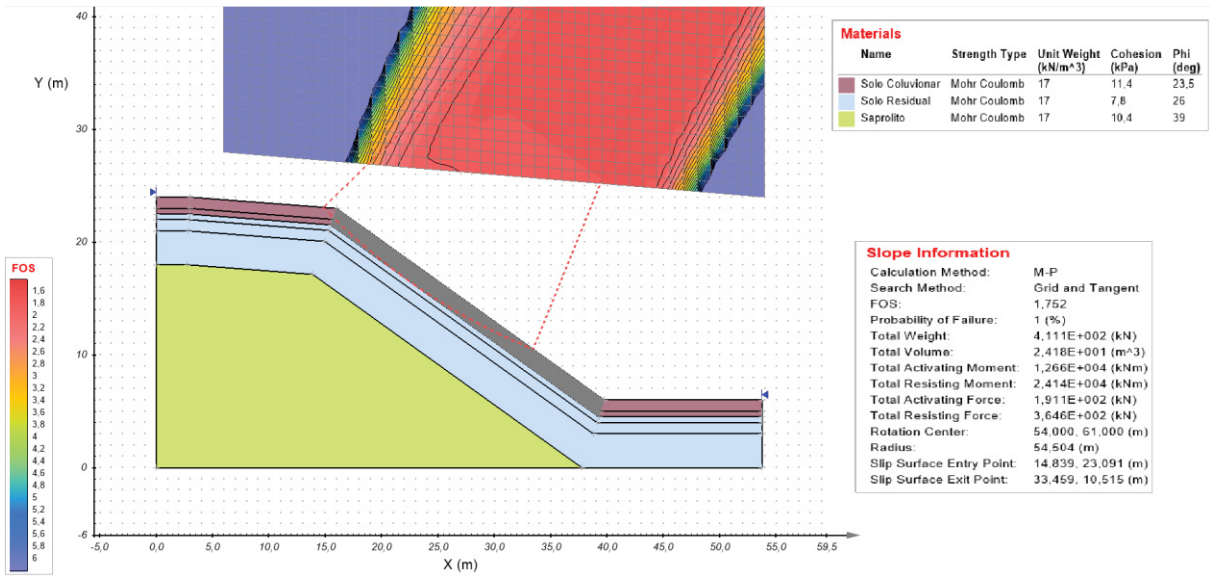
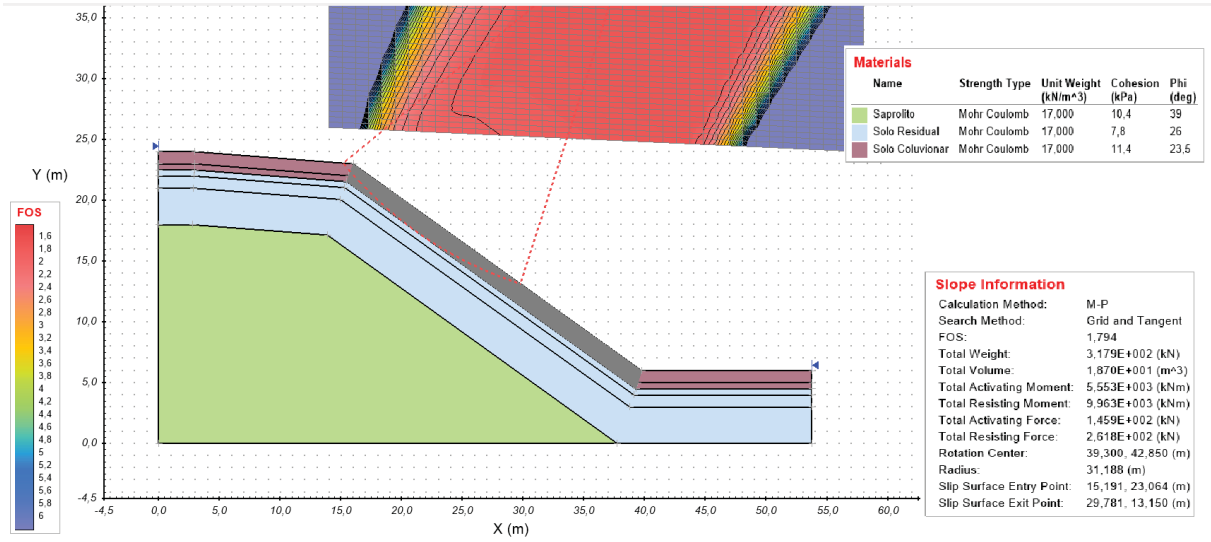
APÊNDICE 1 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA EM PROFUNDIDADES PRÉ-DEFINIDAS NO SVSLOPE

Este apêndice apresenta as imagens obtidas no *software* SVSlope que contêm os resultados obtidos com as abordagens determinística e probabilística, respectivamente, nas profundidades indicadas.

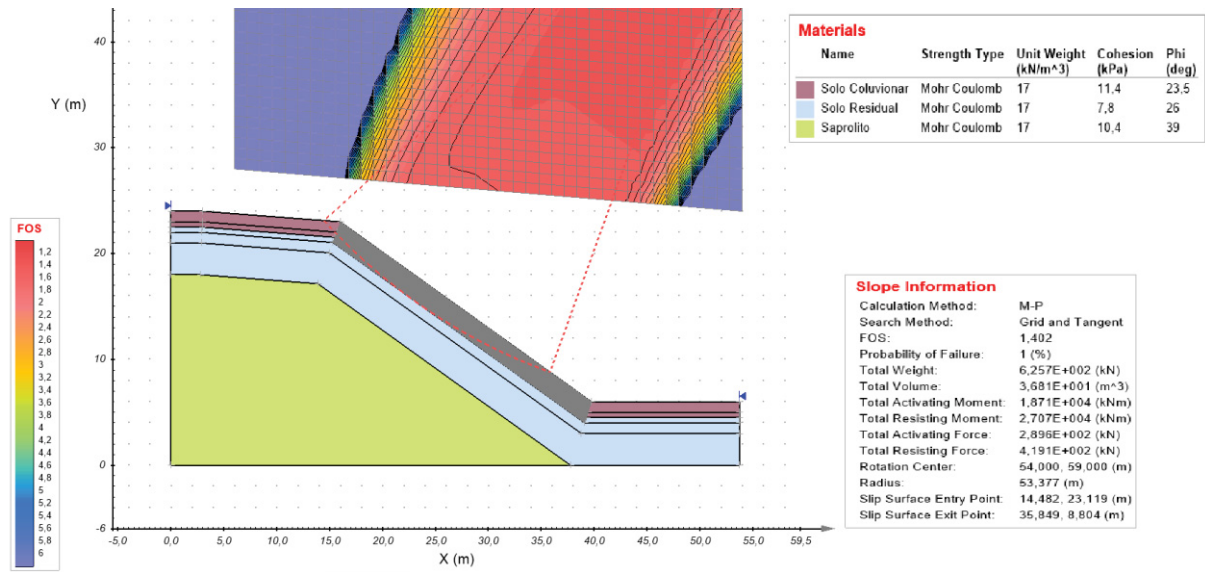
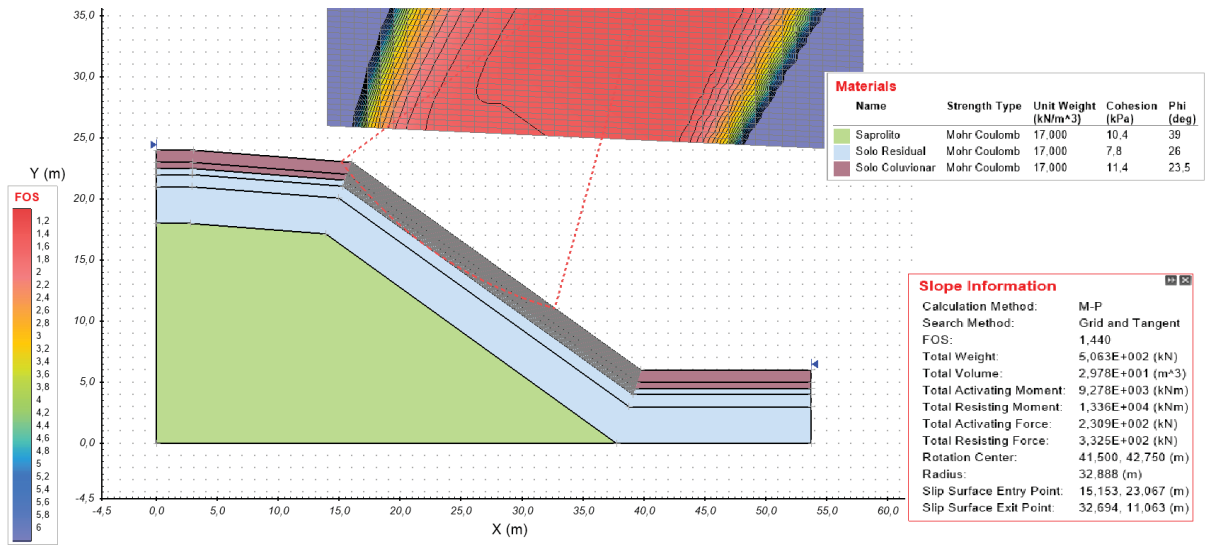
- 1,0 METRO DE PROFUNDIDADE



• 1,5 METROS DE PROFUNDIDADE



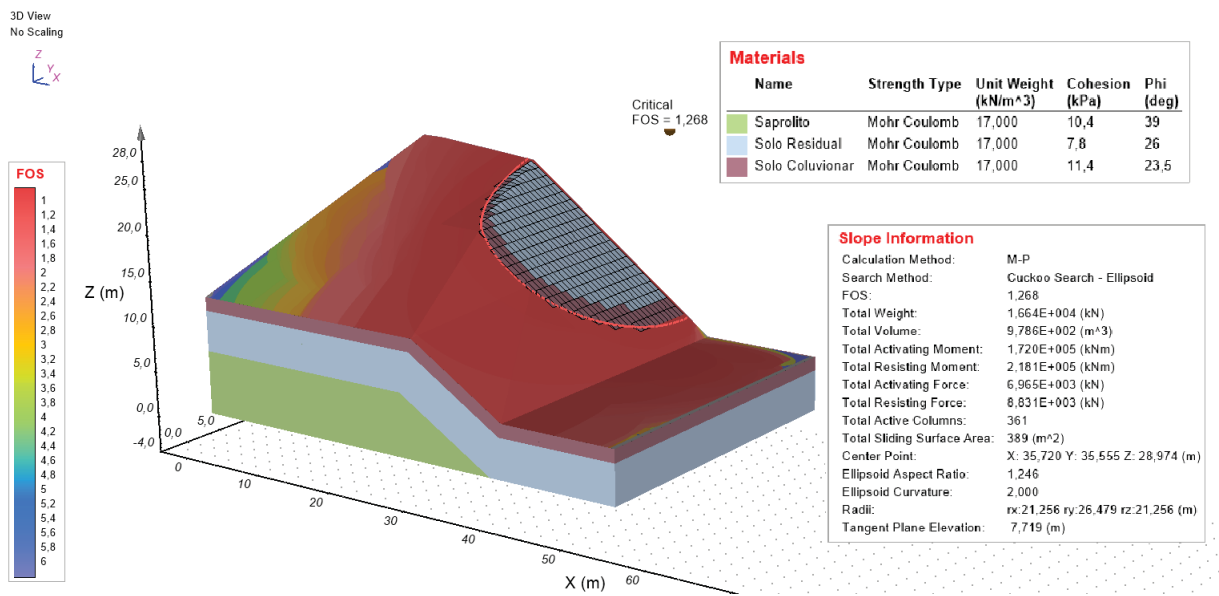
• 2,0 METROS DE PROFUNDIDADE



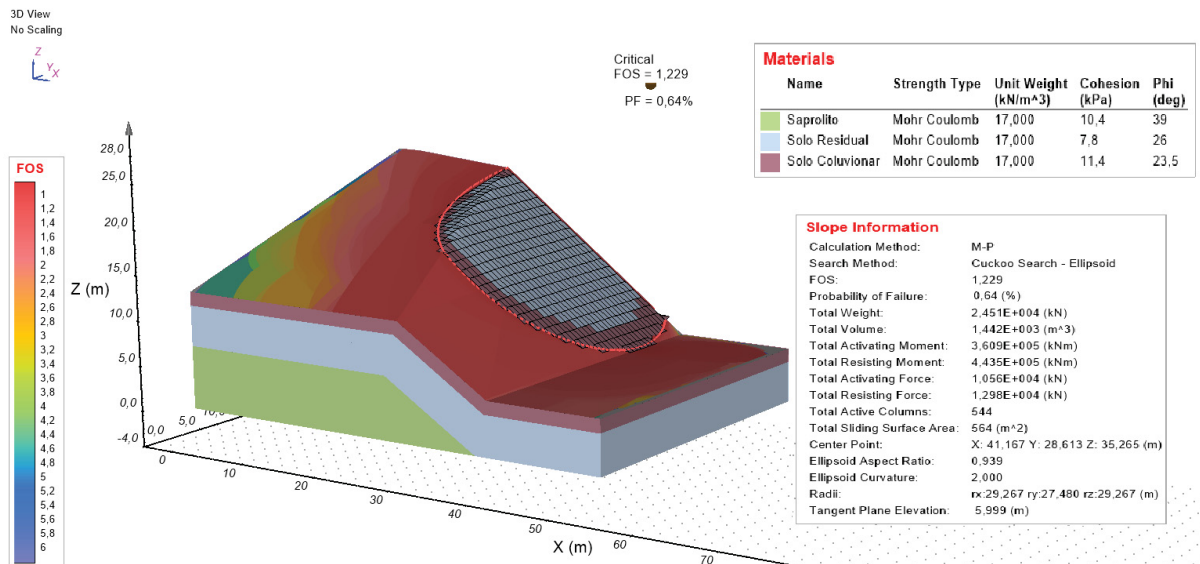
APÊNDICE 2 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA

Este apêndice apresenta as imagens obtidas no *software* SVSlope que contêm os resultados obtidos com as abordagens determinística e probabilística 3D, respectivamente, na superfície de ruptura crítica.

