



Kadson Matheus Barreiros Gomes

**Avaliação da influência da distribuição da sucção inicial
nas condições de fluxo e estabilidade de encostas não
saturadas por meio de análises bi e tridimensionais**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Rio de Janeiro

Setembro de 2019



Kadson Matheus Barreiros Gomes

**Avaliação da influência da distribuição da sucção inicial
nas condições de fluxo e estabilidade de encostas não
saturadas por meio de análises bi e tridimensionais**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
da PUC-Rio. Aprovado pela Comissão
Examinadora abaixo.

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Gilson de Farias Neves Gitirana Jr

UFG – Universidade Federal de Goiás

Rio de Janeiro, 06 de setembro de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador

Kadson Matheus Barreiros Gomes

Graduou-se em Geologia pela UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 2014. Ingressou no mestrado em Engenharia Civil na área de Geotecnia na PUC-Rio em 2016, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geomecânica Computacional aplicada a solos não saturados.

Ficha Catalográfica

Gomes, Kadson Matheus Barreiros

Avaliação da influência da distribuição da sucção inicial nas condições de fluxo e estabilidade de encostas não saturadas por meio de análises bi e tridimensionais / Kadson Matheus Barreiros Gomes ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos. – 2019.

126 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Análise de estabilidade. 3. Modelagem 3D. 4. Solo não saturado. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A meu orientador Tácio Mauro Pereira de Campos, por toda a paciência e apoio oferecidos durante os desafios enfrentados ao longo da produção deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio na figura de seus professores e funcionários com os quais tive o prazer de conviver durante este mestrado.

A ALTA Geotecnia, pelos horários flexíveis que me permitiram desenvolver este trabalho em paralelo com minhas atividades profissionais, e todos os seus colaboradores pelos constantes estímulos e mensagens de apoio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

A toda equipe de suporte da SoilVision, cuja disponibilidade e prontidão foram indispensáveis no desenvolvimento das análises apresentadas.

Aos colegas Thiago Carnavale e João Vicente que dividiram experiências sobre a utilização dos softwares.

Aos companheiros André, Antônio, Igor Bruno, Igor Gabriel, José Carlos, Lênin e Sales, vocês não têm ideia do quão importante vocês foram para que eu me mantivesse seguindo em frente.

A minha família, especialmente a minha mãe e minha avó por estarem sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis.

E, por fim, a Deus, sem o qual nada disso seria possível.

Resumo

Gomes, Kadson Matheus Barreiros; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Orientador). **Avaliação da influência da distribuição da sucção inicial nas condições de fluxo e estabilidade de encostas não saturadas por meio de análises bi e tridimensionais.** Rio de Janeiro, 2019. 126p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A estabilidade de encostas constituídas por solos residuais não saturados sofre grande influência das variações das condições de fluxo locais, uma vez que, em muitos casos, grande parte de sua resistência ao cisalhamento é conferida pela coesão aparente acarretada pelo fenômeno de sucção. Sabendo disso, o presente trabalho avaliou, através de análises de estabilidade e de fluxo realizadas em modelos bi e tridimensionais, a possibilidade de se criar um modelo onde o resultado final de estabilidade independa da distribuição de sucção inicial. As análises e modelagens de fluxo e estabilidade foram executadas com auxílio dos softwares SVDesigner, SVSlope e SVFlux-GE integrantes do pacote SVOoffice, desenvolvido pela SoilVision. Buscou-se quantificar a influência da distribuição da sucção inicial nos casos estudados. Os parâmetros de solo utilizados como dados de entrada nos modelos derivaram de estudos desenvolvidos por de Oliveira (2013) sobre os mecanismos de ruptura de movimentos de massa que ocorreram em Nova Friburgo durante o megadesastre que ocorreu na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, e os dados climáticos advieram de registros contemporâneos e pretéritos ao evento. Nos modelos 2D foi possível, ao se considerar aproximadamente oito meses de dados climáticos, que diferentes condições iniciais de sucção homogêneas convergissem para um resultado único de estabilidade. Nas modelagens também foi observado que o comportamento do fluxo diferiu entre os modelos 2D e 3D o que teve um significativo impacto em suas análises de estabilidade.

Palavras-chave

Análise de estabilidade; Modelagem 3D; Solo não saturado.

Abstract

Gomes, Kadson Matheus Barreiros; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor). **Evaluation of the influence of the initial suction distribution in Stability and flow conditions of unsaturated slopes through two and three-dimensional analysis.** Rio de Janeiro, 2019. 126p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The stability of slopes consisting of unsaturated residual soils is strongly influenced by variations in local flow conditions, since in many cases much of their shear strength is conferred by the apparent cohesion caused by the suction phenomenon. With this in mind, the present study evaluated the possibility of creating a model where the final stability result is independent of the initial suction distribution through stability and flow analyzes performed in two and three-dimensional models. Flow and stability analyzes and modeling were performed using the SVDesigner, SVSlope and SVFlux-GE software components of the SVOoffice package developed by SoilVision. It was tried to quantify the influence of the initial suction distribution in the cases studied. The soil parameters used as input data in the models were derived from studies developed by de Oliveira (2013) on the mechanisms of rupture of the mass movements that occurred in Nova Friburgo during the disaster that occurred in the Serrana Region of Rio de Janeiro in 2011, and the climatic data came from records in the region during and before the event. In the 2D models, it was possible, considering approximately eight months of climatic data, that different initial homogeneous suction conditions converged to a single stability result. It was also observed that the flow behavior differed between the 2D and 3D models, which had a significant impact on their stability analyzes.

Keywords

Stability analysis; 3D modeling; unsaturated soil.

Sumário

1 Introdução	17
2 Revisão bibliográfica	18
2.1. Solos residuais	18
2.2 Solos não saturados	18
2.2.1 Sucção no solo	19
2.2.2 Curva de retenção de umidade no solo	19
2.3 Análises de estabilidade	20
2.3.1 Efeito de condições de fluxo em estabilidade de taludes	20
2.3.2 Comparação de análises de estabilidade em modelos 2D e 3D	22
3 Dados de entrada	30
3.1 Geometria do talude e propriedades do solo	30
3.1.1 Propriedades geotécnicas do solo	32
3.1.2 Geometria	37
3.2 Dados climatológicos	40
3.2.1 Pluviometria	41
3.2.2 Evaporação e temperatura	42
4 Análises bidimensionais	45
4.1 Condições das análises de fluxo 2D	46
4.1.1 Constantes	46
4.1.2 Distribuições iniciais de sucção	46
4.1.3 Condições de contorno	46
4.2 Condições das análises de estabilidade 2D	47
4.3 Resultados das análises de estabilidade bidimensionais	48
4.4 Resultados das análises de fluxo bidimensionais	54
5 Análises tridimensionais	70
5.1 Condições das análises tridimensionais	70
5.2 Resultado das análises de estabilidade tridimensionais	71
5.2.1 Comparação da estabilidade inicial (sucção constante)	71

5.2.2 Progressão das análises de estabilidade com o tempo	73
5.3 Análises de fluxo tridimensionais	77
6 Conclusão	81
Referências bibliográficas	83
Apêndice A – Dados pluviométricos	86
Apêndice B – Dados de evaporação e temperatura	90
Apêndice C – Construção geométrica dos modelos 3D	94
Apêndice D – Pontos que definem a geometria 2D	103
Apêndice E – Pontos que definem a geometria 3D	104
Apêndice F – Detalhes das análises de estabilidade	110

Lista de figuras

Figura 1 - Curva de retenção típica com destaque para as divisões apresentadas e os principais parâmetros (Gitirana Jr. et al., 2015).....	20
Figura 2 – Representação gráfica do critério de Mohr Coulomb estendido para solos não saturados (modificado de Leong Jr. et al., 2001).	21
Figura 3 – Geometria de talude avaliadas (a) talude plano, (b) talude convexo, (c) talude convexo (Chaudhary et al., 2016).	24
Figura 4 – Seção 2D compartilhada por todos os modelos 3D (Chaudhary et al., 2016).	24
Figura 5 – Geometria de talude avaliadas (a) talude plano, (b) talude convexo, (c) talude convexo (Chaudhary et al., 2016).	25
Figura 6 – Comparação dos fatores de segurança resultantes de análises de estabilidade 2D e 3D, respectivamente, obtidos com o método dos elementos finitos (Gómez et al., 2016).....	26
Figura 7 – Geometria do maciço onde se desenvolveu o maciço (Mitchell et al, 1993).....	27
Figura 8 – Resumo das forças e deslocamentos atuantes no movimento de massa descrito (Bryne et al., 1992).....	28
Figura 9 – Localização de Condomínio do Lago e Comunidade Prainha (de Oliveira, 2013).	31
Figura 10 – Estado do Condomínio do Lago após os deslizamentos (de Oliveira, 2013).	32
Figura 11 – Pontos de coleta de amostras (de Oliveira, 2013).....	33
Figura 12 – Curva de retenção de umidade referente a amostra F02 (solo aduro).	36
Figura 13 – Curva de retenção de umidade referente a amostra F04 (solo jovem).	36
Figura 14 – Função de permeabilidade referente a amostra F02 (solo maduro).....	36
Figura 15 – Função de permeabilidade referente a amostra F04 (solo jovem)....	37
Figura 16 – Condomínio do Lago antes de ocorrerem os movimentos de massa (de Oliveira 2013).	38
Figura 17 – Geometria 2D original modelada por de Oliveira (2013).....	39

Figura 18 – Estratigrafia original das camadas modeladas por de Oliveira (2013).	39
Figura 19 – Geometria utilizada nas análises bidimensionais.	40
Figura 20 – Localização da estação pluviométrica Fazenda Mendes.....	41
Figura 21 – Dados de pluviometria advindos da estação Fazenda Mendes.....	42
Figura 22 – Localização da estação climatológica de Cordeiro.....	42
Figura 23 – Representação esquemática do Evaporímetro de Piche (SoilControl).....	43
Figura 24 – Dados de evaporação potencial advindos da estação Fazenda Mendes.....	43
Figura 25 – Dados de temperatura advindos da estação Fazenda Mendes.	44
Figura 26 – Condições de contorno consideradas nas análises.....	47
Figura 27 – Distribuição do fator de segurança ao longo do tempo.....	50
Figura 28 – Ponto de convergência dos fatores de segurança na análise preliminar.....	50
Figura 29 – Distribuição do fator de segurança ao longo do tempo considerando o período de aproximadamente 8 meses antes da ruptura.	51
Figura 30 – Distribuição do fator de segurança ao longo do tempo considerando o período de aproximadamente 4 meses antes da ruptura.	52
Figura 31 – Superfície de ruptura final observada nas análises de estabilidade.	53
Figura 32 – Perfis verticais para análises de distribuição de poropressão	54
Figura 33 – Exemplo de gráfico esclarecendo o significado das curvas apresentadas nos perfis de distribuição das poropressões exibidos nas Figuras 35 a 44.....	55
Figura 34 – Distribuição, em relação ao tempo e aos dados de entrada de precipitação, das curvas apresentadas na Figura 28, seguindo a representação por cores.	55
Figura 35 – Cenário com sucção inicial de 50 kPa e face permeável na base.....	56
Figura 36 – Cenário com sucção inicial de 75 kPa e face permeável na base.....	57

Figura 37 – Cenário com sucção inicial de 100 kPa e face permeável na base.....	58
Figura 38 – Cenário com sucção inicial de 150 kPa e face permeável na base.....	59
Figura 39 – Cenário com sucção inicial de 200 kPa e face permeável na base.....	60
Figura 40 – Cenário com sucção inicial de 50 kPa e alagamento na base.	61
Figura 41 – Cenário com sucção inicial de 75 kPa e alagamento na base.....	62
Figura 42 – Cenário com sucção inicial de 100 kPa e alagamento na base.....	63
Figura 43 – Cenário com sucção inicial de 150 kPa e alagamento na base.....	64
Figura 44 – Cenário com sucção inicial de 200 kPa e alagamento na base.....	65
Figura 45 – Distribuições de poropressão no perfil de crista antes da ruptura, resultantes de cada um dos estados iniciais.	67
Figura 46 – Distribuições de poropressão no perfil de meia encosta antes da ruptura, resultantes de cada um dos estados iniciais.....	67
Figura 47 – Distribuições de poropressão no perfil de base antes da ruptura (base permeável), resultantes de cada um dos estados iniciais.....	68
Figura 48 – Distribuições de poropressão no perfil de base antes da ruptura (alagamento na base), resultantes de cada um dos estados iniciais.....	68
Figura 49 – Condições de contorno impermeáveis.	70
Figura 50 – Demais condições de contorno.	70
Figura 51 – Condições do algoritmo de procura de superfícies de ruptura 3D.....	71
Figura 52 – Gráfico de comparação dos fatores de segurança nos estados iniciais.....	71
Figura 53 – Superfície de ruptura para a análise 2D com sucção de 75 kPa.	73
Figura 54 – Superfície de ruptura para a análise 3D Convexa com sucção de 75 kPa.	73
Figura 55 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 200 kPa.....	74
Figura 56 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 150 kPa.....	74

Figura 57 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 100 kPa.....	75
Figura 58 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 75kPa.	75
Figura 59 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 75kPa.são.....	77
Figura 60 – Destaque para chuva ocorrido no dia 294, adotada como Situação 1.....	78
Figura 61 – Localização dos perfis de poropressão do modelo 3D Plano.	78
Figura 62 – Localização dos perfis de poropressão do modelo 3D Côncavo.....	78
Figura 63 – Comparação das poropressões no perfil de crista.	79
Figura 64 – Comparação das poropressões no perfil de meia encosta.	79
Figura 65 – Comparação das poropressões no perfil de base.	80
Figura 66 – Gráfico resumo dos dados de pluviometria advindos da estação Fazenda Mendes.	86
Figura 67 – Gráfico resumo dos dados de evaporação potencial advindos da estação Fazenda Mendes.....	90
Figura 68 – Gráfico resumo dos dados de temperatura advindos da estação Fazenda Mendes.....	93
Figura 69 – Destaque para linhas que definem a geometria do modelo.....	94
Figura 70 – Comparação dos sistemas de coordenadas 2D e 3D utilizados.....	94
Figura 71 – Primeiro passo para conversão do modelo 2D em 3D.	95
Figura 72 – Determinação da profundidade do modelo 3D nas caixas de diálogo do software.....	96
Figura 73 – Geometria resultante da conversão descrita.	96
Figura 74 – Procedimento para input de ponto na SVDesigner.....	97
Figura 75 – Pontos da “Superfície 1” 3D convexa adicionada no SVDesigner.....	97
Figura 76 – Processo de conversão de pontos em superfície triangulada.....	98
Figura 77 – Processo de conversão de pontos em superfície triangulada.....	98
Figura 78 – Triangulação da superfície após o refinamento.....	99

Figura 79 – Transformação da superfície triangulada em grid.	99
Figura 80 – Superfície em grid resultante do processo descrito.	99
Figura 81 – Destaque para dados do grid a serem copiados.	100
Figura 82 – Opção para edição da geometria das superfícies.	100
Figura 83 – Configuração do tipo de superfície para grid.	100
Figura 84 – Superfície resultante no SVFlux-GE ou SVSlope.	100
Figura 85 – Destaque para comando utilizado para colar dados de grid na geometria.	100
Figura 86 – Geometria final côncava.	101
Figura 87 – Geometria final convexa	101
Figura 88 – Destaque para região considerada excluindo porções adicionais da superfície.	101
Figura 89 – Seção (y,z) côncava.	102
Figura 90 – Seção (y,z) convexa.	102
Figura 91 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 50 kPa.	110
Figura 92 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 50 kPa.	110
Figura 93 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 75kPa.	110
Figura 94 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 75kPa.	110
Figura 95 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 100 kPa.	110
Figura 96 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 100 kPa.	110
Figura 97 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 150 kPa.	111
Figura 98 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 150 kPa.	111
Figura 99 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 200 kPa	111

Figura 100 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 200 kPa.....	111
Figura 101 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 50 kPa.....	112
Figura 102 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 75kPa.....	113
Figura 103 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 100 kPa.....	114
Figura 104 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 150 kPa.	115
Figura 105 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 200 kPa.....	116
Figura 106 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 50 kPa.....	117
Figura 107 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 75kPa.....	118
Figura 108 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 100 kPa.....	119
Figura 109 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 150 kPa.....	120
Figura 110 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 200 kPa.....	121
Figura 111 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 50 kPa.....	122
Figura 112 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 75kPa.....	123
Figura 113 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 100 kPa.....	124
Figura 114 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 150 kPa.....	125
Figura 115 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 200 kPa.....	126

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de resistência considerados por Chaudhary et al. (2016).	25
Tabela 2 - Profundidade e data de coleta das amostras (de Oliveira, 2013).	33
Tabela 3 – Índices físicos (de Oliveira, 2013).	34
Tabela 4 – Resultado do ensaio de permeabilidade (de Oliveira, 2013).....	34
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de determinação da curva de retenção de umidade (de Oliveira, 2013).....	35
Tabela 6 – Resultados médios dos ensaios de cisalhamento direto utilizados como dados de entrada (de Oliveira, 2013).	37
Tabela 7 – Constantes adotadas pelo software durante as análises.....	46
Tabela 8 – Parâmetros de resistência utilizados nas análises.	48
Tabela 9 – Fatores de segurança obtidos para cada forma de talude.....	72
Tabela 10 – Comparação dos fatores de segurança em relação às análises 2D.....	72
Tabela 11 – Áreas das superfícies de ruptura 3D.	73
Tabela 12 –Volumes mobilizados nos movimentos de massa.	73
Tabela 13 – Dados pluviométricos advindos da estação Fazenda Mendes.	86
Tabela 14 – Dados de evaporação potencial e temperatura advindos da estação Cordeiro.....	90
Tabela 15 – Coordenadas X e Y que definem as superfícies do modelo 2D....	103
Tabela 16 – Pontos utilizados para definir a Superfície 1 da geometria 3D côncava.	104
Tabela 17 – Pontos utilizados para definir a Superfície 2 da geometria 3D côncava,	105
Tabela 18 – Pontos utilizados para definir a Superfície 3 da geometria 3D côncava.	106
Tabela 19 – Pontos utilizados para definir a Superfície 1 da geometria 3D convexa.	107
Tabela 20 – Pontos utilizados para definir a Superfície 2 da geometria 3D convexa.	108

Tabela 21 – Pontos utilizados para definir a Superfície 3 da geometria 3D
convexa. 109

1

Introdução

Ao se desenvolver projetos em um local de geomorfologia com tamanha amplitude quanto a do Estado do Rio de Janeiro é inevitável que o profissional de engenharia se depare com um grande número de encostas íngremes. Nestes casos é imprescindível que uma criteriosa análise de estabilidade seja desenvolvida para garantir a segurança das estruturas vizinhas.

Ademais, levando em consideração que a maioria das encostas brasileiras se encontra não saturada, e que a coesão aparente desempenha um relevante papel nas forças resistentes que mantêm os taludes estáveis, é de suma importância que as condições de fluxo locais sejam levadas em consideração.

Nesse aspecto, seria natural concluir que a condição ideal para análises de estabilidade em solos não saturados seria por meio de um modelo, cujos resultados de sucção independessem do valor de entrada inicial, sendo, desta forma, dependente apenas dos dados climatológicos e das características do solo.

Desta forma o presente trabalho busca avaliar a possibilidade de se criar tal modelo, o que será realizado em modelos bi e tridimensionais.

Adicionalmente, se busca comparar o resultado dos diferentes modelos para melhor compreender a influência que a forma 3D do talude exerce nas condições de estabilidade e fluxo.

O capítulo 2 deste trabalho faz uma breve revisão bibliográfica sobre a influência de condições de fluxo na estabilidade de taludes não saturados e sobre a relação entre a estabilidade de modelos bi e tridimensionais.

No capítulo 3 são apresentados os dados de entrada que serviram de base para a construção dos modelos apresentados.

No capítulo 4 são abordadas as condições em que foram desenvolvidos os modelos 2D e seus respectivos resultados.

O capítulo 5 detalha o procedimento utilizado para modelagem 3D dos taludes considerados.

No capítulo 6 são apresentados os resultados das análises tridimensionais de fluxo e estabilidade.

E, por fim, o Capítulo 7 oferece as conclusões elaboradas com base nos resultados produzidos.

2

Revisão bibliográfica

2.1

Solos residuais

Solos residuais são aqueles cuja origem se dá a partir dos processos intempéricos que atuam sobre a rocha “in situ”. Dessa forma, ao se estudar o comportamento destes solos é de suma importância levar em consideração não só sua rocha matriz, ou seja, o material de origem que, ao ser alterado, se transformou em solo, como também as características do ambiente onde o intemperismo supracitado ocorreu.

Conhecer a rocha da qual se originou o solo é importante porque solos residuais são compostos por agregados e cristais de minerais alterados, de forma que a composição do solo é controlada pela rocha matriz.

Ademais, como a ação do intemperismo é um processo gradual, conhecer o quão avançado estão os processos pedogenéticos em um determinado solo é importante para determinar não só suas propriedades, mas também para o quanto das heterogeneidades das rochas, tais quais foliações, ainda estão presentes nos solos.

Por fim, é importante destacar que serão principalmente os aspectos climáticos que controlarão não só a velocidade com que o intemperismo agirá sobre rochas como também a forma como este agirá, assim sendo, é possível que rochas idênticas originem solos residuais diferentes em função dos processos intempéricos envolvidos.

2.2

Solos não saturados

O grau de saturação de um perfil de solo será usualmente controlado por sua textura e pela topografia e clima da região onde este se localiza. Em encostas de elevada declividade, os solos dificilmente estarão completamente saturados, mesmo em climas com alta pluviosidade. Uma vez que é justamente nesse tipo de encosta que costumam se desenvolver movimentos de massa de alto impacto social e econômico, é importante conhecer e estudar o comportamento geotécnico

desses solos para que possam ser tomadas medidas preventivas contra este tipo de desastre.

2.2.1

Sucção no solo

Solos não saturados têm parte de sua resistência condicionada pela “coesão aparente” causada pela sucção matricial, a qual é descrita como resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados, que tendem a aproximá-las entre si (Silva & Carvalho, 2007).

A sucção pode ser dividida em matricial e osmótica onde a primeira é devido à atuação das forças de adsorção e de capilaridade e a segunda devido à presença de solutos na água livre do solo. Desta forma a sucção total é resultado da soma destas duas parcelas.

Embora a sucção osmótica seja relevante para estudos de contaminação, ao se considerar o ganho de resistência na estabilidade de taludes esta parcela da sucção se torna irrelevante tal qual verificado por alguns autores como Fredlund et al. (1978) e Edil et al. (1981). Desta forma, seria necessário considerar somente a sucção matricial para se descrever o comportamento de solos não saturados, do ponto de vista geotécnico.

Com base na revisão apresentada neste tópico, o termo sucção ao ser utilizado doravante neste trabalho será referente a sucção matricial e serão desprezados os efeitos da sucção osmótica nas análises desenvolvidas.

2.2.2

Curva de retenção de umidade no solo

Esta curva define a função que relaciona a quantidade de água presente em um material com a energia necessária para removê-la. Em solos não saturados, como a coesão aparente é parte importante da resistência do material é importante conhecer a quantidade de água no solo, normalmente expressa na curva na forma de teor de umidade gravimétrica, volumétrica ou grau de saturação e sucção correspondente.

Vanapalli et al. (1999) divide a curva de retenção em três estágios, denominados zona de efeito limite (ou zona saturada), fase de transição (ou zona de dessaturação) e fase residual de drenagem. O primeiro corresponde ao trecho onde todos os poros estão saturados, no segundo ocorre a drenagem da fase líquida e no terceiro a presença de água nos vazios é reduzida e descontínua. A Figura 1 ilustra a divisão supracitada em uma curva de retenção típica. Nestas curvas o eixo das coordenadas é comumente representado pelo valor da sucção, enquanto no eixo das ordenadas a quantidade de água é representada como umidade gravimétrica(w), umidade volumétrica(θ_w) ou grau de saturação (S).

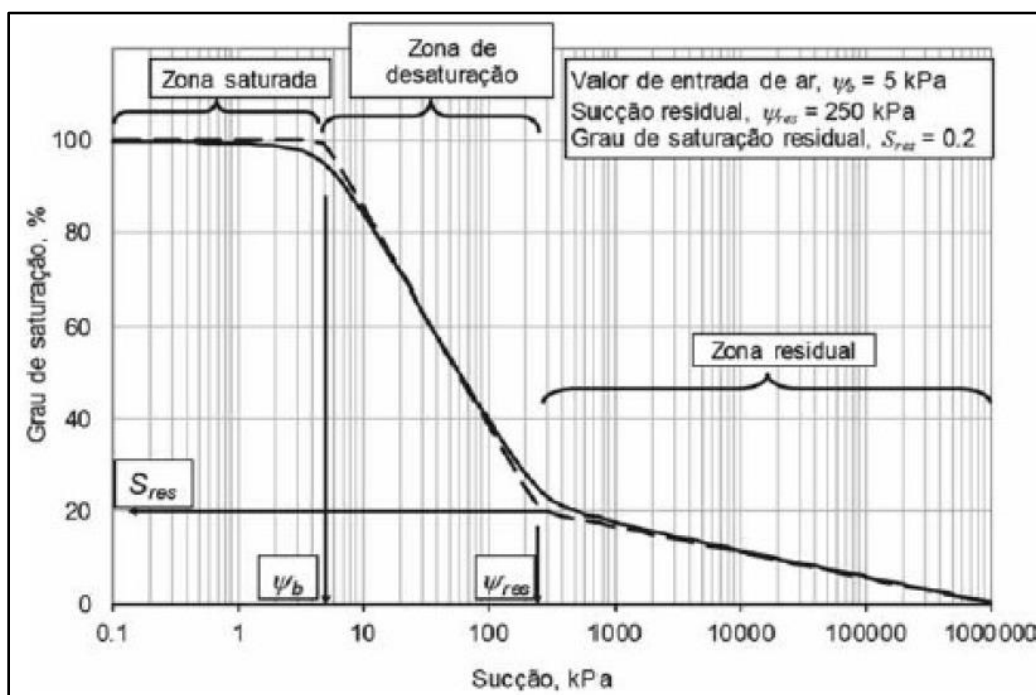


Figura 1 - Curva de retenção típica com destaque para as divisões apresentadas e os principais parâmetros (Gitirana Jr. et al., 2015).

2.3 Análises de estabilidade

2.3.1 Efeito de condições de fluxo em estabilidade de taludes

Conforme apresentado anteriormente solos não saturados têm parte de sua resistência conferida pela sucção, que se relaciona ao grau de saturação através da curva de retenção de umidade. Partindo desta premissa, para que fosse possível se modelar uma análise de estabilidade realista, seria, a princípio, necessário se conhecer o grau de saturação do solo em todo o talude analisado.

Dessa forma, é possível se argumentar que antes de entender o impacto da sucção nas condições de estabilidade do talude, é importante definir seu valor correto através da curva de sucção e do grau de saturação do solo

Contudo, a aferição direta do grau de saturação ao longo de um talude pode ser um desafio, uma vez que além de variar com tempo considerando condições como pluviosidade e temperatura, esse valor também difere de ponto a ponto na grande maioria das situações.

Tendo em vista as possíveis limitações que podem dificultar uma campanha de aferição direta do grau de saturação em tempo real, se torna evidente a importância de simulações de fluxo que, com base em propriedades conhecidas do solo permitam prever o grau de saturação em diferentes situações e por consequência a intensidade da sucção.

Uma vez definido o valor da sucção, controlado pelas condições de fluxo locais, é necessário se entender sua influência na estabilidade. Nesse aspecto, Leong et al. (2001) faz um resumo sobre as aplicações da mecânica de solos não saturados na engenharia geotécnica. Neste trabalho é citado, entre outros aspectos, a adaptação do critério de ruptura de Mohr Coulomb para englobar os efeitos da sucção, originalmente proposta por Fredlund et al (1978), como apresentado na Equação 2.1, cuja representação gráfica é apresentada na Figura 2.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2.1)$$

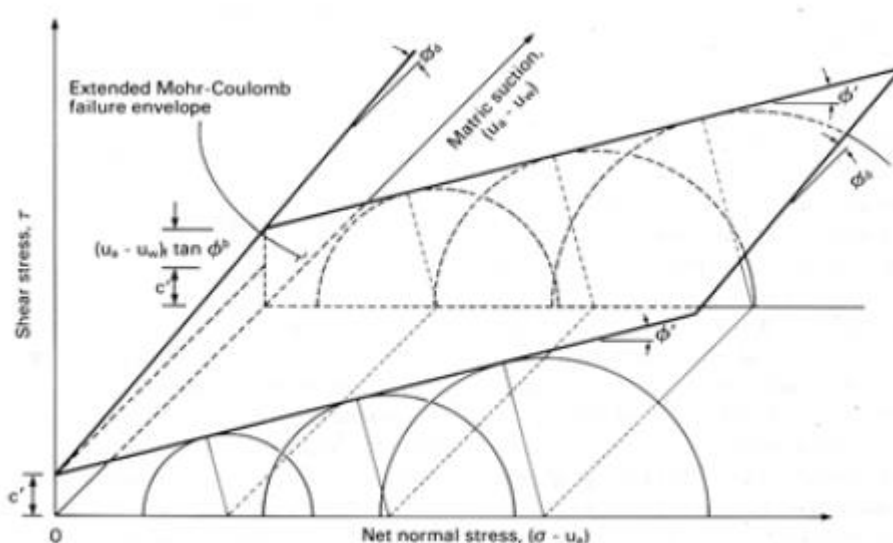


Figura 2 – Representação gráfica do critério de Mohr Coulomb estendido para solos não saturados (modificado de Leong Jr. et al., 2001).

Ainda na Equação 2,1, destaca-se que a maioria dos termos constitui uma grandeza física real ou uma definição bastante difundida no meio geotécnico, com exceção do parâmetro ϕ^b , que é o ângulo que descreve o aumento da resistência ao cisalhamento em função da sucção.

Por fim, é válido ressaltar que para solos saturados o efeito da sucção é teoricamente igual ao efeito das tensões totais líquidas, resultando no critério de Mohr Coulomb utilizado para solos saturados, que é a forma mais conhecida, conforme apresentado na Equação 2.2.

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (2.2)$$

2.3.2

Comparação de análises de estabilidade em modelos 2D e 3D

Ao se observar a bibliografia disponível sobre análises de estabilidade em encostas percebe-se que, historicamente, é mais frequente a interpretação dos problemas através da modelagem 2D, apesar dos modelos 3D serem intuitivamente mais representativos da condição observada em campo.

Isto é justificado no fato de que o início dos estudos sobre estabilidade de taludes data de um período no qual não havia tecnologia disponível para modelar detalhadamente estas soluções, de forma que era necessária a adoção de modelos simplificados, compatíveis com a ausência de ferramentas computacionais.

Apesar da crescente evolução da capacidade de processamento dos computadores ter popularizado a utilização de análises de estabilidade 3D, os modelos 2D ainda são os mais aceitos na maioria das utilizações, uma vez que esses já foram consagrados por um grande número de estudos ao longo dos anos.

Tendo em vista as premissas supracitadas, se torna necessário se entender a relação entre os resultados obtidos nos diferentes tipos de análise, para que seja possível adaptar as práticas e normas já consagradas pelos modelos 2D à simulação mais fiel presente em 3D.

Gitirana et al. (2008) documentou acréscimos de 18% a 29% nos fatores de segurança ao comparar modelos 3D com a análise 2D originalmente realizada por Svelsdon (1956) para a ruptura de Lodalen, que ocorreu em uma estação de triagem localizada a menos de 4km a leste da estação ferroviária “Oslo East”, na Noruega.

Bar & Weekes (2017) ainda destacam o fato de que as análises 3D possibilitam uma representação mais realista de heterogeneidades presentes no talude, especialmente em taludes rochosos onde a presença de estruturas geológicas tem um grande impacto. Este trabalho comparou análises 2D e 3D em diversos taludes rochosos e em todos houve um acréscimo no fator de segurança ao se considerar os elementos tridimensionais. Contudo, a ordem de grandeza dessa variação foi diferente em cada caso.

Chaudhary et al. (2016), realizou análises em taludes hipotéticos considerando diferentes parâmetros de resistência e configurações de talude côncavas, convexas e planas. A Figura 3 apresenta as configurações geométricas utilizadas para os taludes hipotéticos avaliados. É importante se destacar que do ponto de vista 2D todas as seções consideradas são idênticas, de forma que o trabalho citado teve seu enfoque em executar uma análise de sensibilidade, avaliando os efeitos da variação da forma 3D sobre a estabilidade.

Para os taludes côncavos e convexas foram consideradas duas possibilidades para o ângulo “ α ” que define sua concavidade, sendo adotados os valores de $\alpha = \pm 22,5^\circ$ e $\alpha = \pm 45^\circ$.

As condições de saturação e fluxo foram definidas como únicas para todos os modelos sendo considerada uma condição de fluxo permanente com linha freática pré-determinada, como é possível observar na Figura 4, que exibe a seção 2D compartilhada por todas as geometrias.

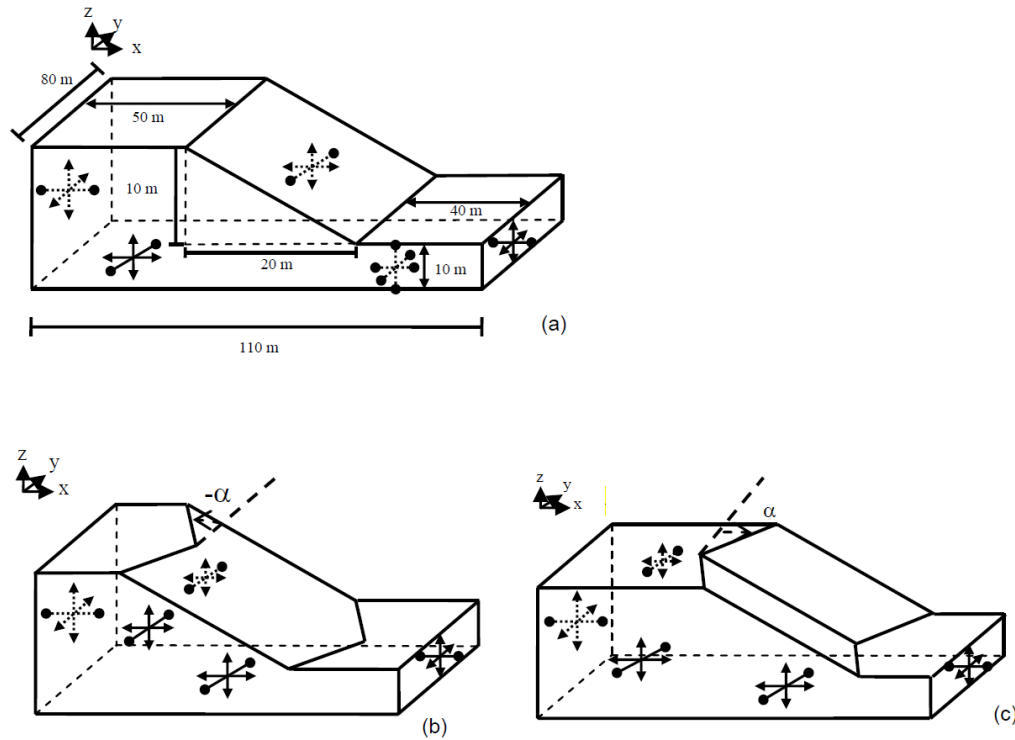


Figura 3 – Geometria de talude avaliadas (a) talude plano, (b) talude convexo, (c) talude convexo (Chaudhary et al., 2016).

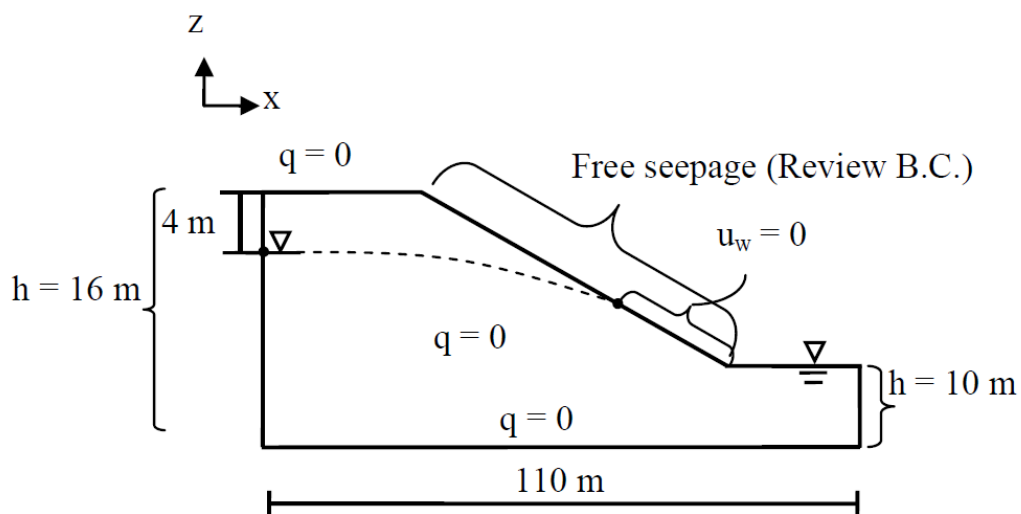


Figura 4 – Seção 2D compartilhada por todos os modelos 3D (Chaudhary et al., 2016).

No que tange aos parâmetros de resistência, Chaudhary et al. (2016) consideraram o solo como uma massa homogênea, com parâmetros variando conforme apresentado na Tabela 1, que exhibe os parâmetros em conjunto com as formas de talude consideradas, criando 48 cenários possíveis de análises de estabilidade. As análises de estabilidade expostas no trabalho citado foram

realizadas segundo o método de equilíbrio geral (GLE), descrito por Fredlund et al. (1981).

Tabela 1 – Parâmetros de resistência considerados por Chaudhary et al. (2016).

Slope aspect angle (α) Case identifier					Soil Properties		
Convex	Plane	Concave					
-45°	-22.5°	0°	22.5°	45°	c'	ϕ'	ϕ^b
1a	1b	1c	1d	1e	10	10	5
2a	2b	2c	2d	2e	10	20	10
3a	3b	3c	3d	3e	10	30	20
4a	4b	4c	4d	4e	20	10	5
5a	5b	5c	5d	5e	20	20	10
6a	6b	6c	6d	6e	20	30	20
7a	7b	7c	7d	7e	30	10	5
8a	8b	8c	8d	8e	30	20	10
9a	9b	9c	9d	9e	30	30	20
10a	10b	10c	10d	10e	40	10	5
11a	11b	11c	11d	11e	40	20	10
12a	12b	12c	12d	12e	40	30	20

Conforme observado na Figura 5, os resultados obtidos por Chaudhary et al. (2016) apontaram que independentemente da parametrização adotada para o solo, houve um acréscimo no fator de segurança tanto nos taludes côncavos quanto nos taludes convexos comparados ao talude plano, sendo este maior para os taludes côncavos.

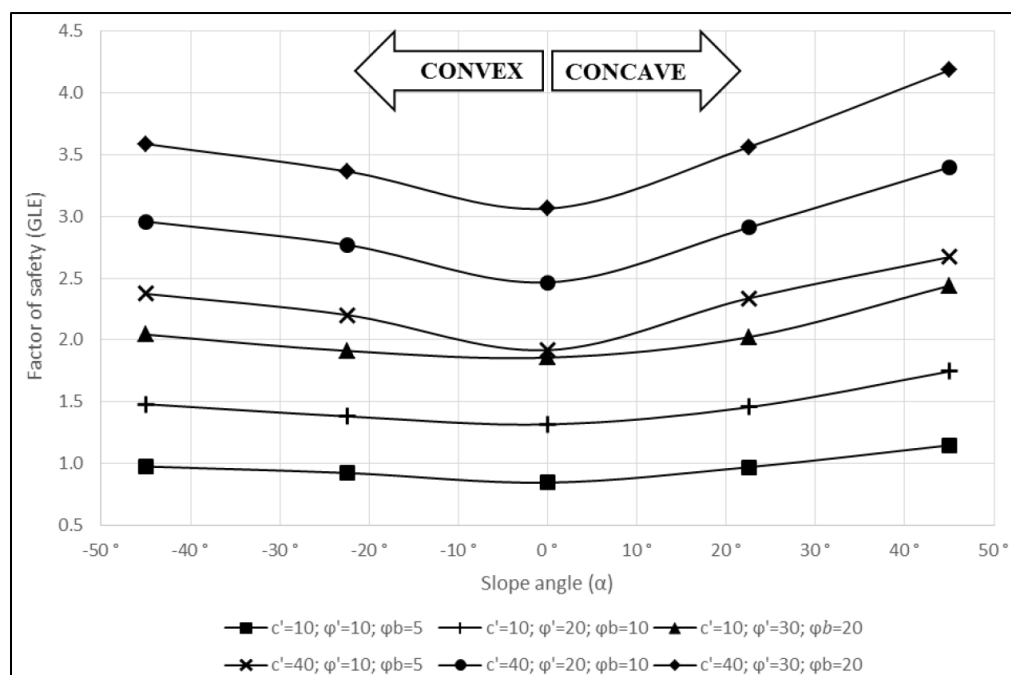


Figura 5 – Geometria de talude avaliadas (a) talude plano, (b) talude convexo, (c) talude convexo (Chaudhary et al., 2016).