- DETERMINÍSTICO

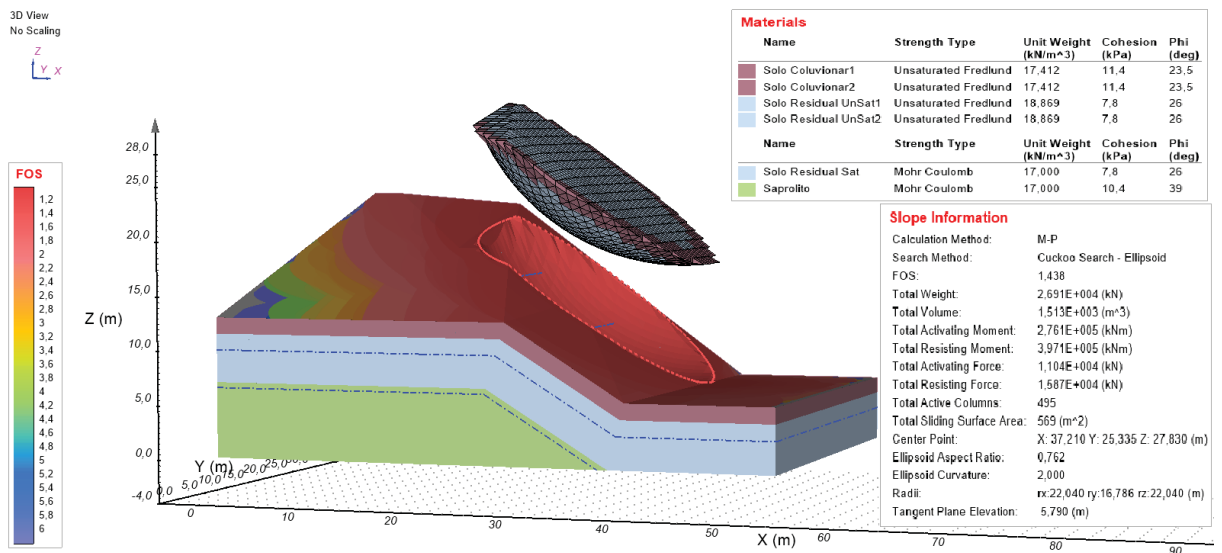
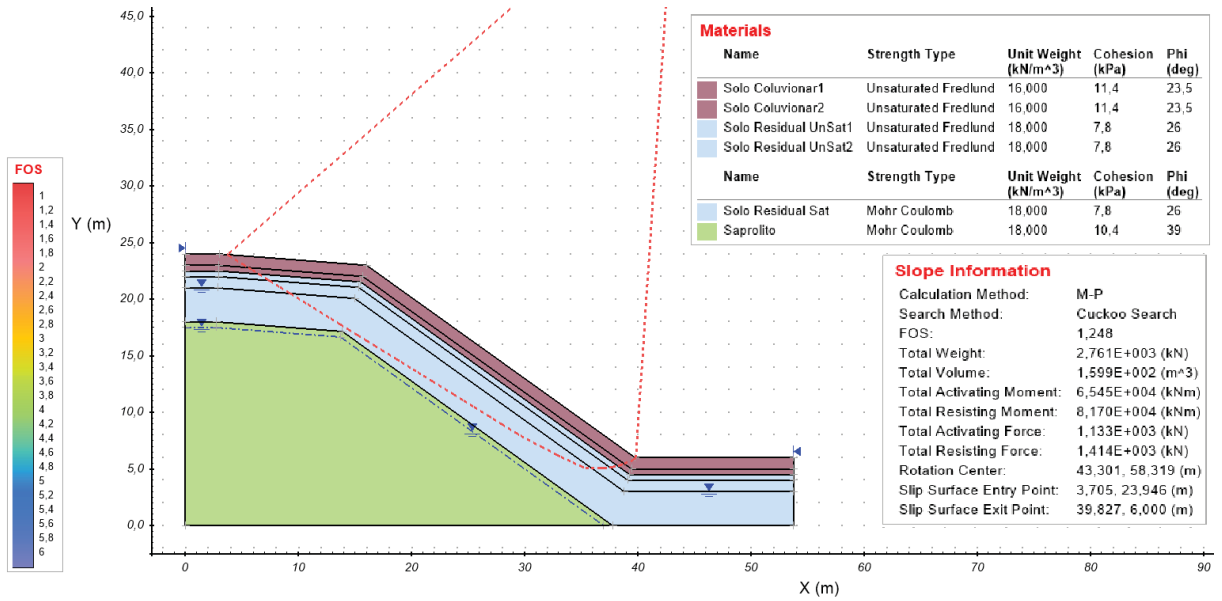


- PROBABILÍSTICO

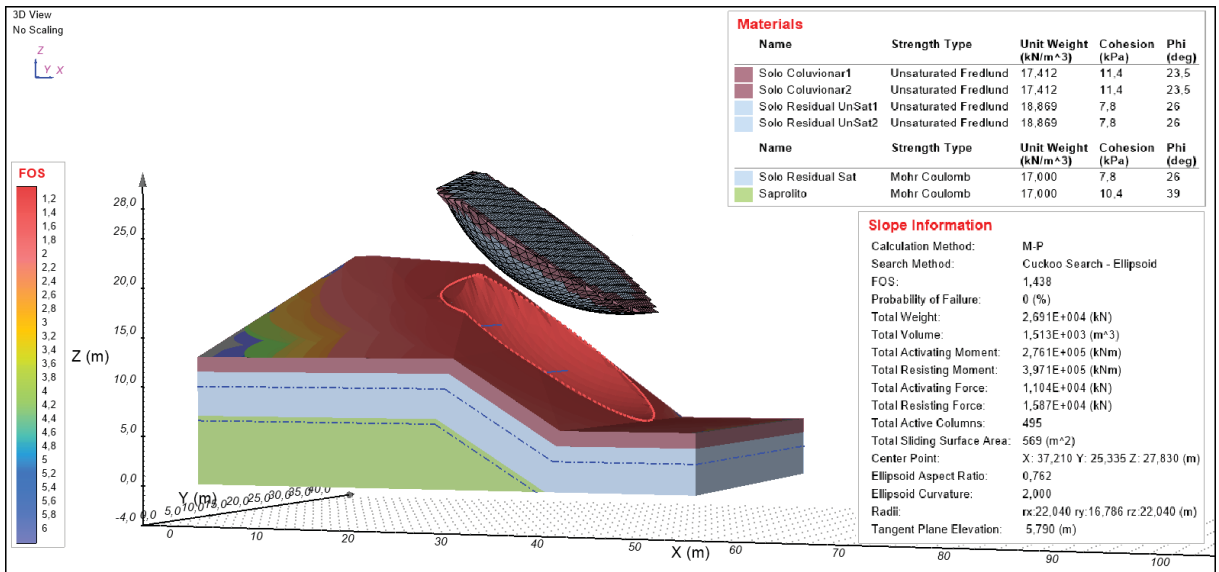
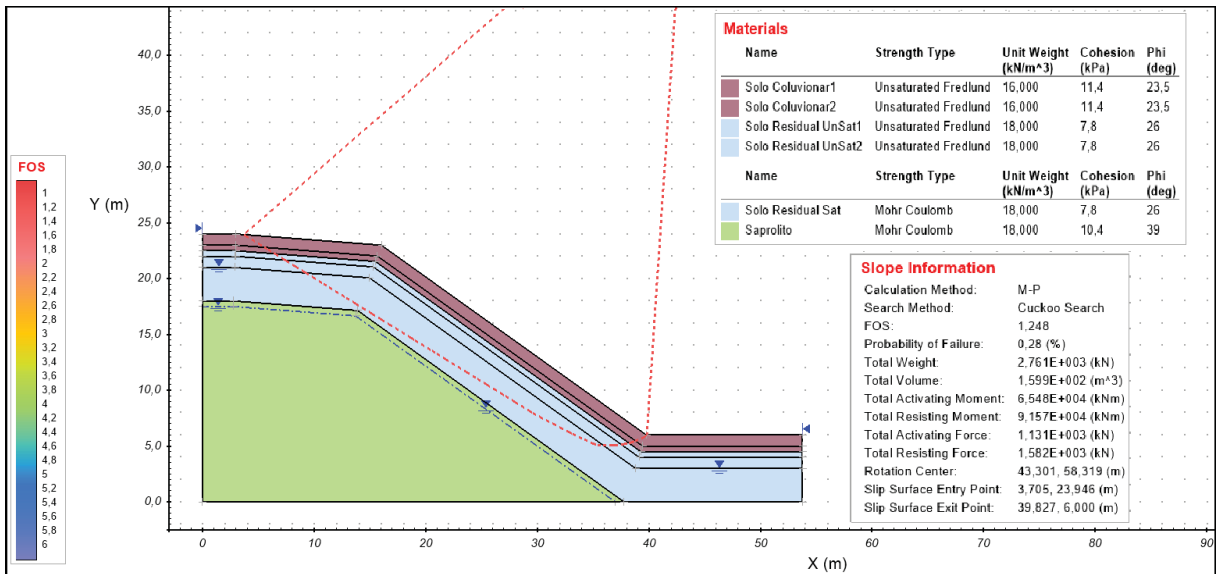


APÊNDICE 3 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA NA PROFUNDIDADE DE NÍVEL D'ÁGUA DE 6,5 METROS

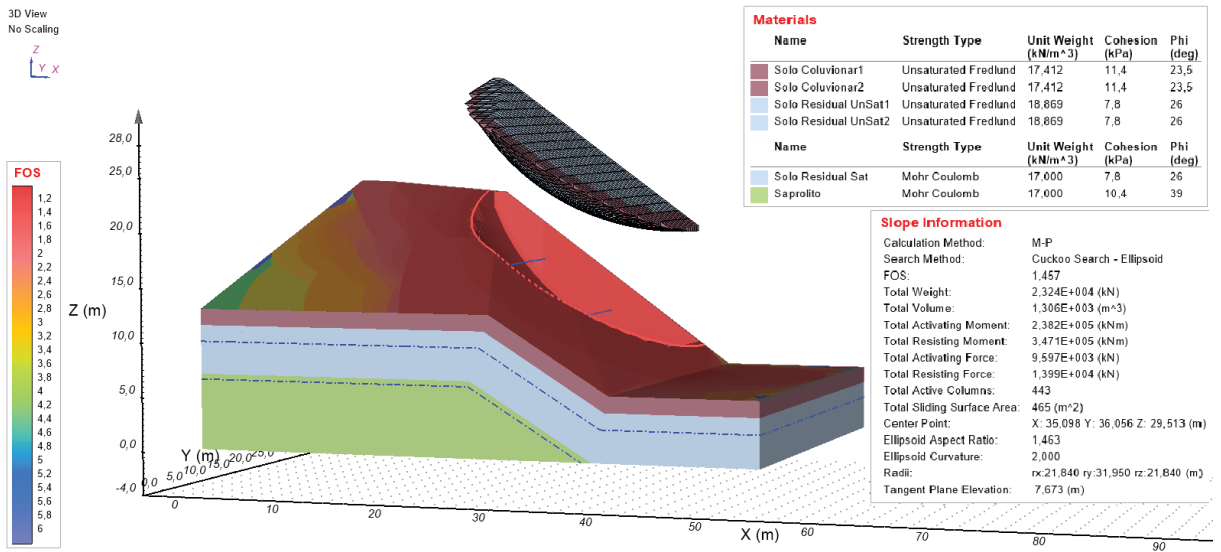
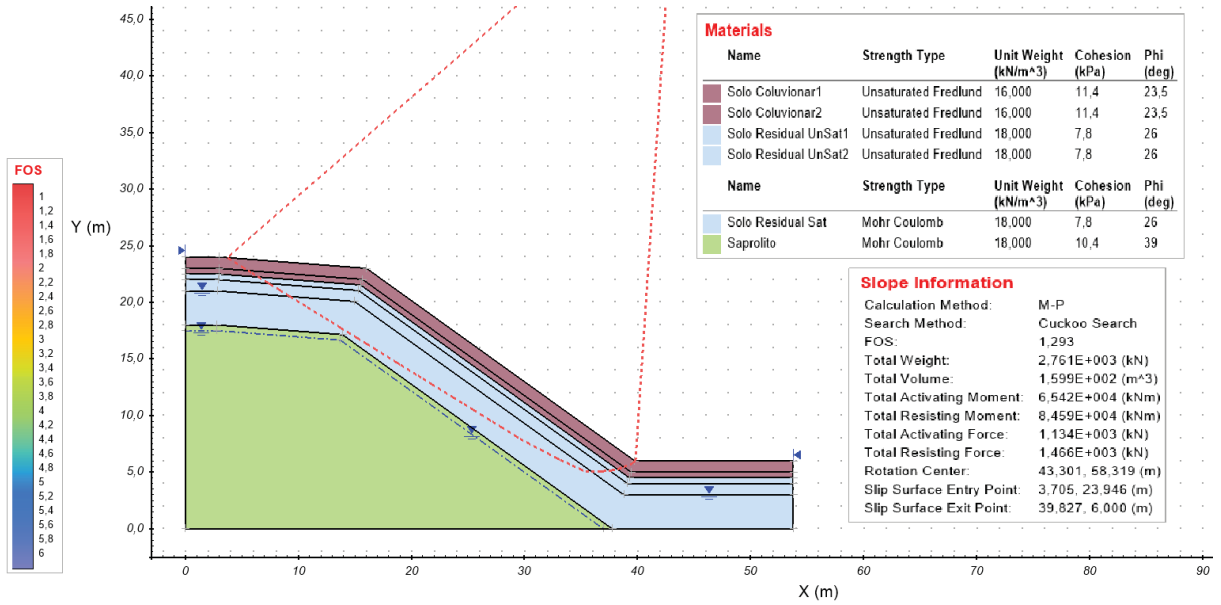
- 20 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



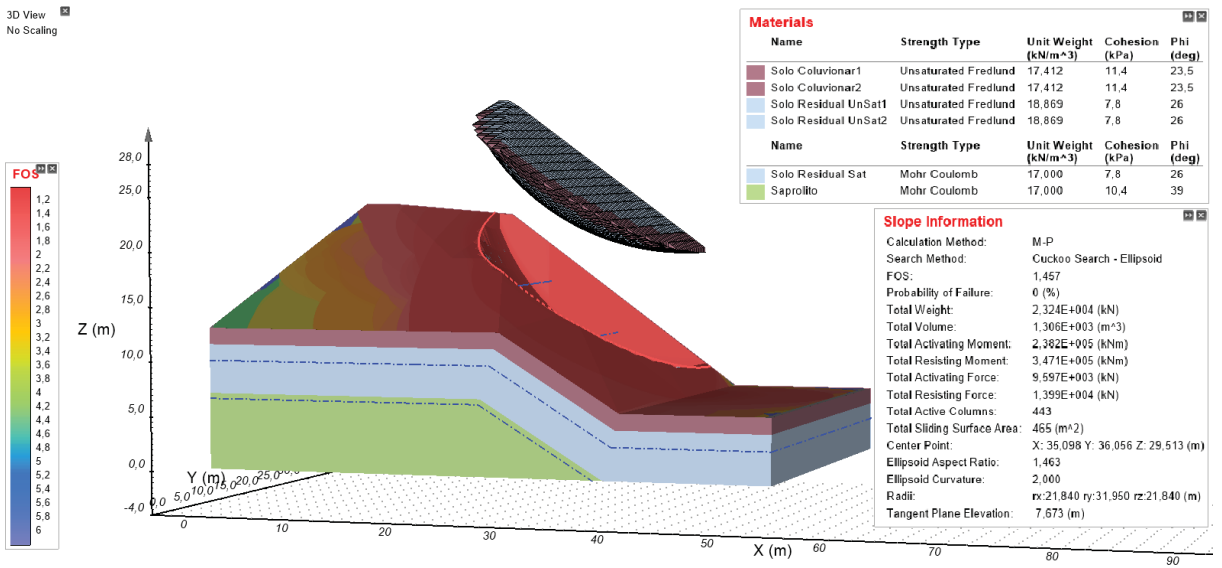
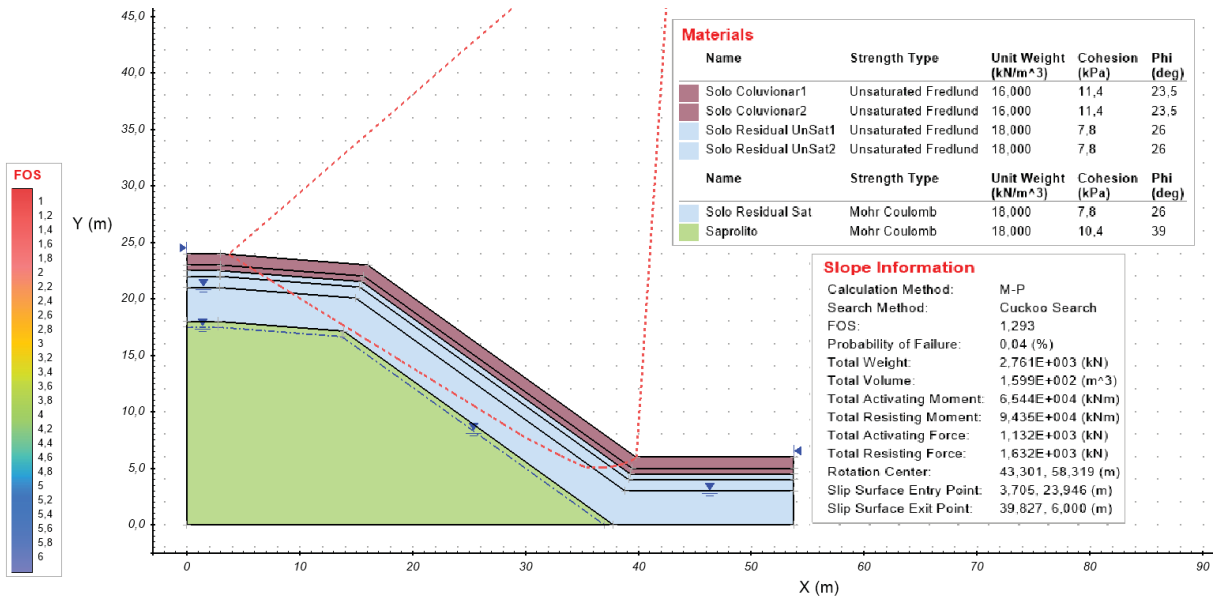
➤ Probabilístico



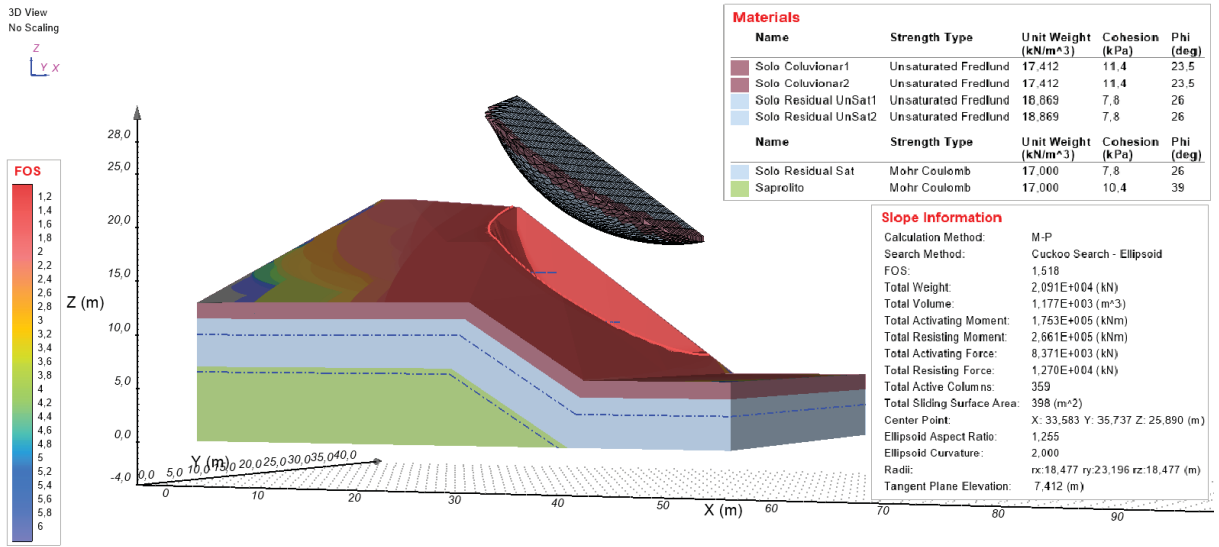
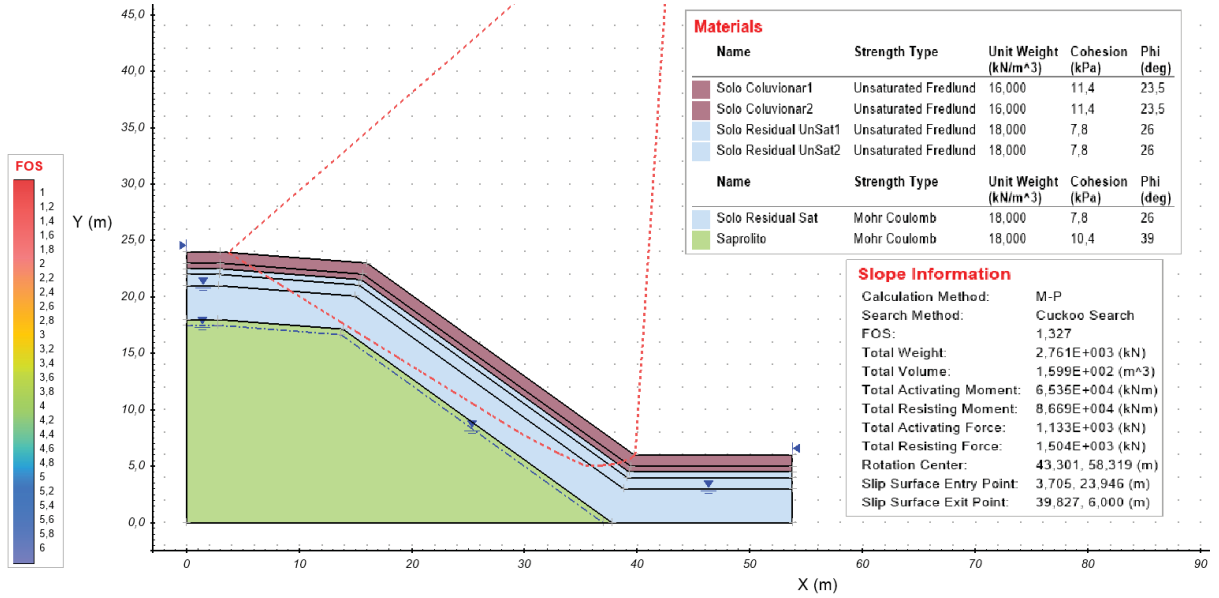
- 40 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



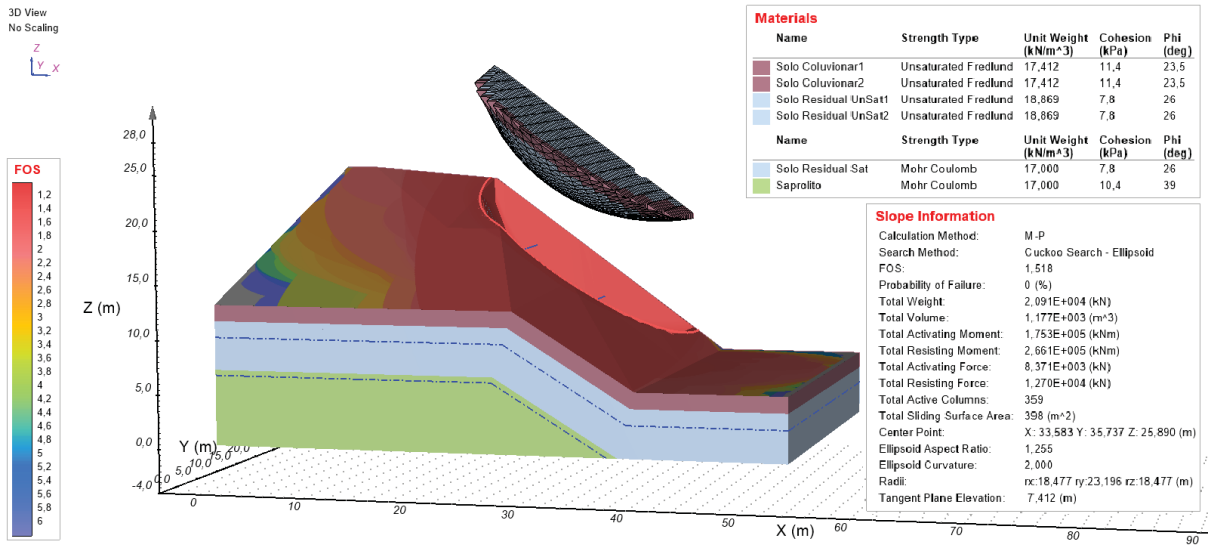
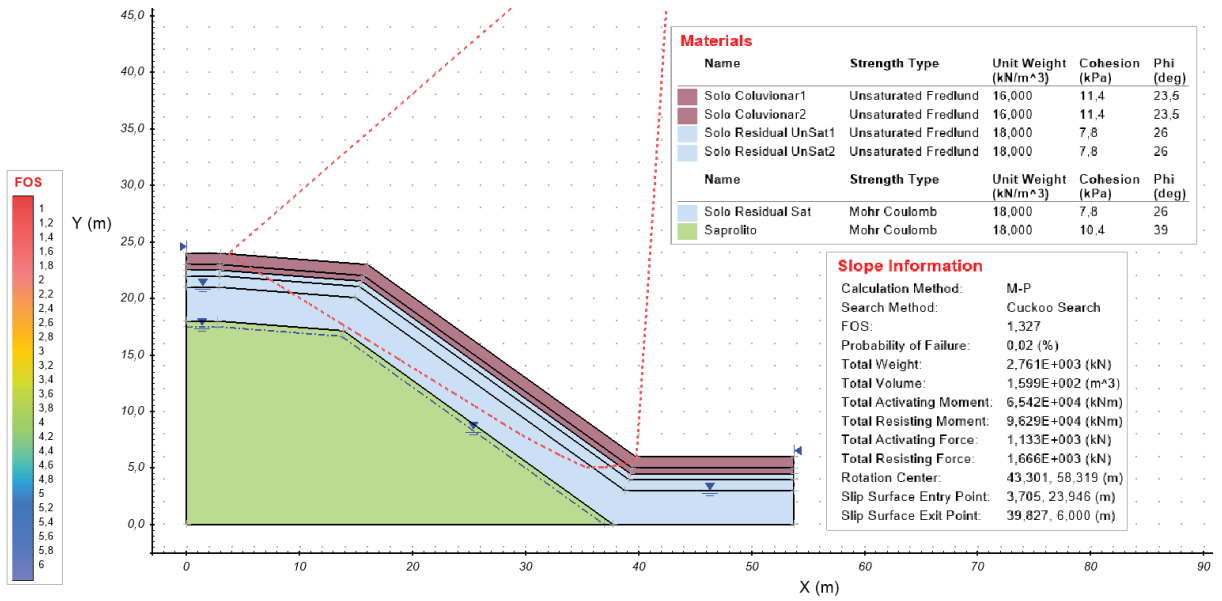
➤ Probabilístico



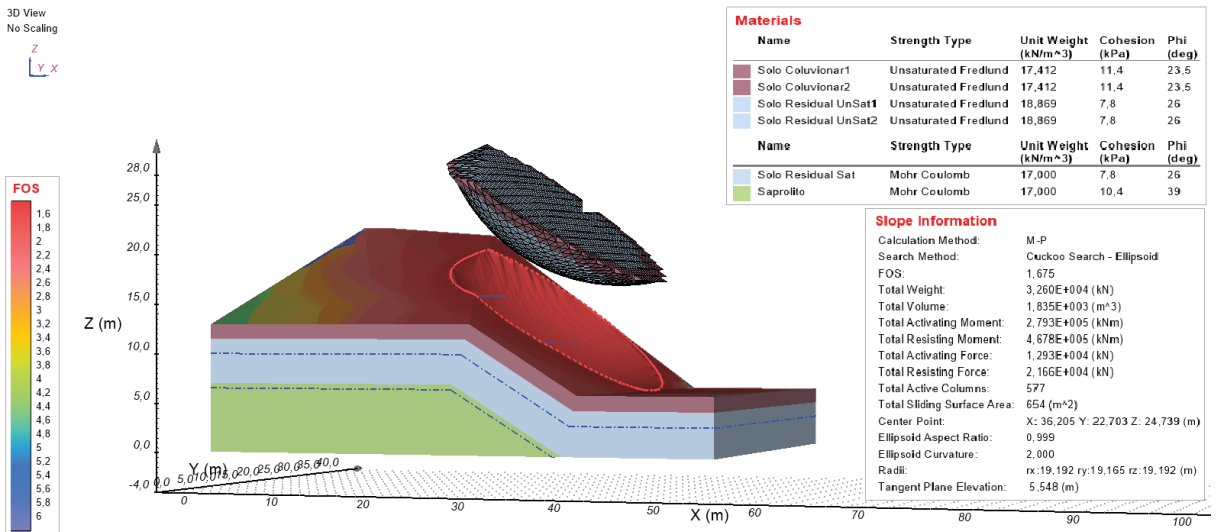
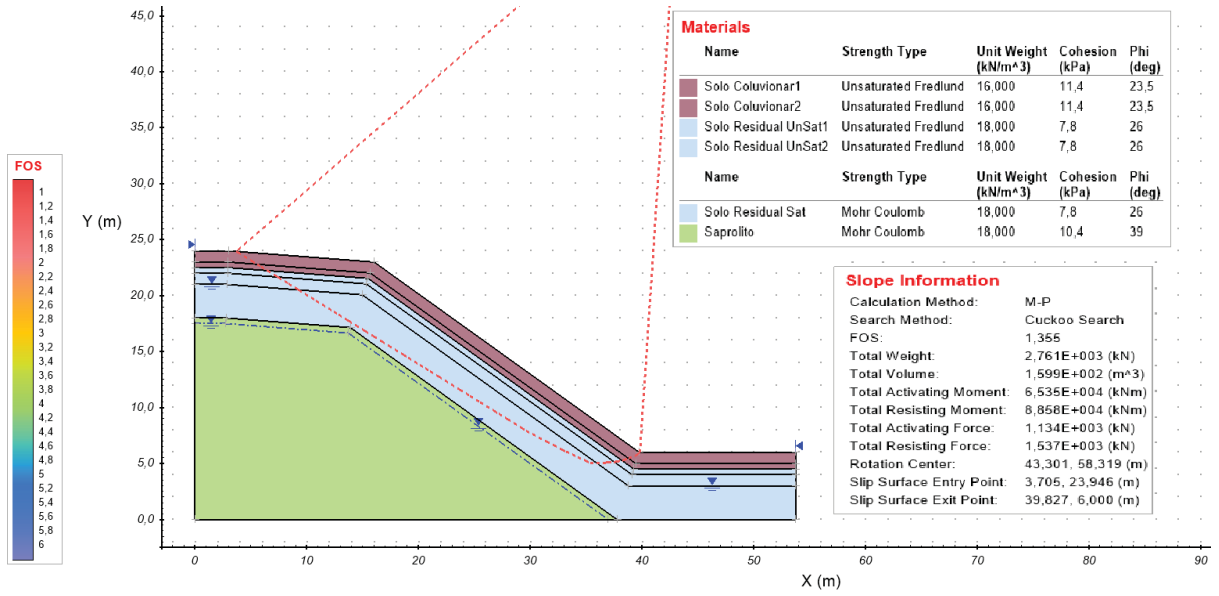
- 60 kPa DE SUCCÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