Além das comparações de fatores de segurança 2D e 3D em análises de equilíbrio de equilíbrio tais quais as apresentadas anteriormente, também são encontrados na bibliografia trabalhos que comparam os fatores de segurança 2D e 3D de taludes em análises utilizando métodos numéricos, como os estudos desenvolvidos por Gómez et al. (2016), que apontaram um maior fator de segurança em análises em 3D em do que em análises 2D com a utilização de elementos finitos, situação semelhante à observada nas análises por equilíbrio limite, conforme exposto na Figura 6.

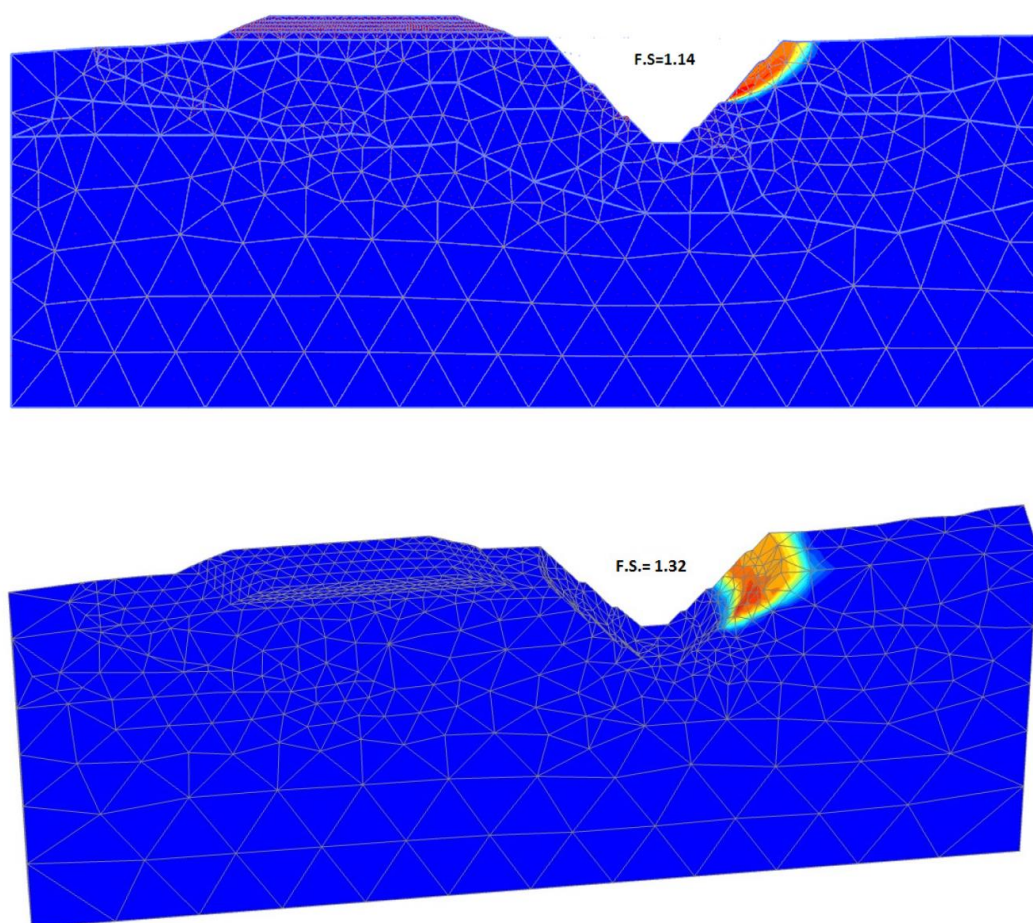


Figura 6 – Comparação dos fatores de segurança resultantes de análises de estabilidade 2D e 3D, respectivamente, obtidos com o método dos elementos finitos (Gómez et al., 2016).

Com base nos dados já exibidos nesse tópico seria de se esperar que a análise 3D sempre resultasse em fatores de segurança mais altos que a 2D. Contudo, embora não seja usual, situações específicas envolvendo condições de fluxo podem condicionar um menor fator de segurança na análise 2D em comparação com análise 3D, como foi o caso da ruptura no aterro de resíduos da Kettleman Hills, localizado no Estado da Califórnia do Estados Unidos.

A ruptura ocorreu no dia 19 de março de 1988 e conforme descrito por Mitchell et al. (1993), existiam forças atuantes nas laterais do maciço cujas componentes geravam esforços mobilizantes que não eram devidamente representados por análises 2D. A Figura 7 apresenta um esquema da geometria na qual se desenvolveu a ruptura, enquanto a Figura 8 apresenta um resumo das forças e deslocamentos envolvidos.

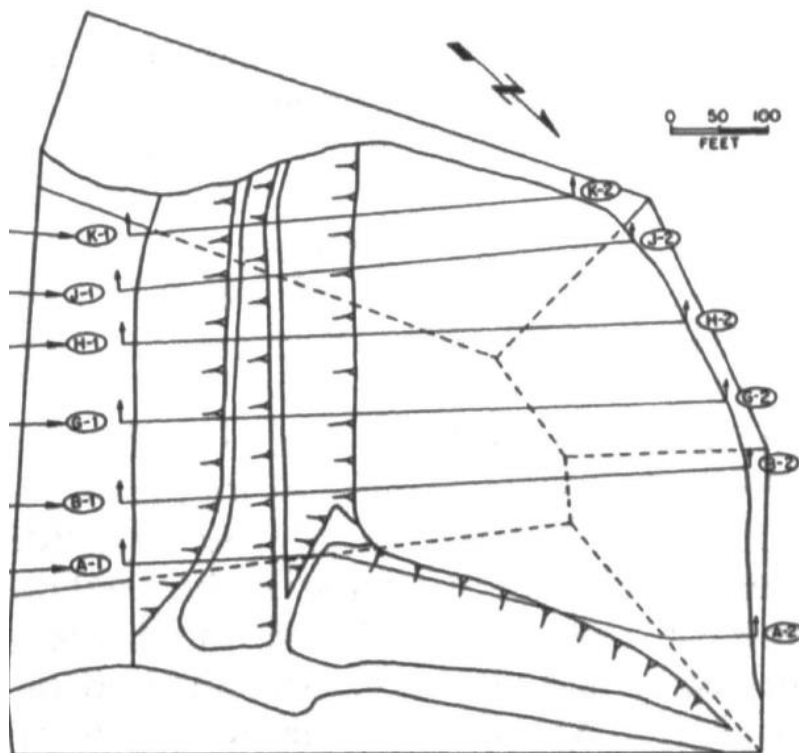


Figura 7 – Geometria do maciço onde se desenvolveu o maciço (Mitchell et al, 1993).

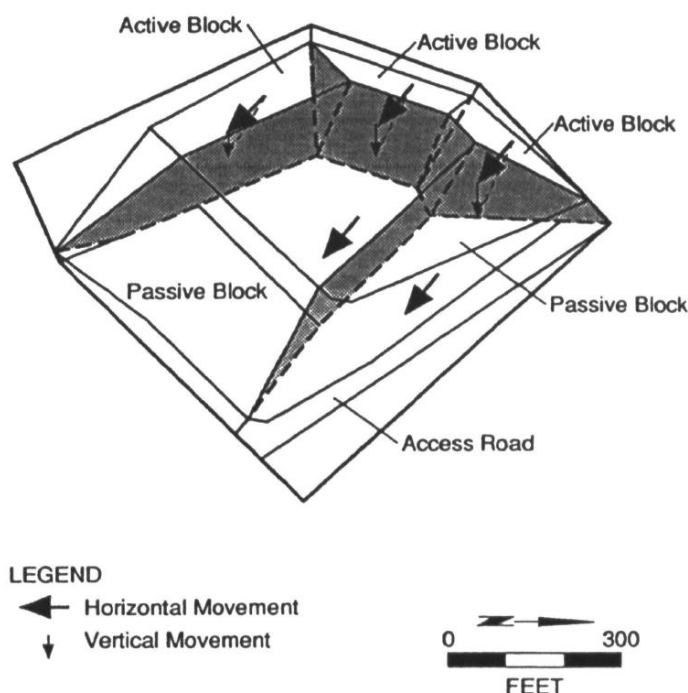


Figura 8 – Resumo das forças e deslocamentos atuantes no movimento de massa descrito (Bryne et al., 1992).

As análises 2D apresentaram fatores de segurança variando de 1,25 a 1,1 de forma que estes valores apesar de baixos não justificavam a ruptura e somente nas análises 3D foram encontrados valores que variavam de 1,08 a 1,01, estes sim sendo representativos da situação observada, conforme analisado por Seed et al. (1990).

A partir da revisão apresentada no presente tópico é possível concluir que, as análises 2D e 3D diferem em vários aspectos, e embora exista uma tendência do fator de segurança 3D ser maior, tal qual exposto por Gitirana et al. (2008) e Chaudhary et al. (2016), existem casos particulares onde o fator de segurança será semelhante, como nos casos de talude plano de material homogêneo descrito por Chaudhary et al. (2016), ou mesmo superior, conforme descrito no estudo de caso específico de Seed et al. (1990).

Conforme descrito por Mitchell et al. (1993) o que definirá se a adição dos elementos tridimensionais aumentará ou diminuirá o fator de segurança será a diferença entre as forças mobilizantes adicionadas ser maior ou menor que a resistência extra conferida pelas diferenças no tamanho e na superfície da massa a ser rompida. No caso específico da ruptura de Kettle Hills o baixo atrito entre

algumas das camadas de base da estrutura do aterro foi um dos principais condicionantes do fator de segurança tridimensional ser mais baixo.

Dessa forma recomenda-se que diante de um novo problema envolvendo análises de estabilidade o bom profissional geotécnico execute tanto análises em 2D quanto em 3D caso a situação permita, pois, a própria diferença entre os resultados promoverá um maior entendimento do caso em questão.

3

Dados de entrada

Para que seja possível avaliar um maior número de cenários envolvendo diferentes perfis de sucção inicial, o presente trabalho realiza análises que partem de valores de poropressão hipotéticos. Apesar destes valores iniciais serem simulados, é importante, para que o resultado seja condizente com a realidade, que os demais dados sejam representativos de situações reais previamente estudadas. Desta forma, serão apresentados neste tópico os dados de entrada utilizados nas análises de estabilidade e fluxo.

Os dados escolhidos derivam de estudos e registros desenvolvidos na região serrana do Estado Rio de Janeiro. Este local foi escolhido para fonte dos parâmetros inseridos nas análises devido ao seu longo histórico envolvendo movimentos de massa em encostas. Dentre tais eventos destacam-se os movimentos de massa que ocorreram em janeiro de 2011, tal evento, denominado pelo Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ) como Megadesastre '11, deixou mais de 20,000 desabrigado e causou cerca de 1000 óbitos, com mais de 400 desaparecidos.

Desta forma, considerando o grande impacto econômico e social deste desastre, seus mecanismos de ruptura e o grande número de publicações resultantes, considerou-se as condições envolvidas como ideais para embasar as análises deste trabalho.

Nesse contexto, as propriedades do solo e geometria do talude derivaram dos estudos de mecanismos de ruptura associados aos escorregamentos da Prainha e Condomínio do Lago no Município de Nova Friburgo desenvolvidos por de Oliveira (2013), enquanto os dados climatológicos advieram dos registros de estações climáticas na região.

3.1

Geometria do talude e propriedades do solo

De Oliveira (2013) teve como objeto de estudo duas localidades, denominadas condomínio do Lago e comunidade Prainha, no Distrito da Conquista, ambas as localidades atingidas pelos escorregamentos que ocorreram

em Nova Friburgo na madrugada do dia 12 de janeiro de 2011. A Figura 9 apresenta a localização dos pontos descritos.



Figura 9 – Localização de Condomínio do Lago e Comunidade Prainha (de Oliveira, 2013).

No que tange ao contexto geológico, de Oliveira (2013) descreve que nas localidades do estudo o embasamento rochoso é formado por granitoides que estão inseridos no contexto regional das unidades Granito Nova Friburgo e Complexo Rio Negro.

Com relação aos dados de entrada para o presente trabalho foi escolhida a localidade do Condomínio do Lago como principal fonte de informações. A Figura 10 ilustra o estado da localidade em questão após a ocorrência dos movimentos de massa.

Tal como descrito por de Oliveira (2013), uma das principais causas deste movimento de massa foi a perda da resistência conferida pela coesão aparente, uma vez que os eventos de chuvas extremas ocorridos nos dias 11 e 12 de janeiro afetaram a distribuição da poropressão no solo desencadeando os processos de instabilização.



Figura 10 – Estado do Condomínio do Lago após os deslizamentos (de Oliveira, 2013).

3.1.1 Propriedades geotécnicas do solo

Os dados de entrada referentes as propriedades do solo também foram provenientes dos estudos desenvolvidos por de Oliveira (2013), que os determinou através de uma campanha de ensaios *in situ* e em laboratório. Não serão abordadas neste tópico todas as análises apresentadas no trabalho supracitado, apenas aquelas cujos resultados foram inseridos como parâmetros de entrada durante as análises.

Para subsidiar os ensaios de laboratório de Oliveira (2013) realizou uma campanha de amostragem que englobou a Comunidade Prainha, e o Condomínio do Lago. Nestes pontos foram coletadas tanto amostras amolgadas quanto indeformadas em diferentes profundidades. A coleta foi realizada com o auxílio de trincheiras.

As amostras coletadas na Comunidade Prainha foram denominadas F01 e F03, enquanto as amostras coletadas no Condomínio do Lago foram denominadas F02 e F04. Os pontos de coleta das amostras são ilustrados na Figura 11 e as datas e profundidades de coleta são apresentadas na Tabela 2.

Como dados de entrada para as análises deste trabalho optou-se por utilizar somente os dados advindos do Condomínio do Lago, desta forma, a amostra F02 foi denominada como “solo maduro” e a amostra F04 foi denominada “solo jovem”, nomenclaturas estas que serão utilizadas doravante. As divisões das camadas em solo jovem e maduro se basearam principalmente nas análises tátil-visuais apresentadas por de Oliveira (2013).

Tabela 2 - Profundidade e data de coleta das amostras (de Oliveira, 2013).

Amostra	Profundidade (m)	Data de coleta	Dimensões (cm³)
F.01	1,5 a 2 metros	10/03/2012	40x40x40
		05/10/2012	
F.02	1,5 a 2 metros	10/03/2012	40x40x40
		05/10/2012	
F.03	2 a 3 metros	10/03/2012	40x40x40
		05/10/2012	
F.04	2 a 3 metros	10/03/2012	40x40x40
		05/10/2012	

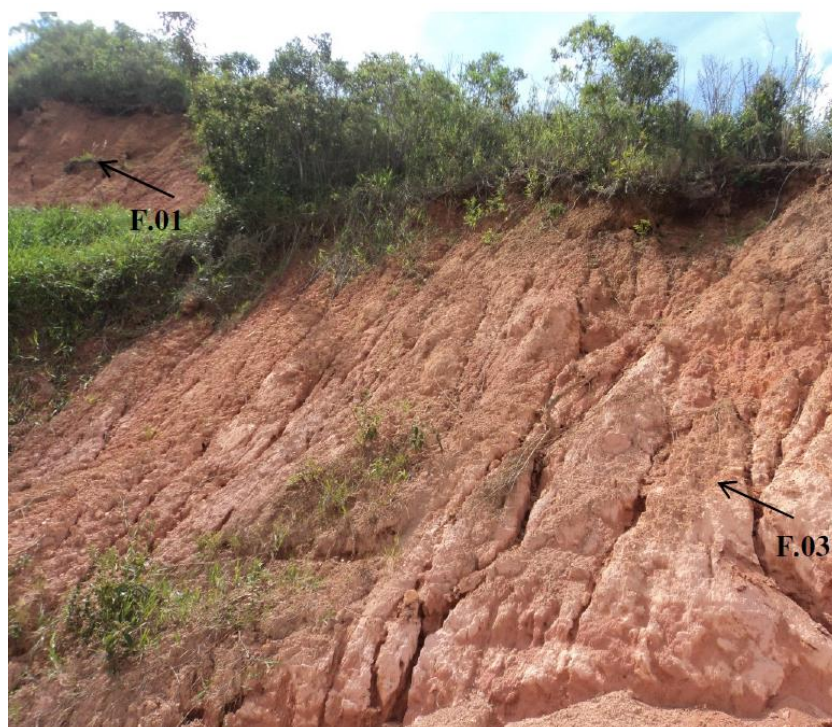


Figura 11 – Pontos de coleta de amostras (de Oliveira, 2013).

Os dados de entrada inseridos nas análises podem ser subdivididos em dois grupos o primeiro relacionado às propriedades hidráulicas no solo e o segundo relacionado a resistência ao cisalhamento.

Os parâmetros de entrada referentes às propriedades hidráulicas foram subsidiados pela caracterização física, pelos ensaios de permeabilidade *in situ* e pelos ensaios para obtenção da curva de retenção de umidade executados por de Oliveira (2013). Os ensaios de caracterização física foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio (LGMA) seguindo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e seus resultados estão apresentados na Tabela 3

Tabela 3 – Índices físicos (de Oliveira, 2013).

Amostra	Material	G _s	γ_{nat} (kN/m ³)	W _{nat} (%)	γ_d (kN/m ³)	e (%)	n (%)	S (%)
F02	Solo maduro	2,65	16,21	21,65	13,33	0,95	48,65	59,30
F04	Solo Jovem	2,67	15,91	15,66	13,76	0,90	47,43	45,42

A permeabilidade *in situ* foi determinada com o auxílio de um Permeâmetro de Guelph, que é um equipamento composto por um frasco de Mariotte, que mantém a carga constante dentro do furo, onde água é gradualmente introduzida, conforme o fluido presente no furo permeia para o solo. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos por de Oliveira (2013) para este ensaio.

Tabela 4 – Resultado do ensaio de permeabilidade (de Oliveira, 2013).

Amostra	Material	K _{sat} (Guelph) (cm/s)
F02	Solo maduro	4,52E-03
F04	Solo Jovem	1,00E-04

Por fim, de Oliveira (2013) também executou ensaios para determinação da curva de retenção de umidade, sendo estes realizados utilizando a técnica do papel filtro, método que se baseia na propriedade de meios porosos absorver ou perder água ao entrarem em equilíbrio de pressão quando estão em ambiente fechado seja em contato direto ou não.

Como descrito por Lopes (2006), neste método o ponto de equilíbrio é atingido quando fluxo de fluido cessa, sendo os valores de umidade do solo e do papel filtro diferentes para este ponto, porém com mesma sucção, e uma vez que o papel filtro utilizado no ensaio é constituído de um material cuja curva de retenção de umidade já é conhecida é possível determinar a curva de retenção do solo. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos por de Oliveira (2013).

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de determinação da curva de retenção de umidade (de Oliveira, 2013).

F02 (solo maduro)		F04 (solo jovem)	
Sucção média (kPa)	θ (%)	Sucção média (kPa)	θ (%)
79310.29	0.06	9161.45	2.84
44632.54	0.11	978.37	5.3
15946.32	0.17	258.65	9.64
3080.12	0.22	64.45	13
372.51	0.22	37.63	15.68
65.81	0.32	16.74	18.55
47.28	0.35	9.54	22.57
39.15	0.37	5.31	26.89
45.90	0.34	4.61	29.23
37.12	0.37	2.00	35.83
45.15	0.31		

A modelagem hidráulica da estratigrafia foi construída de forma que o solo foi dividido em duas camadas, sendo a superior denominada “solo maduro”, e a inferior “solo jovem”. Os detalhes desta divisão serão apresentados no próximo tópico referente à modelagem geométrica.

Dessa forma, tendo como dados de entrada os resultados supracitados, foi possível construir, utilizando o *software* SVFlux-GE pertencente ao pacote SVOOffice, duas curvas de retenção de umidade distintas. A primeira referente ao “solo maduro” foi confeccionada a partir dos dados da amostra F,02, utilizando o ajuste bimodal de Fredlund (2000), conforme exposto na Figura 12. Já na segunda, referente ao “solo jovem”, os dados de entrada foram aqueles referentes a amostra F,04 e o ajuste utilizado na curva foi o proposto por Van Genuchten (1980) e Mualem (1976), tal qual exposto na Figura 13.

Uma vez definidas as curvas de retenção de umidade, a função de permeabilidade não saturada foi estimada pelo SVFlux-GE com base na curva citada e na permeabilidade saturada advinda dos ensaios de permeabilidade *in situ*. As funções de permeabilidade dos solos jovem e maduro são apresentadas nas

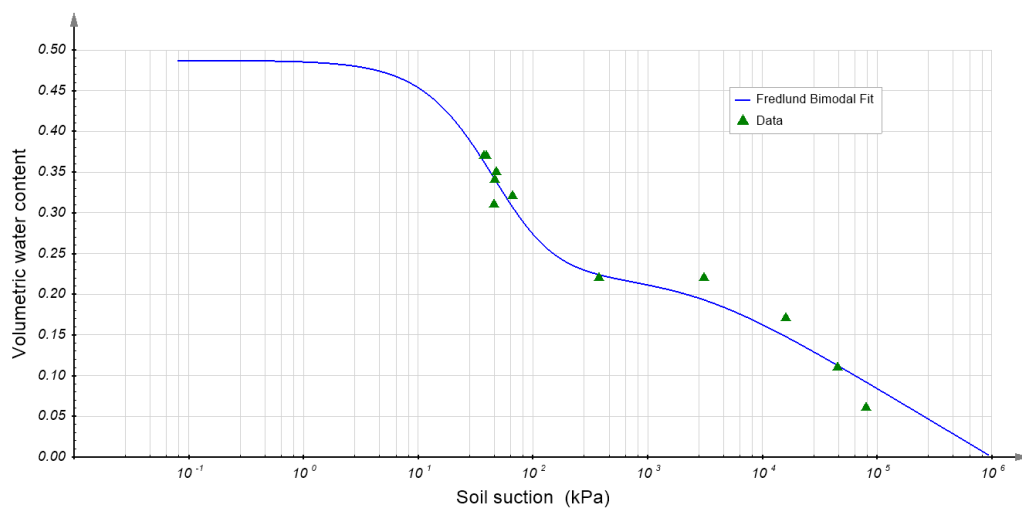


Figura 12 – Curva de retenção de umidade referente a amostra F02 (solo maduro).

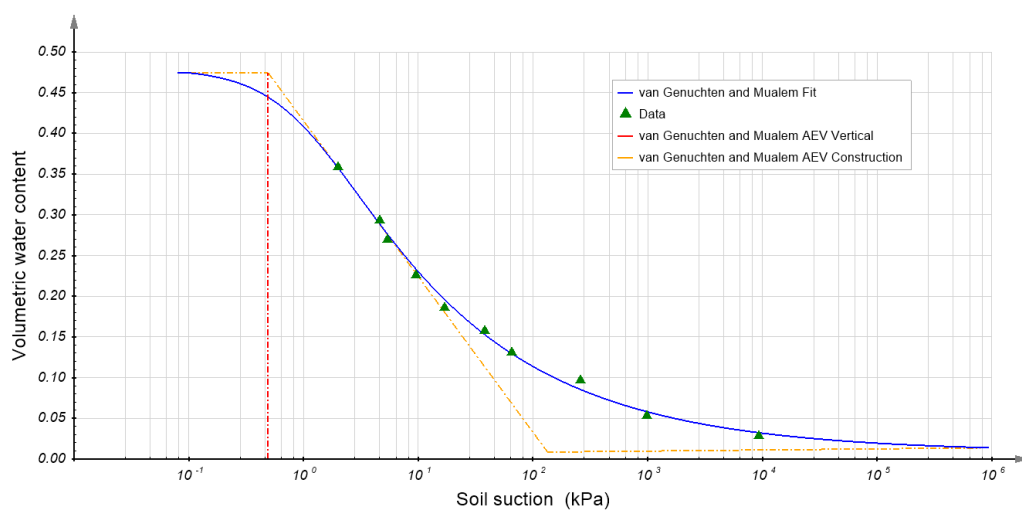


Figura 13 – Curva de retenção de umidade referente a amostra F04 (solo jovem).

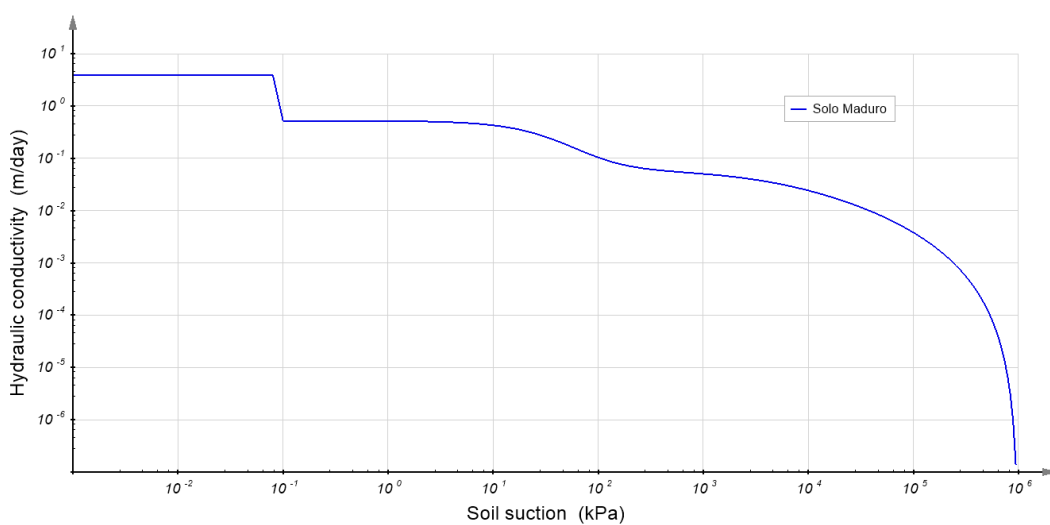


Figura 14 – Função de permeabilidade referente a amostra F02 (solo maduro).

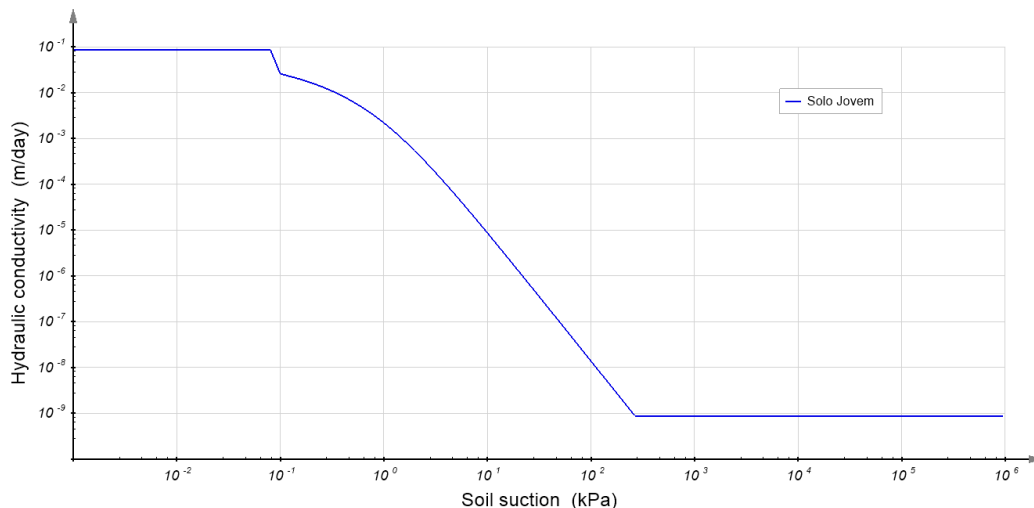


Figura 15 – Função de permeabilidade referente a amostra F04 (solo jovem).

No que tange aos parâmetros de resistência do solo, de Oliveira (2013) os definiu a partir de ensaios de cisalhamento direto inundados, sendo, desta forma, compostos por uma primeira fase de adensamento seguida por uma outra de cisalhamento.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios, exibindo os parâmetros médios utilizados como dados de entrada. A média dos parâmetros das amostras F,01 e F,02 foi utilizada como *input* da resistência do “solo maduro”, já a média das amostras F,03 e F,04 foi referente ao “solo jovem”

Tabela 6 – Resultados médios dos ensaios de cisalhamento direto utilizados como dados de entrada (de Oliveira, 2013).

Amostra	Material	c'	ϕ'	R^2
F01 e F02	Solo maduro	2,66	26,04	0,95
F03 e F04	Solo jovem	0,00	36,72	0,98

3.1.2 Geometria

A geometria utilizada nas análises foi baseada em uma reprodução da encosta presente no condomínio do Lago antes dos movimentos de massa ocorrerem, situação ilustrada pela Figura 16.



Figura 16 – Condomínio do Lago antes de ocorrerem os movimentos de massa (de Oliveira 2013).

Conforme observado, a área supracitada é caracterizada por relevo com o topo arredondado e uma encosta que possui aproximadamente 70m de altura e 60° de inclinação.

Uma vez que os estudos de de Oliveira (2013) foram desenvolvidos após os deslizamentos já terem ocorrido, esta definiu a geometria através de uma reconstituição tendo como base o volume de material deslizado, a área da cicatriz e as sondagens executadas no local. Estas modelagens resultaram no perfil central exibido na Figura 17, cuja geometria serviu de base para as análises 2D apresentadas neste trabalho.

A estratigrafia originalmente proposta por de Oliveira (2013) era constituída por uma intercalação de quatro camadas, tendo suas propriedades advindas tanto dos ensaios realizados nas amostras do Condomínio do Lago, quanto da Comunidade Prainha, tal qual exposto na Figura 18.

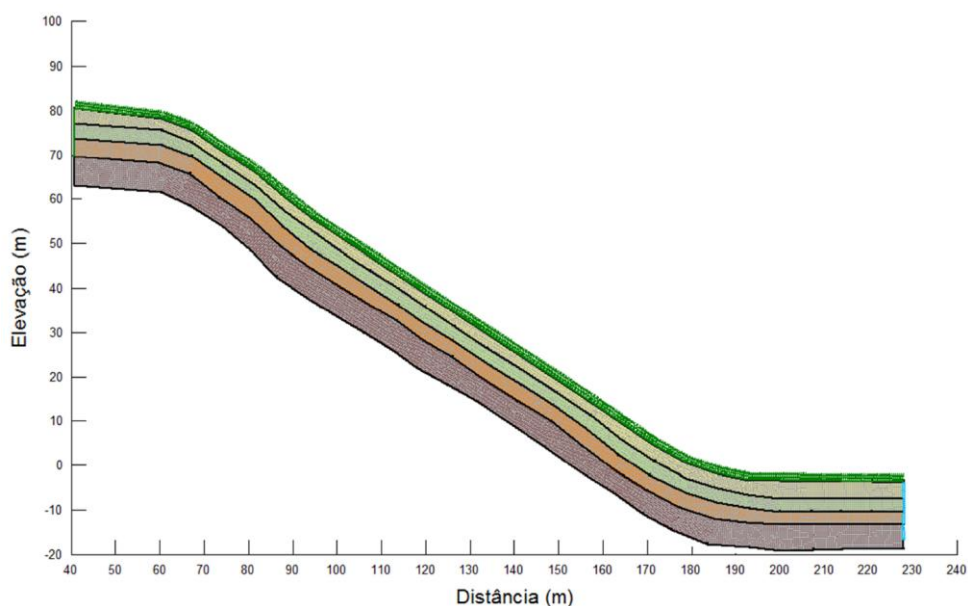


Figura 17 – Geometria 2D original modelada por de Oliveira (2013).

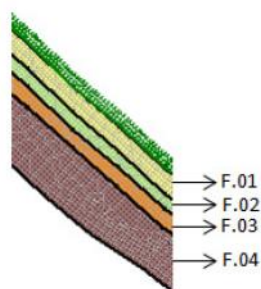


Figura 18 – Estratigrafia original das camadas modeladas por de Oliveira (2013).

Para compor os dados de entrada do presente trabalho o perfil 2D foi construído com uma geometria semelhante, mas a estratigrafia foi modificada para considerar somente os dados advindos do Condomínio do Lago, sendo a única exceção a resistência ao cisalhamento onde foram considerados na camada superior, denominada “solo maduro”, como a média das amostras F01 e F02 e na camada inferior, denominada “solo jovem” com a média das amostras F03 e F04. A Figura 19 apresenta a geometria final bidimensional inserida no SVFlux-GE do pacote SVOoffice.

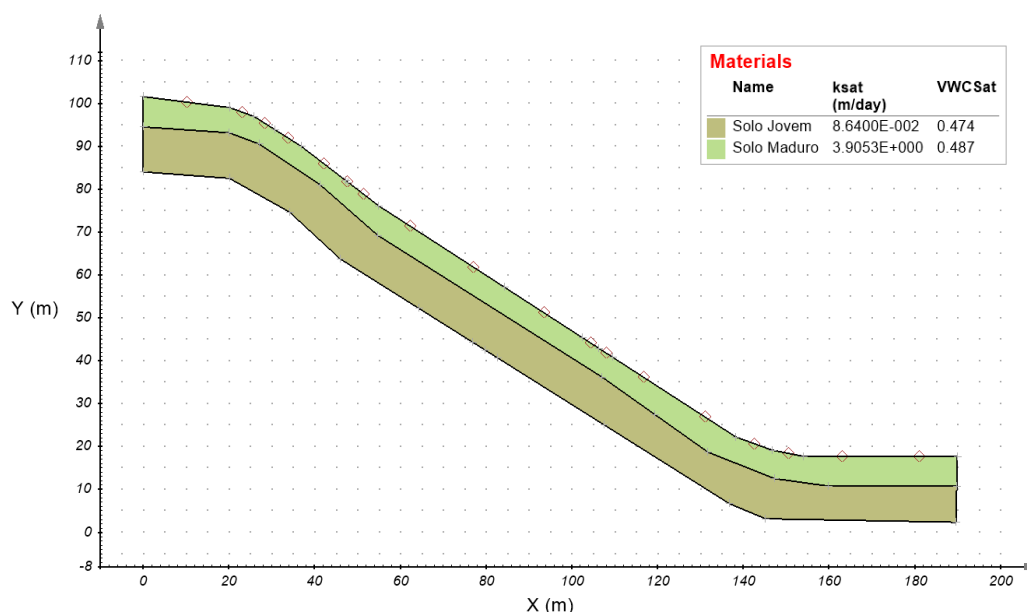


Figura 19 – Geometria utilizada nas análises bidimensionais.

No que tange à geometria referente às análises 3D, embora o perfil central tenha se mantido o mesmo, o restante da geometria não foi baseada em uma configuração de talude existente, mas sim em situações hipotéticas para se verificar possíveis diferenças no comportamento de encostas planas, côncavas e convexas frente à distribuição de sucção em relação a condições climáticas, considerações que serão detalhadas posteriormente neste trabalho.

3.2

Dados climatológicos

Uma vez que o trabalho busca entender como se comporta a distribuição de sucção em uma encosta não saturada exposta a um evento pluviométrico intenso, como o registrado em janeiro de 2011 na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, é necessário que diferentes perfis iniciais de sucção sejam expostos a longos ciclos de precipitação e evaporação para se entender qual a influência da sucção inicial na distribuição de poropressões final.

Com base nas premissas apresentadas, foi determinado um período de aproximadamente um ano antes dos eventos que ocorreram na região serrana para se estudar como as distribuições iniciais de sucção evoluíram expostas às condições climáticas até o evento. Nestas circunstâncias foram considerados como dados de entrada informações climatológicas de pluviometria, evaporação

e temperatura referentes ao período de 01/02/2010 a 31/01/2011 conforme detalhado a seguir.

3.2.1 Pluviometria

Os dados pluviométricos que abasteceram os modelos foram obtidos no Sistema Nacional de Informações sobre Recurso Hídricos (SNIRH) sob gerência da Agência Nacional de Águas (ANA). Este sistema oferece acesso ao banco de dados coletados pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH) e suas informações podem ser acessadas online através do Portal HidroWeb.

Neste portal foram coletadas informações advindas da estação pluviométrica Fazenda Mendes, estação mais próxima ao Condomínio do Lago que possuía registros referentes ao período desejado. A Figura 20 apresenta a localização desta estação e sua posição em relação ao Condomínio do Lago.

A Figura 21 apresenta um gráfico com o resumo dos dados de entrada referente à pluviometria, provenientes da estação supracitada, enquanto estes parâmetros de entradas detalhados são expostos no Apêndice A. Os dados foram inseridos como taxas de precipitação diárias, com unidade de entrada no programa em $\text{m}^3/\text{dia}/\text{m}^2$, que equivale a 1/1000 da unidade em mm comumente empregada.

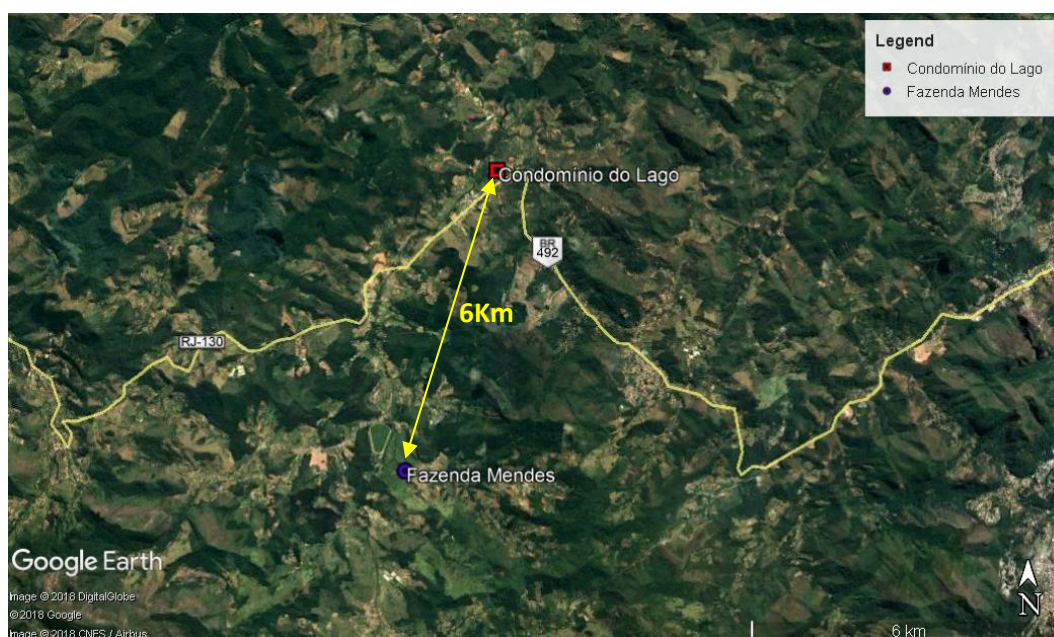


Figura 20 – Localização da estação pluviométrica Fazenda Mendes.

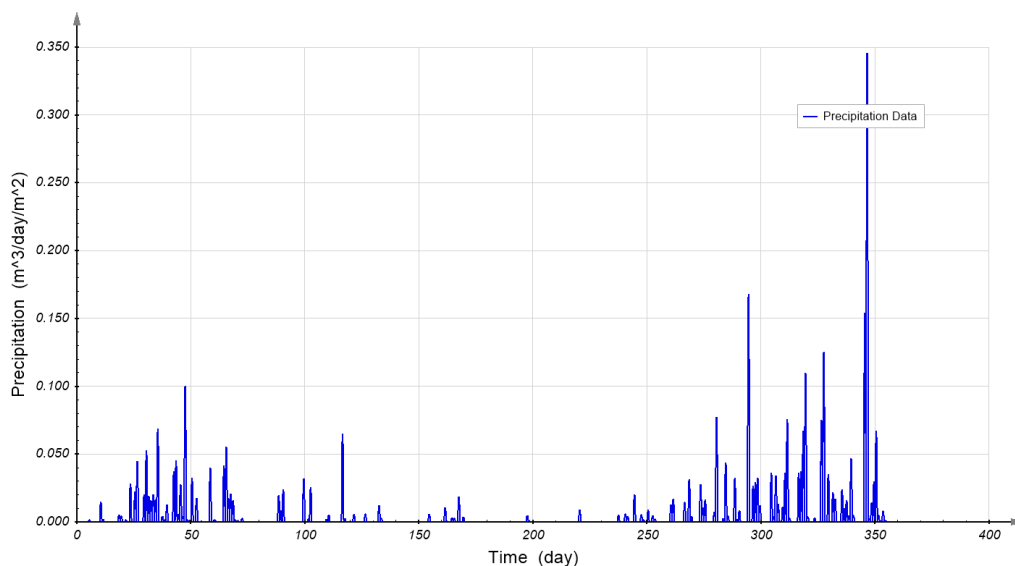


Figura 21 – Dados de pluviosimetria advindos da estação Fazenda Mendes.