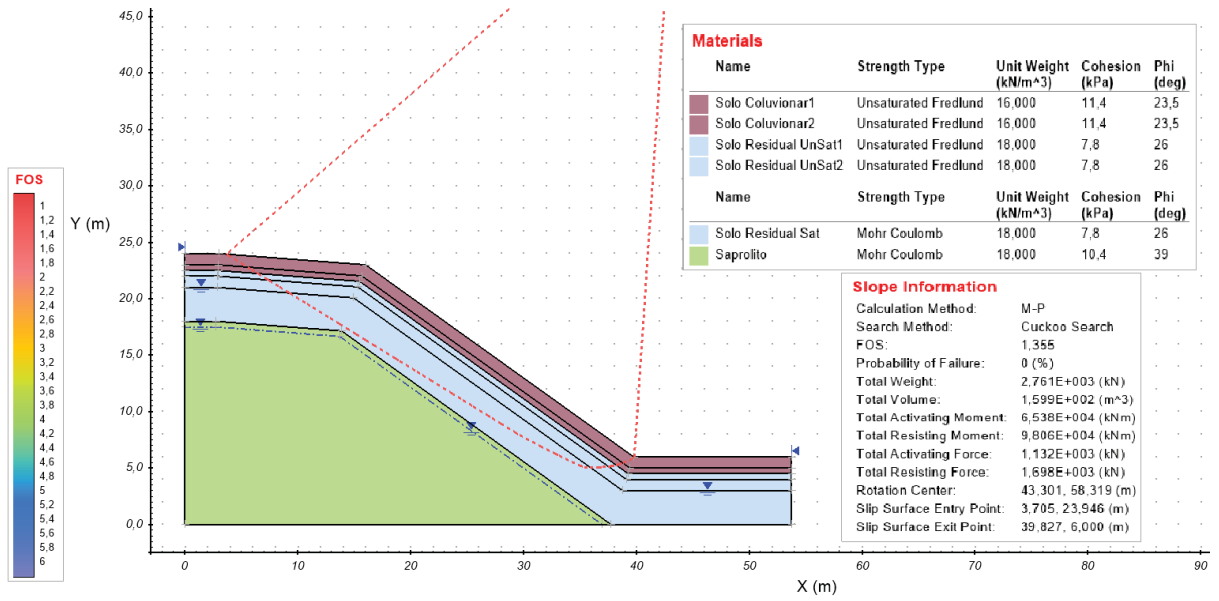
➤ Probabilístico



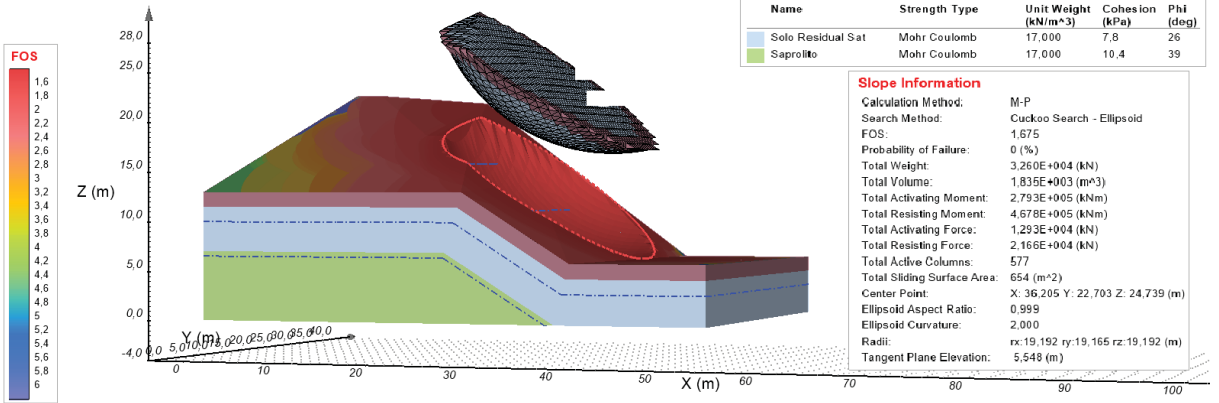
- 80 kPa DE SUCCÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



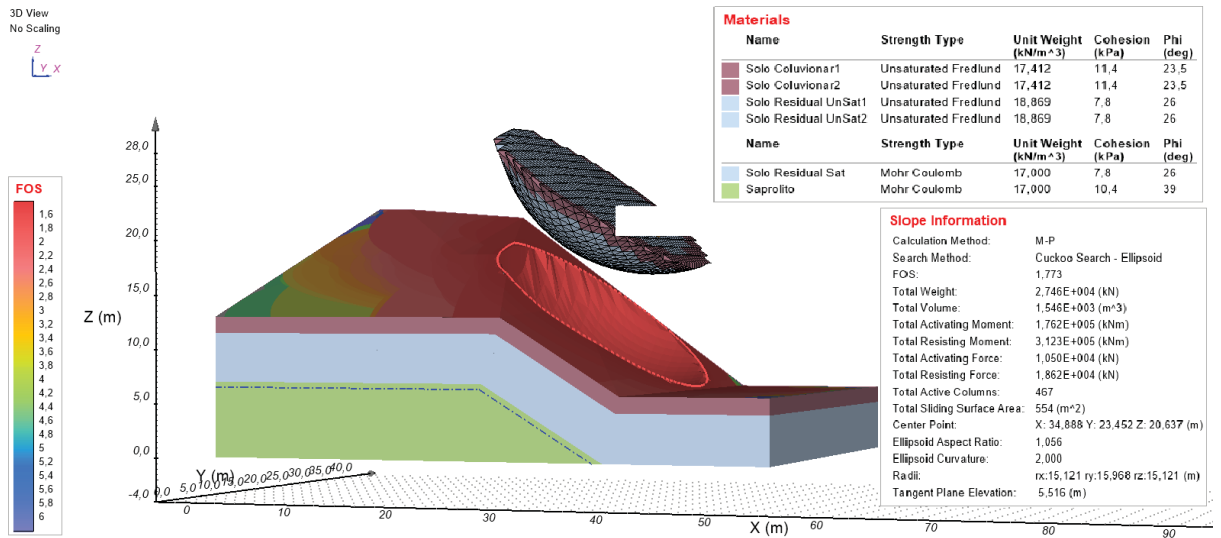
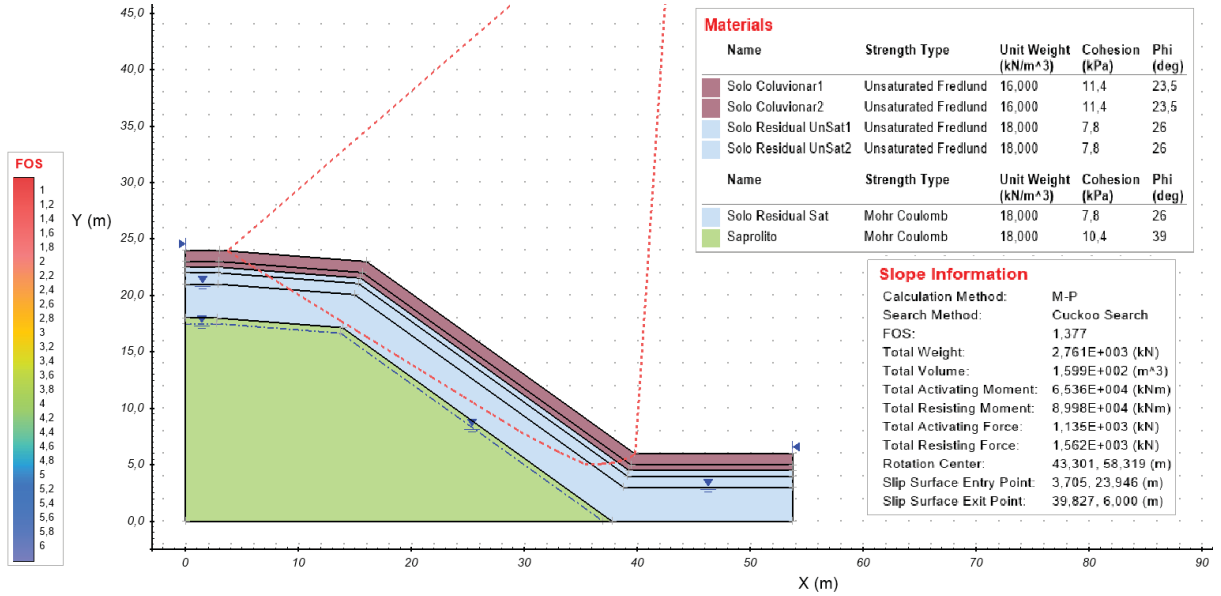
➤ Probabilístico



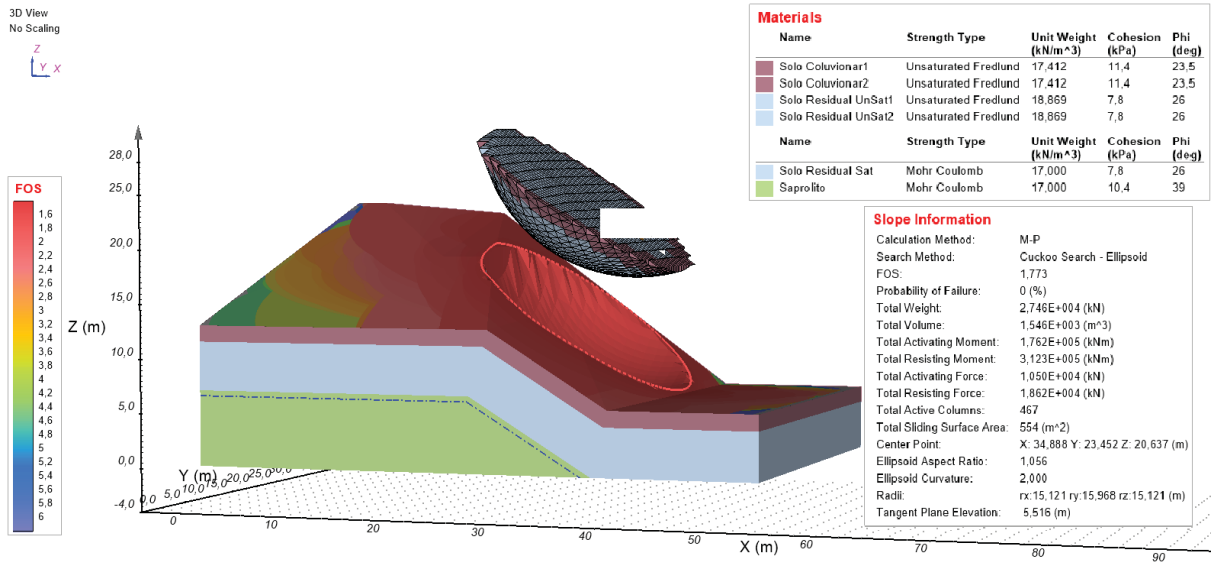
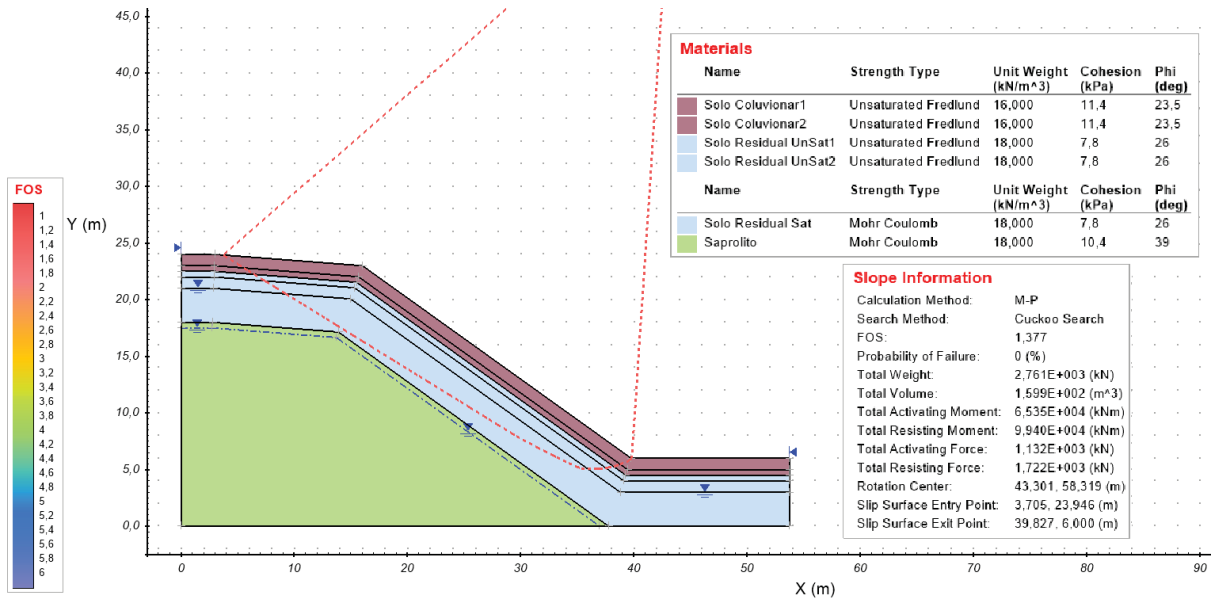
3D View
No Scaling



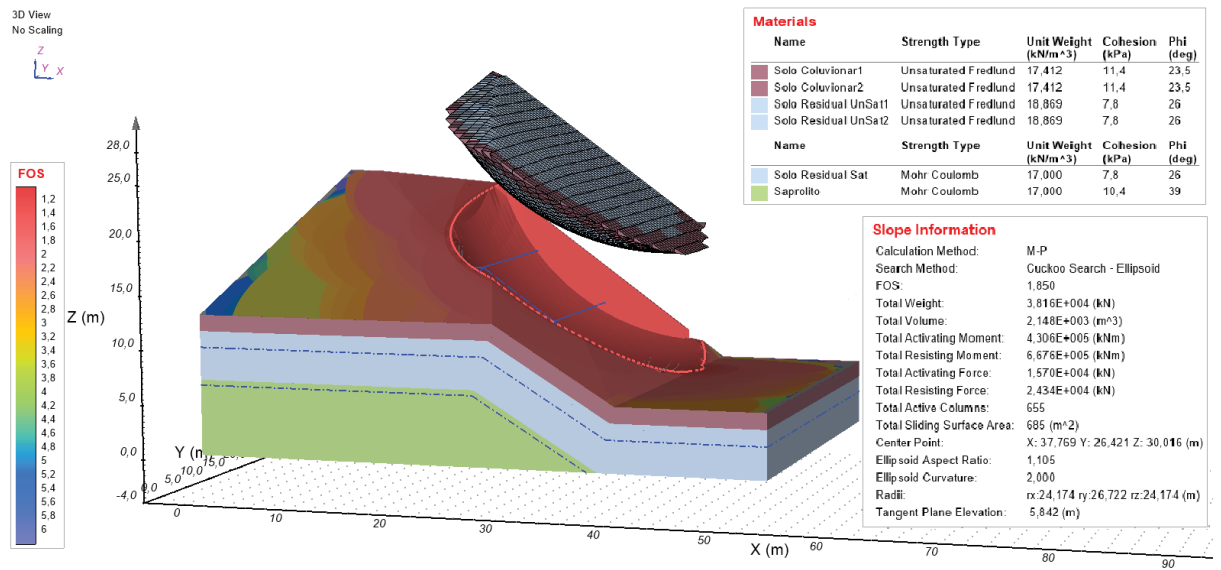
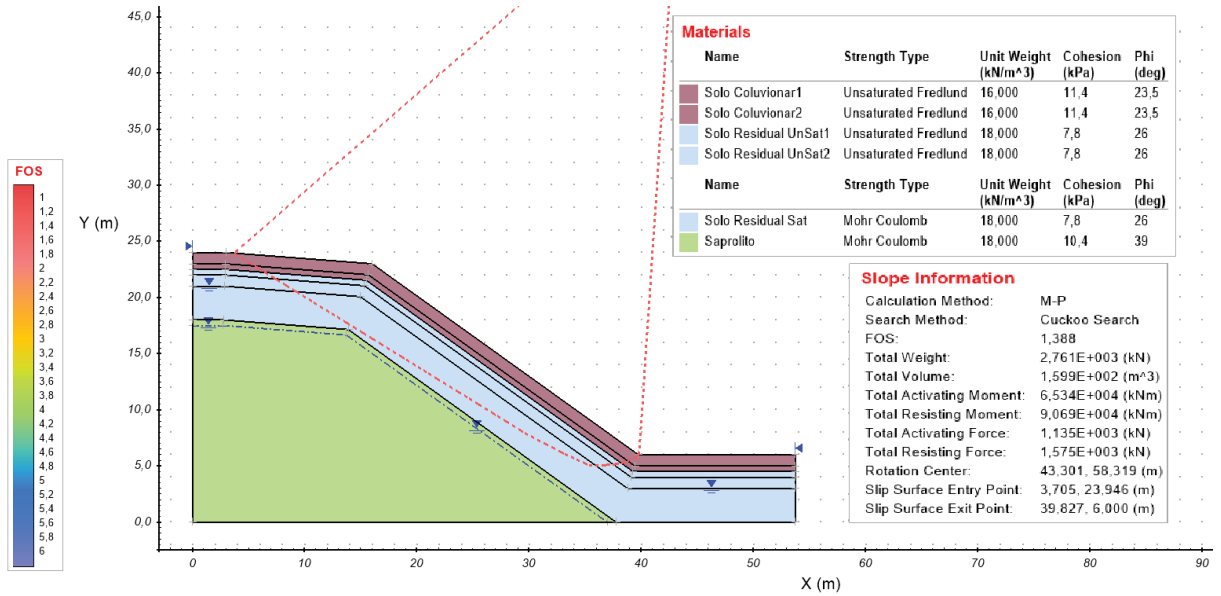
- 100 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