3.2.2 Evaporação e temperatura

Assim como ocorreu com a pluviosimetria, os dados de entrada referentes a evaporação e temperatura do ar foram obtidos a partir de registros em estações climatológicas da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Neste caso, os dados foram obtidos a partir de informações disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo estas advindas de uma estação climatológica localizada no Município de Cordeiro. A localização desta estação é apresentada na Figura 22.

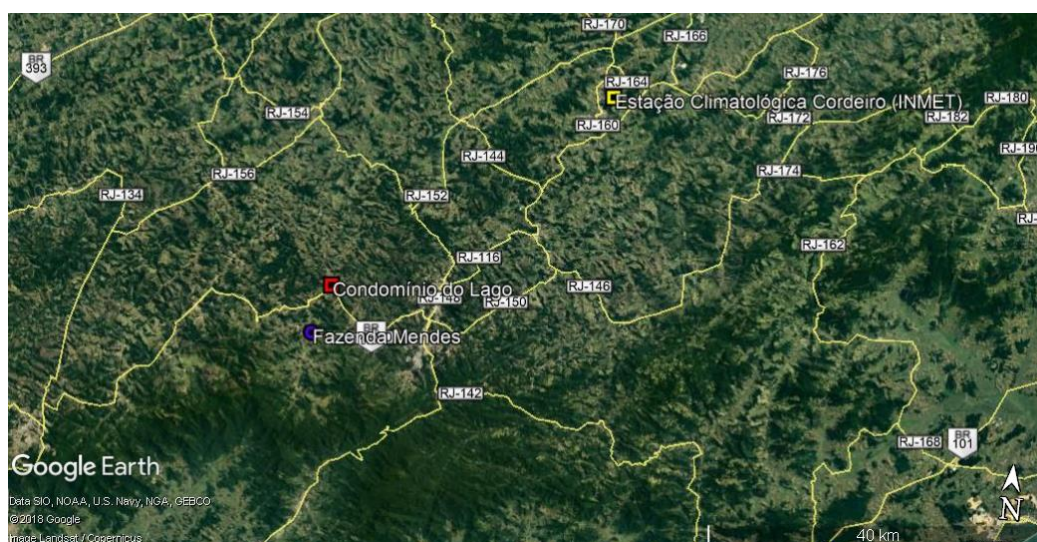


Figura 22 – Localização da estação climatológica de Cordeiro.

Nesta estação, os valores de evaporação potencial foram determinados com o Evaporímetro de Piche que é constituído por um tubo cilíndrico de vidro com 25 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro, a extremidade superior do tubo é fechada com o próprio vidro, enquanto na sua extremidade inferior há um disco de papel poroso fixado com uma presilha, conforme esquema apresentado na Figura 23. Neste instrumento, a evaporação é medida pelo nível de água dentro do tubo.

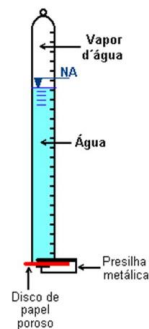


Figura 23 – Representação esquemática do Evaporímetro de Piche (SoilControl).

É importante destacar que mesmo já tendo em mãos os resultados referentes a evaporação potencial, a temperatura do ar também foi um dos *inputs* dados no SVFlux-GE uma vez que esta afeta a temperatura da superfície do solo, o que tem influência sobre os valores de evaporação real calculados no *software*. As Figuras 24 e 25 apresentam gráficos contendo um resumo dados de entrada de evaporação potencial e temperatura, respectivamente, enquanto o Apêndice B detalha tais dados.

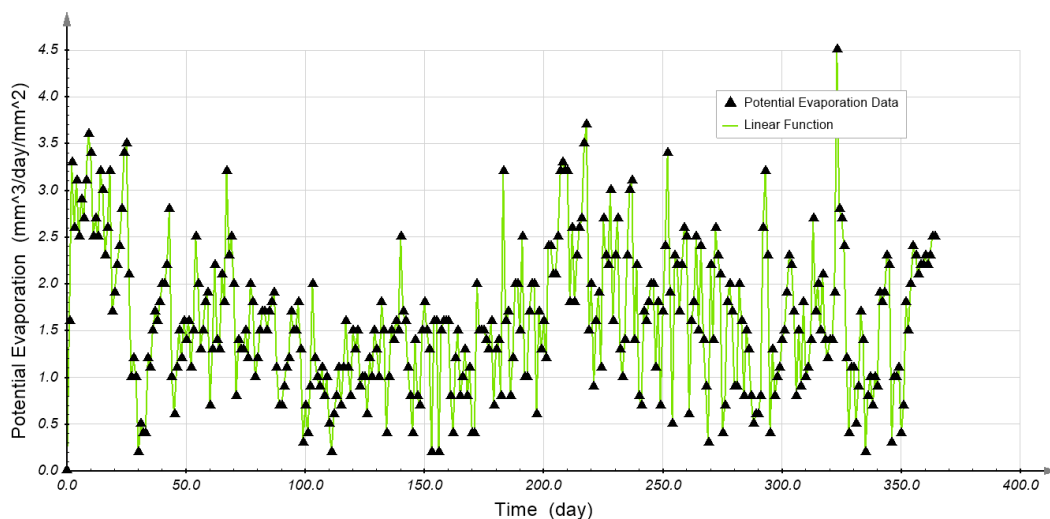


Figura 24 – Dados de evaporação potencial advindos da estação Fazenda Mendes.

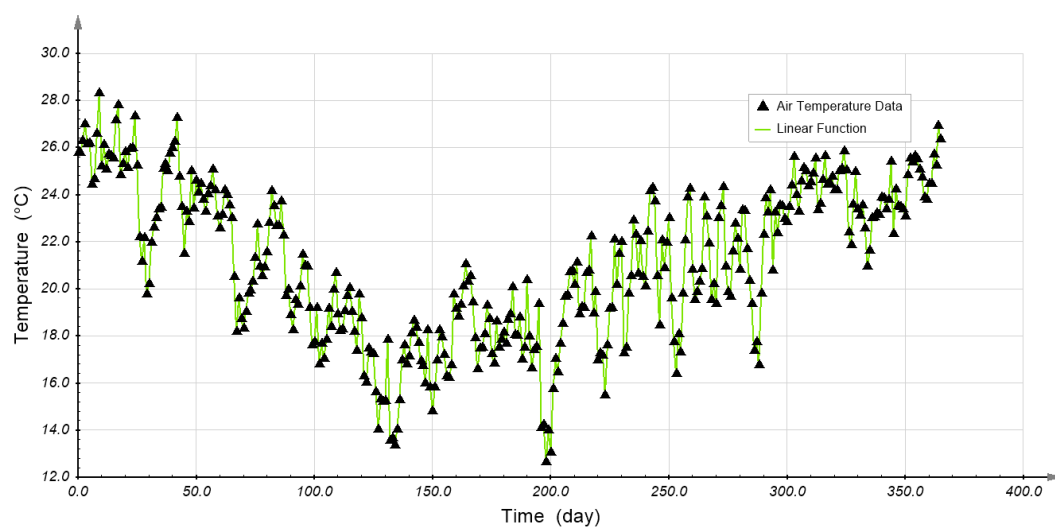


Figura 25 – Dados de temperatura advindos da estação Fazenda Mendes.

4

Análises bidimensionais

Tal qual descrito na revisão bibliográfica apresentada no início deste trabalho é de comum conhecimento que a coesão aparente, condicionada pela sucção, é responsável por uma significativa porção das forças resistentes que mantêm encostas não saturadas estáveis, de forma que é seguro afirmar que sem este fenômeno um grande número de encostas brasileiras estariam instáveis em suas presentes configurações.

Ao longo da revisão bibliográfica também foram citadas as dificuldades de se obter dados atualizados de sucção ao longo de toda a encosta. A combinação destes dois fatores evidencia a importância de modelos computacionais que simulem condições de sucção a partir das características do solo e de dados climáticos.

Contudo, mesmo as simulações supracitadas ainda precisam de um dado inicial de sucção, e como a distribuição de sucção varia com o tempo, uma vez que esta é controlada pela umidade do material, este *input*, caso inadequado, pode causar respostas que não sejam condizentes com a realidade observada em campo.

Tendo em vista as premissas apresentadas acima, seria natural concluir que a situação ideal para análises de estabilidade em solos não saturados seria através de um modelo, cujos resultado de sucção independesse do valor de entrada inicial, sendo, desta forma, dependente apenas dos dados climatológicos e das características do solo.

Dessa forma, o presente capítulo busca através de análises de fluxo e estabilidade definir se é possível que diferentes distribuições iniciais de sucção converjam para resultados semelhantes uma vez expostos a longos períodos de idênticas precipitação e evaporação e, caso seja possível, qual é o período mínimo que deve ser considerado para que isto ocorra.

Os modelos foram construídos com base nos dados de entrada apresentados no item 3 e todas as análises foram executadas com auxílio dos softwares SVSlope e SVFlux-GE integrantes do pacote SVoffice, desenvolvido pela SoilVision.

4.1

Condições das análises de fluxo 2D

Os modelos 2D foram configurados para situações de fluxo transiente, visto que esta é a condição adequada para criar um modelo com dados de precipitação e evaporação que variam ao longo do tempo. Os tópicos a seguir detalham as condições em que foram realizadas as análises, assim como seus resultados.

4.1.1

Constantes

Primeiramente, para promover um entendimento mais completo das análises, foi verificado no software qual era o valor adotado para as constantes envolvidas nas análises, sendo estas: peso específico, densidade e viscosidade da água e a aceleração da gravidade. A Tabela 7 exibe os valores destas constantes, retirados diretamente da caixa de diálogo do software.

Tabela 7 – Constantes adotadas pelo software durante as análises.

	Parameter	Value	Units
	General		
	Unit Weight of Water:	9.807	kN/m ³
	Density of Water:	1000	kg/m ³
	Water Normal Viscosity:	0.06054	kg/m-min
	Acceleration Due to Gravity:	9.807	m/s ²

4.1.2

Distribuições iniciais de sucção

As análises 2D foram realizadas com cinco distribuições de sucção inicial. Estas distribuições foram configuradas como homogêneas, ou seja, com um único valor de sucção em todos os pontos do talude e foram adotados cinco valores de sucção para estes cenários iniciais, sendo estes: 50kPa, 75kPa, 100kPa, 150kPa e 200 kPa. O valor inicial de 20 kPa, também havia sido cogitado para as análises, mas como este criava uma condição de instabilidade, com fator de segurança inferior a 1 já no cenário inicial este foi descartado.

4.1.3

Condições de contorno

Na construção dos modelos foram configuradas três condições de contorno distintas, conforme exposto na Figura 26.

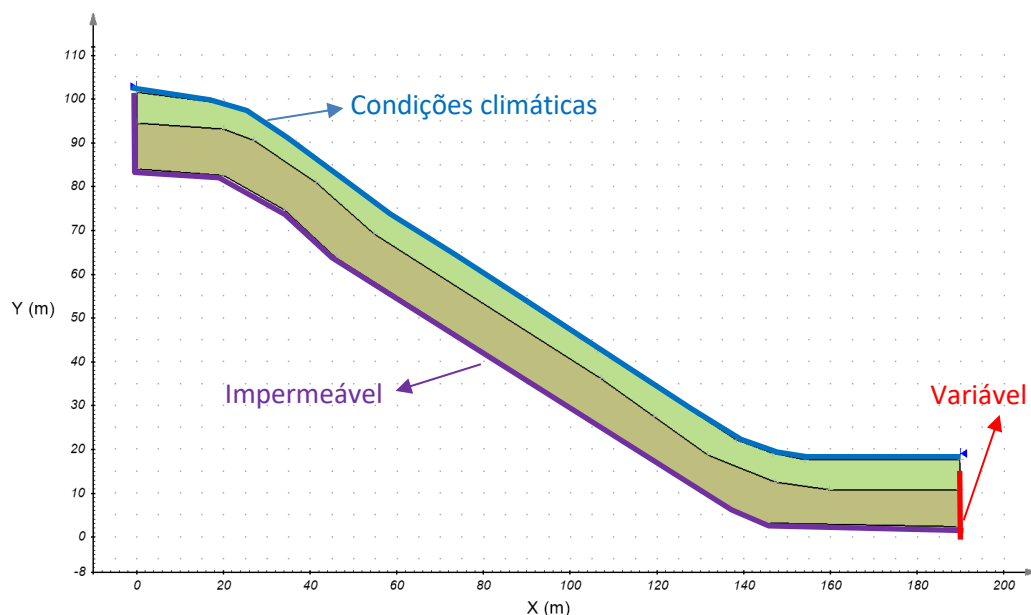


Figura 26 – Condições de contorno consideradas nas análises.

A superfície do terreno destacada na cor azul foi onde foram aplicadas as condições climáticas referentes a precipitação e evaporação detalhadas nos dados de entrada.

Já a superfície destacada em roxo que engloba a base do modelo e seu limite a esquerda foi configurada como impermeável. Na base do modelo, o limite impermeável foi configurado para se simular o contato com o topo rochoso são e impermeável, e no limite à esquerda foi escolhido para criar uma situação sem contribuição de fluxo externo, com exceção daquele proveniente da precipitação.

Por fim, a superfície destacada em vermelho foi considerada como variável, com duas possibilidades de condições de contorno. A primeira possibilidade foi considerar este contorno como impermeável para promover o acúmulo de água na base e simular uma situação de inundação, condição bastante comum em eventos de alta pluviosidade. Já a segunda possibilidade considerou o trecho em questão como uma face percolante que permitia a saída de água de forma natural, por meio de uma carga hidráulica constante, procurando se simular as condições de nível de água que se formariam naturalmente no local.

4.2

Condições das análises de estabilidade 2D

Em conjunto com as análises de fluxo também foram executadas análises de estabilidade, estas tiveram como objetivo entender o impacto que as variações de sucção observadas teriam no fator de segurança da encosta.

As análises foram realizadas com superfícies de ruptura circular, através do método do Equilíbrio Limite Geral (Fredlund et al. 1981), comumente designado como GLE. As constantes adotadas foram as mesmas apresentadas para as análises de fluxo. A busca por superfícies de ruptura foi realizada a partir do método “slope search” que permite a busca de superfícies críticas em toda a extensão do talude.

No que tange aos parâmetros de resistência, foram utilizados aqueles derivados do trabalho de de Oliveira (2013), detalhados no item 3 deste trabalho. Contudo, os parâmetros supracitados foram provenientes de ensaios realizados em solo saturado, não sendo suficientes para que sejam desenvolvidas as análises de resistência de solo não saturado deste trabalho.

Tal situação demanda que seja adotada uma parametrização adequada à problemas envolvendo solos não saturados, isto foi feito com a adoção de um valor de ϕ^b , parâmetro utilizado para modelar o ganho de resistência do em função da sucção tal qual formulação descrita no item 2.3.1 da revisão bibliográfica deste trabalho.

Os valores de ϕ^{tb} foram estimados com base nos estudos de Fredlund & Rahardjo (1993), que recomendam que o valor de ϕ^{tb} seja proporcional ao valor de ϕ' em uma proporção de 1/2 a 2/3 do primeiro em relação ao segundo. No presente trabalho foi considerada a proporção de 1/2 para todos os materiais resultando nos parâmetros de resistência apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de resistência utilizados nas análises.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	ϕ' (graus)	ϕ^{tb} (graus)
Solo maduro	18,11	2,66	26,04	13,02
Solo jovem	18,42	0	36,72	18,36

4.3

Resultados das análises de estabilidade bidimensionais

Nestas análises a primeira questão a ser levantada foi se de fato era possível que diferentes distribuições de sucção inicial convergissem para uma distribuição única após um longo período de precipitações e evaporações.

Para se verificar se tal possibilidade era plausível, foi realizada em um primeiro momento uma análise preliminar, constituída de uma análise de fluxo acoplada a uma análise de estabilidade, que foi executada partindo-se das distribuições iniciais de sucção homogêneas de 50 kPa, 75 kPa, 100 kPa 150 kPa e 200 kPa, que foram submetidas às mesmas condições climáticas e registrando-se qual era a resposta do fator de segurança obtido através das análises de estabilidade para cada caso. No que tange à condição de contorno designada como variável, na base do talude, a mesma foi definida como uma face percolante para esta análise preliminar.

Os resultados da simulação supracitada estão apresentados na Figura 27, onde se observa que as diferentes distribuições iniciais estavam, em seu ponto inicial em relação ao tempo, com fatores de segurança distintos, o que era de se esperar, dada a influência da sucção na estabilidade de taludes não saturados. Todavia, apesar da diferença na situação inicial, os fatores de segurança das análises de estabilidade gradualmente convergiram para um valor único.

Ainda observando Figura 27, é possível verificar que a convergência completa dos valores ocorre no tempo de aproximadamente 8 meses após a condição inicial, conforme destacado pela linha vermelha apresentada nesta mesma figura. Na Figura 28, posiciona-se esta data em relação à distribuição de precipitação do período considerado, onde é possível se verificar que esta convergência total ocorre no final de período de estiagem e início do período de maior precipitação.

Ao se avaliar o significado desta data no contexto dos dados de entrada que são advindos da precipitação que ocorreu em Nova Friburgo antes dos eventos catastróficos registrados em janeiro de 2011, tem-se que o dia 280 do período considerado corresponde ao dia 07/11/2010, aproximadamente 2 meses antes do evento.

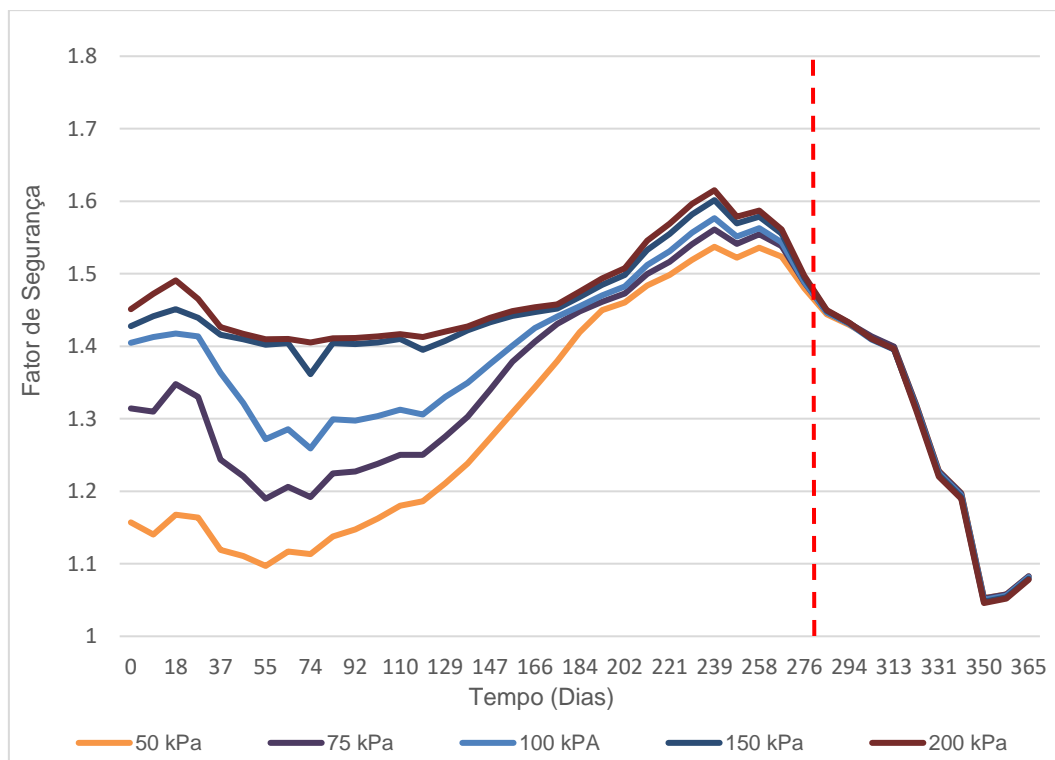


Figura 27 – Distribuição do fator de segurança ao longo do tempo.

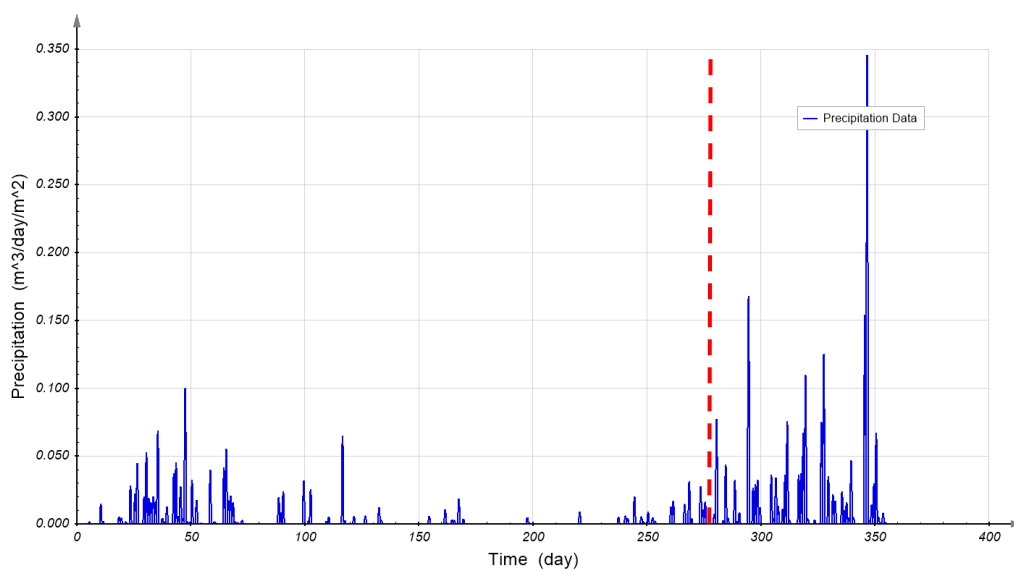


Figura 28 – Ponto de convergência dos fatores de segurança na análise preliminar.

Uma vez que se verificou que é possível que diferentes cenários iniciais de distribuição de sucção converjam para uma mesma condição de estabilidade final após serem submetidos a condições climáticas idênticas durante o período de um ano, a próxima etapa das análises foi verificar qual era o período mínimo para que esta convergência ocorresse e entender as condições hidrogeológicas envolvidas no fenômeno.

Para se verificar o tempo mínimo de convergência, análises semelhantes à apresentada na Figura 27 foram executadas reduzindo-se gradativamente o período de tempo considerado entre o início das análises e o evento de ruptura.

A partir deste processo foi verificado que o período mínimo a ser considerado antes do evento de ruptura para que as diferentes distribuições de sucção inicial convergissem para uma condição única de estabilidade final era de pouco mais de 8 meses, situação verificada tanto para o cenário que considerou a condição de contorno variável como uma face percolante quanto para aquele que a considerou impermeável, simulando uma situação de inundação na base do talude, ambas as situações apresentaram resultados bastante semelhantes conforme pode ser observado nos resultados apresentados Figura 29.

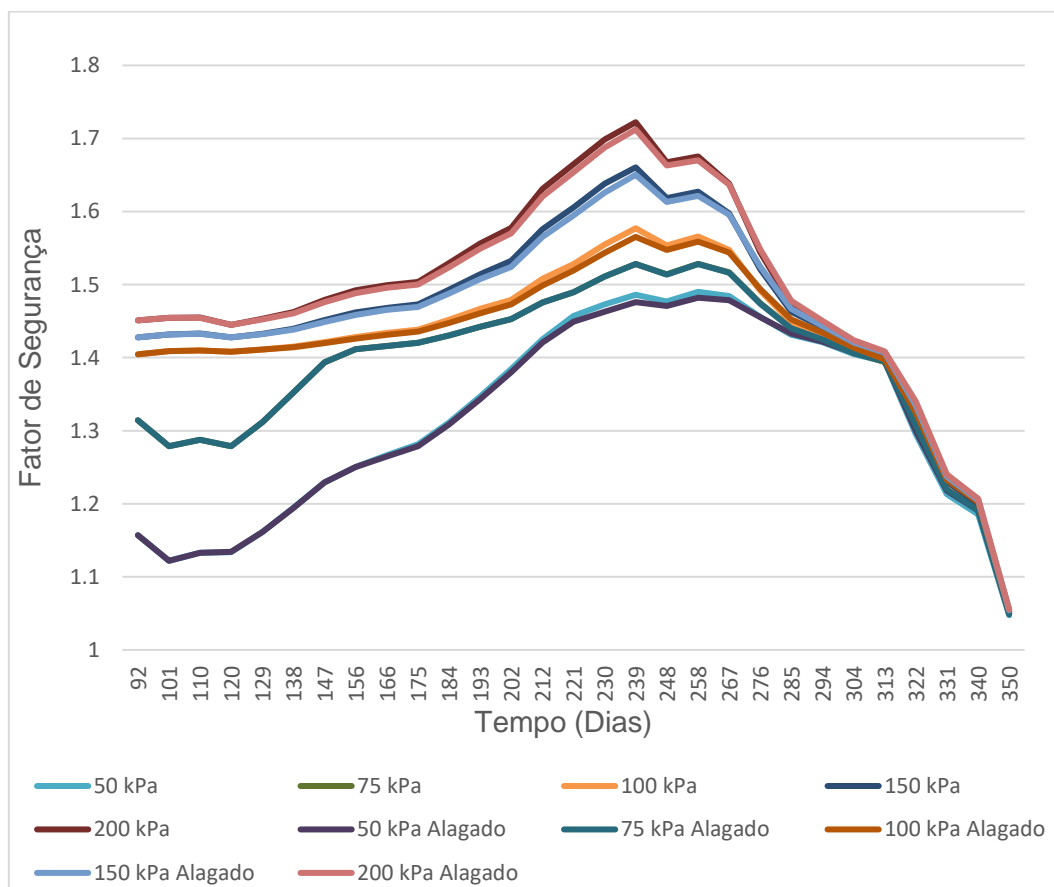


Figura 29 – Distribuição do fator de segurança ao longo do tempo considerando o período de aproximadamente 8 meses antes da ruptura.

É importante se destacar que a convergência dos resultados não ocorre de forma abrupta, mas sim gradual o que pode tornar a interpretação subjetiva. Contudo a diferença dos resultados se torna óbvia ao se comparar os resultados apresentados na Figura 29 onde se considerou aproximadamente 8 meses de

condições climáticas antes do evento de ruptura e os resultados apresentados na Figura 30 onde se considerou apenas 4 meses antes da ruptura.

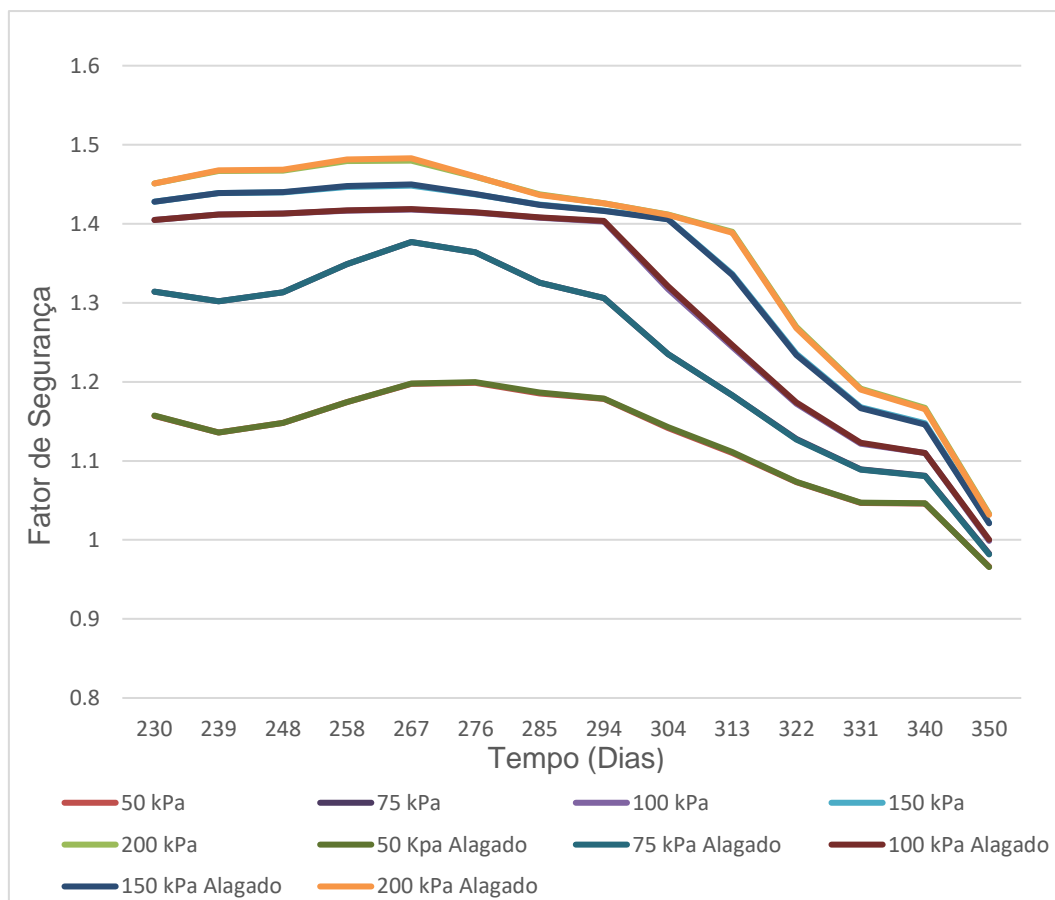


Figura 30 – Distribuição do fator de segurança ao longo do tempo considerando o período de aproximadamente 4 meses antes da ruptura.

Nesta situação os diferentes cenários iniciais não convergem para uma situação final única, ou seja, há influência do cenário inicial no resultado final, situação que, tal qual já foi descrito anteriormente, não é ideal, pois o dado correspondente à condição inicial pode ter sido obtida em uma situação inadequada à análise executada.

Uma vez determinado o período mínimo para que os cenários iniciais converjam para um único resultado e esclarecido o impacto deste período nas análises de estabilidade, é importante entender o significado do período considerado dentro do contexto dos dados de entrada e do evento que ocorreu em Nova Friburgo em janeiro de 2011.

Nesse aspecto, os 8 meses antes da ruptura significam que, para ser possível executar análises cujo resultado independa do valor inicial de sucção, seria necessário considerar dados climáticos a partir do mês de maio de 2010.

Desta forma, os indícios presentes nos resultados apontam que é necessário que os distintos cenários iniciais de sucção sejam expostos a um período prolongado de menor precipitação para que a hidrogeologia condicione respostas semelhantes aos eventos de precipitação posteriores, ou seja, nas análises o período seco presente antes do início das estações chuvosas parece homogeneizar as condições de poropressão, ocasionando respostas semelhantes a partir do início do período de maiores precipitações.

Por fim, é válido se destacar que não só os fatores de segurança foram idênticos, como também as formas de suas superfícies de ruptura, sendo observados em todos os casos que esta se desenvolveu predominantemente no contato entre o solo maduro e o solo jovem, mobilizando exclusivamente o solo maduro, resultados semelhantes aos encontrados por de Oliveira (2013). A Figura 31 expõe a superfície de ruptura comum a todas as análises consideradas.

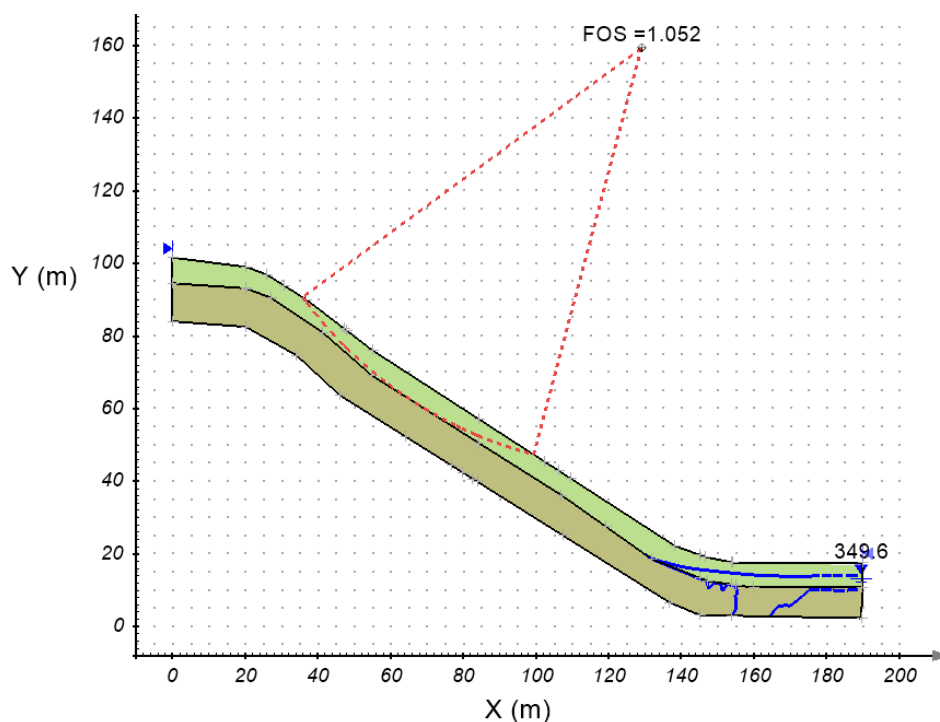


Figura 31 – Superfície de ruptura final observada nas análises de estabilidade.

4.4

Resultados das análises de fluxo bidimensionais

Com o objetivo de se verificar se a hipótese previamente apresentada, a qual foi formulada a partir dos resultados das análises de estabilidade, se prova verdadeira foram escolhidos três perfis verticais no modelo, exibidos na Figura 32, para que fossem avaliadas detalhadamente as distribuições de poropressão.

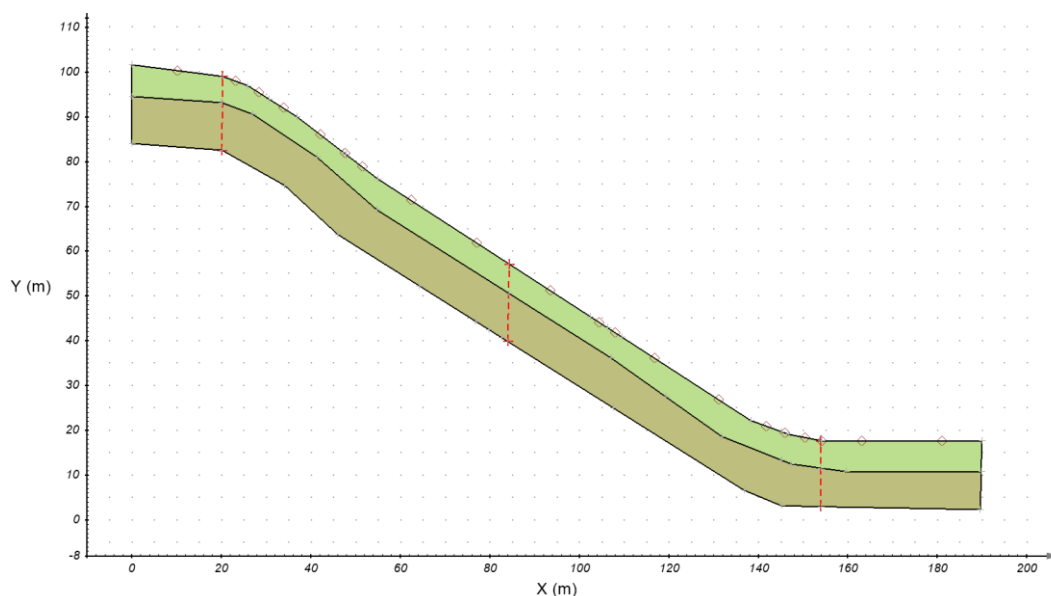


Figura 32 – Perfis verticais para análises de distribuição de poropressão

Os perfis foram distribuídos com o intuito a cobrir os pontos chave do talude de forma que o primeiro foi posicionado na crista do talude, o segundo posicionado a meia-encosta e o terceiro na base do talude.

Os resultados das distribuições das poropressões observadas nos perfis supracitados são apresentados nas Figuras 35 a 44, sendo em cada figura exibidas três distribuições, correspondentes a crista, meia encosta e base do talude, respectivamente, para cada um dos cenários modelados.

Nestas figuras o eixo das abcissas corresponde aos valores de poropressão em kPa enquanto o eixo das ordenadas corresponde à altura do perfil em si, sendo a origem deste eixo correspondente à base do perfil, onde se encontra o contato com o topo rochoso, e o valor máximo referente ao topo, na interface com a atmosfera.

Por fim, a Figura 33 esclarece o significado das curvas apresentadas nas Figuras 35 a 44, onde cada cor representa a distribuição das poropressões em um determinado momento, enquanto a Figura 34, utilizando o mesmo código de

cores, localiza estes momentos, temporalmente, em relação aos dados de entrada de precipitação apresentados anteriormente.

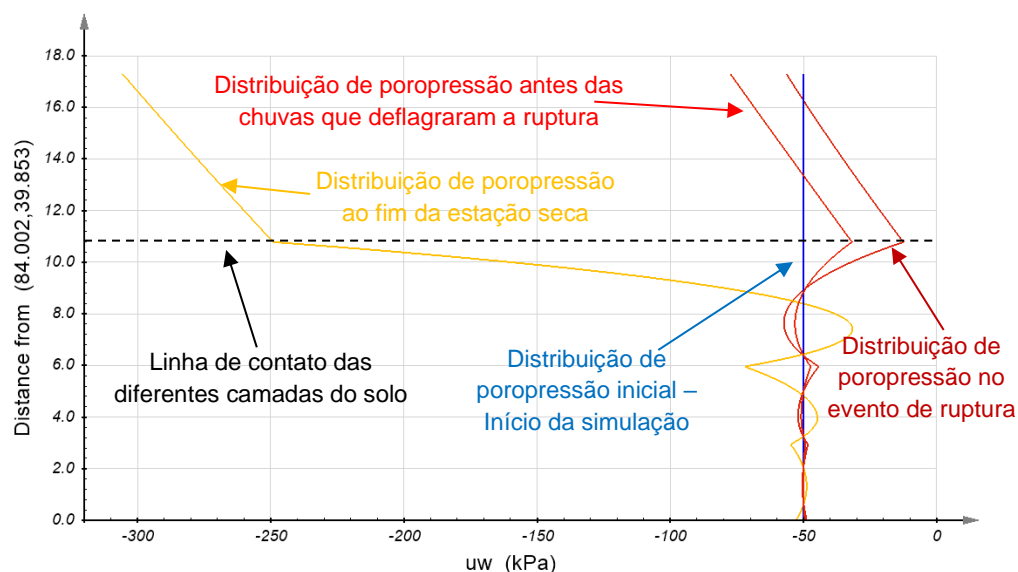


Figura 33 – Exemplo de gráfico esclarecendo o significado das curvas apresentadas nos perfis de distribuição das poropressões exibidos nas Figuras 35 a 44.

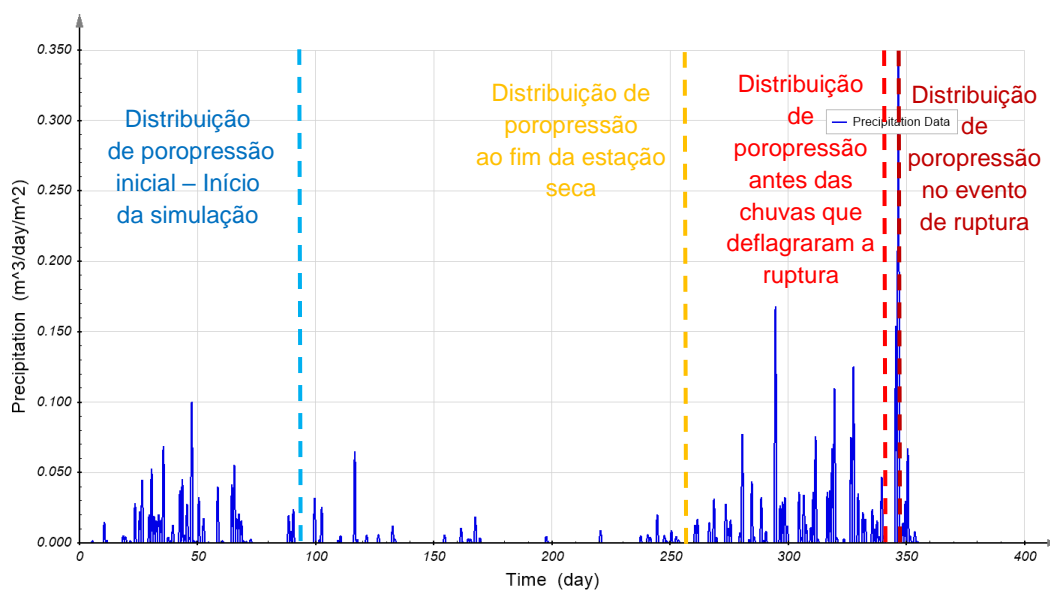


Figura 34 – Distribuição, em relação ao tempo e aos dados de entrada de precipitação, das curvas apresentadas na Figura 28, seguindo a representação por cores.

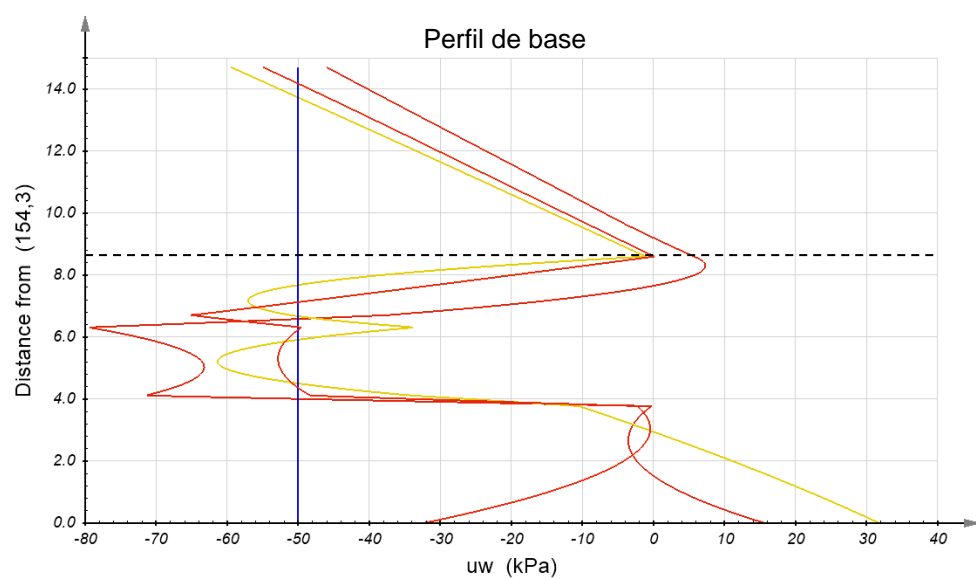
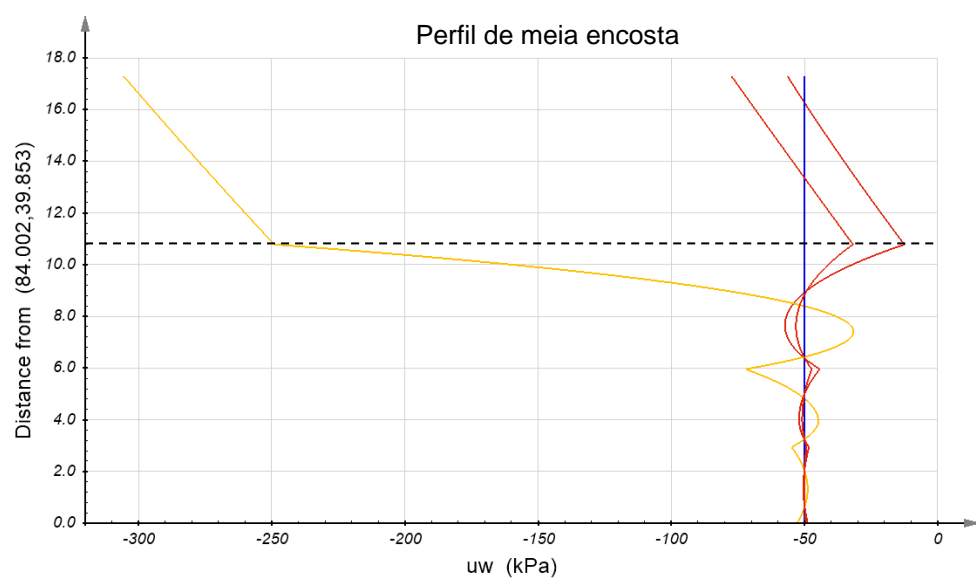
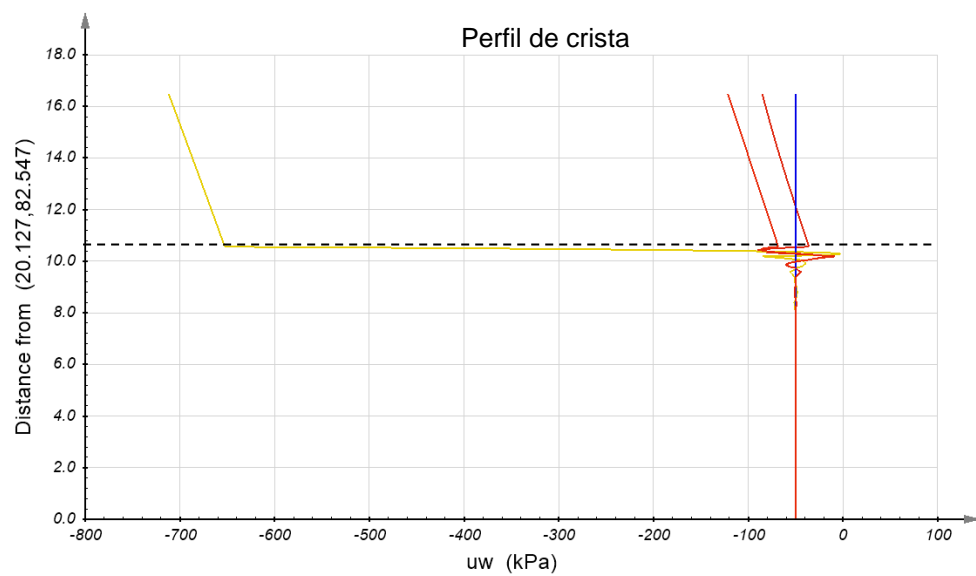


Figura 35 – Cenário com sucção inicial de 50 kPa e face permeável na base.

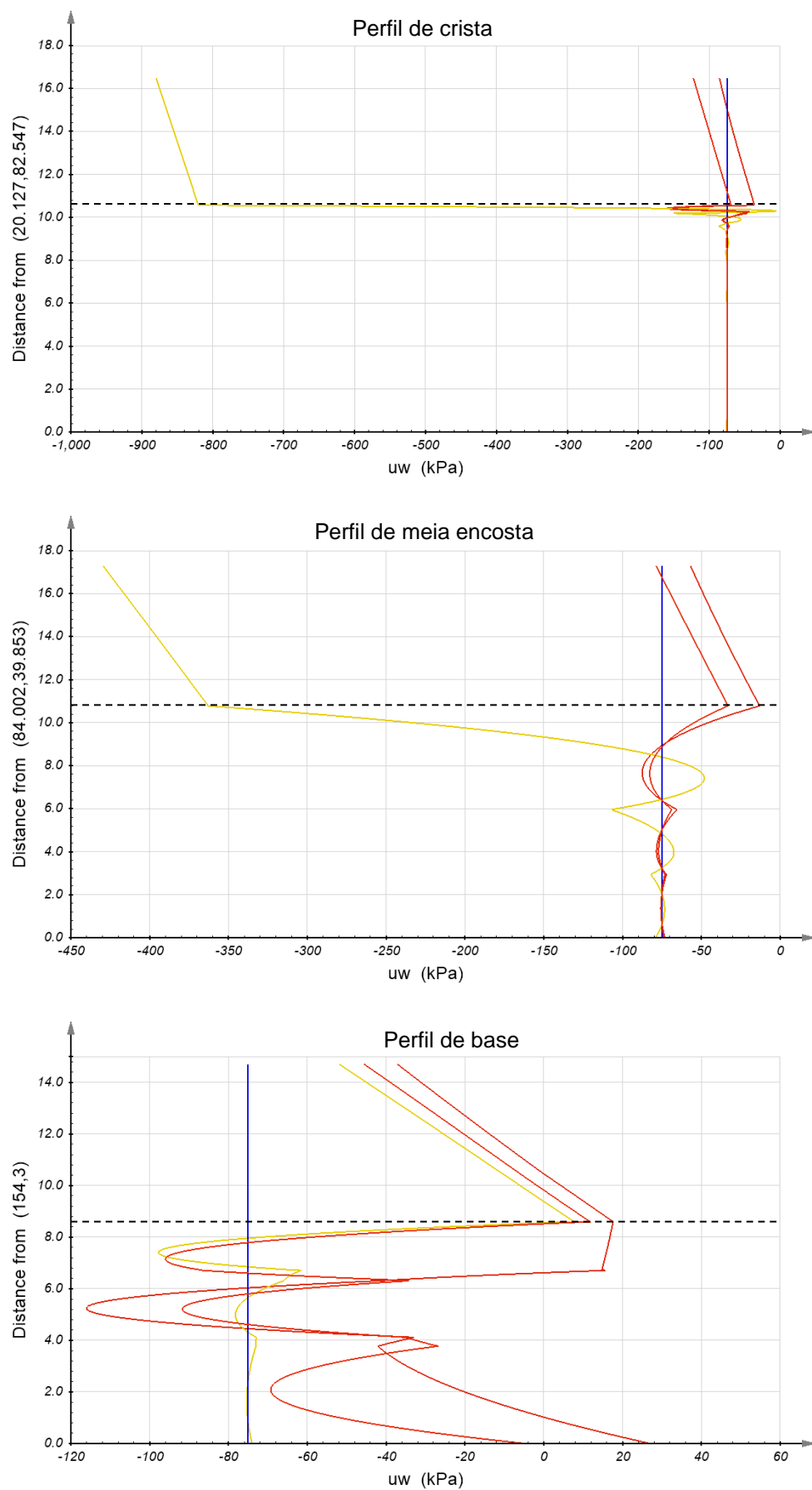


Figura 36 – Cenário com sucção inicial de 75 kPa e face permeável na base.

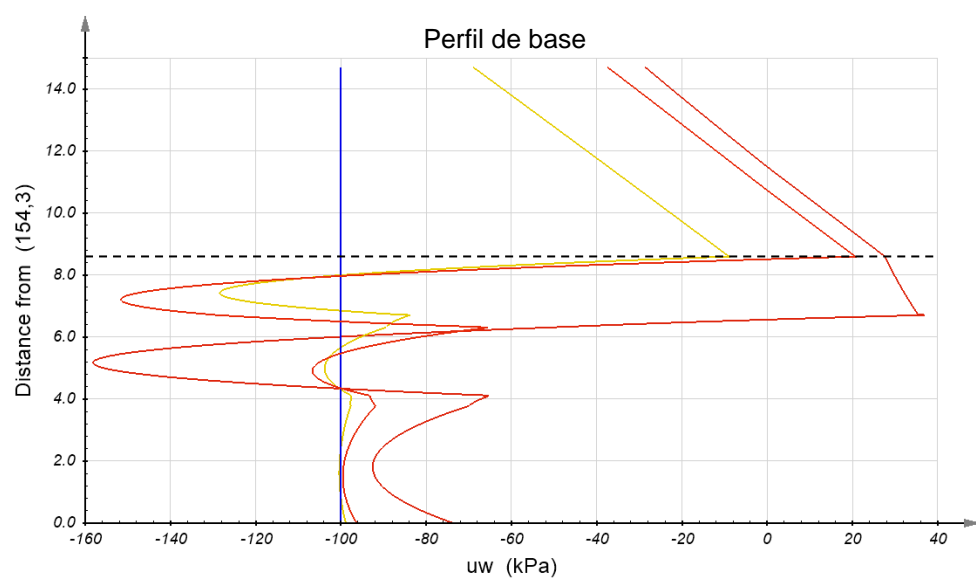
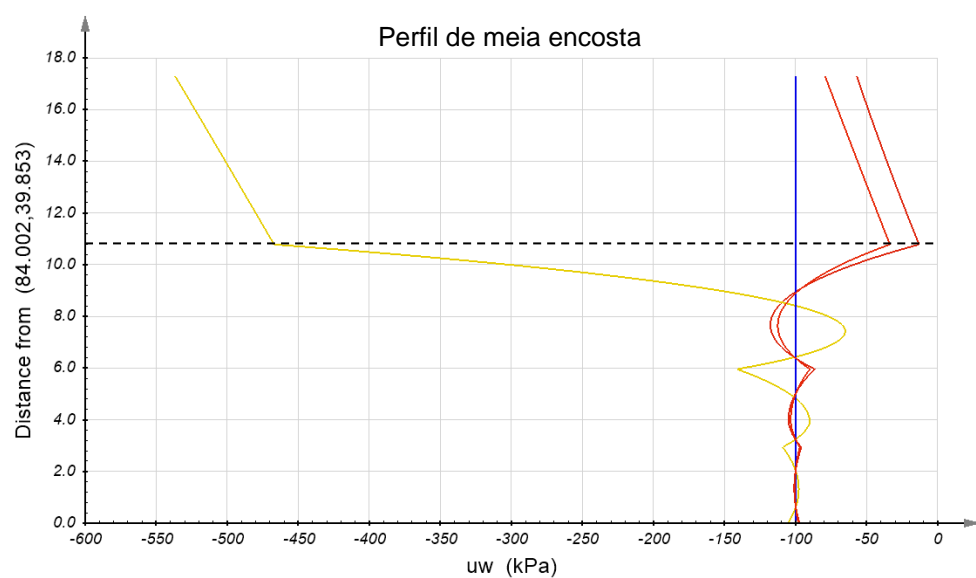
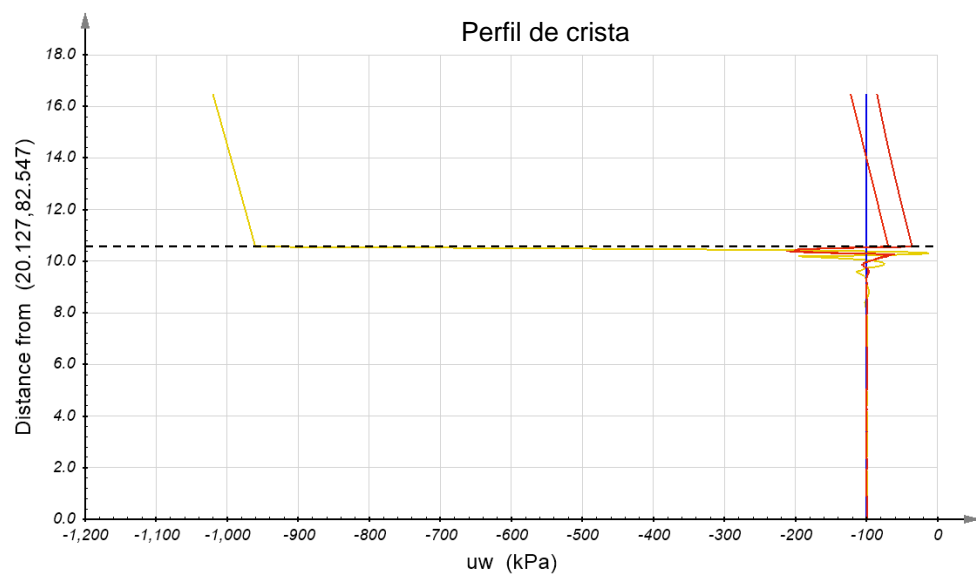


Figura 37 – Cenário com sucção inicial de 100 kPa e face permeável na base.

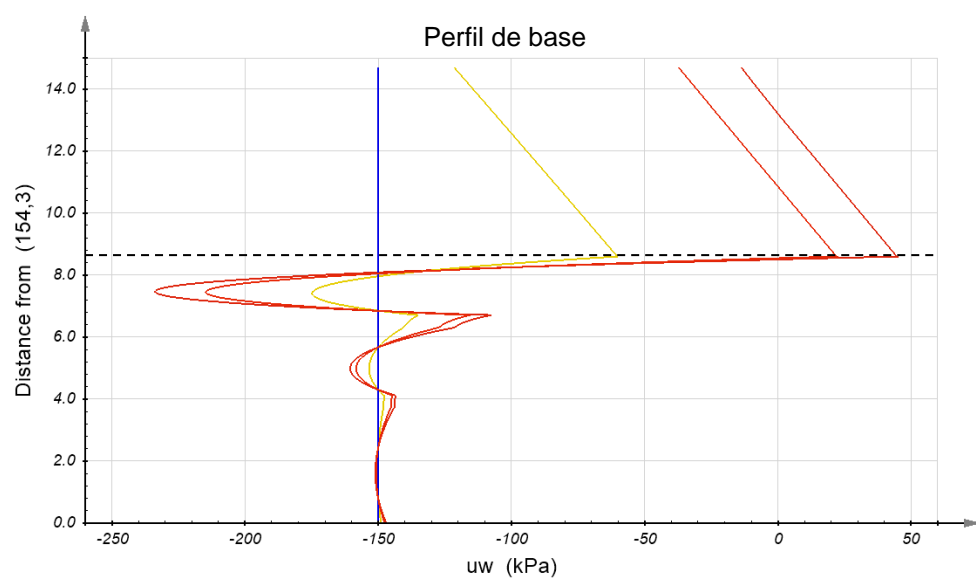
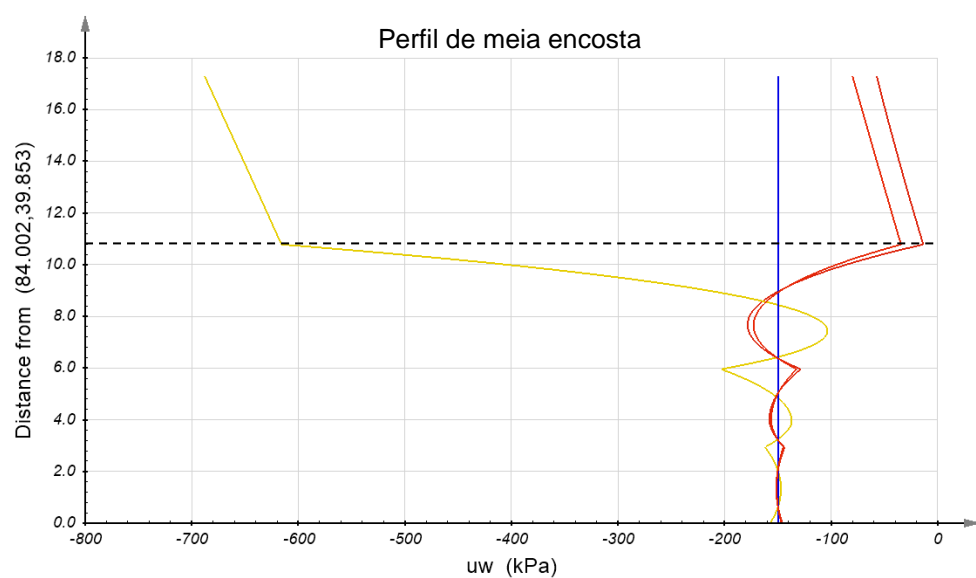
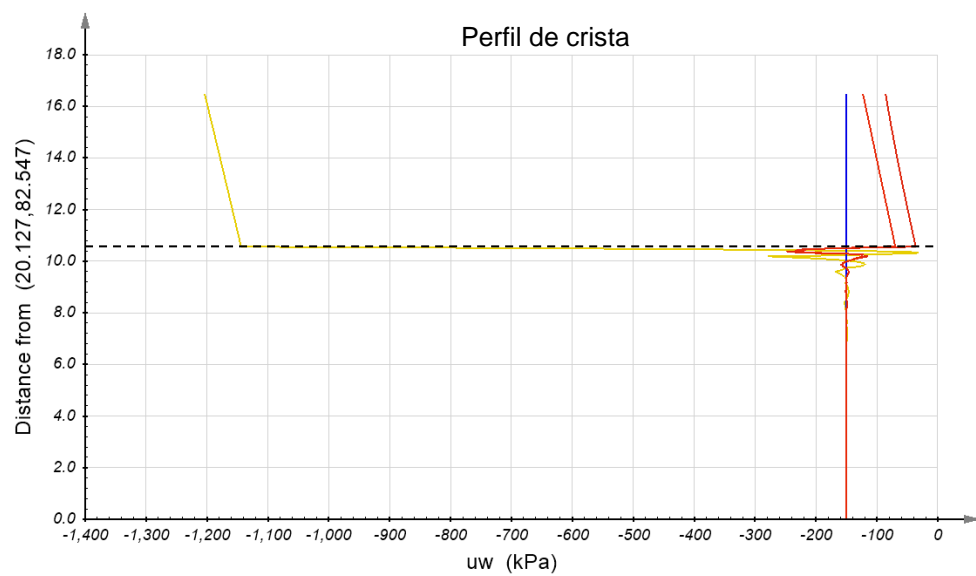


Figura 38 – Cenário com sucção inicial de 150 kPa e face permeável na base.

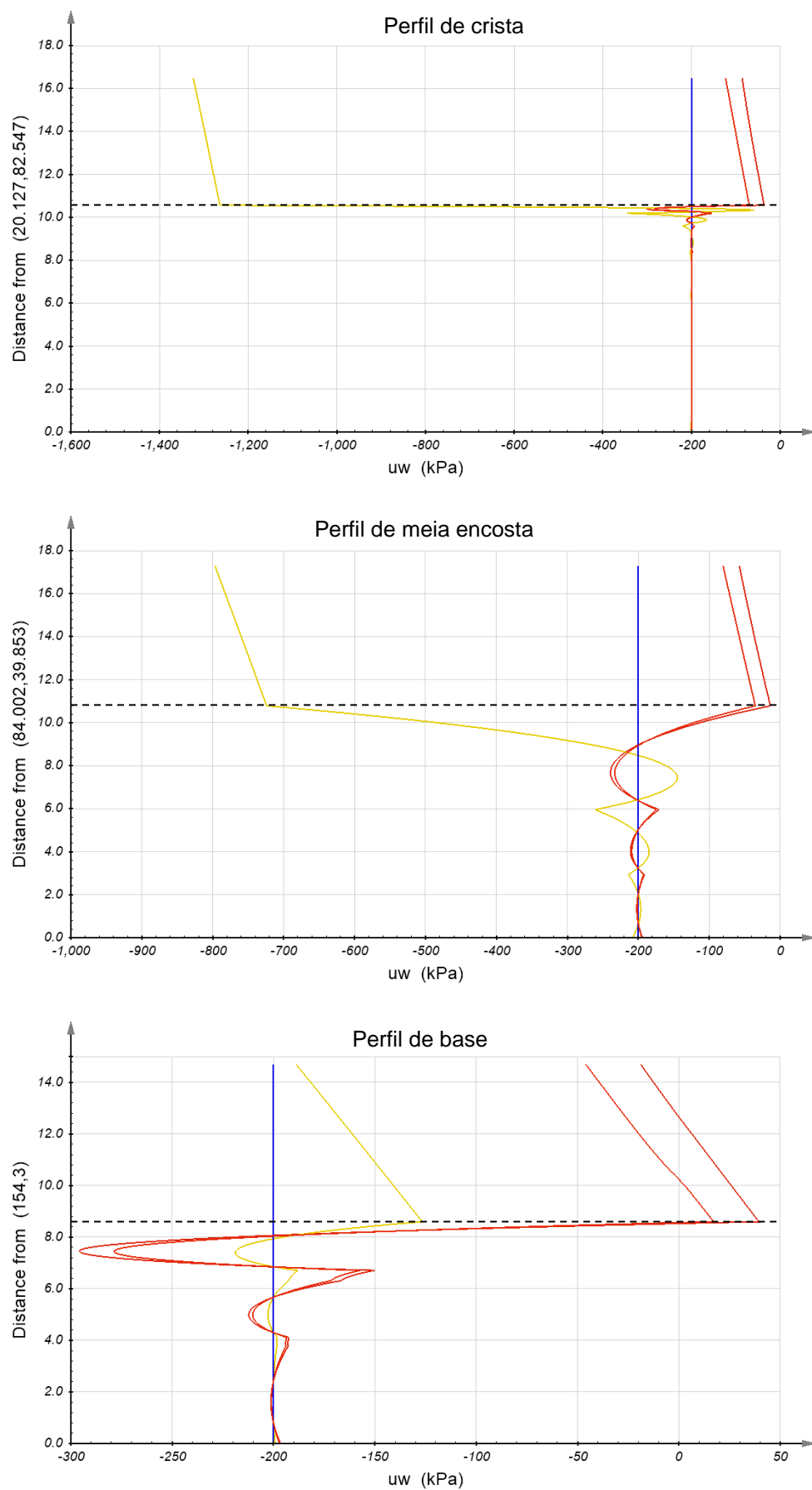


Figura 39 – Cenário com sucção inicial de 200 kPa e face permeável na base.

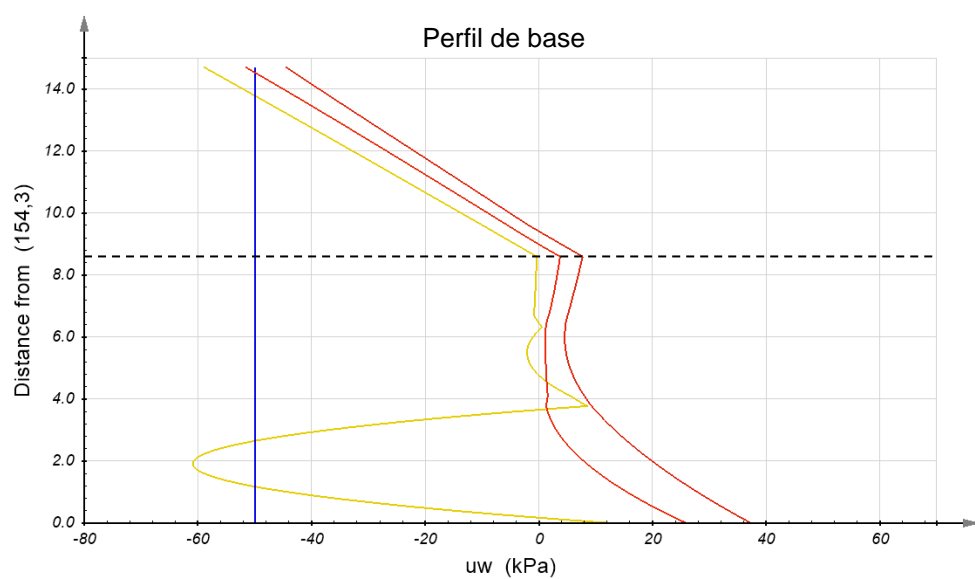
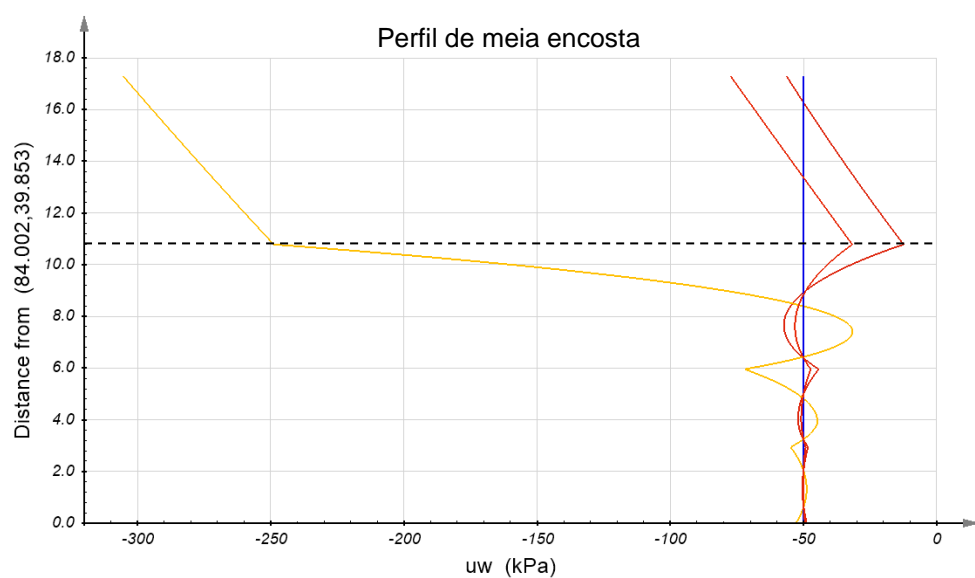
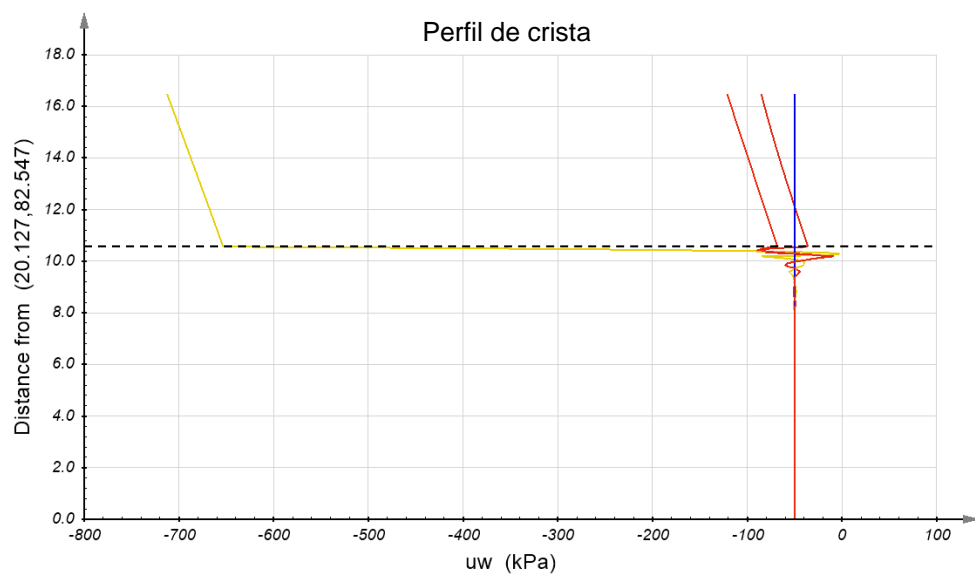


Figura 40 – Cenário com sucção inicial de 50 kPa e alagamento na base.

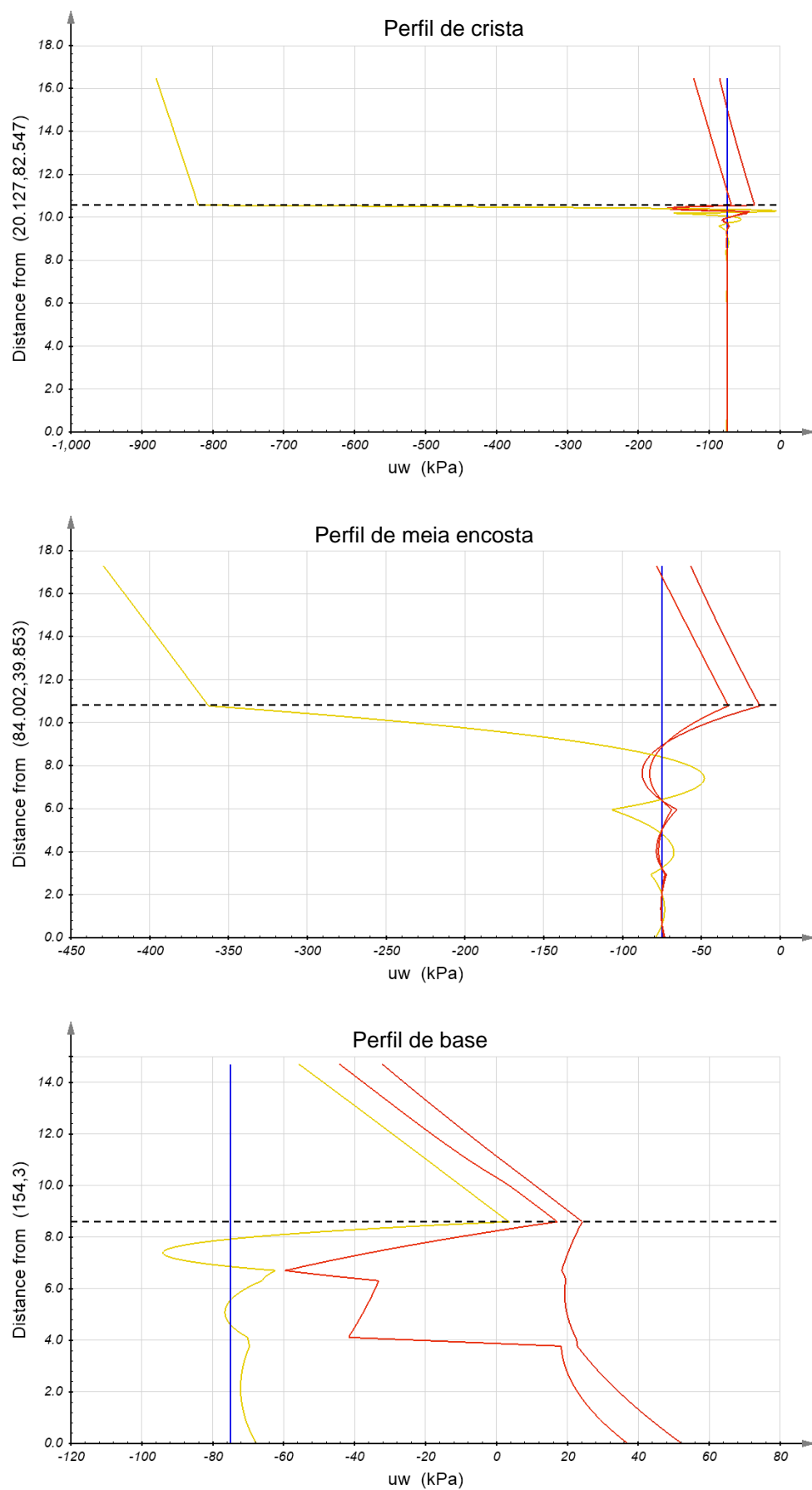


Figura 41 – Cenário com sucção inicial de 75 kPa e alagamento na base.

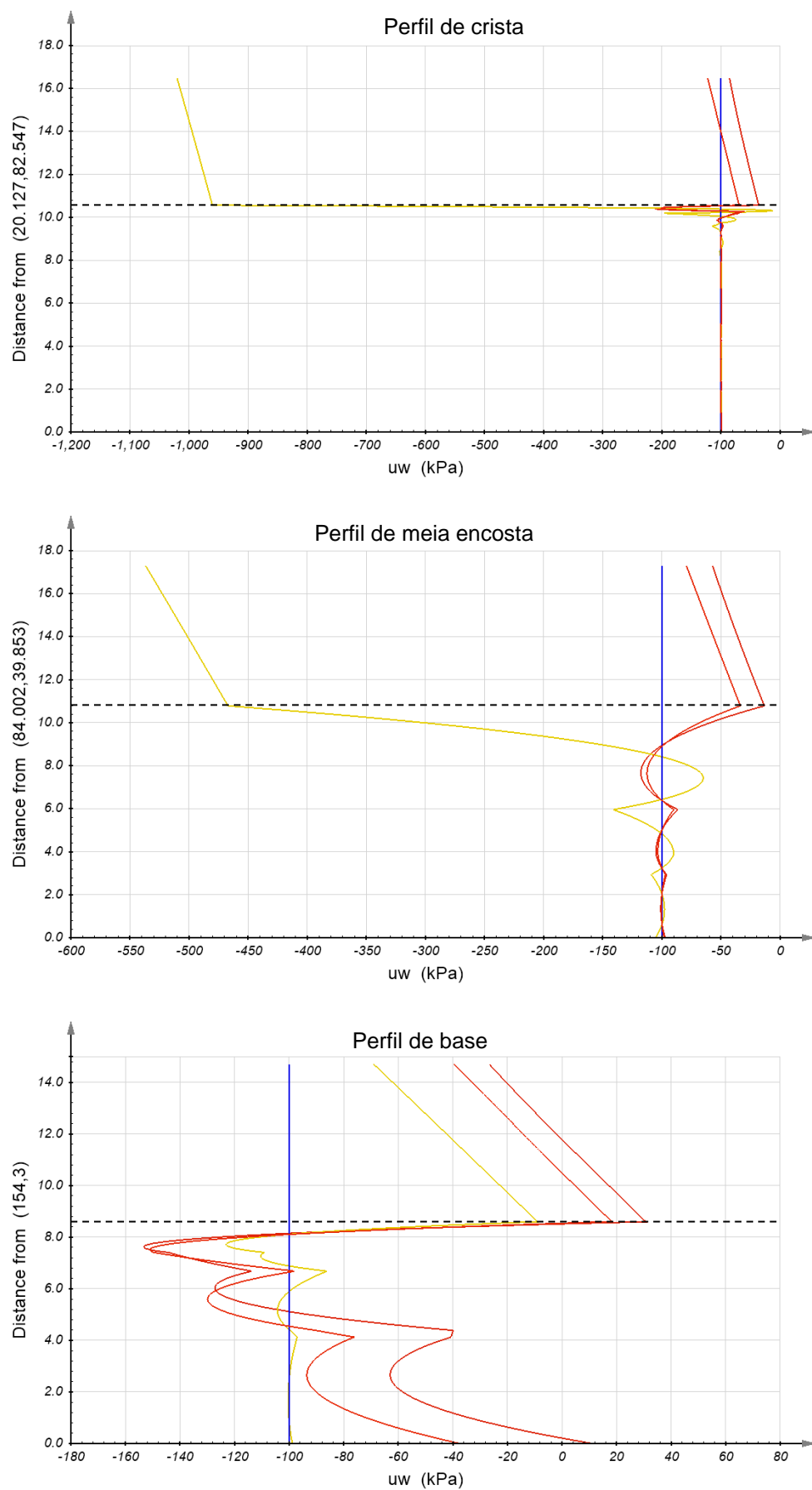


Figura 42 – Cenário com sucção inicial de 100 kPa e alargamento na base.

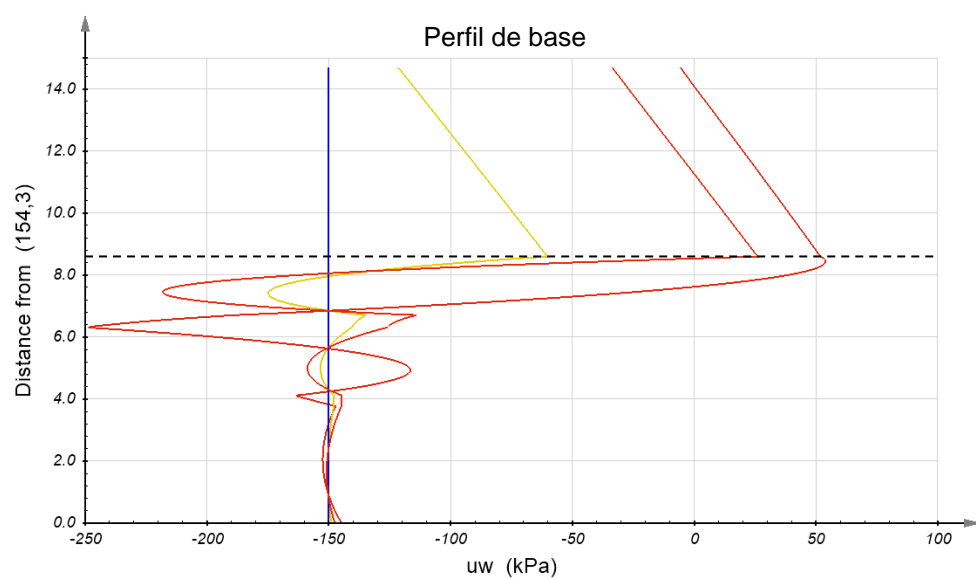
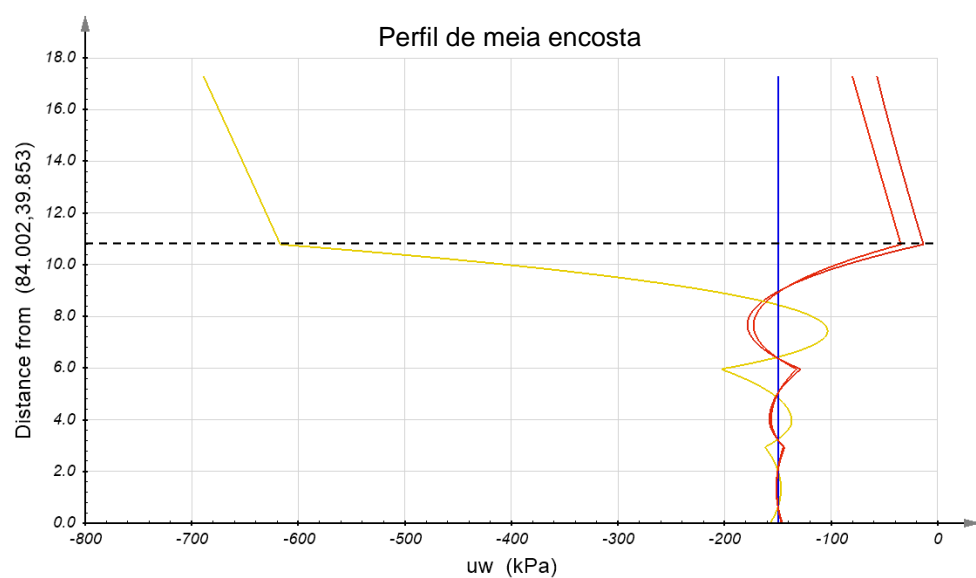
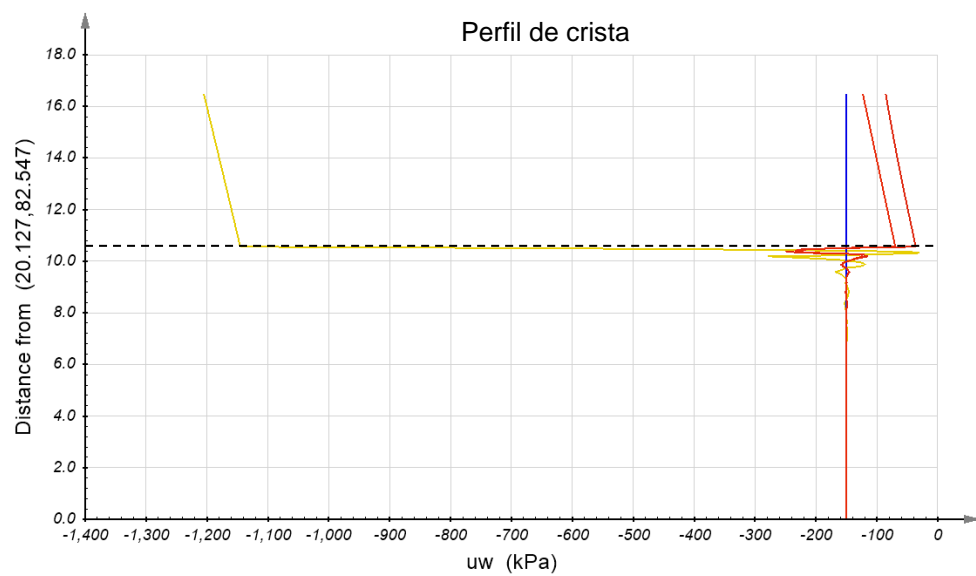


Figura 43 – Cenário com sucção inicial de 150 kPa e alargamento na base.