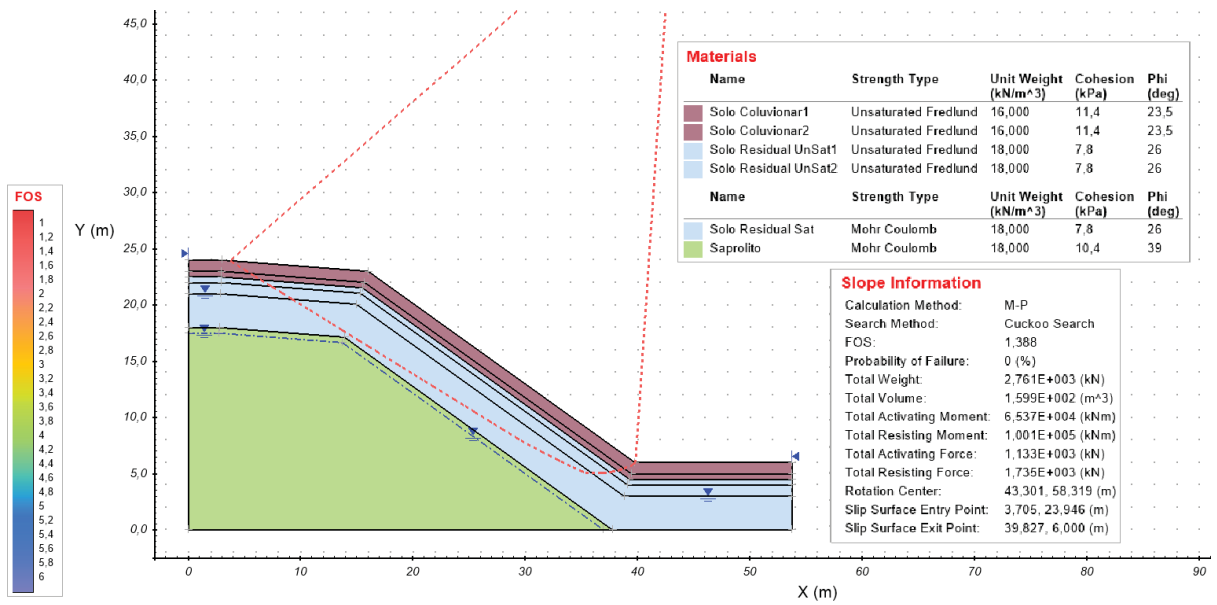
➤ Probabilístico



- 120 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico

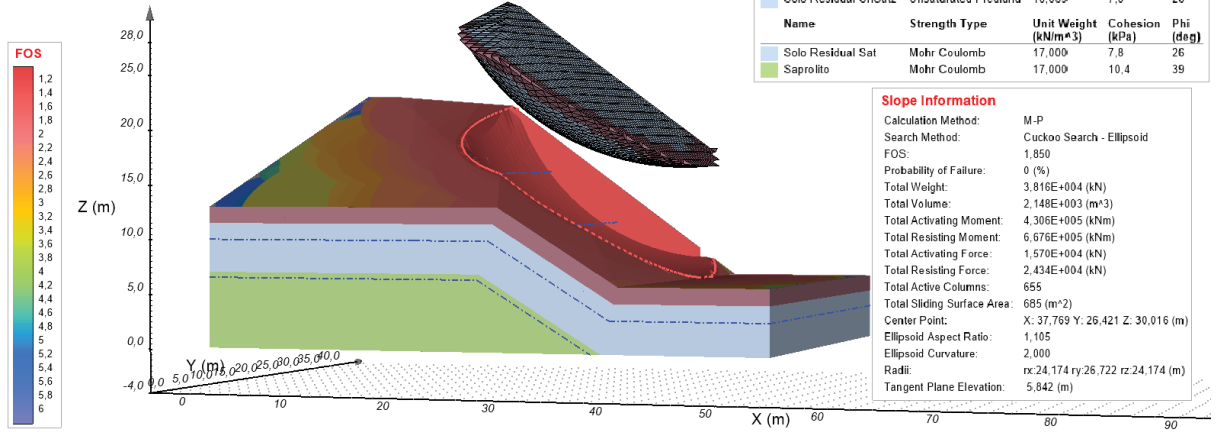


➤ Probabilístico



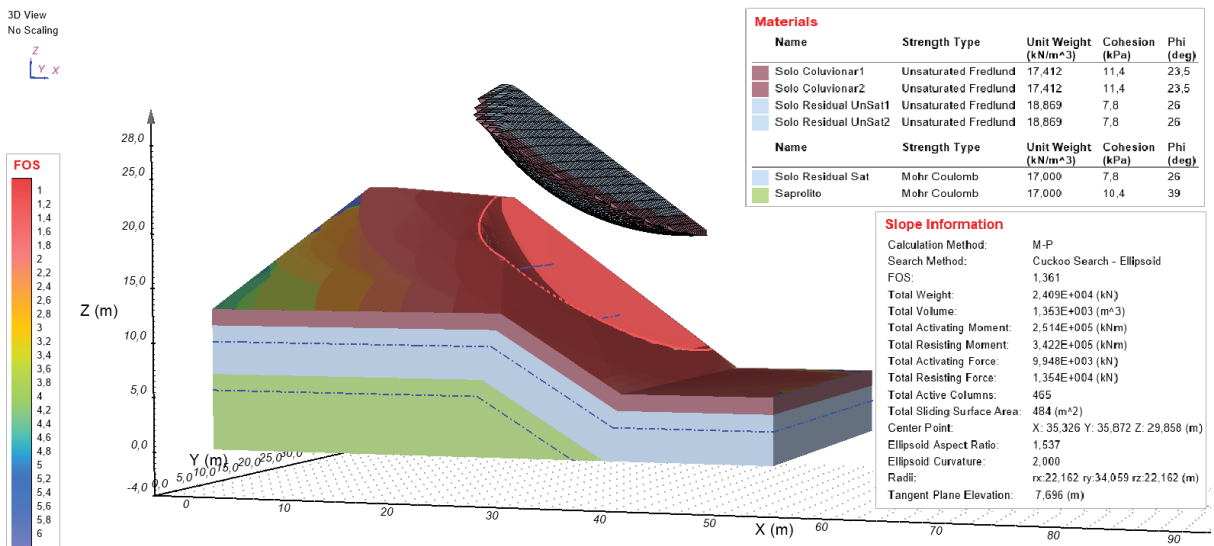
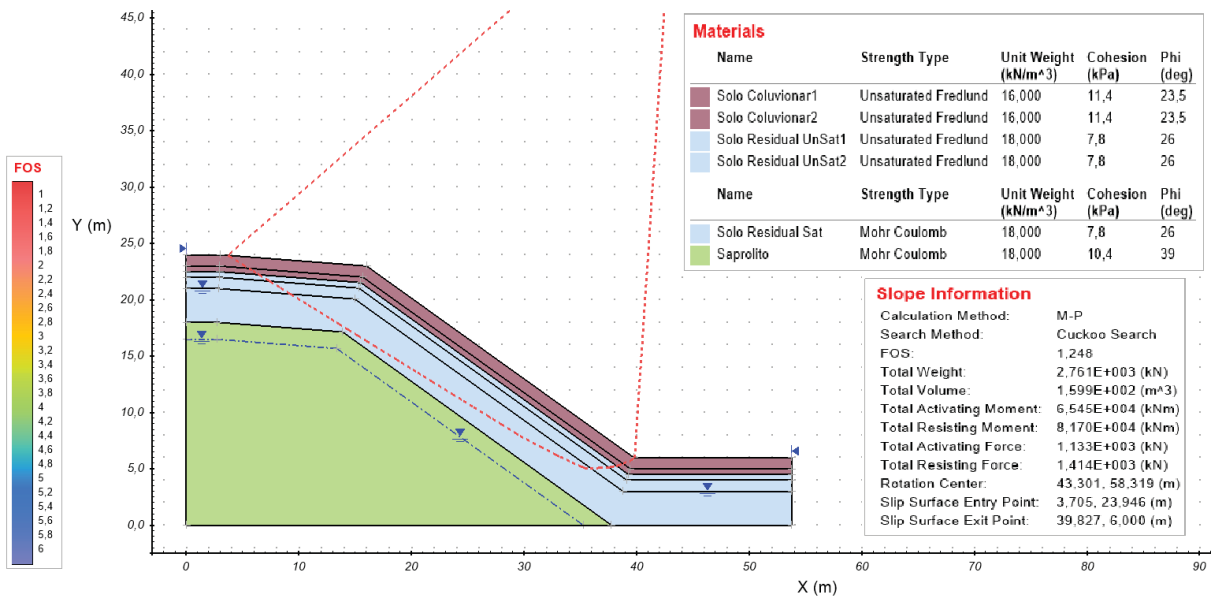
3D View
No Scaling

Z
Y X

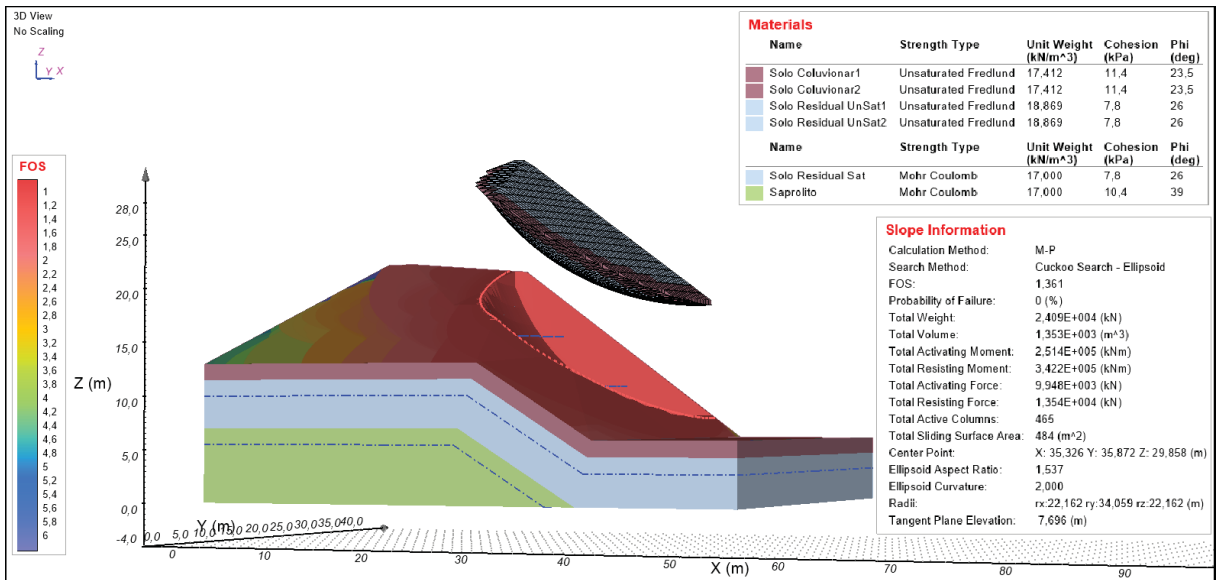
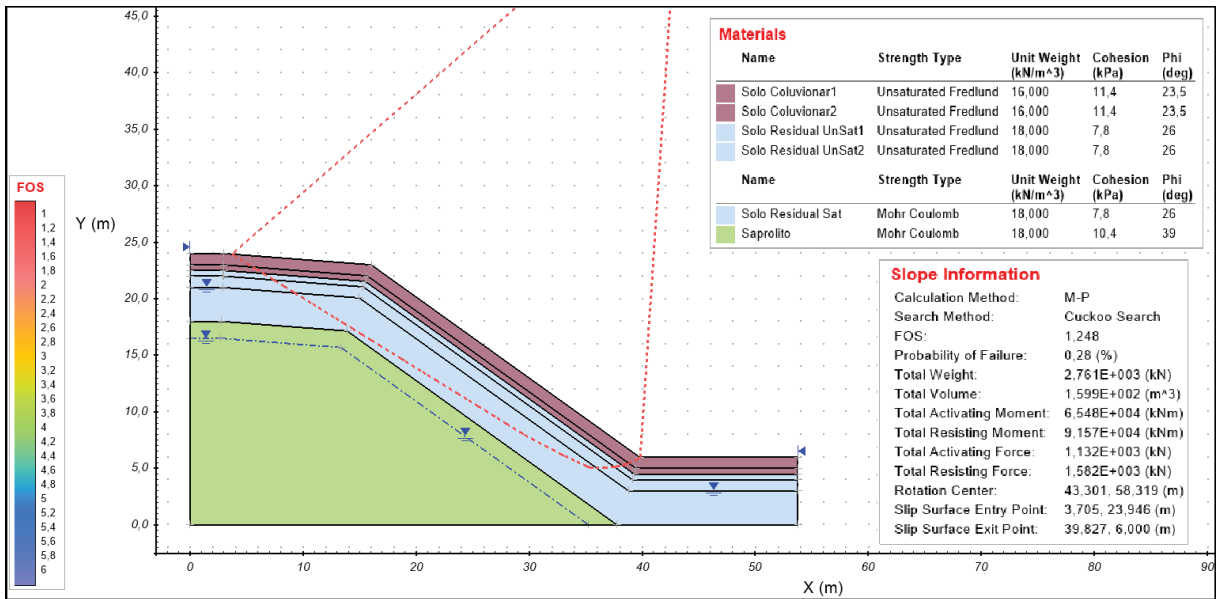