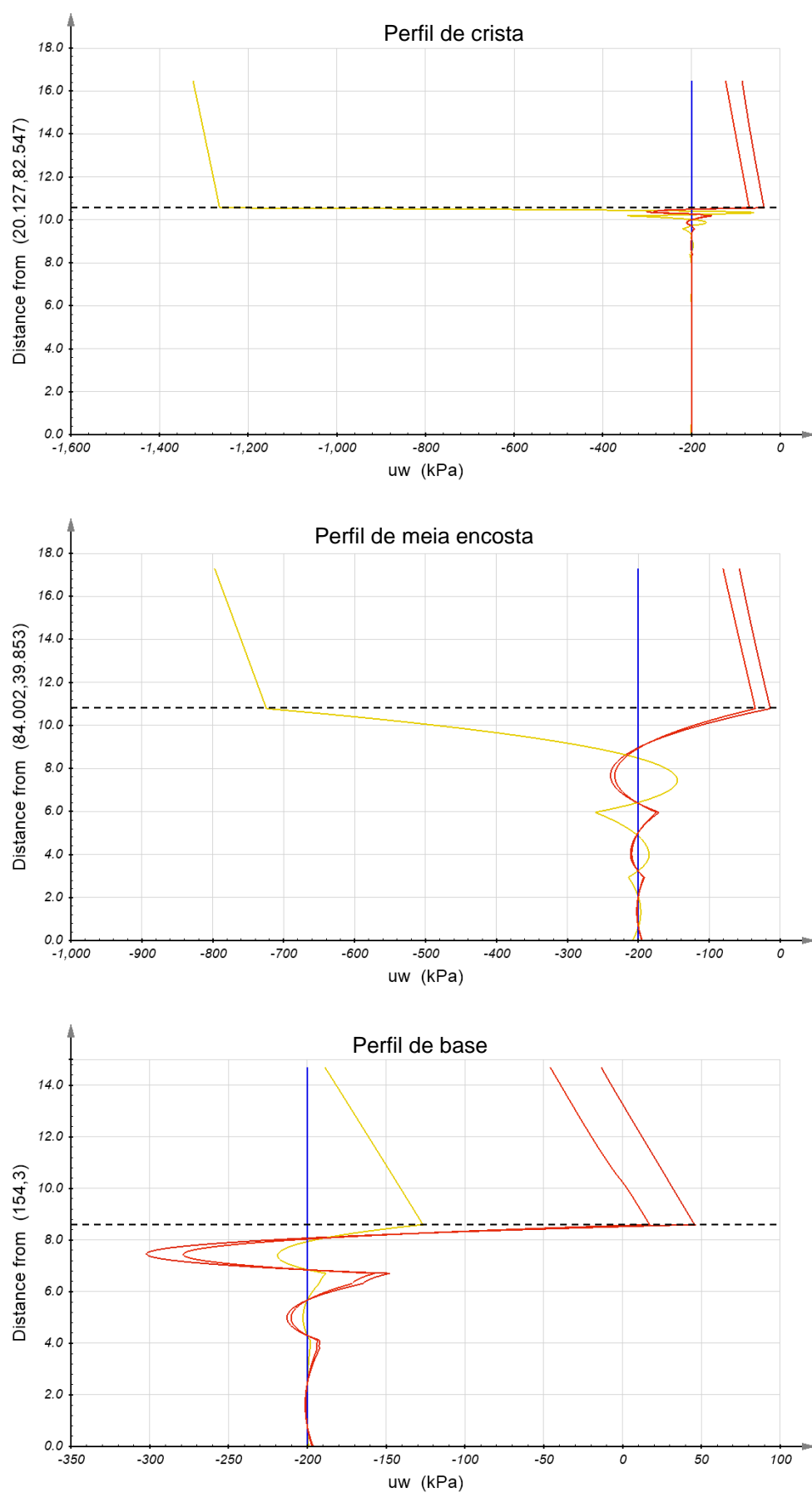


Figura 44 – Cenário com sucção inicial de 200 kPa e alargamento na base.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 35 a 34, é possível fazer algumas considerações. Primeiramente, é possível perceber que a simulação de diferentes condições de drenagem na base do talude não afetou os perfis de distribuições de poropressões localizados a meia encosta e na crista do talude, sendo as diferenças perceptíveis somente no perfil de base do talude.

Também foi possível perceber que a camada superficial de solo, a qual foi denominado solo maduro, é muito mais suscetível às variações de poropressão do que a camada inferior, a qual foi denominada solo jovem. Este fato se torna evidente ao se observar a variação dos valores de sucção no perfil da crista do talude onde grandes variações são registradas no solo maduro, enquanto o solo residual jovem conserva os valores iniciais de sucção ao longo de todo o período analisado.

A discrepância supracitada está provavelmente relacionada à diferença na ordem de grandeza da permeabilidade das duas camadas. Conforme descrito no tópico referente aos dados de entrada das análises, foi adotado para a camada superior, o solo residual maduro, uma permeabilidade de $4,53 \text{ E-}03$, e para o solo residual jovem, uma permeabilidade de $1,00 \text{ E-}04$. Esta diferença, associada a inclinação do talude, possivelmente favorece que a água percole sobre o contato entre as camadas ao invés de se infiltrar no solo residual jovem. Embora menores, as diferenças supracitadas também são observadas no perfil de meia encosta. Já na base do talude a geometria horizontal do terreno favorece a percolação para a camada inferior.

Apesar dos valores observados para as distribuições de sucção no talude variarem em cada cenário, é importante destacar que todas apresentam um perfil com padrão semelhante, sendo este constituído por valores mais elevados de poropressão na camada superior, fato muito provavelmente ligado à diferença de permeabilidade das camadas, tal qual descrito anteriormente, seguido por uma zona de maior sucção no centro da camada inferior, e outra de aumento de poropressão na base do solo junto ao topo rochoso impermeável, sendo este aumento ligado ao acúmulo de água proporcionado pelo contato do solo com a rocha impermeável.

No que tange à convergência dos valores de sucção ao longo do tempo, foi demonstrado que a mesma de fato ocorre, uma vez que as distribuições de sucção antes da ruptura e durante a ruptura eram idênticas no solo maduro, para os perfis

meia encosta e crista, e muito semelhantes em ambas as situações do perfil de base.

As Figuras 45 a 48 resumem, cada uma, em um gráfico único, a distribuição das poropressões antes do início das chuvas que deflagraram as rupturas (previamente apresentada na cor vermelha nas Figuras 35 a 44) para todos os cenários considerados nos perfis de crista, meia encosta, base permeável e base alagada, respectivamente. Nestes gráficos o significado dos eixos é análogo ao descrito para as Figuras 30 a 39.

Nas Figuras 45 e 46 é possível perceber que, tal qual descrito anteriormente, independente da distribuição inicial o perfil final de sucção no solo maduro foi igual, com valor de aproximadamente 100 kPa, no perfil de crista, e em torno de 50 kPa no perfil de meia encosta. Na camada inferior do solo percebe-se que a mesma convergência não ocorre, e os valores finais, antes da ruptura, foram muito semelhantes aos iniciais.

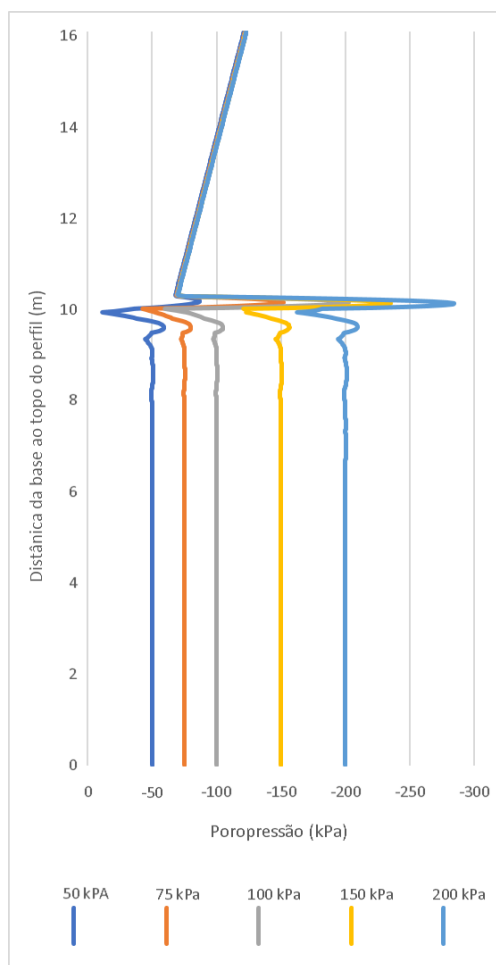


Figura 45 – Distribuições de poropressão no perfil de crista antes da ruptura, resultantes de cada um dos estados iniciais.

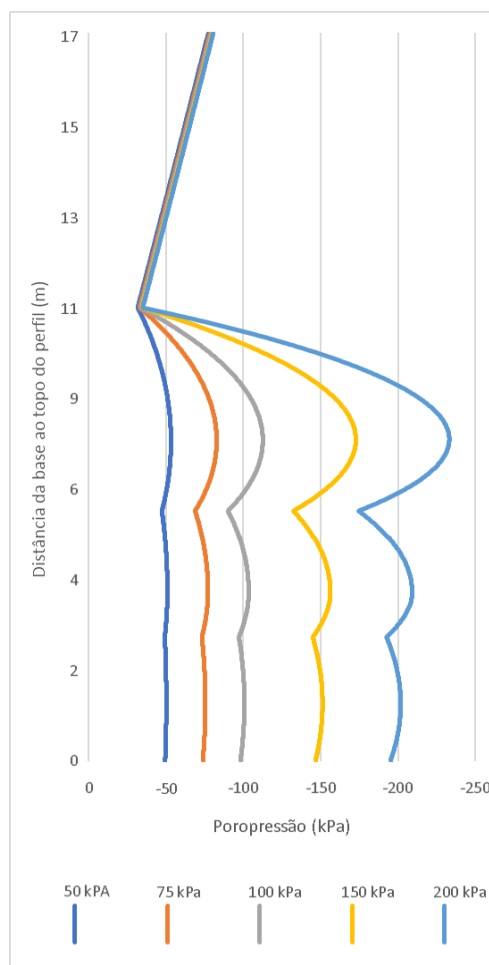


Figura 46 – Distribuições de poropressão no perfil de meia encosta antes da ruptura, resultantes de cada um dos estados iniciais.

Nos perfis de base a situação observada foi semelhante, ocorrendo convergência das distribuições de sucção no solo maduro enquanto a camada mais profunda tem suas distribuições finais controladas principalmente pelo cenário inicial, conforme pode ser observado nas Figuras 47 e 48 que apresentam respectivamente as distribuições de sucção na base do talude para as situações de face permeável no limite do modelo e alagamento na base, respectivamente.

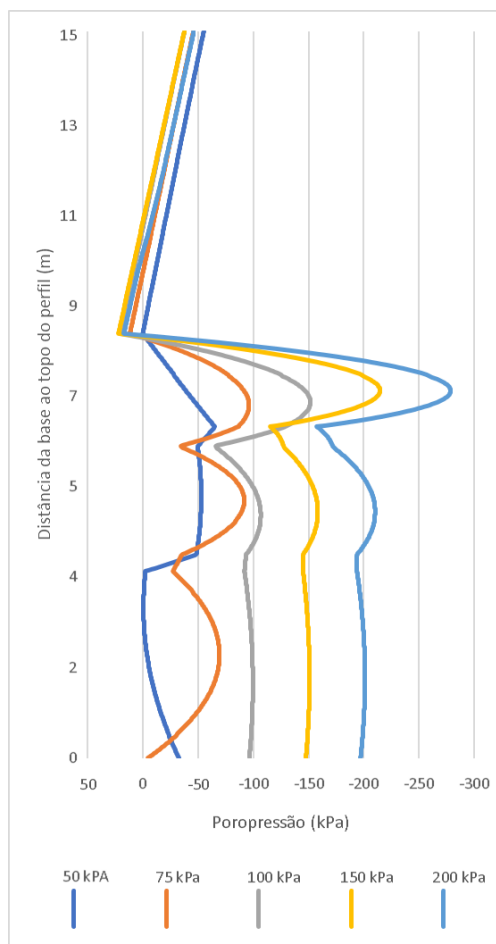


Figura 47 – Distribuições de poropressão no perfil de base antes da ruptura (base permeável), resultantes de cada um dos estados iniciais.

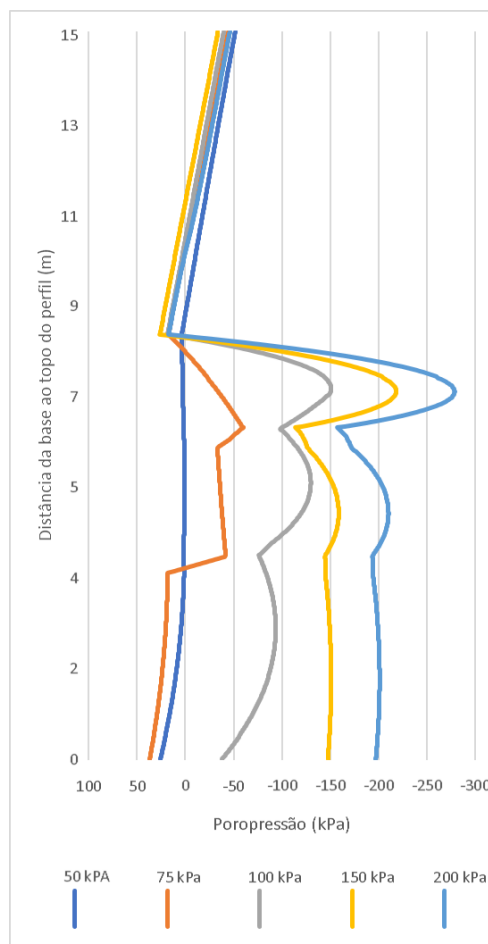


Figura 48 – Distribuições de poropressão no perfil de base antes da ruptura (alagamento na base), resultantes de cada um dos estados iniciais.

Com base em todos os resultados apresentados até o presente momento é válido concluir que é possível construir modelos, para as condições aqui estudadas, onde a distribuição na camada superficial de solo de um determinado talude antes da ruptura independa da distribuição inicial de sucção e que o intervalo necessário para que esta convergência ocorresse neste caso foi de aproximadamente oito meses.

Na camada inferior os valores finais de sucção ainda foram muito semelhantes ao *input* inicial, não tendo ocorrido nesta camada uma convergência relevante, contudo como no modelo considerado a ruptura se desenvolveu exclusivamente no solo maduro, isto foi suficiente para que os fatores de segurança e as superfícies de rupturas das análises de estabilidade também convergissem.

5 Análises tridimensionais

5.1 Condições das análises tridimensionais

Uma vez obtidos os resultados das análises bidimensionais, foi iniciada a confecção dos modelos tridimensionais, sendo o primeiro passo a modelagem geométrica, detalhada no Apêndice C.

As condições consideradas nas análises tridimensionais foram semelhantes às aquelas previamente estabelecidas na modelagem bidimensional, de forma que constantes, parâmetros do solo e condições climáticas não foram alteradas.

No que tange às condições de contorno, foram consideradas como impermeáveis as superfícies do contato solo/rocha, os limites laterais e o limite superior, tal qual exposto na Figura 49. As demais condições de contorno foram aplicadas no contato com a atmosfera (precipitação e evaporação) e no limite inferior (face permeável), conforme ilustrado pela Figura 50.

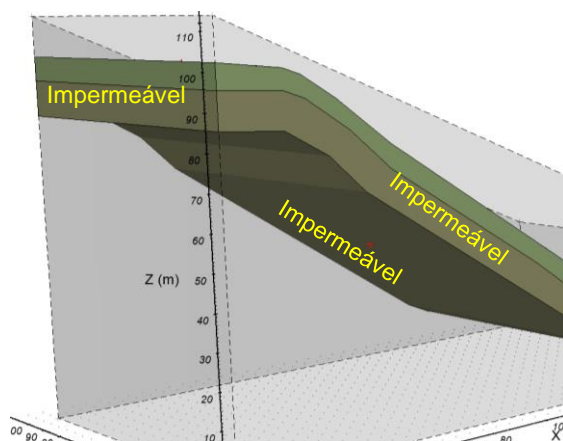


Figura 49 – Condições de contorno impermeáveis.

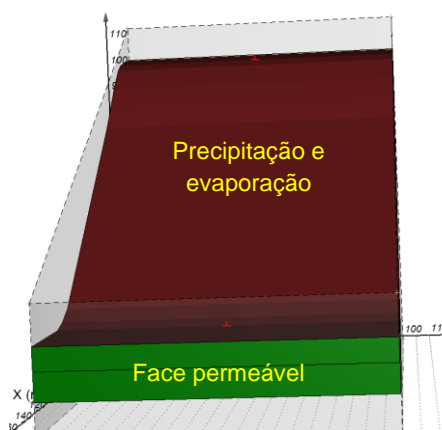


Figura 50 – Demais condições de contorno.

Nas análises de estabilidade, assim como ocorreu nos modelos 2D, a superfície de ruptura foi definida através do modo “slope search”, que permite a busca por superfícies de ruptura em qualquer ponto do talude. Com relação às especificações tridimensionais da estabilidade (Figura 51), foi definido como eixo de ruptura a seção central do talude, conforme destacado em azul na figura supracitada, e o formato da superfície de ruptura foi limitado a formas cuja razão

das dimensões nos eixos X/Y fosse igual a 1, conforme destacado em vermelho na Figura 51.

Figura 51 – Condições do algoritmo de procura de superfícies de ruptura 3D.

5.2

Resultado das análises de estabilidade tridimensionais

5.2.1

Comparação da estabilidade inicial (sucção constante)

A primeira etapa das análises tridimensionais foi a comparação dos fatores de segurança, nos diferentes formatos de talude, para cada uma das condições iniciais previamente consideradas (ou seja, antes das condições de fluxo serem aplicadas) cujos resultados estão resumidos na Figura 52 e na Tabela 9. A Tabela 10 apresenta uma comparação dos resultados 2D e 3D.

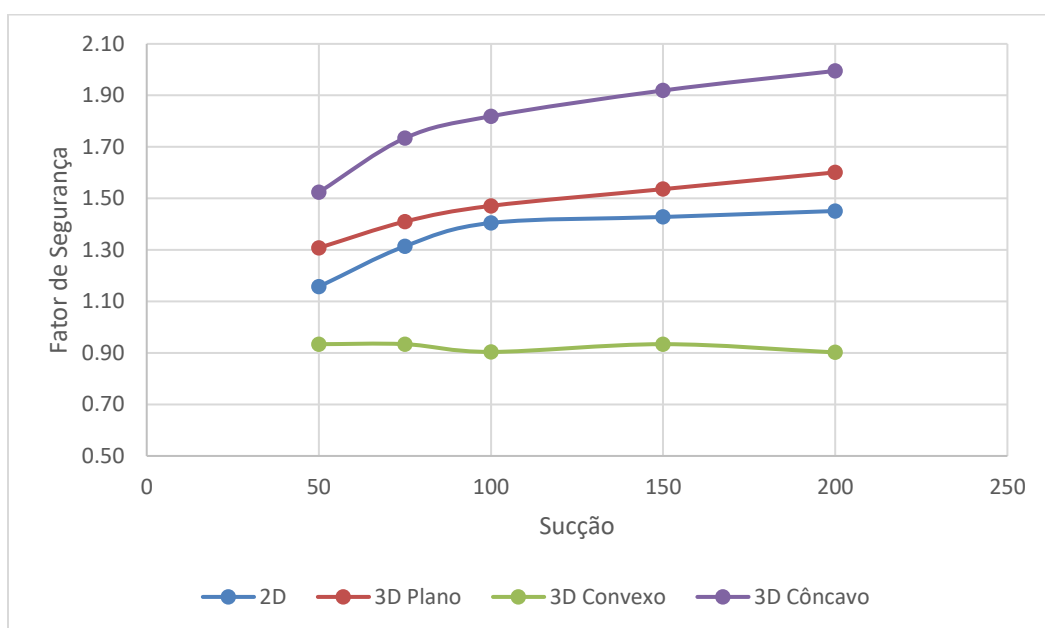


Figura 52 – Gráfico de comparação dos fatores de segurança nos estados iniciais.

Tabela 9 – Fatores de segurança obtidos para cada forma de talude.

Sucção(kPa)	Fator de Segurança			
	2D	3D Plano	3D Convexo	3D Côncavo
50	1,16	1,31	0,93	1,52
75	1,31	1,41	0,93	1,73
100	1,40	1,47	0,90	1,82
150	1,43	1,54	0,93	1,92
200	1,45	1,60	0,90	2,00

Tabela 10 – Comparação dos fatores de segurança em relação às análises 2D.

Sucção(kPa)	Comparação com os valores 2D		
	3D Plano	3D Convexo	3D Côncavo
50	13%	-20%	31%
75	8%	-29%	32%
100	5%	-36%	30%
150	8%	-35%	34%
200	10%	-38%	38%

Conforme exposto, os fatores de segurança observados no modelo plano foram os mais próximos dos valores obtidos nos modelos 2D, sendo estes ligeiramente superiores, com um acréscimo máximo de 13%. Estima-se que os resultados do modelo 3D plano seriam iguais aos 2D caso fosse adotado uma superfície de ruptura cilíndrica.

Para os modelos côncavos foram observados acréscimos no fator de segurança de 29% a 37% em comparação ao modelo 2D, que equivalem acréscimos de 17% a 25% se os valores forem comparados com os resultados do modelo 3D plano. Estes resultados são próximos daqueles obtidos por Chaudhary et al. (2016), que registrou um aumento 32% a 38% ao comparar modelos 3D planos e côncavos com formatos semelhantes aos utilizados no presente trabalho.

Contudo, para os modelos convexos foram identificados decréscimos no fator de segurança proporcionando situações de ruptura já no estado inicial. Ao analisar o formato das superfícies de ruptura se afere que esta situação se deva a uma tendência do formato convexo favorecer a formação de movimentos menos profundos. As Figuras 53 e 54 ilustram este argumento ao comparar as superfícies de ruptura obtidas nos modelos 2D e 3D convexo respectivamente, enquanto as Tabelas 11 e 12 o reforçam ao comparar as áreas e os volumes dos movimentos de massa.

Os detalhes de todas as superfícies de ruptura em cada uma das condições iniciais consideradas são apresentados no Apêndice F.

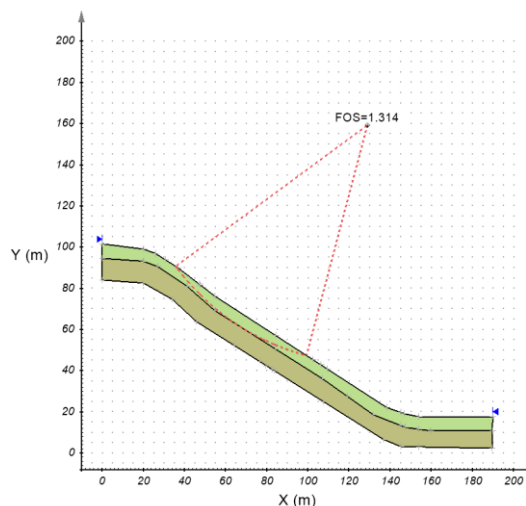


Figura 53 – Superfície de ruptura para a análise 2D com sucção de 75 kPa.

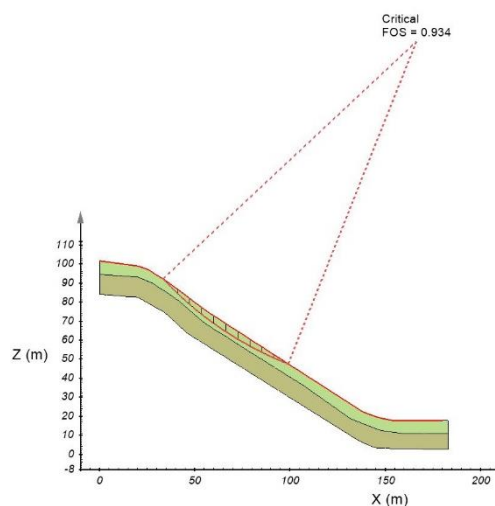


Figura 54 – Superfície de ruptura para a análise 3D Convexa com sucção de 75 kPa.

Tabela 11 – Áreas das superfícies de ruptura 3D.

Sucção(kPa)	Área das superfícies de ruptura 3D (m²)		
	3D Plano	3D Convexo	3D Côncavo
50	1220	749	1080
75	8440	749	6630
100	8590	164	6660
150	8590	749	7200
200	8590	164	8110

Tabela 12 – Volumes mobilizados nos movimentos de massa.

Sucção(kPa)	Volume mobilizado (m³)		
	3D Plano	3D Convexo	3D Côncavo
50	3007	1034	2398
75	41430	1034	30330
100	56400	199	32020
150	56400	1034	37980
200	56400	199	52010

Por fim, é válido destacar que não foi identificada uma relação direta entre os valores de poropressão e o acréscimo de resistência relacionado a forma, ou seja, a porcentagem de acréscimo de resistência não variou com a sucção.

5.2.2

Progressão das análises de estabilidade com o tempo

As Figuras 55 a 58 exibem a avaliação da evolução do fator de segurança em relação à progressão das condições climáticas com o tempo para os cenários de sucção inicial de 200 kPa, 150kPa, 100 kPa e 75kPa, respectivamente. É válido

ressaltar que os modelos 3D convexos não foram considerados nestas análises uma vez que para estes foi caracterizado um cenário de ruptura já no estado inicial.

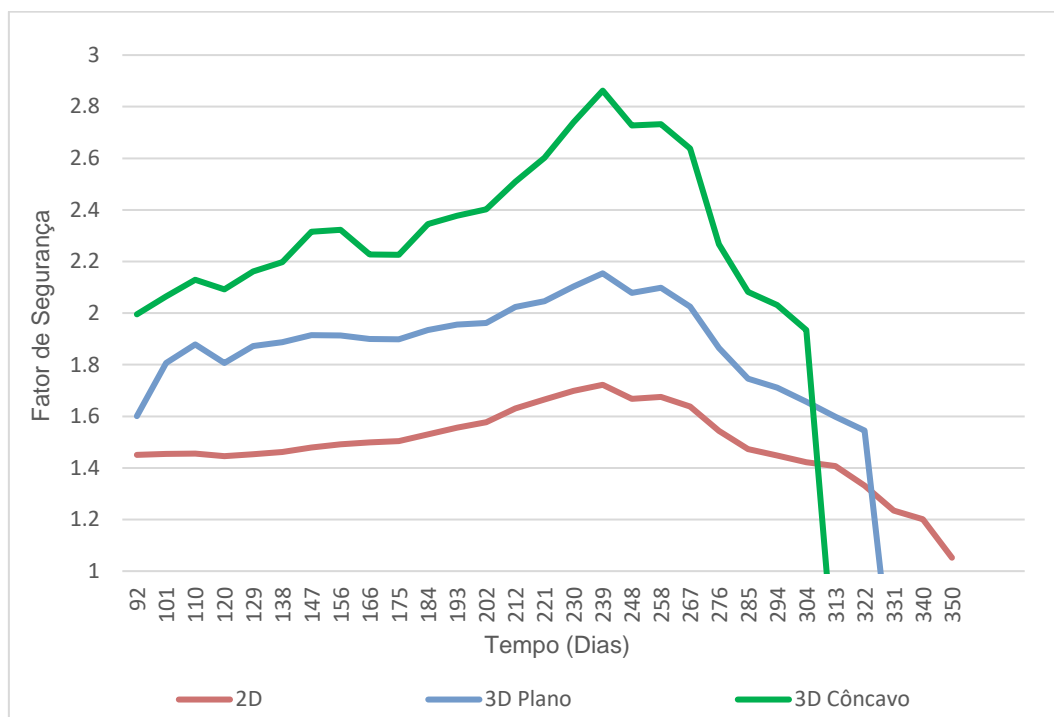


Figura 55 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 200 kPa.

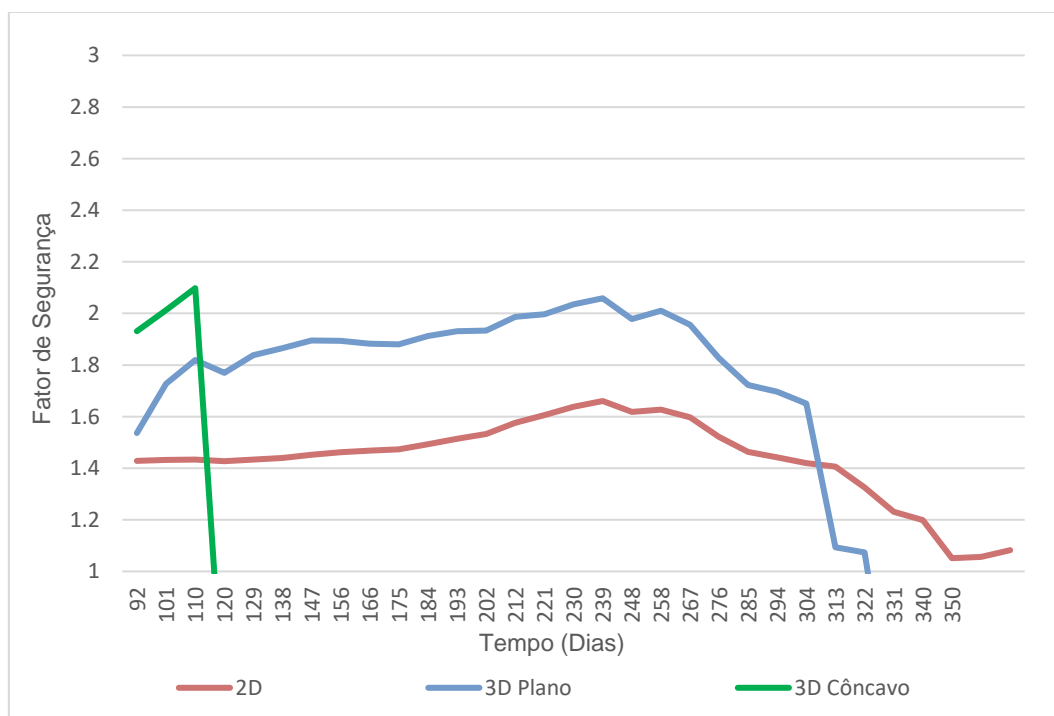


Figura 56 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 150 kPa.

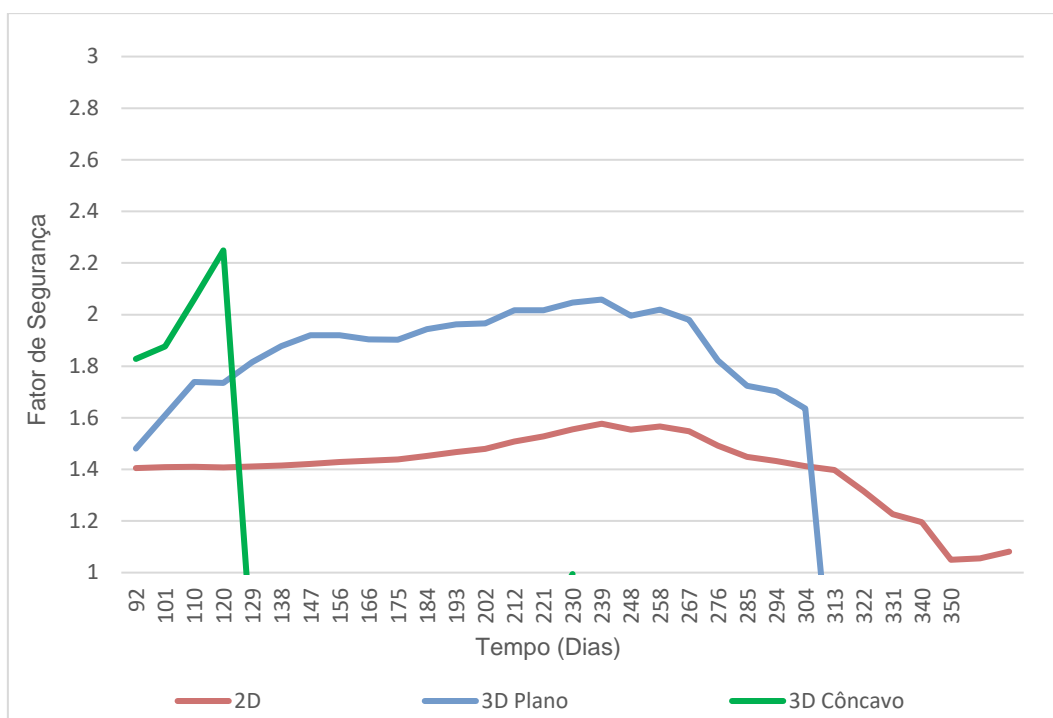


Figura 57 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 100 kPa.

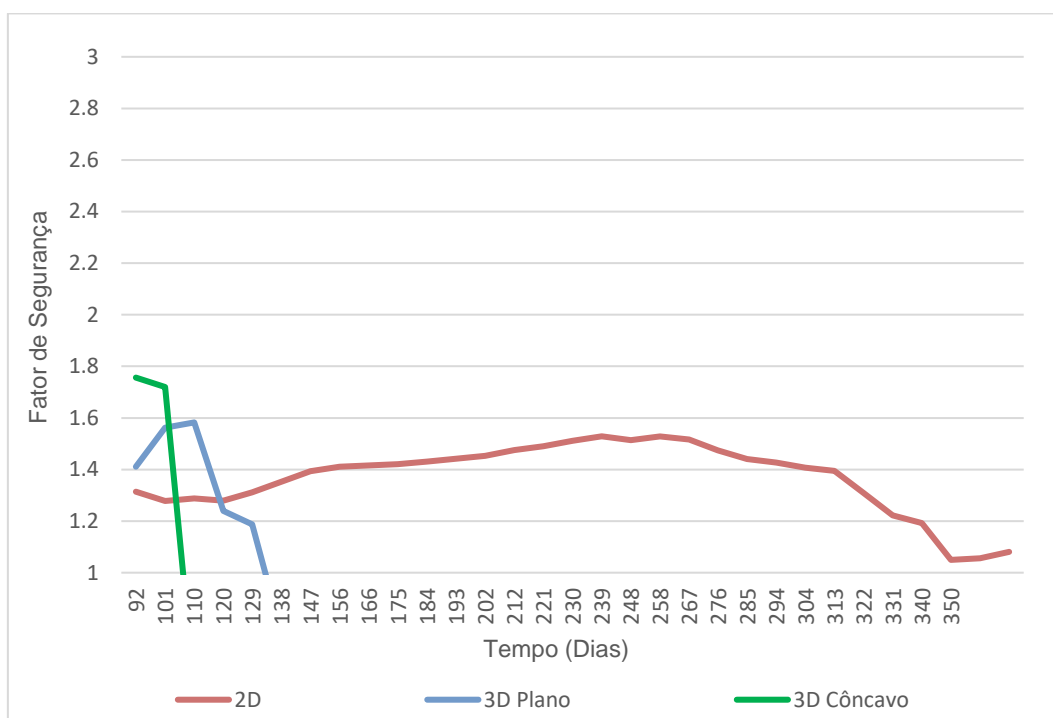


Figura 58 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 75kPa.

É possível observar nos gráficos, para todas as situações consideradas, que, tal qual previamente apresentado nas análises de condição inicial, os modelos tridimensionais 3D côncavos eram os mais estáveis no início do intervalo considerado, seguidos pelos modelos 3D planos e por fim os modelos 2D, na condição menos estável.

Entretanto, a situação se inverte ao longo do tempo, de forma que os modelos 3D côncavos e planos apresentaram fatores de segurança abaixo de 1 antes das chuvas críticas que provocaram os movimentos de massa na região serrana em 12 janeiro de 2011.

Tal resultado sugere que os modelos 3D, embora dotados de um maior fator de segurança inicial, sejam mais suscetíveis às variações condicionadas pela pluviometria.

Embora não tenha sido encontrada a razão exata para que esta situação ocorra nos modelos planos, estima-se que este resultado possa estar relacionado às configurações de superfície de ruptura aplicada, de maneira que se estima que poderiam ter sido encontrados resultados semelhantes aos do modelo 2D caso tivesse sido adotada uma superfície de ruptura cilíndrica, conforme já citado anteriormente.

Para os modelos côncavos é possível que a inclinação das camadas tenda a concentrar o fluxo em direção ao centro do modelo, eixo onde foi analisada a estabilidade.

Por fim, foi avaliado se no modelo 3D plano era registrada a mesma convergência no fator de segurança previamente observada nos modelos 2D. Conforme observado na Figura 59, que exibe tanto a evolução do fator de segurança com o tempo quanto os picos de precipitação previamente apresentados, embora a convergência não tenha sido tão bem definida como a que ocorreu no modelo 2D, a mesma ainda assim é perceptível, com os fatores de segurança dos cenários de sucção inicial de 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa, convergindo para fatores de segurança semelhante antes da ruptura.

Nesta modelagem, contudo as rupturas não ocorreram em uma única data, mas sim dentro do intervalo de 21 dias, em chuvas menores que antecederam às críticas que foram o estopim dos eventos registrados em 2011 na região serrana em 12 janeiro de 2011.

A convergência do fator de segurança ao longo do tempo não foi analisada para os modelos côncavos, uma vez que conforme já havia sido apresentado nas Figuras 55 a 58, para a maioria dos cenários iniciais considerados a ruptura ocorre pouco depois do início do intervalo de tempo avaliado.

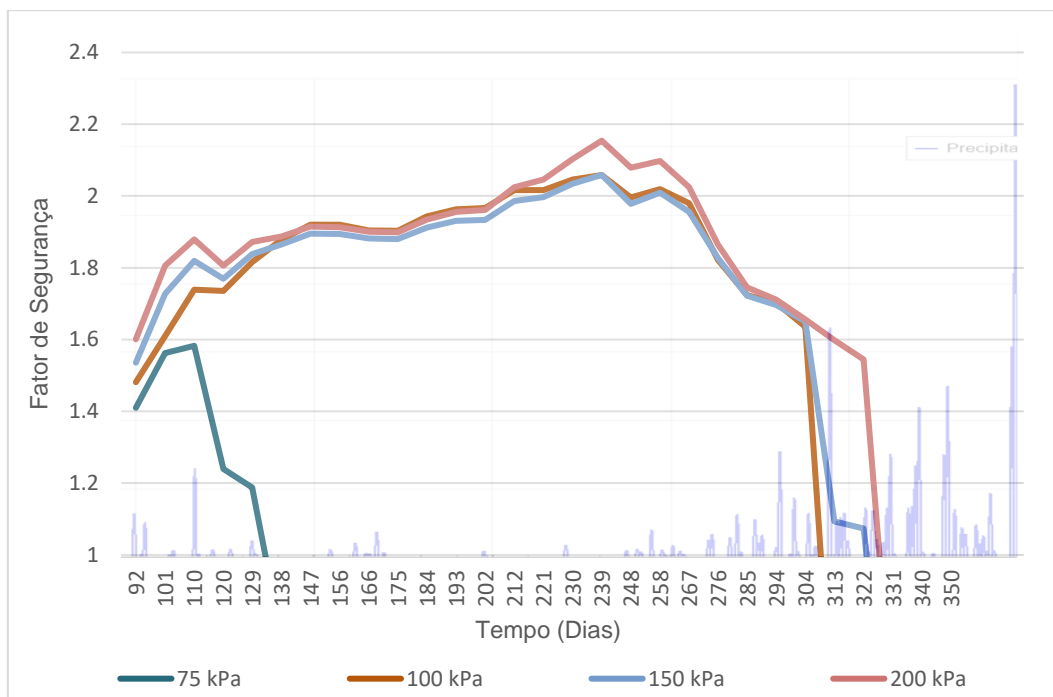


Figura 59 – Progressão do fator de segurança para os modelos de sucção inicial de 75kPa.são

5.3

Análises de fluxo tridimensionais

As análises de fluxo 3D foram realizadas para os modelos 3D planos e côncavos, considerando o estado de sucção inicial de 200 kPa. Tal escolha se baseou no fato de que os resultados das análises de estabilidade foram correlatos independente do estado inicial, de forma que a avaliação do que ocorre para este estado seria representativa dos demais. Ademais, o modelo com sucção inicial de 200 kPa foi aquele em que a geometria côncava mais tardou a romper, permitindo uma melhor avaliação das condições envolvidas.