APÊNDICE 4 – IMAGENS DA ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA 2D E 3D NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CRÍTICA NA PROFUNDIDADE DE NÍVEL D'ÁGUA DE 7,5 METROS

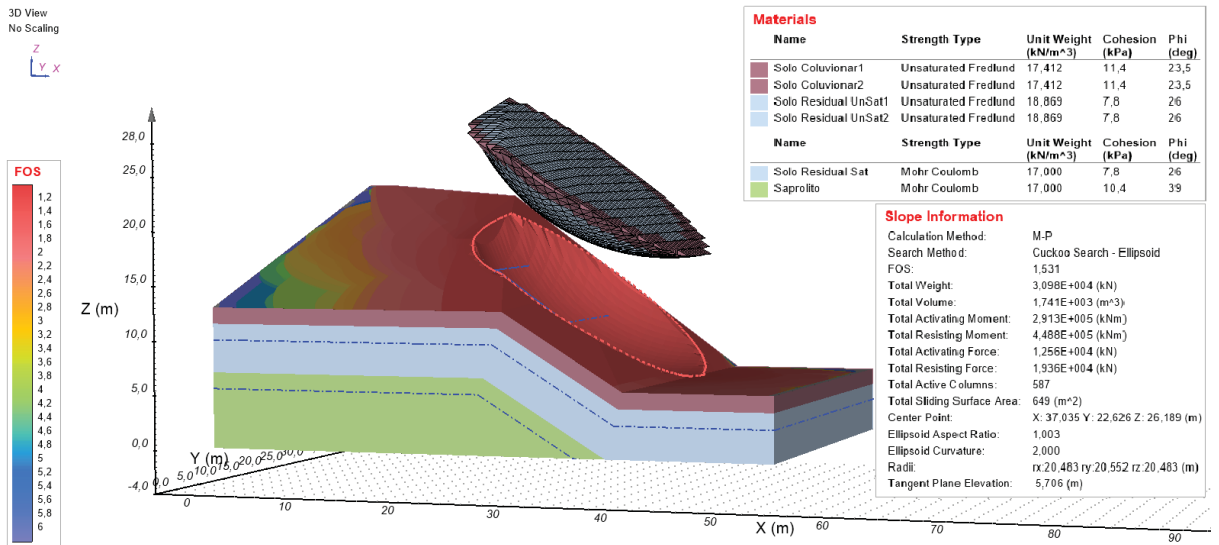
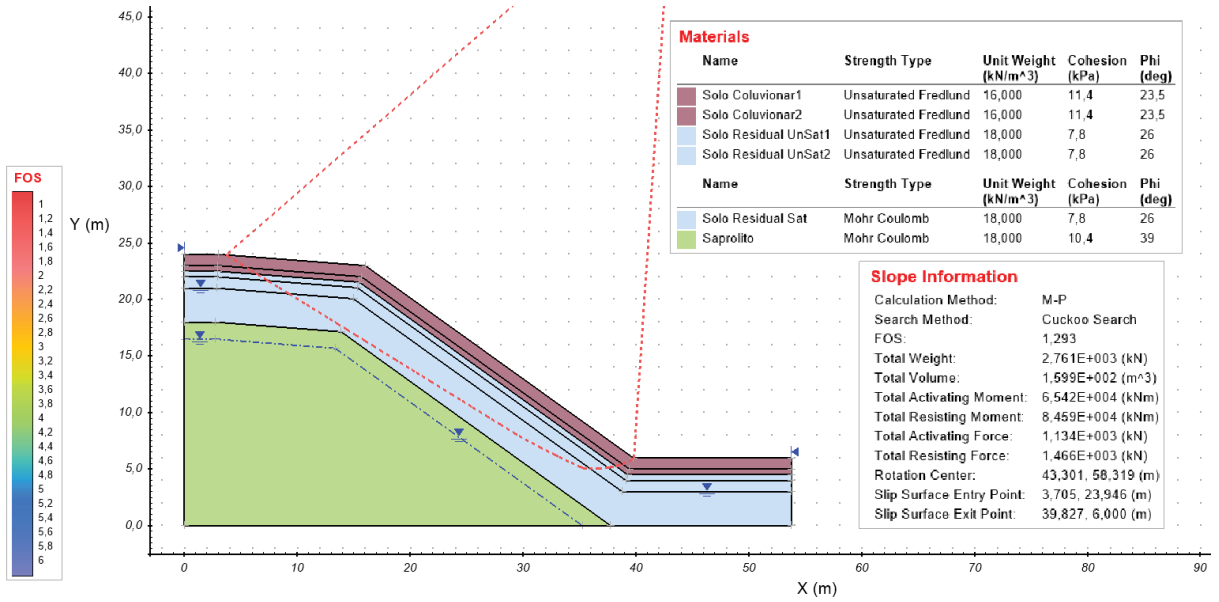
- 20 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



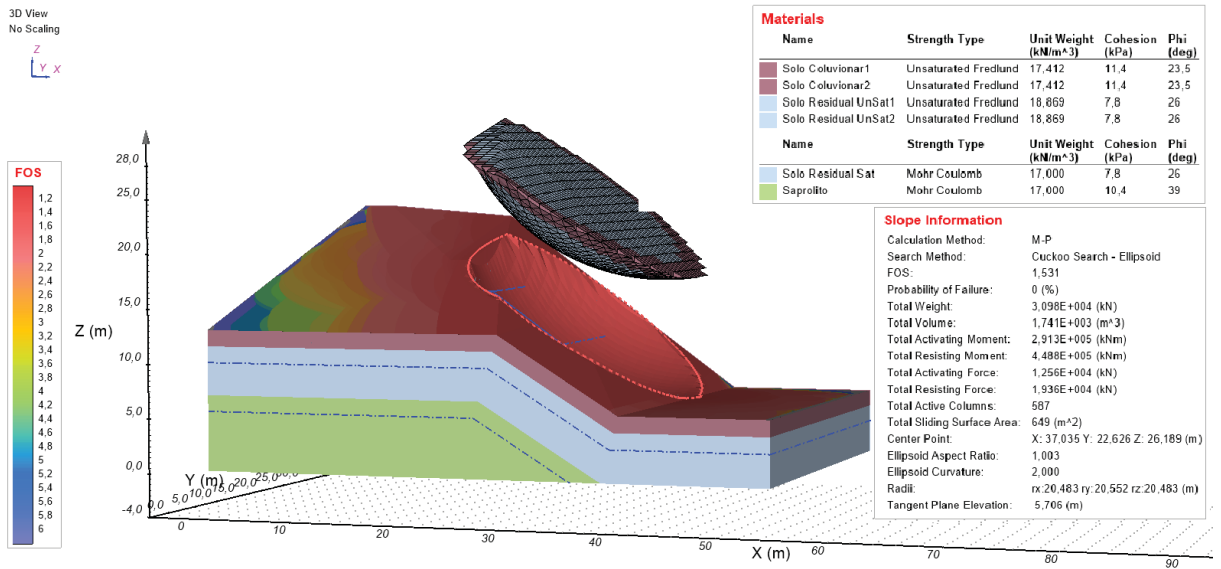
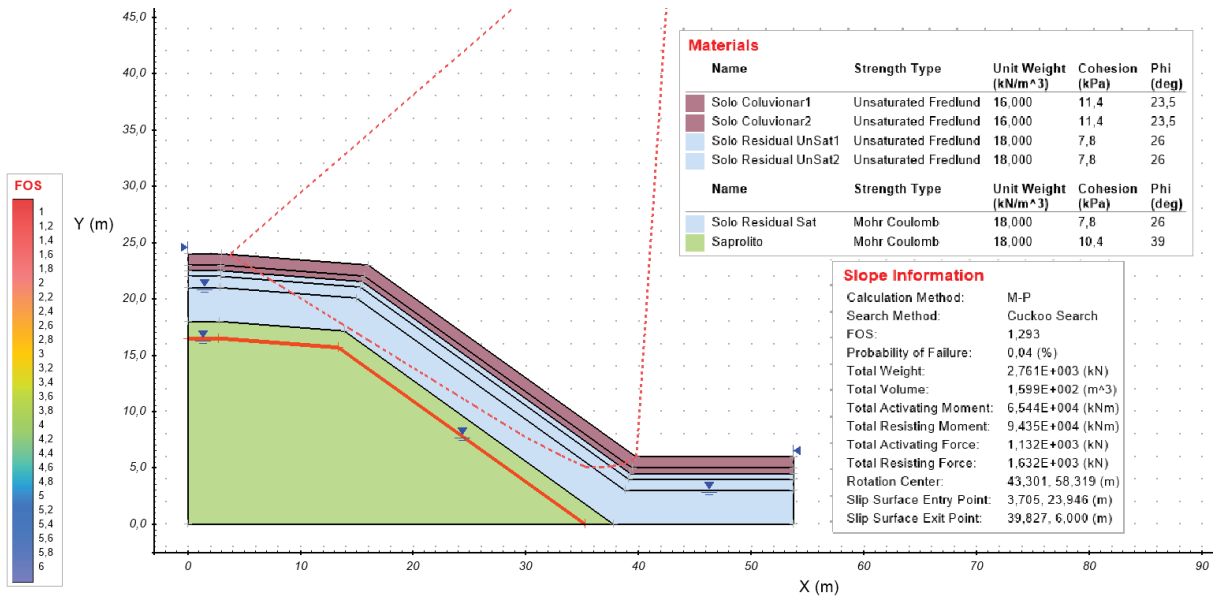
➤ Probabilístico



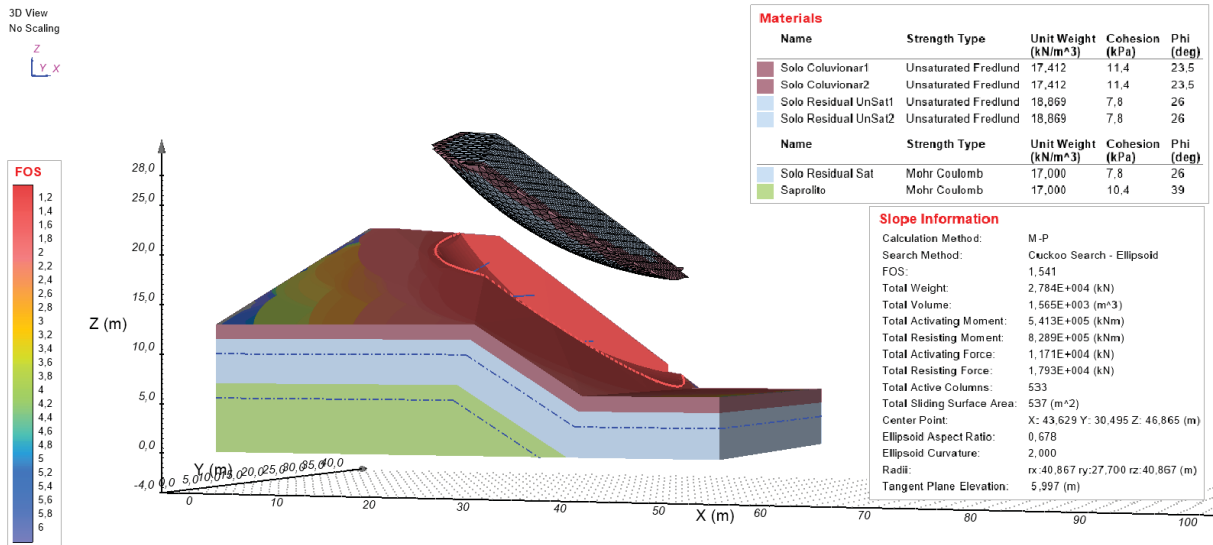
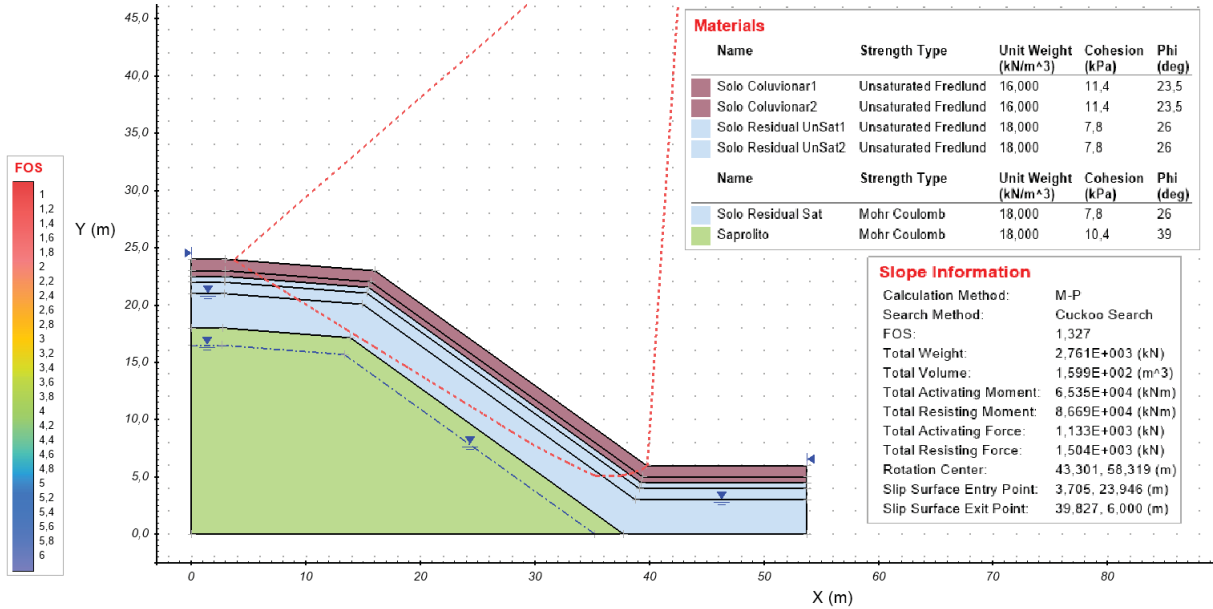
- 40 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