O principal objetivo destas análises foi avaliar se de fato a distribuição de poropressões difere de forma significativa entre os modelos 2D e 3D plano e côncavo, caracterizando o comportamento em cada caso. Para tal, foi avaliada a resposta dos três modelos a um evento de precipitação intensa.

Esta avaliação se deu pela comparação dos perfis de poropressão nos modelos antes e depois do índice pluviométrico diário mais intenso ao qual foram submetidos, sendo esta a chuva que ocorreu no dia 294 (21/11/2010), cuja posição em relação aos dados de entrada está destacada no gráfico de pluviometria apresentado na Figura 60.

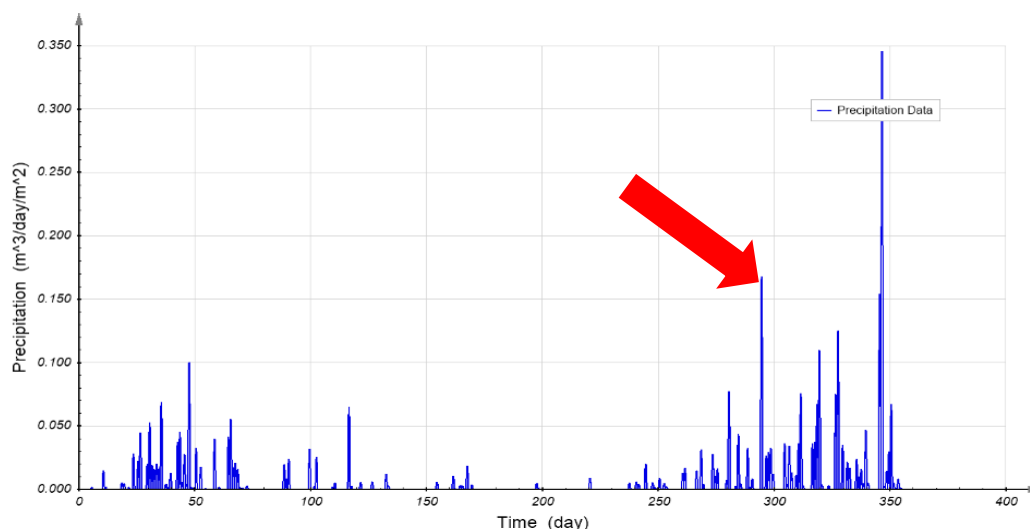


Figura 60 – Destaque para chuva ocorrido no dia 294, adotada como Situação 1.

É válido destacar que este é o segundo maior índice pluviométrico diário presente no *input*, sendo menor apenas que o ocorrido no dia 345 (12/01/2011), que não pôde ser considerado para esta situação, uma vez que os modelos 3D Plano e 3D Côncavo já haviam rompido nesta data.

Conforme apresentado nas Figuras 61 e 62, os perfis analisados foram os mesmos previamente estabelecidos para os modelos 2D, estando, desta forma posicionados na crista, a meia encosta e na base do talude na linha central dos modelos 3D.

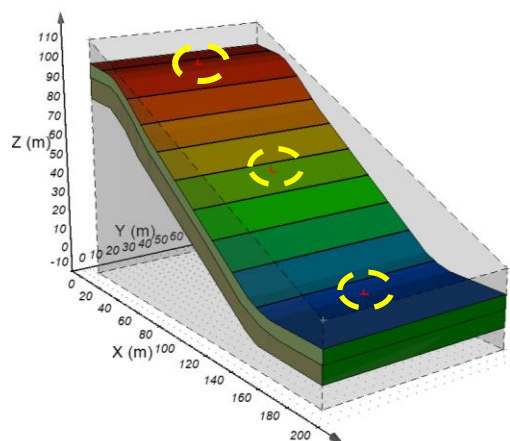


Figura 61 – Localização dos perfis de poropressão do modelo 3D Plano.

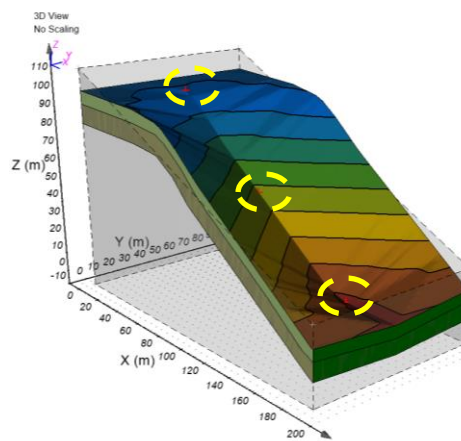


Figura 62 – Localização dos perfis de poropressão do modelo 3D Côncavo.

As Figuras 63, 64 e 65 apresentam as poropressões registradas nos perfis de crista, meia encosta, e base, respectivamente, nos dias 293 e 295, ou seja, antes e depois do evento.

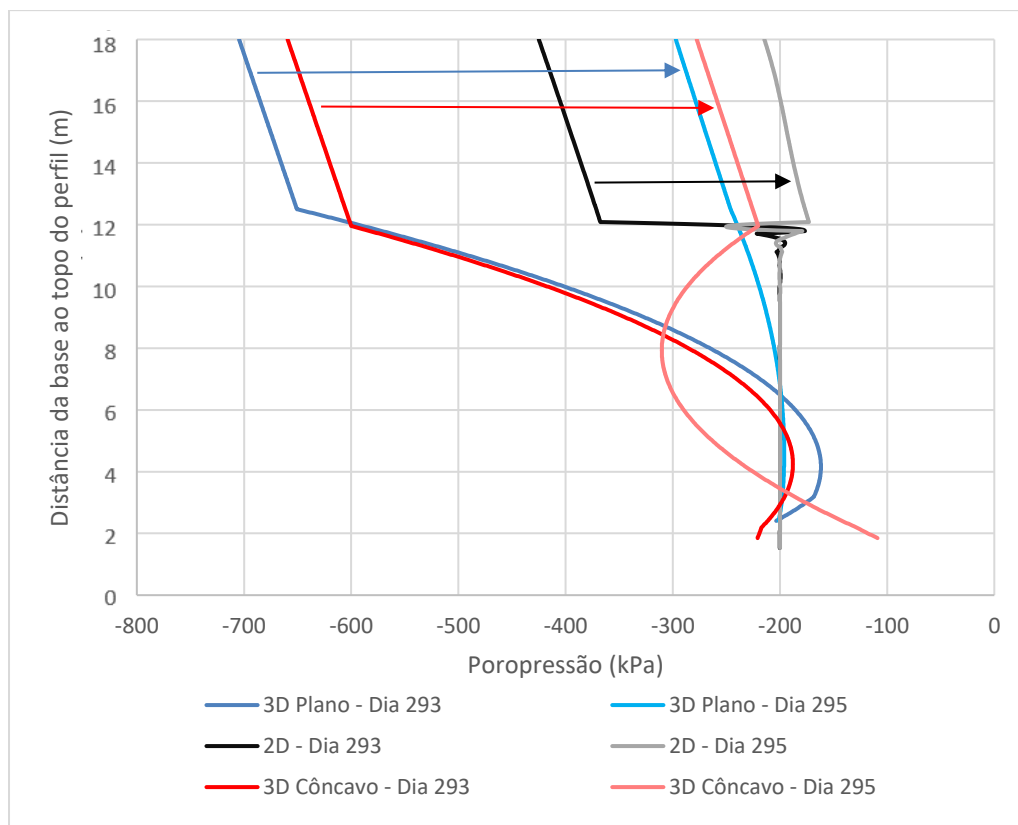


Figura 63 – Comparação das poropressões no perfil de crista.

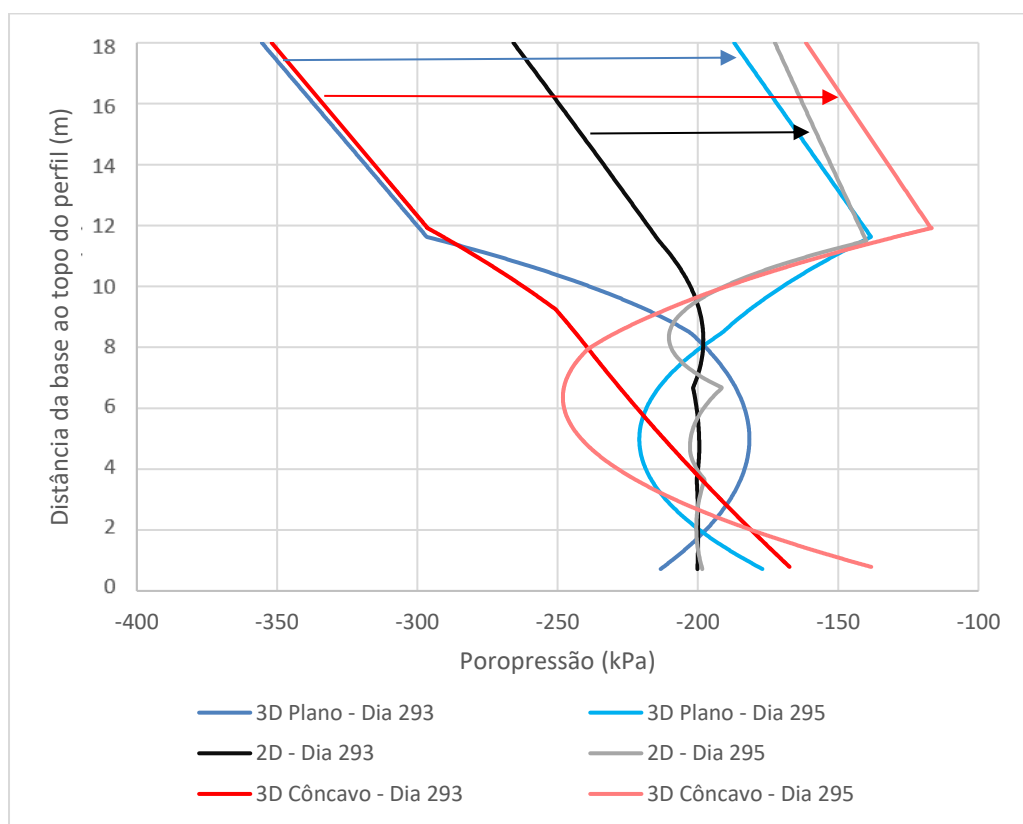


Figura 64 – Comparação das poropressões no perfil de meia encosta.

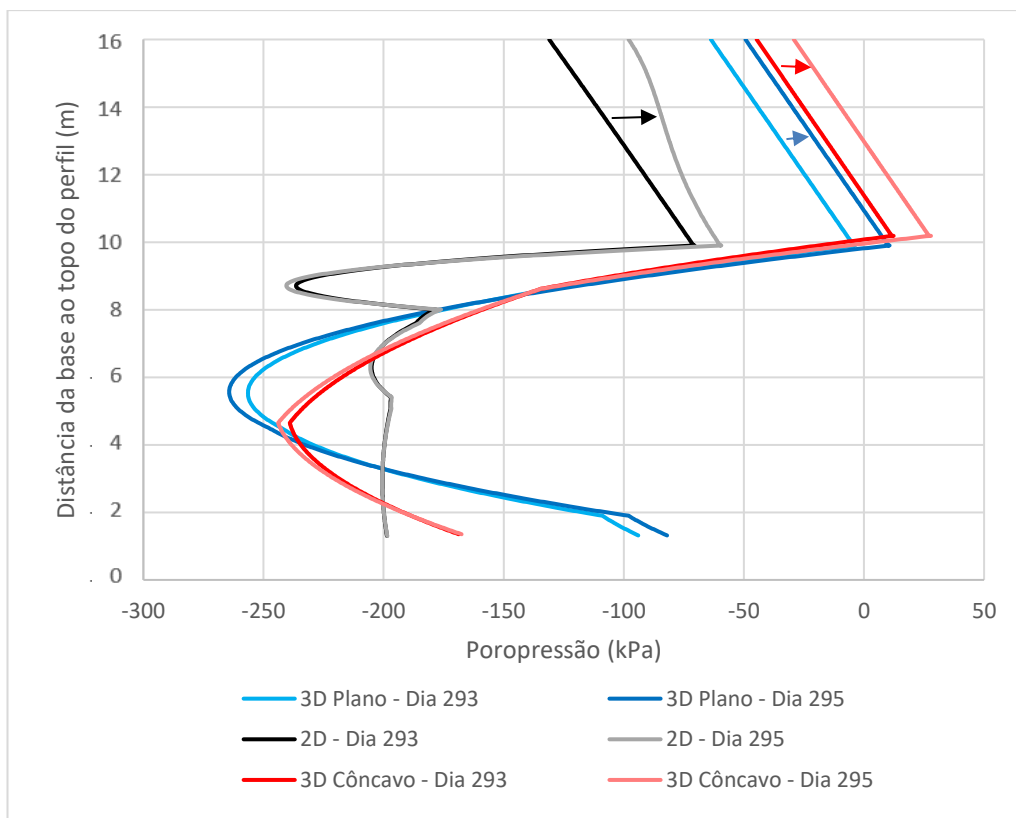


Figura 65 – Comparação das poropressões no perfil de base.

Observando as figuras supracitadas fica claro que os fluxos nos modelos 2D e 3D se comportam de maneiras distintas uma vez que para todos os casos foram observados perfis de poropressões diferentes.

Nos perfis de crista e de meia encosta (Figuras 63 e 64) é possível observar que, em ambos os modelos 3D, as variações de sucção foram muito mais significativas que as registradas no modelo 2D, sugerindo que de fato os modelos 3D são mais suscetíveis a variações de poropressões causadas por condições climáticas.

Também é possível perceber, nos perfis de meia encosta e base (Figuras 65 e 66), que os modelos tridimensionais côncavos apresentaram em sua camada superficial valores de poropressão maiores que os modelos bidimensionais. Especificamente no perfil de base (Figura 65) os valores de poropressão na camada superficial seguiram a ordem “3D Côncavo > 3D Plano > 2D”, o que é semelhante a sequência de rupturas observadas nas análises de estabilidade ao longo do tempo previamente apresentadas.

6 Conclusão

Observou-se nas análises 2D que foi possível criar um modelo no qual perfis iniciais de sucção homogênea com valores de 50 kPa, 75kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa convergiram para um resultado único de estabilidade. A convergência ocorreu ao submeter os diferentes estados iniciais a condições idênticas de precipitação e evaporação por um longo período de tempo.

Nas análises de fator de segurança ao longo do tempo foi necessário considerar um intervalo mínimo de aproximadamente oito meses antes da ruptura para que esta ocorresse simultaneamente e com a mesma geometria, independente do estado inicial. Estes oito meses equivaleram a considerar os dados de precipitação a partir do início da porção do ano caracterizada por menores pluviometrias, e o fator de segurança apresentou valores semelhantes desde o início do período chuvoso.

Nas análises de fluxo, a partir dos perfis de poropressão, se verificou que as semelhanças nas condições de estabilidade observadas estavam de fato relacionadas a perfis de sucção diferentes que convergiam para um estado único ao longo do tempo. Contudo, este fenômeno foi observado somente na camada superficial do solo, de forma que as distribuições finais de poropressão na camada mais profunda variaram caso a caso de acordo com o estado inicial definido como dado de entrada.

Nas análises 3D foi, primeiramente, executada uma comparação da estabilidade dos diferentes formatos de talude em relação a perfis homogêneos de sucção, onde se observou que os modelos tridimensionais planos e côncavos se apresentavam mais estáveis que os modelos bidimensionais.

Nos modelos tridimensionais convexos foi verificado uma condição mais instável, com situações de ruptura já no estado inicial. Avaliações de volume mobilizado e área de superfície de ruptura permitiram concluir que o menor fator de segurança estava ligado ao desenvolvimento de movimentos com menores dimensões.

Nas análises de estabilidade ao longo do tempo dos modelos 3D planos e côncavos identificou-se que apesar de inicialmente mais estáveis, estes romperam

com chuvas menos intensas do que as registradas para a ruptura do modelo 2D. Inferiu-se que isto se relaciona ao desenvolvimento de diferentes condições de fluxo nestes modelos, o que foi posteriormente ratificado pelas análises dos perfis de sucção dos modelos tridimensionais.

Referências bibliográficas

BAR, N.; WEEKES, G. **Directional shear strength models in 2d and 3d limit equilibrium analyses to assess the stability of anisotropic rock slopes in the Pilbara Region of Western Australia.** AUSTRALIAN GEOMECHANICS JOURNAL, 52(4), 91-104. 2017

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media.** Hydrol. Paper 3. Colorado State Univ., Fort Collins, CO, USA, 1964.

BYRNE, R. J.; KENDALL, J; BROWN S. **Cause and Mechanism of Failure of Kettleman Hills Landfill B-19, Phase IA,** Geotechnical Special Technical Publication No. 31, Stability and Performance of Slopes and Embankments - II, A.S.C.E., R.B.Seed and R.W. Boulanger, ed., Vol. 2, pp. 1188-1215. 1992

CHAUDHARY, K. B.; DOMINGOS, V. H.; GITIRANA JR, G.; FREDLUND, M.; LU, H. **Three-Dimensional Slope Stability: Geometry Effects.** In Tailings and Mine Waste Conference (Vol. 16). 2016.

DA SILVA, A. J. N.; DE CARVALHO, F. G. **Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v,31, p,853-862, 2007. DOI: 10,1590/S0100- 06832007000500003.

DE OLIVEIRA, C. M. M. **Avaliação de mecanismos de ruptura associados aos escorregamentos da Prainha e Condomínio em Nova Friburgo.** Dissertação de Mestrado – DEC/ PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2013

DURNER, W. **Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure.** Water Resource, 30(2): 211-223, 1994.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E.; TOHA F. X. **Mechanical behavior and testing methods of unsaturated soils.** Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM, STP 740, pp. 114-129. 1981

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J.; PUFAHL, D. E. **The relationship between limit equilibrium slope stability methods.** In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 3: pp. 409-416. 1981

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. **Stress state variables for unsaturated soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 103 (ASCE 12919). pp. 447-466. 1977

FREDLUND, D. G.; MORGENSTEM, N. R.; WIDGER, R. S. **The shear strength of unsaturated soils**. Canadian Geotechnical J. 15, No. 3, 313-321. 1978

FREDLUND, M. D.; FREDLUND D. G; WILSON G. W. **An equation to represent grain-size distribution**. Canadian Geotechnical Journal, 37(4), 817-827

GITIRANA, JR, G.; SANTOS, M. A.; FREDLUND, M. D., **Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide**. In GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation. 2008. pp. 186-190.

GITIRANA JR, G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. **A curva de retenção de água de materiais porosos**. In: Camapum de Carvalho, J. et al. (Org.). Solos não saturados no contexto geotécnico. ABMS, São Paulo, 2015, p. 205-229

GÓMEZ, J.; GARCIA, D. M.; & ROMANEL, C.; **Análise numérica 3d da estabilidade de taludes de grande altura em minas a céu aberto**. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE, 2(8), 1-15. 2016

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H.; FREDLUND D. G. **Application of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering**. Proc. of the 8th East Asian Pacific Conf. on Structural Eng. And Construction, Singapore. 2001.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção com o método do papel filtro**. In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, PR, 1994, v,2, p. 515-522

MITCHELL, J. K.; SEED, R. B; CHANG, M. **The Kettleman Hills landfill failure: a retrospective view of the failure investigations and lessons learned**. Proceedings of the Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, 2: 1379-1392. 1993

MUALEM, Y. **A catalogue of the hydraulic propreties of unsatured soils**. Technion Research and Development Foundation. 1976.

SEED, R. B.; MITCHELL, J. K.; SEED, H. B. **Kettleman hills waste landfill slope failure. II: stability analyses**. Journal of Geotechnical Engineering, 116(4), 669-690. 1990

SOILCONTROL. **Evaporímetro de Piché.** Disponível em:
<<https://www.soilcontrol.com.br/produto/92573/evaporimetro-de-piche.aspx>> .
Acesso em: 02/02/2019.

VANAPALLI, S. K.; NICOTERA, M. V.; SHARMA, R. S. **Axis translation and negative water column techniques for suction control.** In: Tarantino, A. et al. (Eds.). Laboratory and field testing of unsaturated soils. Springer, 2008, p. 33-48.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils,** Soil Sci. Soc. Am. J., no,44, pp,982-998. 1980.

Apêndice A – Dados pluviométricos

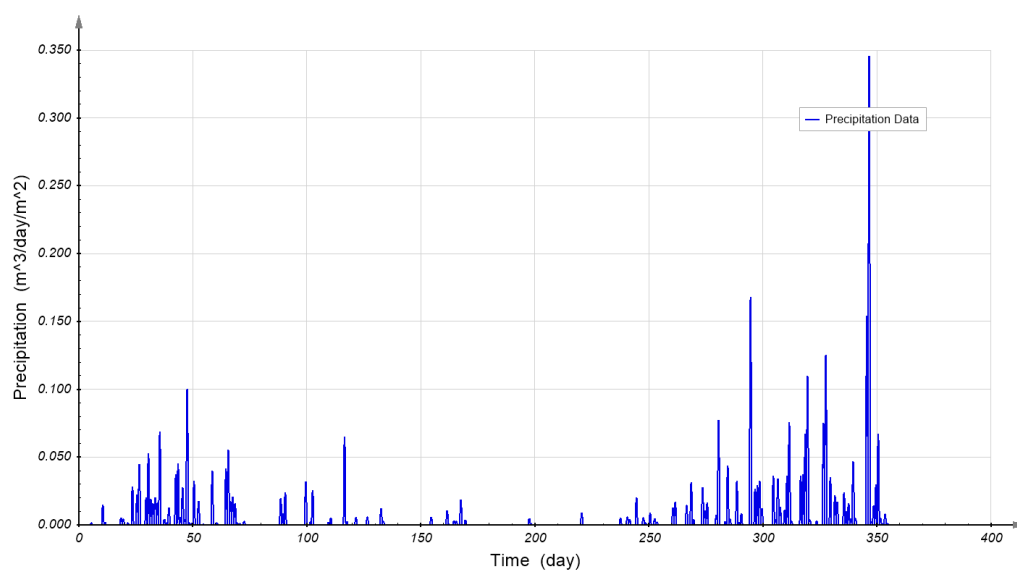


Figura 66 – Gráfico resumo dos dados de pluviometria advindos da estação Fazenda Mendes.

Tabela 13 – Dados pluviométricos advindos da estação Fazenda Mendes.

Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)
01/02/2010	000	0	25/02/2010	025	0,0145	21/03/2010	049	0,0009
02/02/2010	001	0	26/02/2010	026	0,0292	22/03/2010	050	0,0212
03/02/2010	002	0	27/02/2010	027	0	23/03/2010	051	0
04/02/2010	003	0	28/02/2010	028	0	24/03/2010	052	0,0116
05/02/2010	004	0	01/03/2010	029	0,0133	25/03/2010	053	0
06/02/2010	005	0,0011	02/03/2010	030	0,0345	26/03/2010	054	0,0005
07/02/2010	006	0	03/03/2010	031	0,0124	27/03/2010	055	0
08/02/2010	007	0	04/03/2010	032	0,0103	28/03/2010	056	0
09/02/2010	008	0	05/03/2010	033	0,0132	29/03/2010	057	0
10/02/2010	009	0	06/03/2010	034	0,0107	30/03/2010	058	0,0262
11/02/2010	010	0,0097	07/03/2010	035	0,0450	31/03/2010	059	0
12/02/2010	011	0,0016	08/03/2010	036	0	01/04/2010	060	0,0010
13/02/2010	012	0	09/03/2010	037	0,0029	02/04/2010	061	0
14/02/2010	013	0	10/03/2010	038	0,0011	03/04/2010	062	0
15/02/2010	014	0	11/03/2010	039	0,0084	04/04/2010	063	0
16/02/2010	015	0	12/03/2010	040	0	05/04/2010	064	0,0270
17/02/2010	016	0	13/03/2010	041	0	06/04/2010	065	0,0362
18/02/2010	017	0	14/03/2010	042	0,0242	07/04/2010	066	0,0112
19/02/2010	018	0,0036	15/03/2010	043	0,0296	08/04/2010	067	0,0135
20/02/2010	019	0,0028	16/03/2010	044	0,0040	09/04/2010	068	0,0104
21/02/2010	021	0	17/03/2010	045	0,0181	10/04/2010	069	0,0010
22/02/2010	022	0,0011	18/03/2010	046	0,0024	11/04/2010	070	0,0008
23/02/2010	023	0	19/03/2010	047	0,0653	12/04/2010	071	0
24/02/2010	024	0,0186	20/03/2010	048	0,0011	13/04/2010	072	0,0018

Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)
14/04/2010	073	0,0018	30/05/2010	119	0	15/07/2010	165	0,0017
15/04/2010	074	0	31/05/2010	120	0	16/07/2010	166	0
16/04/2010	075	0	01/06/2010	121	0,0037	17/07/2010	167	0,0121
17/04/2010	076	0	02/06/2010	122	0	18/07/2010	168	0
18/04/2010	077	0	03/06/2010	123	0	19/07/2010	169	0,0026
19/04/2010	078	0	04/06/2010	124	0	20/07/2010	170	0
20/04/2010	079	0	05/06/2010	125	0	21/07/2010	171	0
21/04/2010	080	0	06/06/2010	126	0,0040	22/07/2010	172	0
22/04/2010	081	0	07/06/2010	127	0	23/07/2010	173	0
23/04/2010	082	0	08/06/2010	128	0	24/07/2010	174	0
24/04/2010	083	0	09/06/2010	129	0	25/07/2010	175	0
25/04/2010	084	0	10/06/2010	130	0	26/07/2010	176	0
26/04/2010	085	0	11/06/2010	131	0	27/07/2010	177	0
27/04/2010	086	0	12/06/2010	132	0,0079	28/07/2010	178	0
28/04/2010	087	0	13/06/2010	133	0,0018	29/07/2010	179	0
29/04/2010	088	0	14/06/2010	134	0	30/07/2010	180	0
30/04/2010	089	0,0128	15/06/2010	135	0	31/07/2010	181	0
01/05/2010	090	0,0055	16/06/2010	136	0	01/08/2010	182	0
02/05/2010	091	0,0158	17/06/2010	137	0	02/08/2010	183	0
03/05/2010	092	0	18/06/2010	138	0	03/08/2010	184	0
04/05/2010	093	0	19/06/2010	139	0	04/08/2010	185	0
05/05/2010	094	0	20/06/2010	140	0	05/08/2010	186	0
06/05/2010	095	0	21/06/2010	141	0	06/08/2010	187	0
07/05/2010	096	0	22/06/2010	142	0	07/08/2010	188	0
08/05/2010	097	0	23/06/2010	143	0	08/08/2010	189	0
09/05/2010	098	0	24/06/2010	144	0	09/08/2010	190	0
10/05/2010	099	0	25/06/2010	145	0	10/08/2010	191	0
11/05/2010	100	0,0210	26/06/2010	146	0	11/08/2010	192	0
12/05/2010	101	0	27/06/2010	147	0	12/08/2010	193	0
13/05/2010	102	0,0013	28/06/2010	148	0	13/08/2010	194	0
14/05/2010	103	0,0167	29/06/2010	149	0	14/08/2010	195	0
15/05/2010	104	0	30/06/2010	150	0	15/08/2010	196	0
16/05/2010	105	0	01/07/2010	151	0	16/08/2010	197	0,0033
17/05/2010	106	0	02/07/2010	152	0	17/08/2010	198	0,0006
18/05/2010	107	0	03/07/2010	153	0	18/08/2010	199	0
19/05/2010	108	0	04/07/2010	154	0,0038	19/08/2010	200	0
20/05/2010	109	0	05/07/2010	155	0	20/08/2010	201	0
21/05/2010	110	0,0016	06/07/2010	156	0	21/08/2010	202	0
22/05/2010	111	0,0035	07/07/2010	157	0	22/08/2010	203	0
23/05/2010	112	0	08/07/2010	158	0	23/08/2010	204	0
24/05/2010	113	0	09/07/2010	159	0	24/08/2010	205	0
25/05/2010	114	0	10/07/2010	160	0	25/08/2010	206	0
26/05/2010	115	0	11/07/2010	161	0,0071	26/08/2010	207	0
27/05/2010	116	0	12/07/2010	162	0,0002	27/08/2010	208	0
28/05/2010	117	0,0426	13/07/2010	163	0	28/08/2010	209	0
29/05/2010	118	0,0017	14/07/2010	164	0,0021	29/08/2010	210	0

Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)
30/08/2010	211	0	15/10/2010	257	0	30/11/2010	303	0
31/08/2010	212	0	16/10/2010	258	0	01/12/2010	304	0,0235
01/09/2010	213	0	17/10/2010	259	0	02/12/2010	305	0,0026
02/09/2010	214	0	18/10/2010	260	0,0082	03/12/2010	306	0,0223
03/09/2010	215	0	19/10/2010	261	0,0110	04/12/2010	307	0,0088
04/09/2010	216	0	20/10/2010	262	0	05/12/2010	308	0
05/09/2010	217	0	21/10/2010	263	0	06/12/2010	309	0,0074
06/09/2010	218	0	22/10/2010	264	0	07/12/2010	310	0,0236
07/09/2010	219	0	23/10/2010	265	0	08/12/2010	311	0,0494
08/09/2010	220	0,0058	24/10/2010	266	0,0095	09/12/2010	312	0,0018
09/09/2010	221	0	25/10/2010	267	0	10/12/2010	313	0
10/09/2010	222	0	26/10/2010	268	0,0205	11/12/2010	314	0
11/09/2010	223	0	27/10/2010	269	0,0028	12/12/2010	315	0
12/09/2010	224	0	28/10/2010	270	0	13/12/2010	316	0,0238
13/09/2010	225	0	29/10/2010	271	0	14/12/2010	317	0,0242
14/09/2010	226	0	30/10/2010	272	0	15/12/2010	318	0,0438
15/09/2010	227	0	31/10/2010	273	0,0182	16/12/2010	319	0,0716
16/09/2010	228	0	01/11/2010	274	0,0071	17/12/2010	320	0,0025
17/09/2010	229	0	02/11/2010	275	0,0107	18/12/2010	321	0
18/09/2010	230	0	03/11/2010	276	0	19/12/2010	322	0
19/09/2010	231	0	04/11/2010	277	0	20/12/2010	323	0,0020
20/09/2010	232	0	05/11/2010	278	0	21/12/2010	324	0
21/09/2010	233	0	06/11/2010	279	0,0048	22/12/2010	325	0
22/09/2010	234	0	07/11/2010	280	0,0504	23/12/2010	326	0,0489
23/09/2010	235	0	08/11/2010	281	0	24/12/2010	327	0,0818
24/09/2010	236	0	09/11/2010	282	0	25/12/2010	328	0
25/09/2010	237	0,0034	10/11/2010	283	0,0018	26/12/2010	329	0,0230
26/09/2010	238	0	11/11/2010	284	0,0286	27/12/2010	330	0
27/09/2010	239	0	12/11/2010	285	0,0027	28/12/2010	331	0,0141
28/09/2010	240	0,0040	13/11/2010	286	0	29/12/2010	332	0,0112
29/09/2010	241	0,0028	14/11/2010	287	0	30/12/2010	333	0
30/09/2010	242	0	15/11/2010	288	0,0211	31/12/2010	334	0
01/10/2010	243	0	16/11/2010	289	0,0016	01/01/2011	335	0,0158
02/10/2010	244	0,0134	17/11/2010	290	0,0057	02/01/2011	336	0,0067
03/10/2010	245	0	18/11/2010	291	0	03/01/2011	337	0,0104
04/10/2010	246	0	19/11/2010	292	0	04/01/2011	338	0,0033
05/10/2010	247	0,0036	20/11/2010	293	0	05/01/2011	339	0,0305
06/10/2010	248	0,0010	21/11/2010	294	0,1095	06/01/2011	340	0,0031
07/10/2010	249	0	22/11/2010	295	0	07/01/2011	341	0
08/10/2010	250	0,0058	23/11/2010	296	0,0175	08/01/2011	342	0
09/10/2010	251	0	24/11/2010	297	0,0193	09/01/2011	343	0
10/10/2010	252	0,0032	25/11/2010	298	0,0213	10/01/2011	344	0
11/10/2010	253	0,0013	26/11/2010	299	0,0080	11/01/2011	345	0,1005
12/10/2010	254	0	27/11/2010	300	0	12/01/2011	346	0,2254
13/10/2010	255	0	28/11/2010	301	0	13/01/2011	347	0,0013
14/10/2010	256	0	29/11/2010	302	0	14/01/2011	348	0,0094

Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)	Data	Dia	Precipitação (m³/dia/m²)
15/01/2011	349	0,0196	21/01/2011	355	0	27/01/2011	361	0
16/01/2011	350	0,0440	22/01/2011	356	0	28/01/2011	362	0
17/01/2011	351	0,0034	23/01/2011	357	0	29/01/2011	363	0
18/01/2011	352	0,0005	24/01/2011	358	0	30/01/2011	364	0
19/01/2011	353	0,0052	25/01/2011	359	0	31/01/2011	365	0
20/01/2011	354	0,0008	26/01/2011	360	0	-	-	-

Apêndice B – Dados de evaporação e temperatura

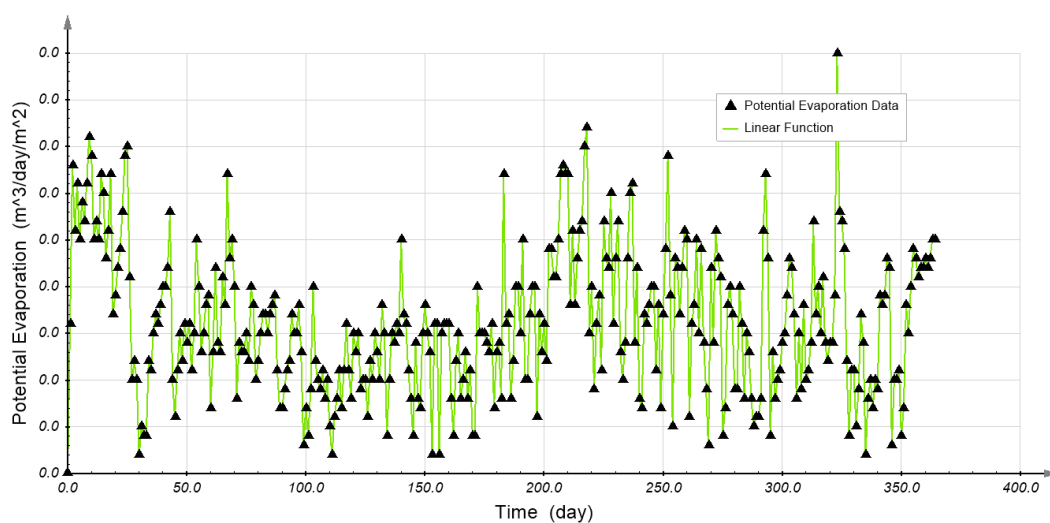


Figura 67 – Gráfico resumo dos dados de evaporação potencial advindos da estação Fazenda Mendes.

Tabela 14 – Dados de evaporação potencial e temperatura advindos da estação Cordeiro.