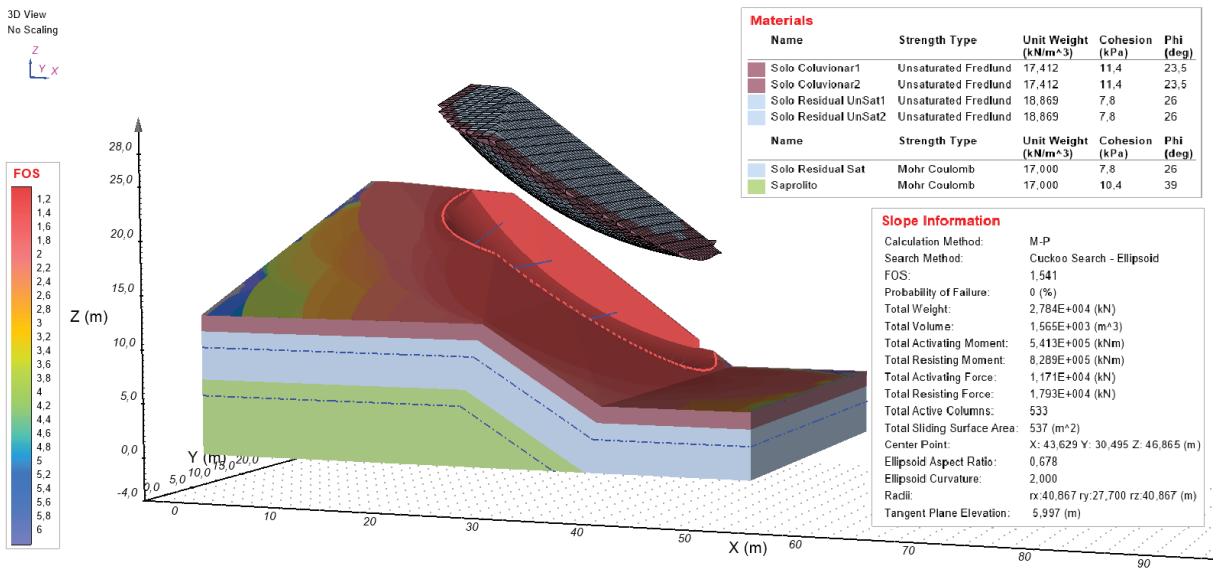
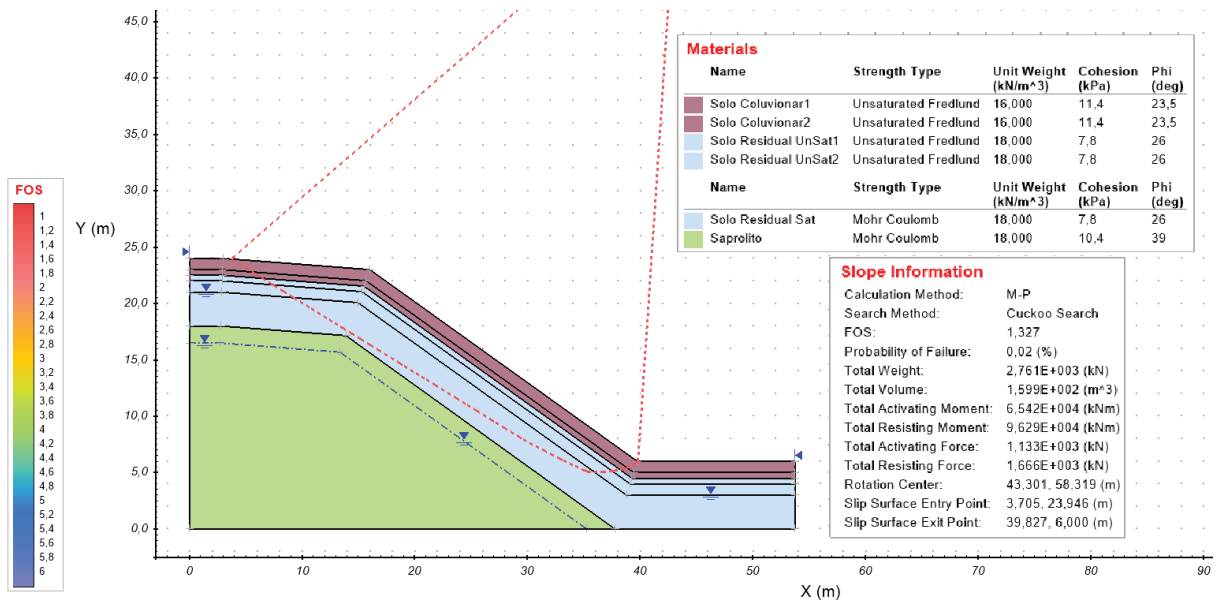
➤ Probabilístico



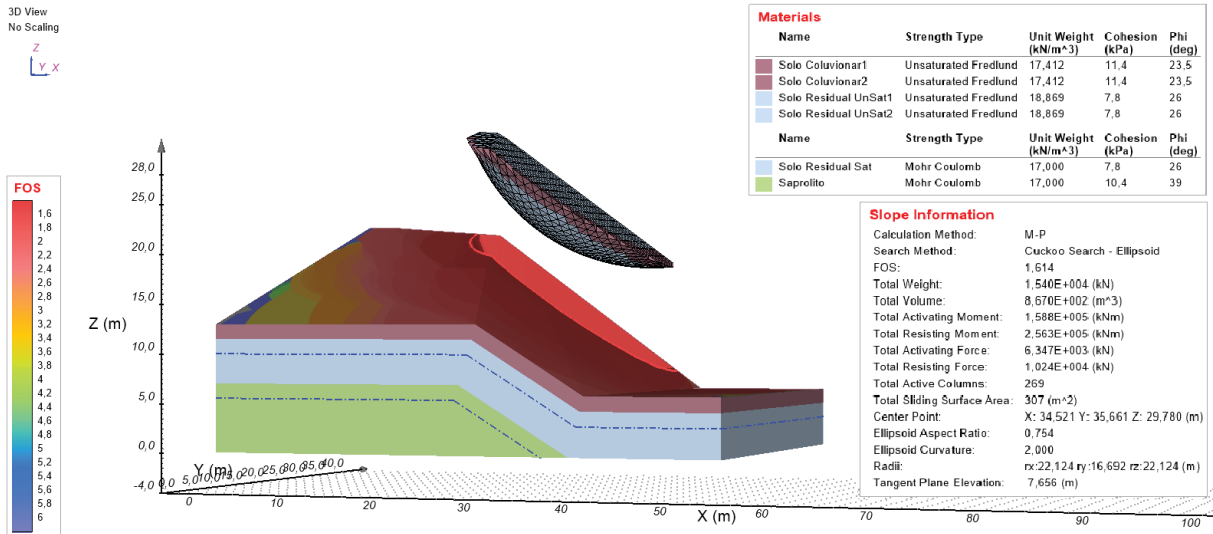
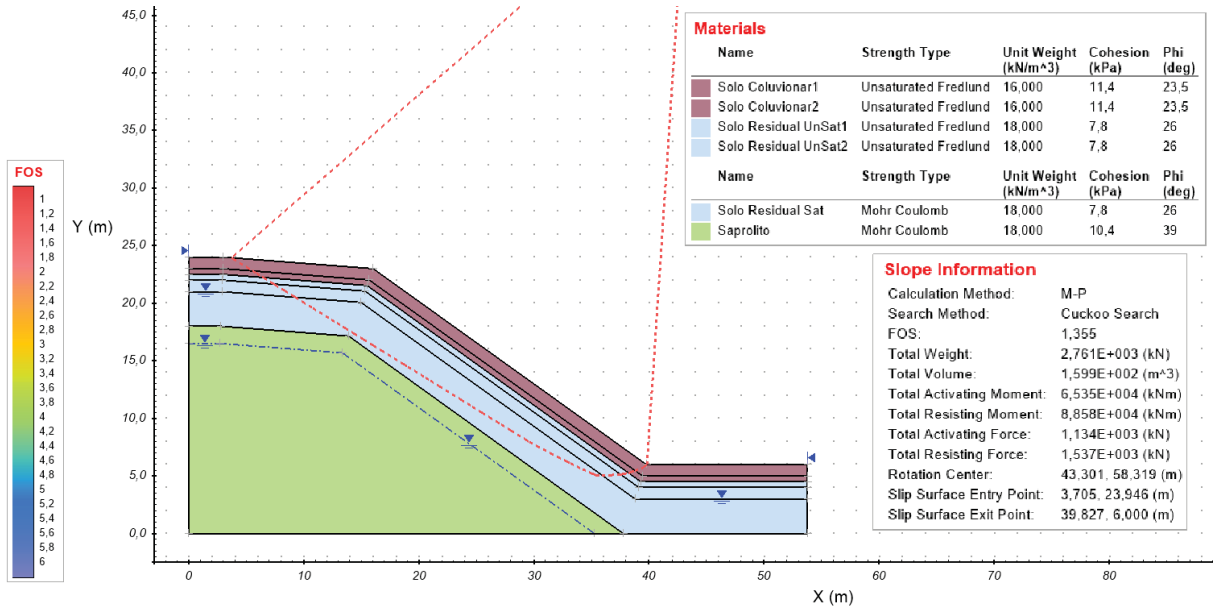
- 60 kPa DE SUCCÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



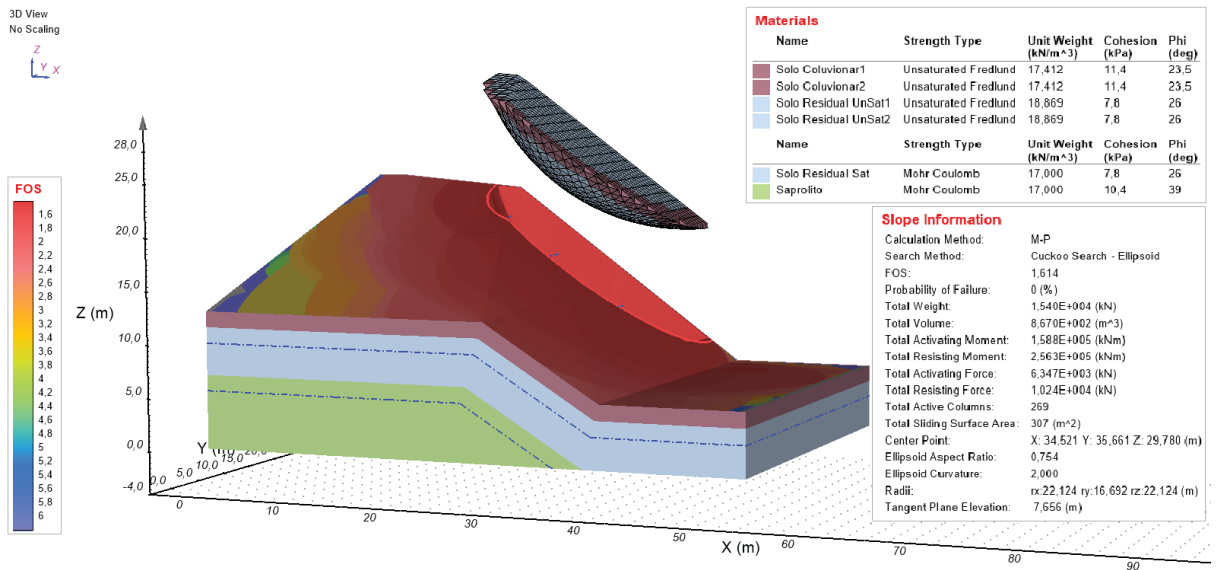
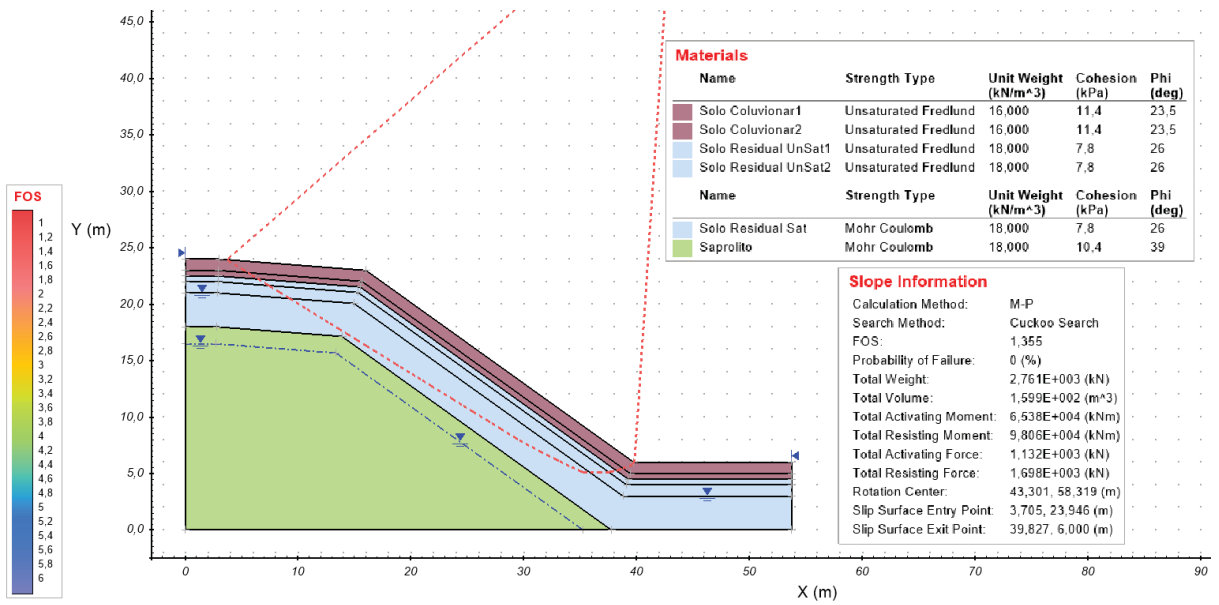
➤ Probabilístico



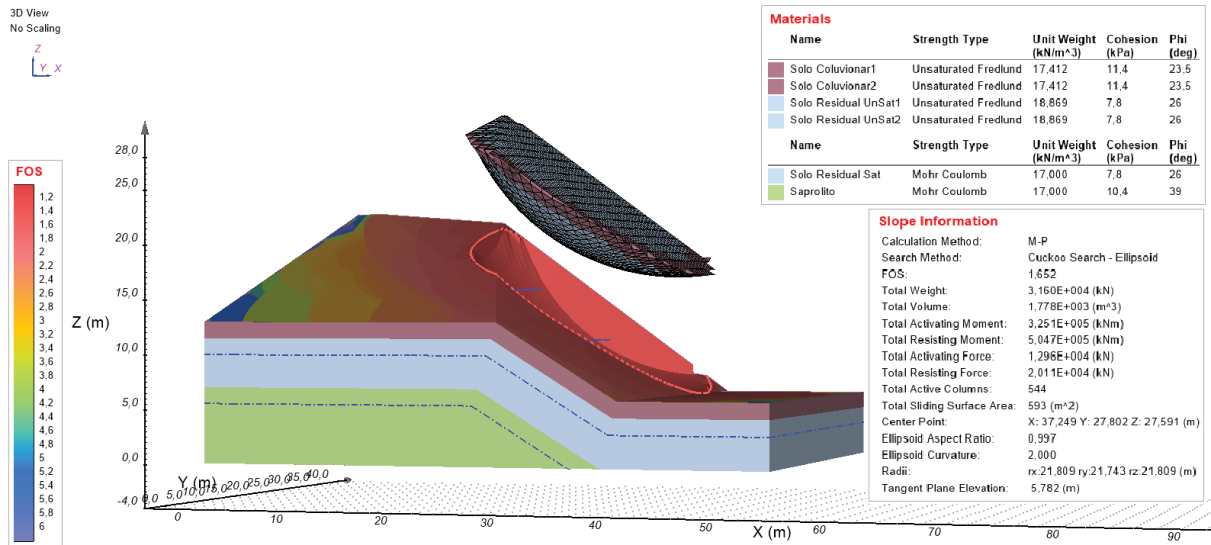
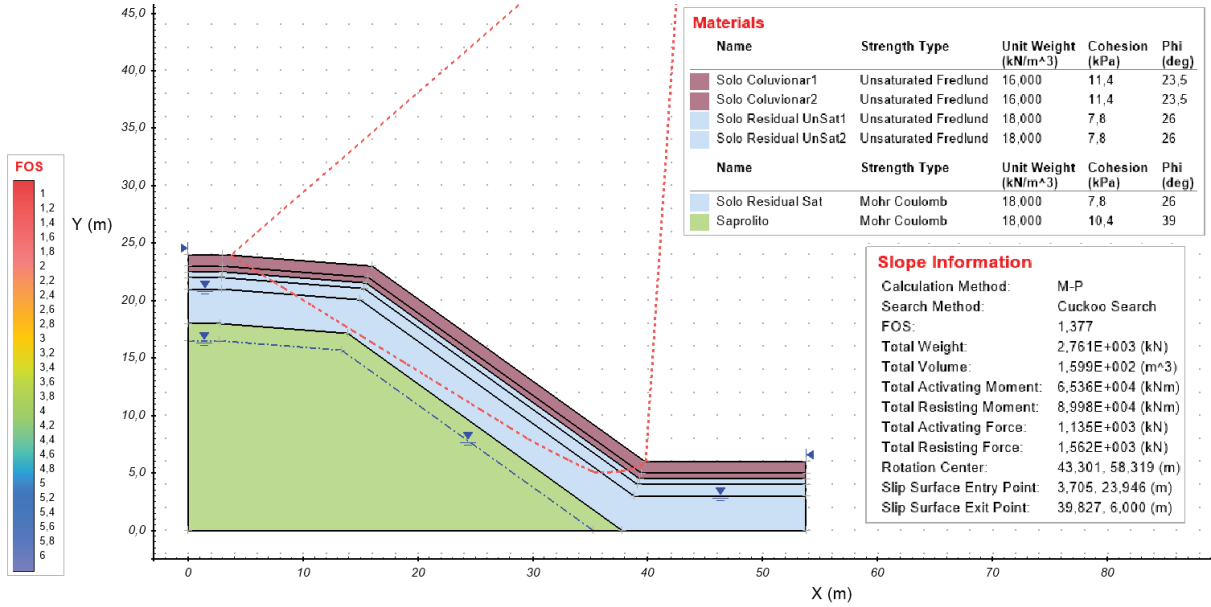
- 80 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