Data	Evap. ($\text{m}^3/\text{dia}/\text{m}^2$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Data	Evap. ($\text{m}^3/\text{dia}/\text{m}^2$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Data	Evap. ($\text{m}^3/\text{dia}/\text{m}^2$)	T ($^{\circ}\text{C}$)
01/02/2010	0,0016	25,76	25/02/2010	0,0035	25,22	21/03/2010	0,0016	23,40
02/02/2010	0,0033	26,28	26/02/2010	0,0021	22,18	22/03/2010	0,0014	24,58
03/02/2010	0,0026	26,98	27/02/2010	0,001	21,14	23/03/2010	0,0016	24,06
04/02/2010	0,0031	26,14	28/02/2010	0,0012	22,16	24/03/2010	0,0011	24,44
05/02/2010	0,0025	26,18	01/03/2010	0,001	19,74	25/03/2010	0,0015	23,78
06/02/2010	0,0029	24,40	02/03/2010	0,0002	20,20	26/03/2010	0,0025	23,26
07/02/2010	0,0027	24,66	03/03/2010	0,0005	21,96	27/03/2010	0,002	24,02
08/02/2010	0,0031	26,58	04/03/2010	0,0004	22,58	28/03/2010	0,0013	24,34
09/02/2010	0,0036	28,30	05/03/2010	0,0004	22,98	29/03/2010	0,0015	25,06
10/02/2010	0,0034	25,18	06/03/2010	0,0012	23,36	30/03/2010	0,0018	24,16
11/02/2010	0,0025	26,10	07/03/2010	0,0011	23,44	31/03/2010	0,0019	23,06
12/02/2010	0,0027	25,04	08/03/2010	0,0015	25,10	01/04/2010	0,0007	22,54
13/02/2010	0,0025	25,70	09/03/2010	0,0017	25,30	02/04/2010	0,0013	23,14
14/02/2010	0,0032	25,62	10/03/2010	0,0016	24,98	03/04/2010	0,0022	24,18
15/02/2010	0,003	25,54	11/03/2010	0,0018	25,74	04/04/2010	0,0014	23,96
16/02/2010	0,0023	27,14	12/03/2010	0,002	25,96	05/04/2010	0,0013	23,52
17/02/2010	0,0026	27,78	13/03/2010	0,002	26,22	06/04/2010	0,0021	23,00
18/02/2010	0,0032	24,80	14/03/2010	0,0022	27,24	07/04/2010	0,0018	20,48
19/02/2010	0,0017	25,30	15/03/2010	0,0028	24,74	08/04/2010	0,0032	18,16
20/02/2010	0,0019	25,80	16/03/2010	0,001	23,46	09/04/2010	0,0023	19,58
21/02/2010	0,0022	25,12	17/03/2010	0,0006	21,46	10/04/2010	0,0025	18,72
22/02/2010	0,0024	25,94	18/03/2010	0,0011	23,26	11/04/2010	0,002	18,30
23/02/2010	0,0028	25,96	19/03/2010	0,0015	22,84	12/04/2010	0,0008	19,02
24/02/2010	0,0034	27,32	20/03/2010	0,0012	24,98	13/04/2010	0,0014	19,78

Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)	Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)	Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)
14/04/2010	0,0013	19,92	30/05/2010	0,0008	19,74	15/07/2010	0,0008	20,30
15/04/2010	0,0013	20,30	31/05/2010	0,0015	18,74	16/07/2010	0,001	20,52
16/04/2010	0,0015	21,30	01/06/2010	0,0013	16,28	17/07/2010	0,0013	19,42
17/04/2010	0,0012	22,72	02/06/2010	0,0015	16,00	18/07/2010	0,0008	17,88
18/04/2010	0,002	20,94	03/06/2010	0,0009	17,46	19/07/2010	0,0011	16,56
19/04/2010	0,0018	20,52	04/06/2010	0,001	17,28	20/07/2010	0,0004	17,46
20/04/2010	0,001	20,90	05/06/2010	0,001	17,22	21/07/2010	0,0004	17,50
21/04/2010	0,0012	21,54	06/06/2010	0,0006	15,58	22/07/2010	0,002	18,06
22/04/2010	0,0015	22,78	07/06/2010	0,0012	14,00	23/07/2010	0,0015	19,28
23/04/2010	0,0017	24,14	08/06/2010	0,001	15,28	24/07/2010	0,0015	18,70
24/04/2010	0,0017	23,50	09/06/2010	0,0015	15,18	25/07/2010	0,0015	17,22
25/04/2010	0,0015	22,64	10/06/2010	0,0013	15,24	26/07/2010	0,0014	16,80
26/04/2010	0,0017	22,64	11/06/2010	0,001	17,82	27/07/2010	0,0013	18,60
27/04/2010	0,0018	23,70	12/06/2010	0,0018	13,54	28/07/2010	0,0016	17,48
28/04/2010	0,0019	22,24	13/06/2010	0,0015	13,64	29/07/2010	0,0007	17,84
29/04/2010	0,0011	19,68	14/06/2010	0,0004	13,34	30/07/2010	0,0013	18,14
30/04/2010	0,0007	19,96	15/06/2010	0,001	14,00	31/07/2010	0,0014	17,66
01/05/2010	0,0007	18,86	16/06/2010	0,0015	15,26	01/08/2010	0,0008	18,66
02/05/2010	0,0009	18,24	17/06/2010	0,0014	16,96	02/08/2010	0,0032	18,90
03/05/2010	0,0011	19,52	18/06/2010	0,0016	17,60	03/08/2010	0,0016	20,06
04/05/2010	0,0012	19,30	19/06/2010	0,0015	16,78	04/08/2010	0,0017	18,02
05/05/2010	0,0017	20,08	20/06/2010	0,0025	17,12	05/08/2010	0,0008	18,00
06/05/2010	0,0015	21,44	21/06/2010	0,0017	18,10	06/08/2010	0,0012	18,76
07/05/2010	0,0015	20,96	22/06/2010	0,0016	18,62	07/08/2010	0,002	16,98
08/05/2010	0,0018	20,92	23/06/2010	0,0011	18,34	08/08/2010	0,002	17,48
09/05/2010	0,0013	19,18	24/06/2010	0,0008	17,70	09/08/2010	0,0015	20,36
10/05/2010	0,0003	17,58	25/06/2010	0,0004	16,92	10/08/2010	0,0025	17,96
11/05/2010	0,0007	17,72	26/06/2010	0,0014	16,72	11/08/2010	0,001	16,62
12/05/2010	0,0004	19,16	27/06/2010	0,0008	15,98	12/08/2010	0,001	17,38
13/05/2010	0,0009	16,78	28/06/2010	0,0007	18,22	13/08/2010	0,0017	17,52
14/05/2010	0,002	17,64	29/06/2010	0,0015	15,80	14/08/2010	0,002	19,36
15/05/2010	0,0012	17,00	30/06/2010	0,0018	14,80	15/08/2010	0,002	14,08
16/05/2010	0,001	17,82	01/07/2010	0,0015	15,80	16/08/2010	0,0006	14,22
17/05/2010	0,0009	19,14	02/07/2010	0,0013	16,94	17/08/2010	0,0017	12,62
18/05/2010	0,0011	18,38	03/07/2010	0,0002	18,22	18/08/2010	0,0013	13,98
19/05/2010	0,0008	19,94	04/07/2010	0,0016	17,92	19/08/2010	0,0016	13,02
20/05/2010	0,001	20,66	05/07/2010	0,0016	17,18	20/08/2010	0,0012	15,72
21/05/2010	0,0005	18,90	06/07/2010	0,0002	16,26	21/08/2010	0,0024	17,00
22/05/2010	0,0002	18,20	07/07/2010	0,0015	16,20	22/08/2010	0,0024	16,44
23/05/2010	0,0006	18,28	08/07/2010	0,0016	16,76	23/08/2010	0,0021	17,64
24/05/2010	0,0008	19,04	09/07/2010	0,0016	19,74	24/08/2010	0,0021	18,50
25/05/2010	0,0011	19,68	10/07/2010	0,0016	19,14	25/08/2010	0,0025	19,66
26/05/2010	0,0007	20,02	11/07/2010	0,0008	18,80	26/08/2010	0,0032	19,70
27/05/2010	0,0011	19,02	12/07/2010	0,0004	19,30	27/08/2010	0,0033	20,68
28/05/2010	0,0016	18,16	13/07/2010	0,0012	20,08	28/08/2010	0,0032	20,78
29/05/2010	0,0011	17,34	14/07/2010	0,0015	21,04	29/08/2010	0,0032	20,16

Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)	Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)	Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)
30/08/2010	0,0018	21,10	15/10/2010	0,0017	22,04	30/11/2010	0,0023	25,60
31/08/2010	0,0026	18,90	16/10/2010	0,0022	23,88	01/12/2010	0,0022	23,96
01/09/2010	0,0018	19,22	17/10/2010	0,0026	24,24	02/12/2010	0,0017	23,26
02/09/2010	0,0023	19,18	18/10/2010	0,0025	20,80	03/12/2010	0,0008	24,54
03/09/2010	0,0026	20,66	19/10/2010	0,0006	19,52	04/12/2010	0,0015	25,12
04/09/2010	0,0027	20,78	20/10/2010	0,0016	19,86	05/12/2010	0,0009	25,00
05/09/2010	0,0035	22,22	21/10/2010	0,0018	20,28	06/12/2010	0,0018	24,36
06/09/2010	0,0037	18,94	22/10/2010	0,0025	20,84	07/12/2010	0,001	24,52
07/09/2010	0,0015	19,84	23/10/2010	0,0015	23,88	08/12/2010	0,0011	24,90
08/09/2010	0,002	16,96	24/10/2010	0,0024	23,06	09/12/2010	0,0014	25,52
09/09/2010	0,0009	17,24	25/10/2010	0,0014	21,90	10/12/2010	0,0027	23,32
10/09/2010	0,0016	17,16	26/10/2010	0,0009	19,52	11/12/2010	0,0017	23,60
11/09/2010	0,0019	15,46	27/10/2010	0,0003	20,18	12/12/2010	0,002	24,62
12/09/2010	0,0011	17,60	28/10/2010	0,0022	19,34	13/12/2010	0,0015	25,64
13/09/2010	0,0027	19,14	29/10/2010	0,0014	22,98	14/12/2010	0,0021	24,42
14/09/2010	0,0023	19,16	30/10/2010	0,0026	23,50	15/12/2010	0,0014	24,44
15/09/2010	0,0022	22,08	31/10/2010	0,0023	24,32	16/12/2010	0,0012	24,74
16/09/2010	0,003	20,16	01/11/2010	0,0021	20,92	17/12/2010	0,0014	24,18
17/09/2010	0,0016	21,48	02/11/2010	0,0004	19,84	18/12/2010	0,0014	24,18
18/09/2010	0,0023	21,98	03/11/2010	0,0007	19,64	19/12/2010	0,0019	25,00
19/09/2010	0,0027	17,26	04/11/2010	0,0018	21,56	20/12/2010	0,0045	25,08
20/09/2010	0,0013	17,48	05/11/2010	0,002	22,74	21/12/2010	0,0028	25,84
21/09/2010	0,001	19,78	06/11/2010	0,0017	22,10	22/12/2010	0,0027	25,02
22/09/2010	0,0014	20,52	07/11/2010	0,0009	20,80	23/12/2010	0,0024	22,38
23/09/2010	0,0023	22,90	08/11/2010	0,0009	23,32	24/12/2010	0,0012	21,84
24/09/2010	0,003	22,28	09/11/2010	0,002	23,30	25/12/2010	0,0004	23,56
25/09/2010	0,0031	20,64	10/11/2010	0,0016	21,66	26/12/2010	0,0011	24,96
26/09/2010	0,0014	22,00	11/11/2010	0,0008	20,34	27/12/2010	0,0011	23,38
27/09/2010	0,0022	20,50	12/11/2010	0,0015	19,34	28/12/2010	0,0005	23,10
28/09/2010	0,0008	20,10	13/11/2010	0,0013	17,34	29/12/2010	0,0009	23,54
29/09/2010	0,0007	22,42	14/11/2010	0,0008	17,74	30/12/2010	0,0017	22,54
30/09/2010	0,0017	24,14	15/11/2010	0,0005	16,74	31/12/2010	0,0014	20,94
01/10/2010	0,0016	24,28	16/11/2010	0,0006	19,80	01/01/2011	0,0002	21,60
02/10/2010	0,0018	23,70	17/11/2010	0,0006	22,28	02/01/2011	0,0008	22,98
03/10/2010	0,002	20,54	18/11/2010	0,0008	23,82	03/01/2011	0,001	23,02
04/10/2010	0,002	18,44	19/11/2010	0,0026	23,24	04/01/2011	0,0007	23,20
05/10/2010	0,0011	22,06	20/11/2010	0,0032	24,16	05/01/2011	0,001	23,14
06/10/2010	0,0018	20,88	21/11/2010	0,0023	20,78	06/01/2011	0,0009	23,88
07/10/2010	0,0007	21,94	22/11/2010	0,0004	23,22	07/01/2011	0,0019	23,84
08/10/2010	0,0017	23,00	23/11/2010	0,0013	22,34	08/01/2011	0,0018	23,38
09/10/2010	0,0024	19,58	24/11/2010	0,0008	23,52	09/01/2011	0,0019	23,78
10/10/2010	0,0034	17,74	25/11/2010	0,001	23,50	10/01/2011	0,0023	25,40
11/10/2010	0,0019	16,36	26/11/2010	0,0011	22,96	11/01/2011	0,0022	22,32
12/10/2010	0,0005	18,06	27/11/2010	0,0014	22,82	12/01/2011	0,0003	24,22
13/10/2010	0,0023	17,30	28/11/2010	0,0015	23,46	13/01/2011	0,001	23,50
14/10/2010	0,0022	19,78	29/11/2010	0,0019	24,38	14/01/2011	0,001	23,48

Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)	Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)	Data	Evap. (m³/dia/m²)	T (°C)
15/01/2011	0,0011	23,36	21/01/2011	0,0024	25,48	27/01/2011	0,0022	24,46
16/01/2011	0,0004	23,06	22/01/2011	0,0023	25,04	28/01/2011	0,0023	25,68
17/01/2011	0,0007	24,82	23/01/2011	0,0021	24,72	29/01/2011	0,0025	25,22
18/01/2011	0,0018	25,52	24/01/2011	0,0022	23,88	30/01/2011	0,0025	26,90
19/01/2011	0,0015	25,34	25/01/2011	0,0022	23,76	31/01/2011	0,0027	26,32
20/01/2011	0,002	25,64	26/01/2011	0,0023	24,46	-	-	

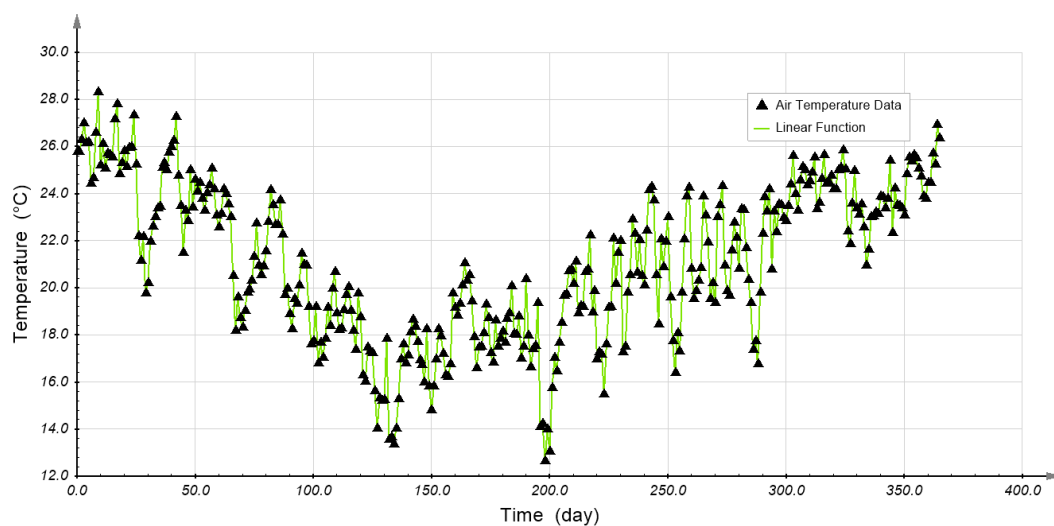


Figura 68 – Gráfico resumo dos dados de temperatura advindos da estação Fazenda Mendes.

Apêndice C – Construção geométrica dos modelos 3D

O primeiro passo da modelagem 3D foi a definição das geometrias. Neste contexto, foram escolhidas três configurações geométricas distintas para simular, de forma simplificada, as possíveis formas de talude, sendo estas planas, côncavas e convexas.

A construção das geometrias 3D teve como base a seção 2D apresentada anteriormente, de forma que em todos os modelos considerados houve o cuidado de se manter a seção central sem alterações, ou seja, cada um dos modelos tridimensionais foi construído com seções bidimensionais centrais idênticas.

A Figura 69 reapresenta a seção 2D utilizada, destacando as linhas que definem os limites entre as camadas. O Apêndice D detalha os pontos que definem estas linhas.

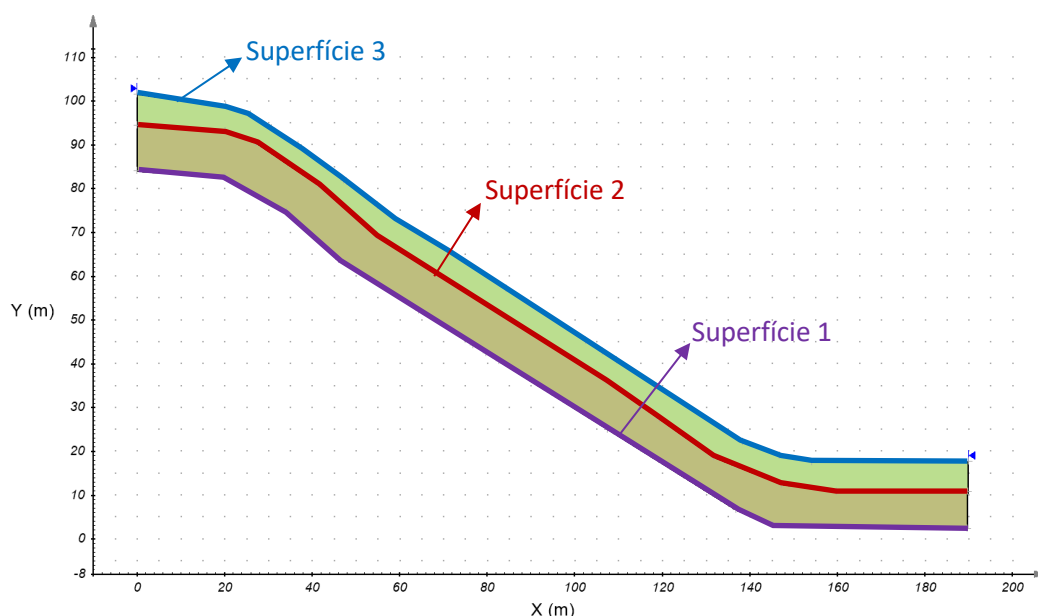


Figura 69 – Destaque para linhas que definem a geometria do modelo.

A conversão de coordenadas do sistema 2D para o 3D se deu conforme ilustrado pela Figura 70.

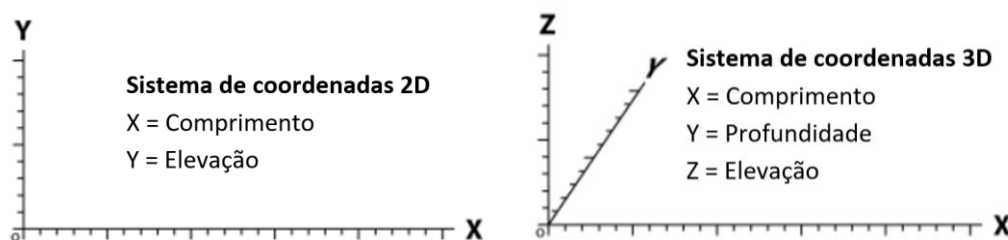


Figura 70 – Comparação dos sistemas de coordenadas 2D e 3D utilizados.

A primeira geometria 3D a ser produzida foi àquela denominada como plana, a qual foi gerada a partir da extrusão direta da seção 2D. Para que esta extrusão fosse possível o *software* preservou os pontos referentes a comprimento e elevação, criando pontos referentes a profundidade.

Dentro do pacote *SVoffice*, este procedimento foi realizado conforme ilustrado pelas Figuras 71 e 72, onde o modelo 2D é primeiramente salvo como um modelo 3D e então é definida a profundidade desejada para a geometria final, que no presente caso foi de 100m, resultando na forma apresentada na Figura 73.

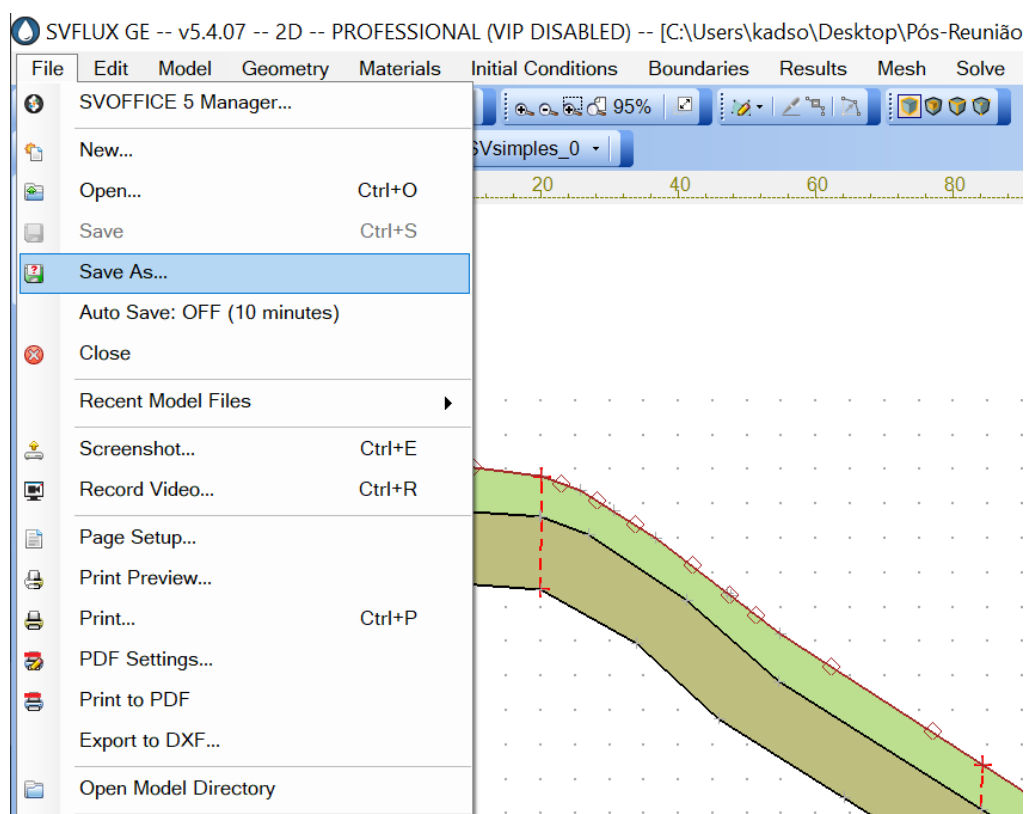


Figura 71 – Primeiro passo para conversão do modelo 2D em 3D.

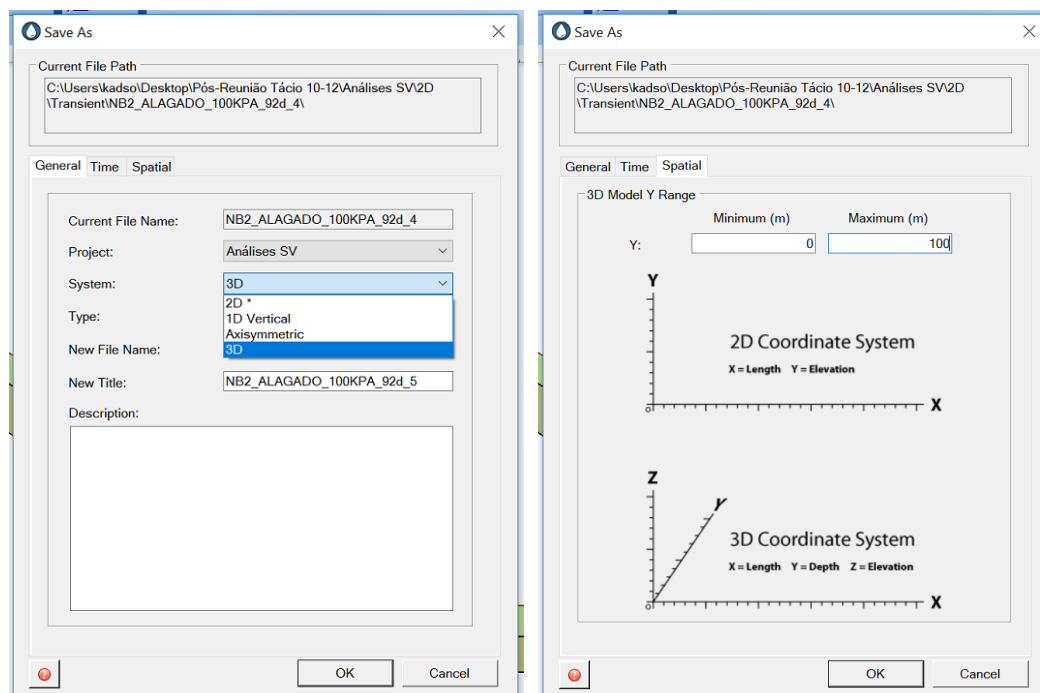


Figura 72 – Determinação da profundidade do modelo 3D nas caixas de diálogo do software.

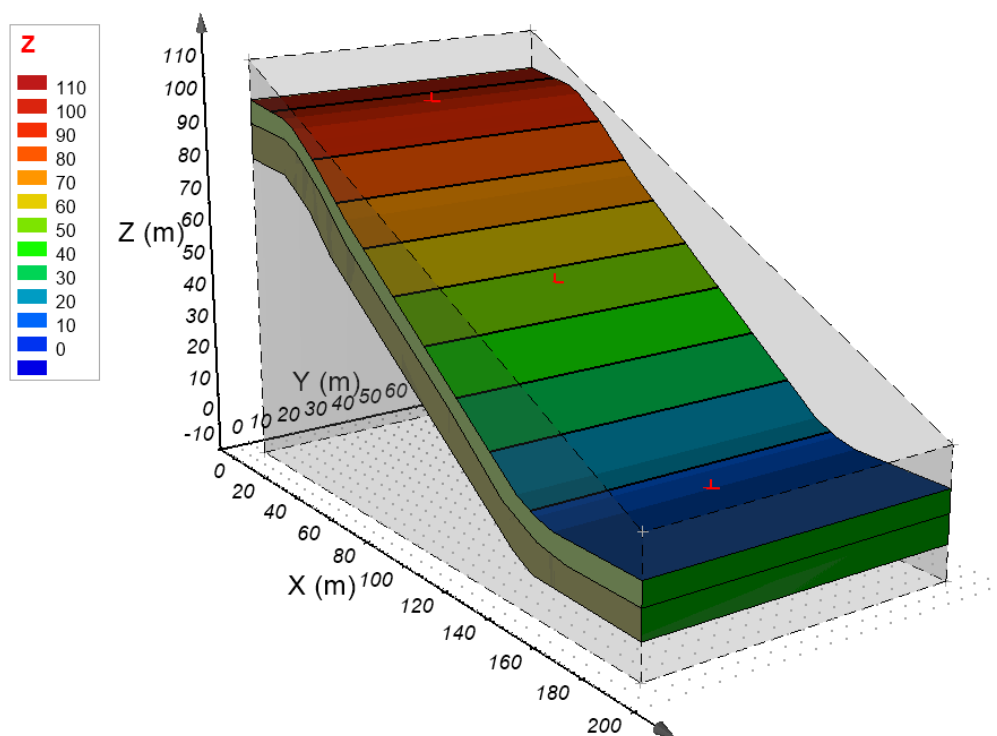


Figura 73 – Geometria resultante da conversão descrita.

É válido ressaltar que, conforme pôde ser observado na Figura 73, nesta primeira configuração geométrica qualquer seção no eixo (z,x) será idêntica àquela considerada nas análises 2D.

Uma vez concluída a modelagem da geometria 3D plana, foi iniciada a configuração das geometrias 3D côncava e convexa. Estas duas geometrias

foram confeccionadas através do mesmo procedimento, sendo o primeiro passo deste, a escolha dos pontos para definir convexidade ou concavidade das superfícies. Os pontos que definem as superfícies côncava e convexa são apresentados no Apêndice E.

Uma vez definidos os pontos que construiriam as superfícies, estes foram utilizados como dados de entrada no SVDesigner, *software* integrante do pacote SVOiice cuja principal funcionalidade é a produção de geometrias para serem utilizadas nos demais programas do pacote. O *input* destes dados no SVDesigner se deu conforme demonstrado na Figura 74, resultando nos pontos apresentados na Figura 75. Na Figura 76 é ilustrado o procedimento que converte os pontos em uma superfície triangulada.

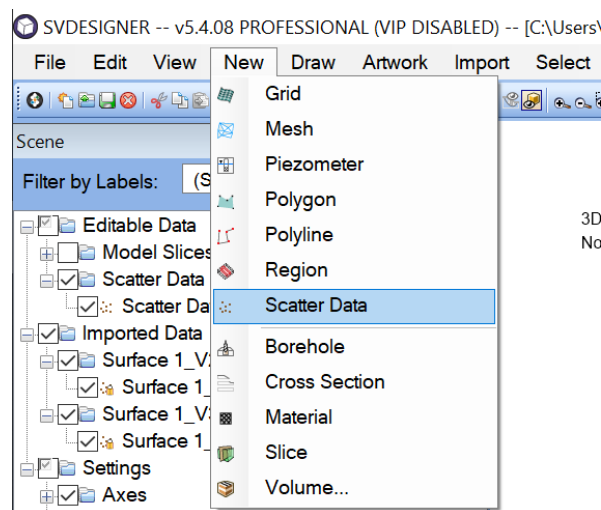


Figura 74 – Procedimento para *input* de ponto na SVDesigner.

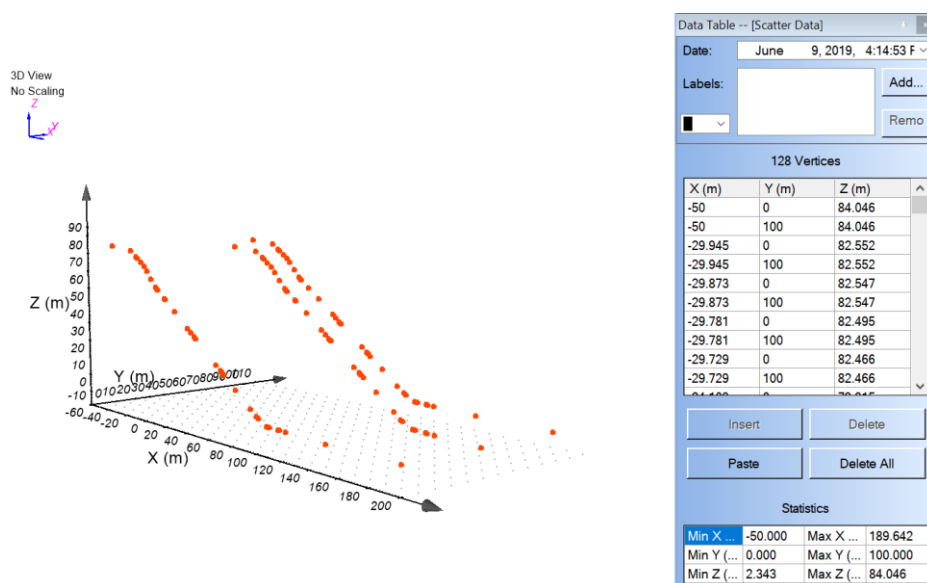


Figura 75 – Pontos da “Superfície 1” 3D convexa adicionada no SVDesigner.

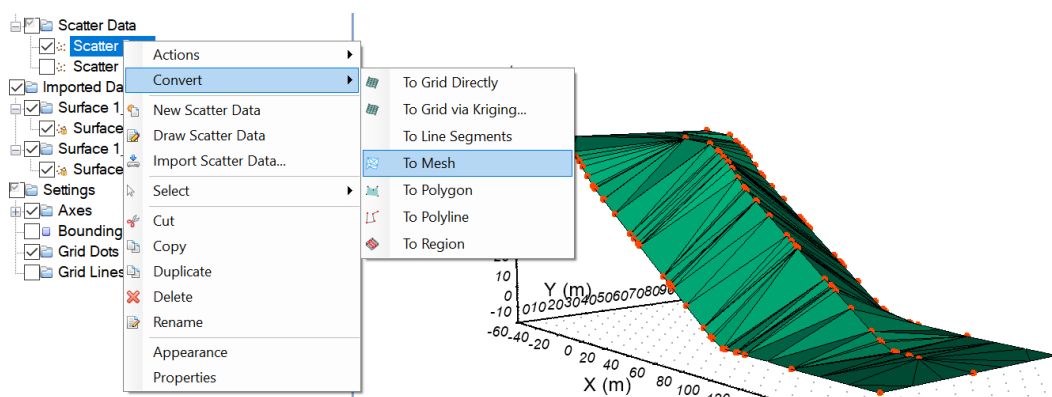


Figura 76 – Processo de conversão de pontos em superfície triangulada.

É importante ressaltar que o SVFlux-GE, não trabalha com superfícies trianguladas, apenas com superfícies em *grid*, de forma que foi necessário executar dois passos adicionais no SVDesigner para converter a superfície triangulada para o formato adequado. O primeiro deles foi o refinamento da triangulação da superfície apresentado na Figura 77, onde se observa que se optou por reduzir o valor do parâmetro “Maximum Edge Length” que originalmente estava configurado como 20m para 2m, resultando na triangulação apresentada na Figura 78.

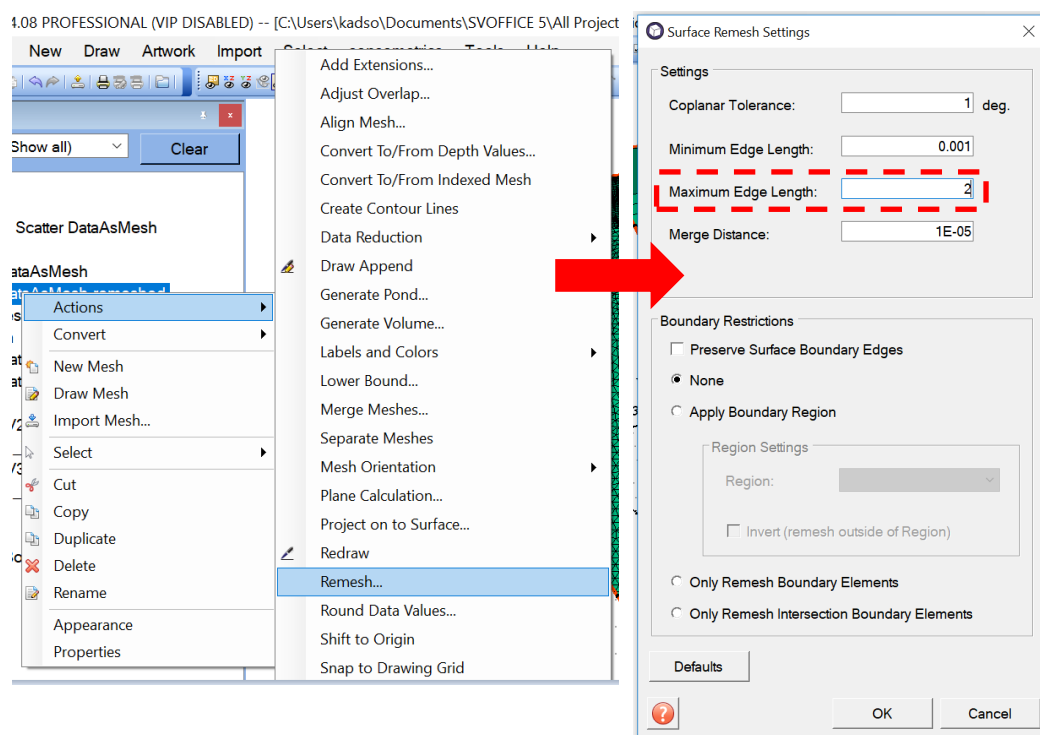


Figura 77 – Processo de conversão de pontos em superfície triangulada.

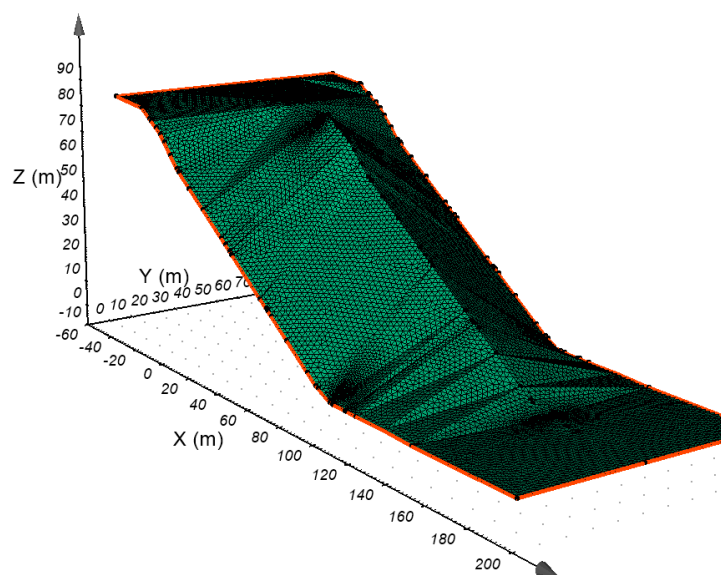


Figura 78 – Triangulação da superfície após o refinamento.

Por fim, a superfície triangulada foi convertida em grid, conforme procedimento apresentado na Figura 79, resultando na superfície exibida na Figura 80.

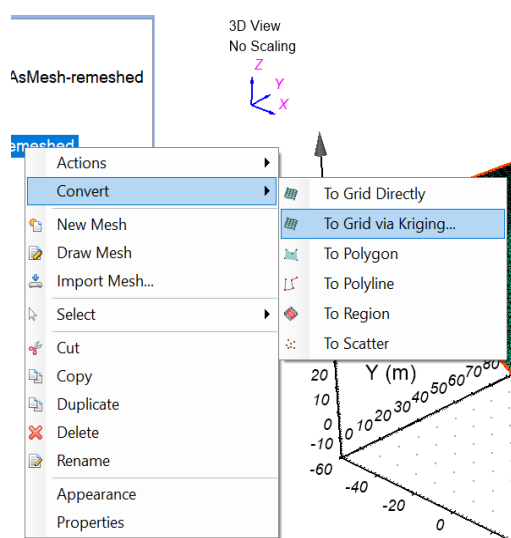


Figura 79 – Transformação da superfície triangulada em *grid*.

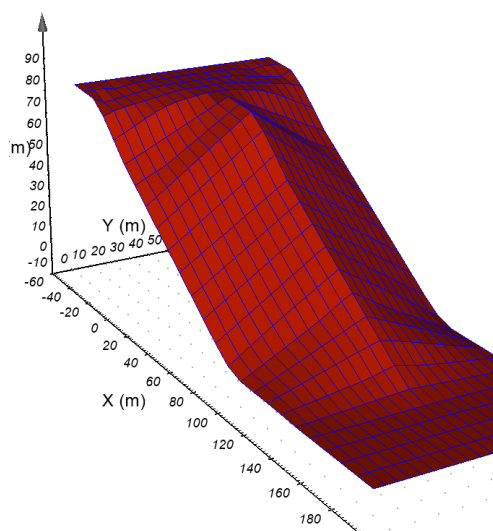


Figura 80 – Superfície em *grid* resultante do processo descrito.

Uma vez com o *grid* construído no SVDesigner o próximo passo é gerar a mesma superfície no SVFlux-GE e no SVSlope. Para tal, primeiramente foram copiados os dados que definem a geometria desejada (Figura 81) e então os mesmos foram inseridos nos demais *softwares*, conforme procedimento detalhado nas Figuras 82 a 85. Ao repetir o processo para todas as superfícies nos formatos côncavo e convexo são obtidas as geometrias finais exibidas nas Figuras 86 e 87.

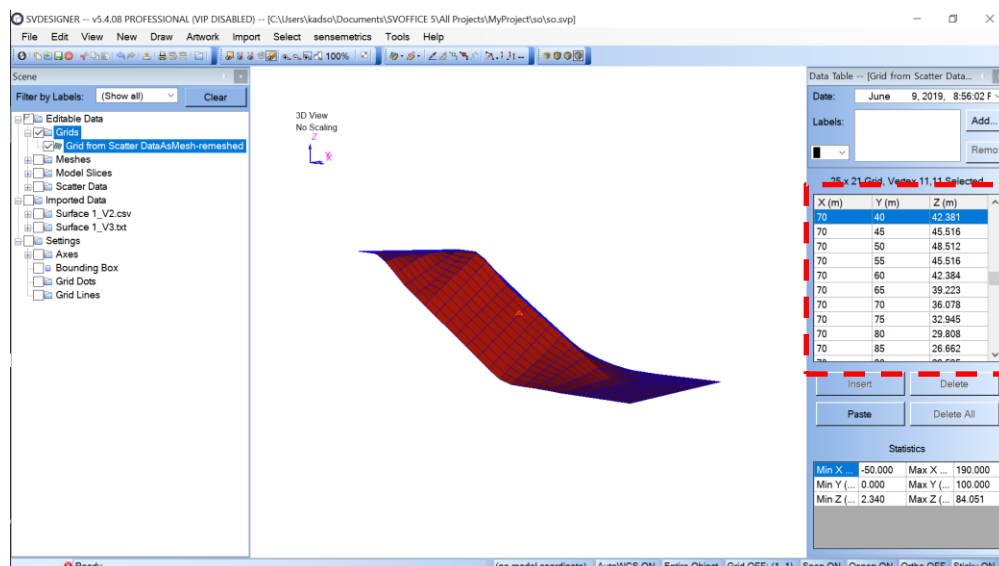


Figura 81 – Destaque para dados do grid a serem copiados.

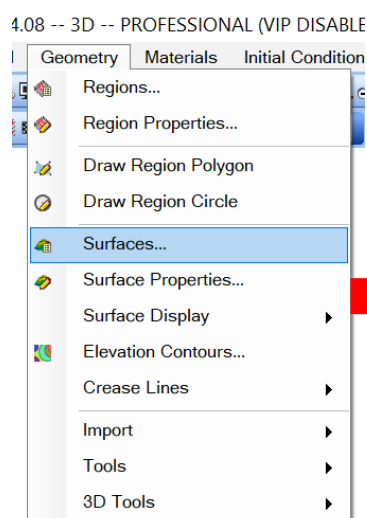


Figura 82 – Opção para edição da geometria das superfícies.

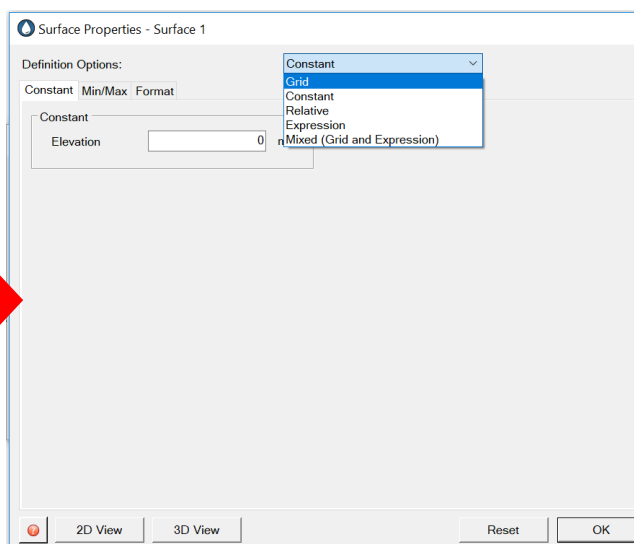


Figura 83 – Configuração do tipo de superfície para *grid*.

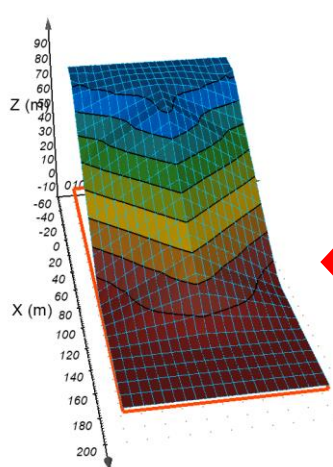


Figura 84 – Superfície resultante no SVFlux-GE ou SVSlope.

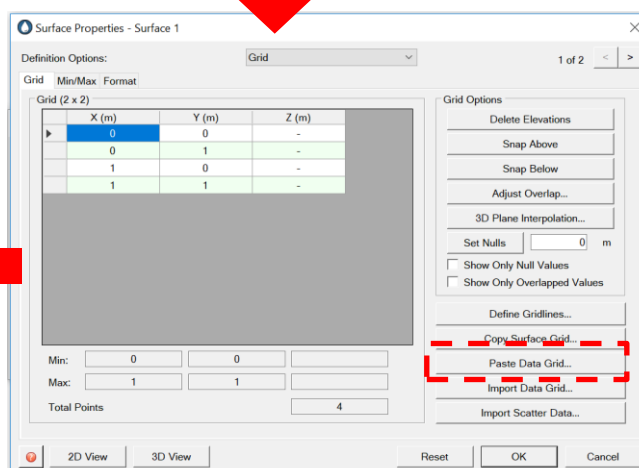


Figura 85 – Destaque para comando utilizado para colar dados de grid na geometria.

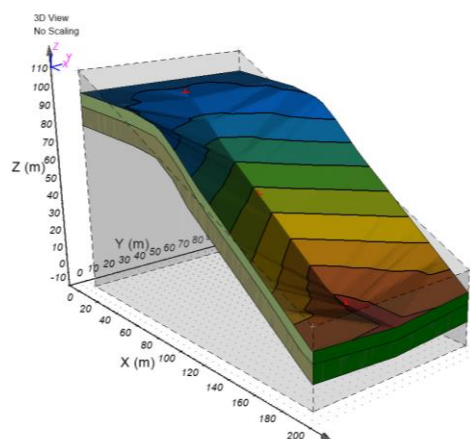


Figura 86 – Geometria final côncava.