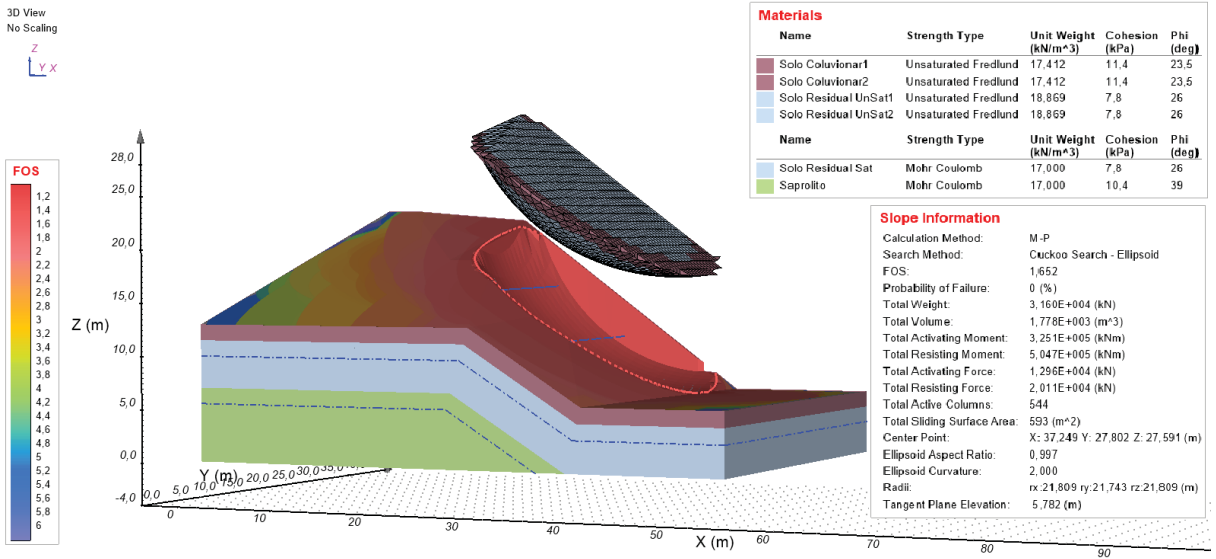
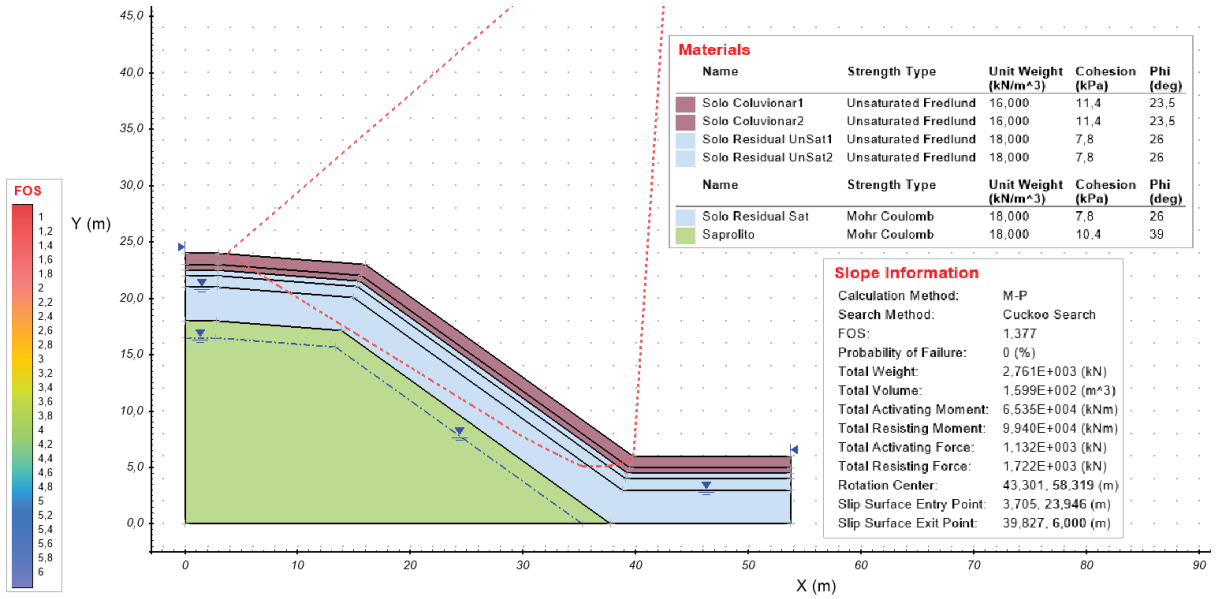
➤ Probabilístico



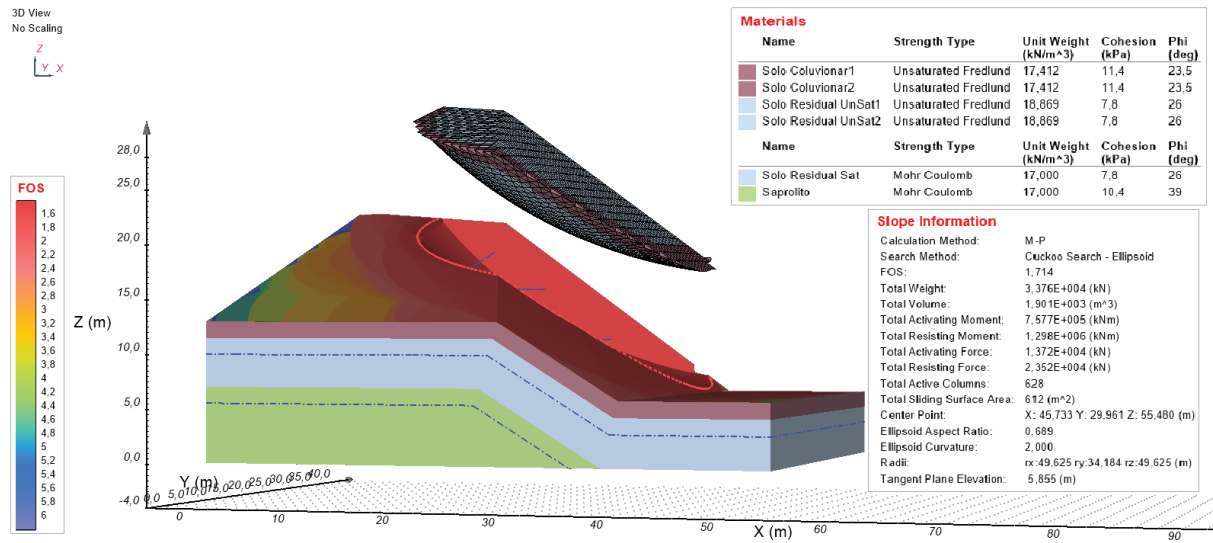
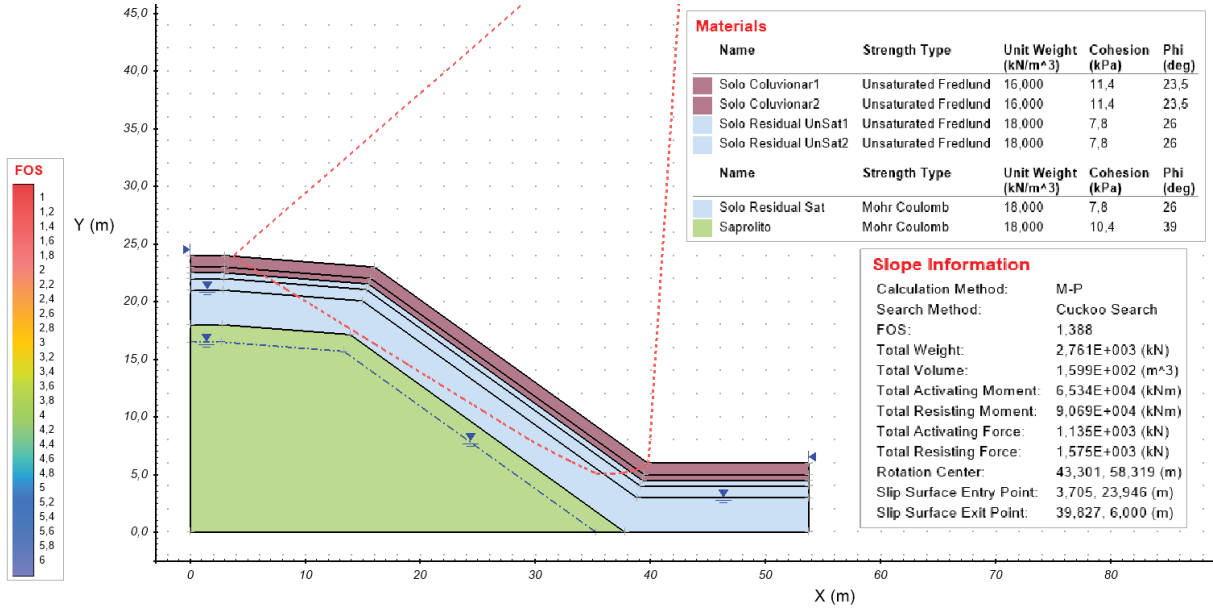
- 100 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



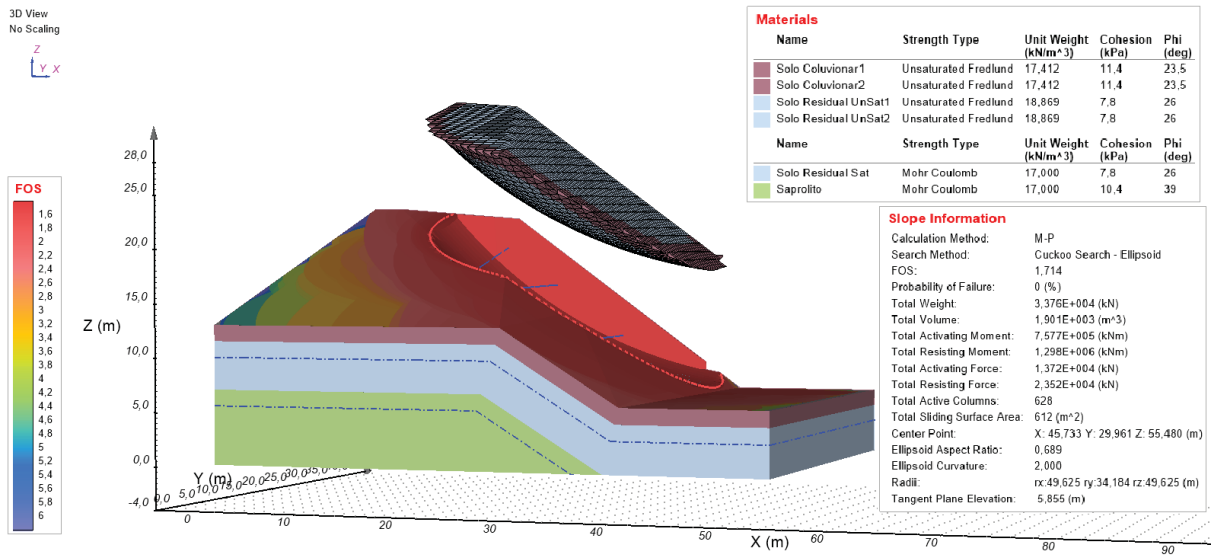
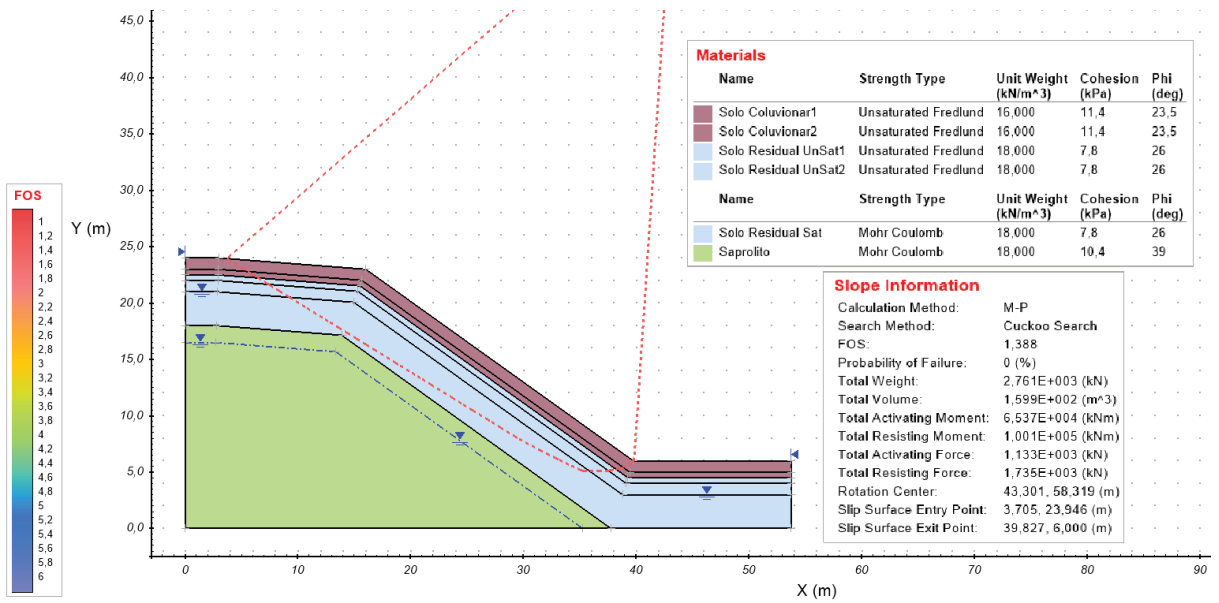
➤ Probabilístico



- 120 kPa DE SUCÇÃO SUPERFICIAL
 - Determinístico



➤ Probabilístico



ANEXO 2 –PERFIL GEOTÉCNICO COM BASE NOS SPT'S DO KM 552 + 200 – PISTA SUL

Este anexo apresenta o perfil geotécnico criado com base nos SPT's do km 552 + 200, pista sul, da Serra Pelada.