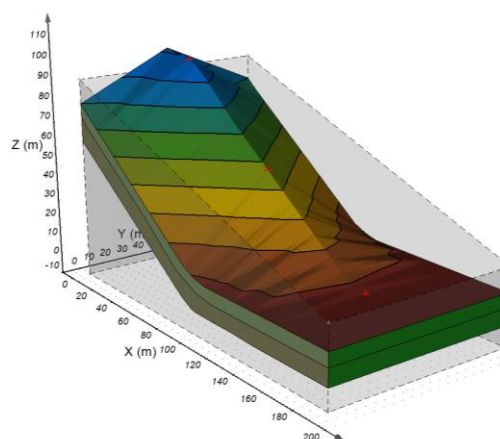


Figura 87 – Geometria final convexa

Ademais, outro cuidado foi tomado para manter a seção central idêntica em todas análises, sendo esta a limitação da região considerada nas análises, limitada nos eixos x e y . Conforme apresentado na Figura 88, por mais que os limites das superfícies possam extrapolar a região predefinida, somente a porção dentro da região, destacada em cinza, será analisada.

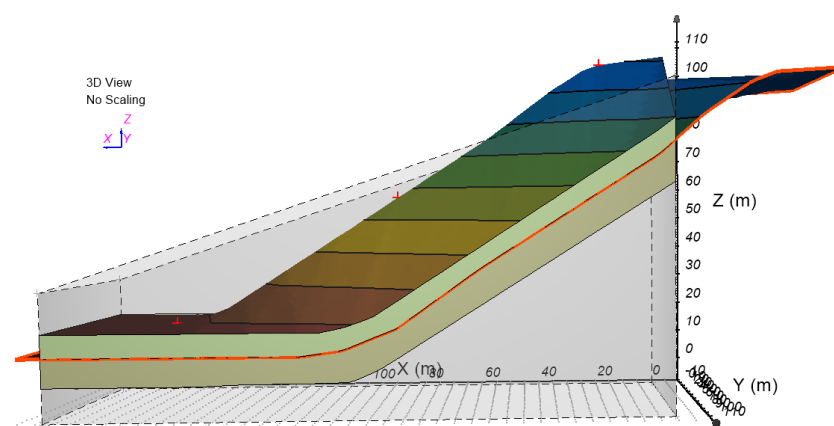


Figura 88 – Destaque para região considerada excluindo porções adicionais da superfície.

No que tange concavidade ou convexidade dos modelos, é válido ressaltar que os modelos foram configurados de forma a apresentar geometrias semelhantes às angulações máximas consideradas por Chaudhary et al. (2016), tal qual exposto nas Figuras 89 e 90 que apresentam seções 2D, no eixo (y,z) , dos modelos côncavo e convexo, respectivamente.

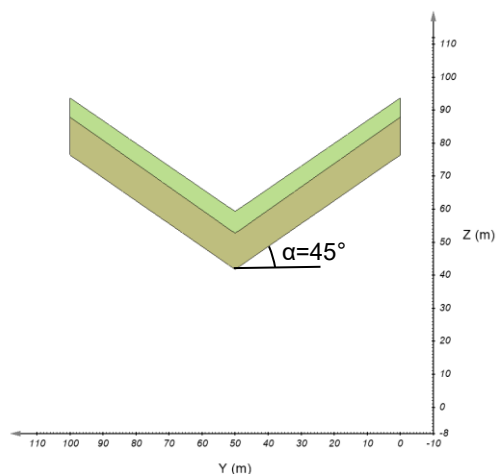


Figura 89 – Seção (y,z) côncava.

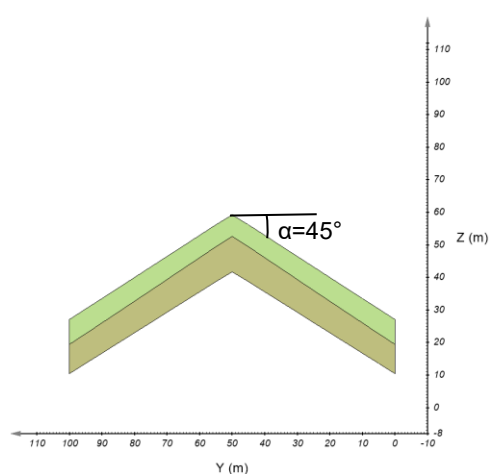


Figura 90 – Seção (y,z) convexa.

Uma vez que os modelos foram construídos com concavidade e convexidade constante, as seções 2D apresentadas são representativas para qualquer valor do eixo x, com a exceção dos valores próximos aos limites da modelagem, que passam a sofrer influência da borda.

Apêndice D – Pontos que definem a geometria 2D

Tabela 15 – Coordenadas X e Y que definem as superfícies do modelo 2D.

Superfície 1		Superfície 2		Superfície 3	
X	Y	X	Y	X	Y
0,00	84,05	0,00	94,53	0,00	101,61
20,06	82,55	20,06	93,17	20,06	99,05
20,13	82,55	20,13	93,14	20,13	99,04
20,22	82,50	20,22	93,11	20,22	99,03
20,27	82,47	20,27	93,09	20,27	99,02
25,89	79,32	25,89	90,99	25,89	96,96
27,09	78,65	27,09	90,55	27,09	96,21
30,70	76,62	30,70	88,13	30,70	93,92
34,12	74,70	34,12	85,84	34,12	91,77
36,88	72,16	36,88	84,00	36,88	90,02
41,34	68,03	41,34	81,01	41,34	86,59
45,99	63,75	45,99	76,93	45,99	83,03
47,27	62,94	47,27	75,80	47,27	82,04
47,85	62,58	47,85	75,30	47,85	81,60
54,79	58,22	54,79	69,21	54,79	76,27
54,98	58,10	54,98	69,09	54,98	76,12
64,31	52,23	64,31	63,20	64,31	70,09
76,79	44,39	76,79	55,31	76,79	62,01
79,78	42,51	79,78	53,43	79,78	60,08
82,67	40,69	82,67	51,60	82,67	58,21
84,00	39,85	84,00	50,76	84,00	57,35
84,21	39,73	84,21	50,63	84,21	57,22
84,33	39,65	84,33	50,55	84,33	57,14
102,51	28,22	102,51	39,07	102,51	45,38
106,34	25,81	106,34	36,65	102,51	45,38
107,06	25,36	107,06	36,20	106,34	42,90
107,52	25,07	107,52	35,88	107,06	42,43
109,53	23,81	109,53	34,45	107,51	42,14
119,33	17,65	119,33	27,51	109,53	40,84
131,78	9,82	131,78	18,69	119,32	34,50
136,78	6,67	136,78	16,71	131,78	26,44
138,29	6,05	138,29	16,11	136,78	23,20
145,19	3,17	145,19	13,37	138,29	22,23
145,20	3,17	145,20	13,37	145,19	19,71
145,20	3,16	145,20	13,36	145,20	19,71
146,72	3,14	146,72	12,76	145,20	19,71
147,29	3,13	147,29	12,53	146,72	19,15
154,00	3,00	154,00	11,60	147,29	19,04
154,12	3,00	154,12	11,58	154,00	17,70
155,00	2,98	155,00	11,46	154,12	17,68
159,78	2,89	159,78	10,79	155,00	17,68
189,64	2,34	189,64	10,81	159,78	17,68
-	-	-	-	189,64	17,69
-	-	-	-	189,82	17,69
-	-	-	-	189,96	17,69

Apêndice E – Pontos que definem a geometria 3D

Tabela 16 – Pontos utilizados para definir a Superfície 1 da geometria 3D côncava.

Superfície 1 – Geometria 3D côncava								
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0,00	0,00	84,05	86,88	0,00	72,16	152,51	100,00	28,22
0,00	50,00	84,05	86,88	100,00	72,16	154,00	50,00	3,00
0,00	100,00	84,05	91,34	0,00	68,03	154,12	50,00	3,00
20,06	50,00	82,55	91,34	100,00	68,03	155,00	50,00	2,98
20,13	50,00	82,55	95,99	0,00	63,75	156,34	0,00	25,81
20,22	50,00	82,50	95,99	100,00	63,75	156,34	100,00	25,81
20,27	50,00	82,47	97,27	0,00	62,94	157,06	0,00	25,36
25,89	50,00	79,32	97,27	100,00	62,94	157,06	100,00	25,36
27,09	50,00	78,65	97,85	0,00	62,58	157,52	0,00	25,07
30,70	50,00	76,62	97,85	100,00	62,58	157,52	100,00	25,07
34,12	50,00	74,70	102,51	50,00	28,22	159,53	0,00	23,81
36,88	50,00	72,16	104,79	0,00	58,22	159,53	100,00	23,81
41,34	50,00	68,03	104,79	100,00	58,22	159,78	50,00	2,89
45,99	50,00	63,75	104,98	0,00	58,10	169,33	0,00	17,65
47,27	50,00	62,94	104,98	100,00	58,10	169,33	100,00	17,65
47,85	50,00	62,58	106,34	50,00	25,81	181,78	0,00	9,82
50,00	0,00	84,05	107,06	50,00	25,36	181,78	100,00	9,82
50,00	100,00	84,05	107,52	50,00	25,07	186,78	0,00	6,67
54,79	50,00	58,22	109,53	50,00	23,81	186,78	100,00	6,67
54,98	50,00	58,10	114,31	0,00	52,23	188,29	0,00	6,05
64,31	50,00	52,23	114,31	100,00	52,23	188,29	100,00	6,05
70,06	0,00	82,55	119,33	50,00	17,65	189,64	50,00	2,34
70,06	100,00	82,55	126,79	0,00	44,39	195,19	0,00	3,17
70,13	0,00	82,55	126,79	100,00	44,39	195,19	100,00	3,17
70,13	100,00	82,55	129,78	0,00	42,51	195,20	0,00	3,17
70,22	0,00	82,50	129,78	100,00	42,51	195,20	100,00	3,17
70,22	100,00	82,50	131,78	50,00	9,82	195,20	0,00	3,16
70,27	0,00	82,47	132,67	0,00	40,69	195,20	100,00	3,16
70,27	100,00	82,47	132,67	100,00	40,69	196,72	0,00	3,14
75,89	0,00	79,32	134,00	0,00	39,85	196,72	100,00	3,14
75,89	100,00	79,32	134,00	100,00	39,85	197,29	0,00	3,13
76,79	50,00	44,39	134,21	0,00	39,73	197,29	100,00	3,13
77,09	0,00	78,65	134,21	100,00	39,73	204,00	0,00	3,00
77,09	100,00	78,65	134,33	0,00	39,65	204,00	100,00	3,00
79,78	50,00	42,51	134,33	100,00	39,65	204,12	0,00	3,00
80,70	0,00	76,62	136,78	50,00	6,67	204,12	100,00	3,00
80,70	100,00	76,62	138,29	50,00	6,05	205,00	0,00	2,98
82,67	50,00	40,69	145,19	50,00	3,17	205,00	100,00	2,98
84,00	50,00	39,85	145,20	50,00	3,17	209,78	0,00	2,89
84,12	0,00	74,70	145,20	50,00	3,16	209,78	100,00	2,89
84,12	100,00	74,70	146,72	50,00	3,14	239,64	0,00	2,34
84,21	50,00	39,73	147,29	50,00	3,13	239,64	100,00	2,34
84,33	50,00	39,65	152,51	0,00	28,22	-	-	-

Tabela 17 – Pontos utilizados para definir a Superfície 2 da geometria 3D côncava,

Superfície 2 – Geometria 3D côncava								
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0,00	50,00	94,53	86,88	0,00	84,00	152,51	100,00	39,07
0,00	0,00	94,53	86,88	100,00	84,00	154,00	50,00	11,60
0,00	100,00	94,53	91,34	0,00	81,01	154,12	50,00	11,58
20,06	50,00	93,17	91,34	100,00	81,01	155,00	50,00	11,46
20,13	50,00	93,14	95,99	0,00	76,93	156,34	0,00	36,65
20,22	50,00	93,11	95,99	100,00	76,93	156,34	100,00	36,65
20,27	50,00	93,09	97,27	0,00	75,80	157,06	0,00	36,20
25,89	50,00	90,99	97,27	100,00	75,80	157,06	100,00	36,20
27,09	50,00	90,55	97,85	0,00	75,30	157,52	0,00	35,88
30,70	50,00	88,13	97,85	100,00	75,30	157,52	100,00	35,88
34,12	50,00	85,84	102,51	50,00	39,07	159,53	0,00	34,45
36,88	50,00	84,00	104,79	0,00	69,21	159,53	100,00	34,45
41,34	50,00	81,01	104,79	100,00	69,21	159,78	50,00	10,79
45,99	50,00	76,93	104,98	0,00	69,09	169,33	0,00	27,51
47,27	50,00	75,80	104,98	100,00	69,09	169,33	100,00	27,51
47,85	50,00	75,30	106,34	50,00	36,65	181,78	0,00	18,69
50,00	0,00	94,53	107,06	50,00	36,20	181,78	100,00	18,69
50,00	100,00	94,53	107,52	50,00	35,88	186,78	0,00	16,71
54,79	50,00	69,21	109,53	50,00	34,45	186,78	100,00	16,71
54,98	50,00	69,09	114,31	0,00	63,20	188,29	0,00	16,11
64,31	50,00	63,20	114,31	100,00	63,20	188,29	100,00	16,11
70,06	0,00	93,17	119,33	50,00	27,51	189,64	50,00	10,81
70,06	100,00	93,17	126,79	0,00	55,31	195,19	0,00	13,37
70,13	0,00	93,14	126,79	100,00	55,31	195,19	100,00	13,37
70,13	100,00	93,14	129,78	0,00	53,43	195,20	0,00	13,37
70,22	0,00	93,11	129,78	100,00	53,43	195,20	100,00	13,37
70,22	100,00	93,11	131,78	50,00	18,69	195,20	0,00	13,36
70,27	0,00	93,09	132,67	0,00	51,60	195,20	100,00	13,36
70,27	100,00	93,09	132,67	100,00	51,60	196,72	0,00	12,76
75,89	0,00	90,99	134,00	0,00	50,76	196,72	100,00	12,76
75,89	100,00	90,99	134,00	100,00	50,76	197,29	0,00	12,53
76,79	50,00	55,31	134,21	0,00	50,63	197,29	100,00	12,53
77,09	0,00	90,55	134,21	100,00	50,63	204,00	0,00	11,60
77,09	100,00	90,55	134,33	0,00	50,55	204,00	100,00	11,60
79,78	50,00	53,43	134,33	100,00	50,55	204,12	0,00	11,58
80,70	0,00	88,13	136,78	50,00	16,71	204,12	100,00	11,58
80,70	100,00	88,13	138,29	50,00	16,11	205,00	0,00	11,46
82,67	50,00	51,60	145,19	50,00	13,37	205,00	100,00	11,46
84,00	50,00	50,76	145,20	50,00	13,37	209,78	0,00	10,79
84,12	0,00	85,84	145,20	50,00	13,36	209,78	100,00	10,79
84,12	100,00	85,84	146,72	50,00	12,76	239,64	0,00	10,81
84,21	50,00	50,63	147,29	50,00	12,53	239,64	100,00	10,81
84,33	50,00	50,55	152,51	0,00	39,07	-	-	-

Tabela 18 – Pontos utilizados para definir a Superfície 3 da geometria 3D côncava.

Superfície 3 – Geometria 3D côncava								
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0,00	50,00	101,61	91,34	0,00	86,59	156,34	0,00	42,90
0,00	0,00	101,61	91,34	100,00	86,59	156,34	100,00	42,90
0,00	100,00	101,61	95,99	0,00	83,03	157,06	0,00	42,43
20,06	50,00	99,05	95,99	100,00	83,03	157,06	100,00	42,43
20,13	50,00	99,04	97,27	0,00	82,04	157,51	0,00	42,14
20,22	50,00	99,03	97,27	100,00	82,04	157,51	100,00	42,14
20,27	50,00	99,02	97,85	0,00	81,60	159,53	0,00	40,84
25,89	50,00	96,96	97,85	100,00	81,60	159,53	100,00	40,84
27,09	50,00	96,21	102,51	50,00	45,38	159,78	50,00	17,68
30,70	50,00	93,92	104,79	0,00	76,27	169,32	0,00	34,50
34,12	50,00	91,77	104,79	100,00	76,27	169,32	100,00	34,50
36,88	50,00	90,02	104,98	0,00	76,12	181,78	0,00	26,44
41,34	50,00	86,59	104,98	100,00	76,12	181,78	100,00	26,44
45,99	50,00	83,03	106,34	50,00	42,90	186,78	0,00	23,20
47,27	50,00	82,04	107,06	50,00	42,43	186,78	100,00	23,20
47,85	50,00	81,60	107,51	50,00	42,14	188,29	0,00	22,23
50,00	0,00	101,61	109,53	50,00	40,84	188,29	100,00	22,23
50,00	100,00	101,61	114,31	0,00	70,09	189,64	50,00	17,69
54,79	50,00	76,27	114,31	100,00	70,09	189,82	50,00	17,69
54,98	50,00	76,12	119,32	50,00	34,50	189,96	50,00	17,69
64,31	50,00	70,09	126,79	0,00	62,01	195,19	0,00	19,71
70,06	0,00	99,05	126,79	100,00	62,01	195,19	100,00	19,71
70,06	100,00	99,05	129,78	0,00	60,08	195,20	0,00	19,71
70,13	0,00	99,04	129,78	100,00	60,08	195,20	100,00	19,71
70,13	100,00	99,04	131,78	50,00	26,44	195,20	0,00	19,71
70,22	0,00	99,03	132,67	0,00	58,21	195,20	100,00	19,71
70,22	100,00	99,03	132,67	100,00	58,21	196,72	0,00	19,15
70,27	0,00	99,02	134,00	0,00	57,35	196,72	100,00	19,15
70,27	100,00	99,02	134,00	100,00	57,35	197,29	0,00	19,04
75,89	0,00	96,96	134,21	0,00	57,22	197,29	100,00	19,04
75,89	100,00	96,96	134,21	100,00	57,22	204,00	0,00	17,70
76,79	50,00	62,01	134,33	0,00	57,14	204,00	100,00	17,70
77,09	0,00	96,21	134,33	100,00	57,14	204,12	0,00	17,68
77,09	100,00	96,21	136,78	50,00	23,20	204,12	100,00	17,68
79,78	50,00	60,08	138,29	50,00	22,23	205,00	0,00	17,68
80,70	0,00	93,92	145,19	50,00	19,71	205,00	100,00	17,68
80,70	100,00	93,92	145,20	50,00	19,71	209,78	0,00	17,68
82,67	50,00	58,21	145,20	50,00	19,71	209,78	100,00	17,68
84,00	50,00	57,35	146,72	50,00	19,15	239,64	0,00	17,69
84,12	0,00	91,77	147,29	50,00	19,04	239,64	100,00	17,69
84,12	100,00	91,77	152,51	0,00	45,38	239,82	0,00	17,69
84,21	50,00	57,22	152,51	100,00	45,38	239,82	100,00	17,69
84,33	50,00	57,14	154,00	50,00	17,70	239,96	0,00	17,69
86,88	0,00	90,02	154,12	50,00	17,68	239,96	100,00	17,69
86,88	100,00	90,02	155,00	50,00	17,68	-	-	-

Tabela 19 – Pontos utilizados para definir a Superfície 1 da geometria 3D convexa.

Superfície 1 – Geometria 3D convexa								
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-50,00	0,00	84,05	29,78	0,00	42,51	88,29	100,00	6,05
-50,00	100,00	84,05	29,78	100,00	42,51	95,19	0,00	3,17
-29,95	0,00	82,55	30,70	50,00	76,62	95,19	100,00	3,17
-29,95	100,00	82,55	32,67	0,00	40,69	95,20	0,00	3,17
-29,87	0,00	82,55	32,67	100,00	40,69	95,20	100,00	3,17
-29,87	100,00	82,55	34,00	0,00	39,85	95,20	0,00	3,16
-29,78	0,00	82,50	34,00	100,00	39,85	95,20	100,00	3,16
-29,78	100,00	82,50	34,12	50,00	74,70	96,72	0,00	3,14
-29,73	0,00	82,47	34,21	0,00	39,73	96,72	100,00	3,14
-29,73	100,00	82,47	34,21	100,00	39,73	97,29	0,00	3,13
-24,11	0,00	79,32	34,33	0,00	39,65	97,29	100,00	3,13
-24,11	100,00	79,32	34,33	100,00	39,65	102,51	50,00	28,22
-22,92	0,00	78,65	36,88	50,00	72,16	104,00	0,00	3,00
-22,92	100,00	78,65	41,34	50,00	68,03	104,00	100,00	3,00
-19,30	0,00	76,62	45,99	50,00	63,75	104,12	0,00	3,00
-19,30	100,00	76,62	47,27	50,00	62,94	104,12	100,00	3,00
-15,88	0,00	74,70	47,85	50,00	62,58	105,00	0,00	2,98
-15,88	100,00	74,70	52,51	0,00	28,22	105,00	100,00	2,98
-13,12	0,00	72,16	52,51	100,00	28,22	106,34	50,00	25,81
-13,12	100,00	72,16	54,79	50,00	58,22	107,06	50,00	25,36
-8,66	0,00	68,03	54,98	50,00	58,10	107,52	50,00	25,07
-8,66	100,00	68,03	56,34	0,00	25,81	109,53	50,00	23,81
-4,01	0,00	63,75	56,34	100,00	25,81	109,78	0,00	2,89
-4,01	100,00	63,75	57,06	0,00	25,36	109,78	100,00	2,89
-2,73	0,00	62,94	57,06	100,00	25,36	119,33	50,00	17,65
-2,73	100,00	62,94	57,52	0,00	25,07	131,78	50,00	9,82
-2,15	0,00	62,58	57,52	100,00	25,07	136,78	50,00	6,67
-2,15	100,00	62,58	59,53	0,00	23,81	138,29	50,00	6,05
0,00	50,00	84,05	59,53	100,00	23,81	139,64	0,00	2,34
4,79	0,00	58,22	64,31	50,00	52,23	139,64	100,00	2,34
4,79	100,00	58,22	69,33	0,00	17,65	145,19	50,00	3,17
4,98	0,00	58,10	69,33	100,00	17,65	145,20	50,00	3,17
4,98	100,00	58,10	76,79	50,00	44,39	145,20	50,00	3,16
14,31	0,00	52,23	79,78	50,00	42,51	146,72	50,00	3,14
14,31	100,00	52,23	81,78	0,00	9,82	147,29	50,00	3,13
20,06	50,00	82,55	81,78	100,00	9,82	154,00	50,00	3,00
20,13	50,00	82,55	82,67	50,00	40,69	154,12	50,00	3,00
20,22	50,00	82,50	84,00	50,00	39,85	155,00	50,00	2,98
20,27	50,00	82,47	84,21	50,00	39,73	159,78	50,00	2,89
25,89	50,00	79,32	84,33	50,00	39,65	189,64	50,00	2,34
26,79	0,00	44,39	86,78	0,00	6,67	189,64	0,00	2,34
26,79	100,00	44,39	86,78	100,00	6,67	189,64	100,00	2,34
27,09	50,00	78,65	88,29	0,00	6,05	-	-	-

Tabela 20 – Pontos utilizados para definir a Superfície 2 da geometria 3D convexa.

Superfície 2 – Geometria 3D convexa								
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-50,00	0,00	94,53	29,78	0,00	53,43	88,29	100,00	16,11
-50,00	100,00	94,53	29,78	100,00	53,43	95,19	0,00	13,37
-29,95	0,00	93,17	30,70	50,00	88,13	95,19	100,00	13,37
-29,95	100,00	93,17	32,67	0,00	51,60	95,20	0,00	13,37
-29,87	0,00	93,14	32,67	100,00	51,60	95,20	100,00	13,37
-29,87	100,00	93,14	34,00	0,00	50,76	95,20	0,00	13,36
-29,78	0,00	93,11	34,00	100,00	50,76	95,20	100,00	13,36
-29,78	100,00	93,11	34,12	50,00	85,84	96,72	0,00	12,76
-29,73	0,00	93,09	34,21	0,00	50,63	96,72	100,00	12,76
-29,73	100,00	93,09	34,21	100,00	50,63	97,29	0,00	12,53
-24,11	0,00	90,99	34,33	0,00	50,55	97,29	100,00	12,53
-24,11	100,00	90,99	34,33	100,00	50,55	102,51	50,00	39,07
-22,92	0,00	90,55	36,88	50,00	84,00	104,00	0,00	11,60
-22,92	100,00	90,55	41,34	50,00	81,01	104,00	100,00	11,60
-19,30	0,00	88,13	45,99	50,00	76,93	104,12	0,00	11,58
-19,30	100,00	88,13	47,27	50,00	75,80	104,12	100,00	11,58
-15,88	0,00	85,84	47,85	50,00	75,30	105,00	0,00	11,46
-15,88	100,00	85,84	52,51	0,00	39,07	105,00	100,00	11,46
-13,12	0,00	84,00	52,51	100,00	39,07	106,34	50,00	36,65
-13,12	100,00	84,00	54,79	50,00	69,21	107,06	50,00	36,20
-8,66	0,00	81,01	54,98	50,00	69,09	107,52	50,00	35,88
-8,66	100,00	81,01	56,34	0,00	36,65	109,53	50,00	34,45
-4,01	0,00	76,93	56,34	100,00	36,65	109,78	0,00	10,79
-4,01	100,00	76,93	57,06	0,00	36,20	109,78	100,00	10,79
-2,73	0,00	75,80	57,06	100,00	36,20	119,33	50,00	27,51
-2,73	100,00	75,80	57,52	0,00	35,88	131,78	50,00	18,69
-2,15	0,00	75,30	57,52	100,00	35,88	136,78	50,00	16,71
-2,15	100,00	75,30	59,53	0,00	34,45	138,29	50,00	16,11
0,00	50,00	94,53	59,53	100,00	34,45	139,64	0,00	10,81
4,79	0,00	69,21	64,31	50,00	63,20	139,64	100,00	10,81
4,79	100,00	69,21	69,33	0,00	27,51	145,19	50,00	13,37
4,98	0,00	69,09	69,33	100,00	27,51	145,20	50,00	13,37
4,98	100,00	69,09	76,79	50,00	55,31	145,20	50,00	13,36
14,31	0,00	63,20	79,78	50,00	53,43	146,72	50,00	12,76
14,31	100,00	63,20	81,78	0,00	18,69	147,29	50,00	12,53
20,06	50,00	93,17	81,78	100,00	18,69	154,00	50,00	11,60
20,13	50,00	93,14	82,67	50,00	51,60	154,12	50,00	11,58
20,22	50,00	93,11	84,00	50,00	50,76	155,00	50,00	11,46
20,27	50,00	93,09	84,21	50,00	50,63	159,78	50,00	10,79
25,89	50,00	90,99	84,33	50,00	50,55	189,64	50,00	10,81
26,79	0,00	55,31	86,78	0,00	16,71	189,64	0,00	10,81
26,79	100,00	55,31	86,78	100,00	16,71	189,64	100,00	10,81
27,09	50,00	90,55	88,29	0,00	16,11			

Tabela 21 – Pontos utilizados para definir a Superfície 3 da geometria 3D convexa.

Superfície 3 – Geometria 3D côncava								
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-50,00	0,00	101,61	30,70	50,00	93,92	95,20	0,00	19,71
-50,00	100,00	101,61	32,67	0,00	58,21	95,20	100,00	19,71
-29,95	0,00	99,05	32,67	100,00	58,21	96,72	0,00	19,15
-29,95	100,00	99,05	34,00	0,00	57,35	96,72	100,00	19,15
-29,87	0,00	99,04	34,00	100,00	57,35	97,29	0,00	19,04
-29,87	100,00	99,04	34,12	50,00	91,77	97,29	100,00	19,04
-29,78	0,00	99,03	34,21	0,00	57,22	102,51	50,00	45,38
-29,78	100,00	99,03	34,21	100,00	57,22	104,00	0,00	17,70
-29,73	0,00	99,02	34,33	0,00	57,14	104,00	100,00	17,70
-29,73	100,00	99,02	34,33	100,00	57,14	104,12	0,00	17,68
-24,11	0,00	96,96	41,34	50,00	86,59	104,12	100,00	17,68
-24,11	100,00	96,96	45,99	50,00	83,03	105,00	0,00	17,68
-22,92	0,00	96,21	47,27	50,00	82,04	105,00	100,00	17,68
-22,92	100,00	96,21	47,85	50,00	81,60	106,34	50,00	42,90
-19,30	0,00	93,92	52,51	0,00	45,38	107,06	50,00	42,43
-19,30	100,00	93,92	52,51	100,00	45,38	107,51	50,00	42,14
-15,88	0,00	91,77	54,79	50,00	76,27	109,53	50,00	40,84
-15,88	100,00	91,77	54,98	50,00	76,12	109,78	0,00	17,68
-13,12	0,00	90,02	56,34	0,00	42,90	109,78	100,00	17,68
-13,12	100,00	90,02	56,34	100,00	42,90	119,32	50,00	34,50
-8,66	0,00	86,59	57,06	0,00	42,43	131,78	50,00	26,44
-8,66	100,00	86,59	57,06	100,00	42,43	136,78	50,00	23,20
-4,01	0,00	83,03	57,51	0,00	42,14	138,29	50,00	22,23
-4,01	100,00	83,03	57,51	100,00	42,14	139,64	0,00	17,69
-2,73	0,00	82,04	59,53	0,00	40,84	139,64	100,00	17,69
-2,73	100,00	82,04	59,53	100,00	40,84	139,82	0,00	17,69
-2,15	0,00	81,60	64,31	50,00	70,09	139,82	100,00	17,69
-2,15	100,00	81,60	69,32	0,00	34,50	139,96	0,00	17,69
0,00	50,00	101,61	69,32	100,00	34,50	139,96	100,00	17,69
4,79	0,00	76,27	76,79	50,00	62,01	145,19	50,00	19,71
4,79	100,00	76,27	79,78	50,00	60,08	145,20	50,00	19,71
4,98	0,00	76,12	81,78	0,00	26,44	145,20	50,00	19,71
4,98	100,00	76,12	81,78	100,00	26,44	146,72	50,00	19,15
14,31	0,00	70,09	82,67	50,00	58,21	147,29	50,00	19,04
14,31	100,00	70,09	84,00	50,00	57,35	154,00	50,00	17,70
20,06	50,00	99,05	84,21	50,00	57,22	154,12	50,00	17,68
20,13	50,00	99,04	84,33	50,00	57,14	155,00	50,00	17,68
20,22	50,00	99,03	86,78	0,00	23,20	159,78	50,00	17,68
20,27	50,00	99,02	86,78	100,00	23,20	189,64	50,00	17,69
25,89	50,00	96,96	88,29	0,00	22,23	189,82	50,00	17,69
26,79	0,00	62,01	88,29	100,00	22,23	189,96	50,00	17,69
26,79	100,00	62,01	95,19	0,00	19,71	189,96	0,00	17,69
27,09	50,00	96,21	95,19	100,00	19,71	189,96	100,00	17,69
29,78	0,00	60,08	95,20	0,00	19,71	-	-	-
29,78	100,00	60,08	95,20	100,00	19,71	-	-	-

Apêndice F – Detalhes das análises de estabilidade

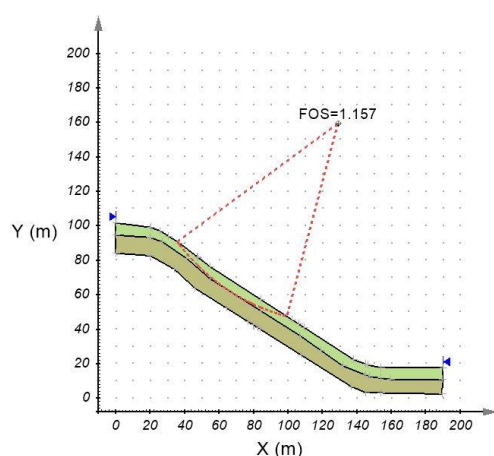


Figura 91 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 50 kPa.

Slope Information

Calculation Method:	GLE
Search Method:	Slope Search
FOS:	1.157
Time:	92 (day)
Total Weight:	5.290E+003 (kN)
Total Volume:	2.922E+002 (m ³)
Total Activating Moment:	3.310E+005 (kNm)
Total Resisting Moment:	3.830E+005 (kNm)
Total Activating Force:	2.368E+003 (kN)
Total Resisting Force:	2.741E+003 (kN)
Rotation Center:	129.042, 159.244 (m)
Radius:	115.720 (m)
Slip Surface Entry Point:	35.810, 90.696 (m)
Slip Surface Exit Point:	99.403, 47.384 (m)

Figura 92 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 50 kPa.

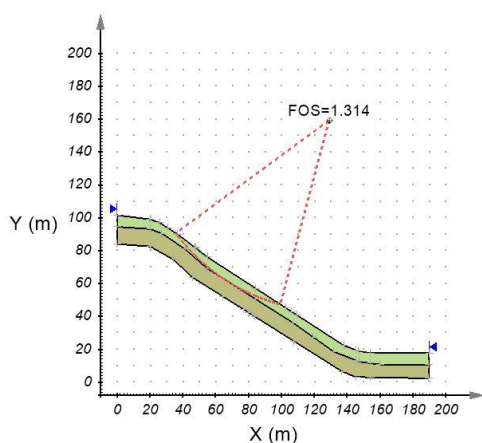


Figura 93 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 75 kPa.

Slope Information

Calculation Method:	GLE
Search Method:	Slope Search
FOS:	1.314
Time:	92 (day)
Total Weight:	5.290E+003 (kN)
Total Volume:	2.922E+002 (m ³)
Total Activating Moment:	3.310E+005 (kNm)
Total Resisting Moment:	4.350E+005 (kNm)
Total Activating Force:	2.363E+003 (kN)
Total Resisting Force:	3.106E+003 (kN)
Rotation Center:	129.042, 159.244 (m)
Radius:	115.720 (m)
Slip Surface Entry Point:	35.810, 90.696 (m)
Slip Surface Exit Point:	99.403, 47.384 (m)

Figura 94 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 75 kPa.

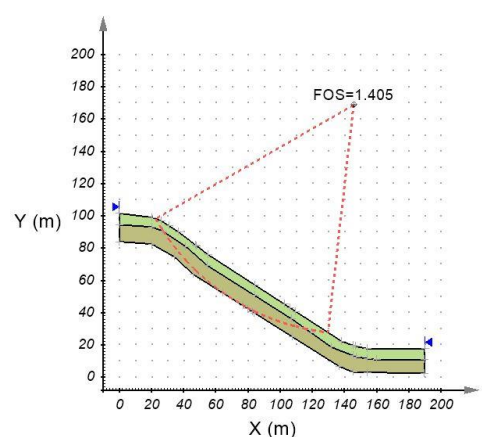


Figura 95 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 100 kPa.

Slope Information

Calculation Method:	GLE
Search Method:	Slope Search
FOS:	1.405
Time:	92 (day)
Total Weight:	2.396E+004 (kN)
Total Volume:	1.311E+003 (m ³)
Total Activating Moment:	1.764E+006 (kNm)
Total Resisting Moment:	2.478E+006 (kNm)
Total Activating Force:	1.041E+004 (kN)
Total Resisting Force:	1.463E+004 (kN)
Rotation Center:	145.705, 168.771 (m)
Radius:	141.925 (m)
Slip Surface Entry Point:	22.584, 98.174 (m)
Slip Surface Exit Point:	129.764, 27.744 (m)

Figura 96 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 100 kPa.

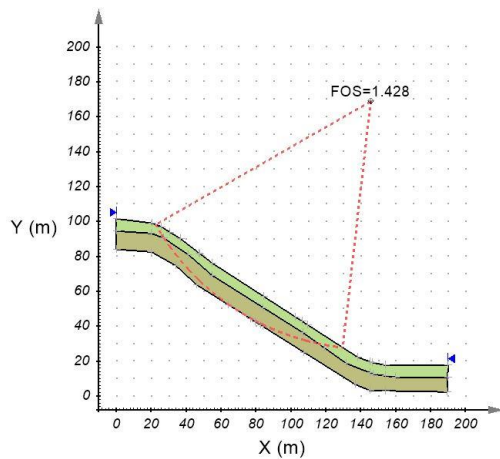


Figura 97 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 150 kPa.

Slope Information	
Calculation Method:	GLE
Search Method:	Slope Search
FOS:	1.428
Time:	92 (day)
Total Weight:	2.396E+004 (kN)
Total Volume:	1.311E+003 (m ³)
Total Activating Moment:	1.764E+006 (kNm)
Total Resisting Moment:	2.519E+006 (kNm)
Total Activating Force:	1.041E+004 (kN)
Total Resisting Force:	1.486E+004 (kN)
Rotation Center:	145.705, 168.771 (m)
Radius:	141.925 (m)
Slip Surface Entry Point:	22.584, 98.174 (m)
Slip Surface Exit Point:	129.764, 27.744 (m)

Figura 98 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 150 kPa.

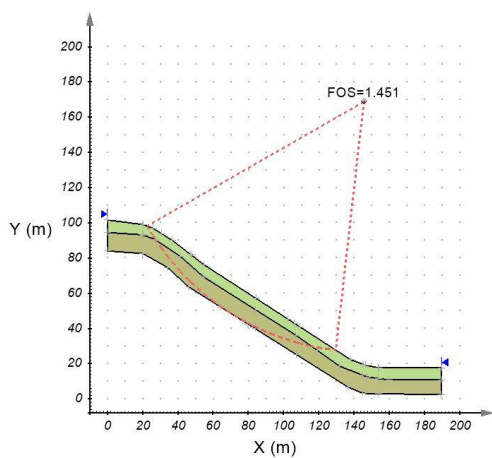


Figura 99 – Análise de estabilidade no modelo 2D para a sucção inicial de 200 kPa

Slope Information	
Calculation Method:	GLE
Search Method:	Slope Search
FOS:	1.451
Time:	92 (day)
Total Weight:	2.396E+004 (kN)
Total Volume:	1.311E+003 (m ³)
Total Activating Moment:	1.764E+006 (kNm)
Total Resisting Moment:	2.560E+006 (kNm)
Total Activating Force:	1.040E+004 (kN)
Total Resisting Force:	1.509E+004 (kN)
Rotation Center:	145.705, 168.771 (m)
Radius:	141.925 (m)
Slip Surface Entry Point:	22.584, 98.174 (m)
Slip Surface Exit Point:	129.764, 27.744 (m)

Figura 100 – Dados da superfície de ruptura no modelo 2D para a sucção inicial de 200 kPa.

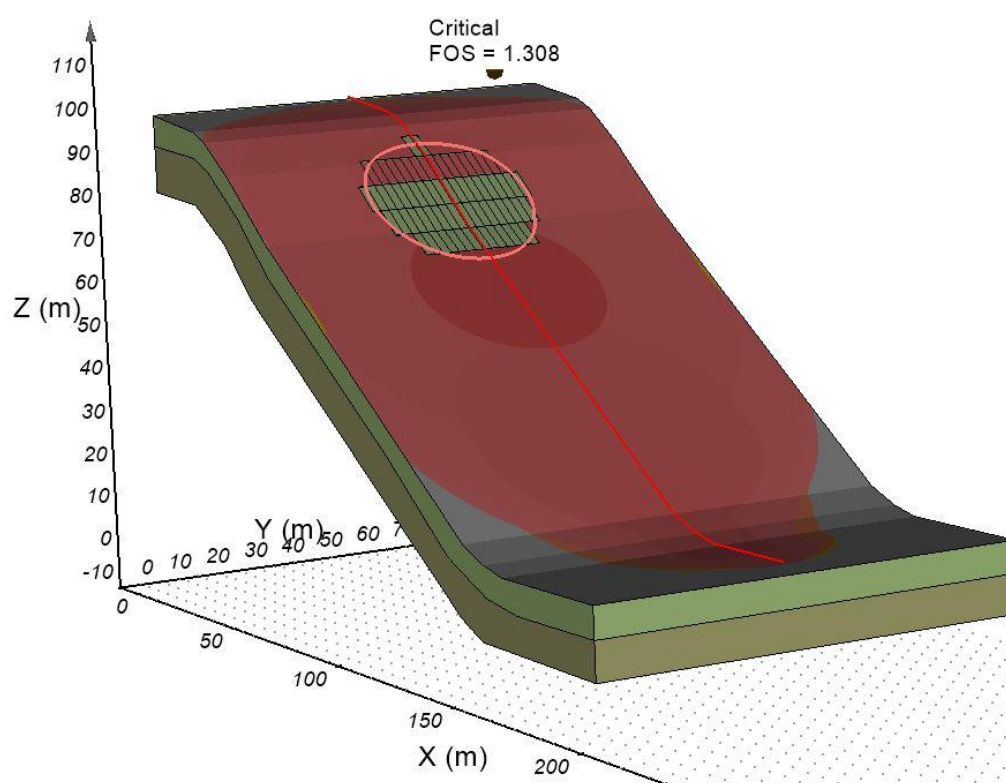
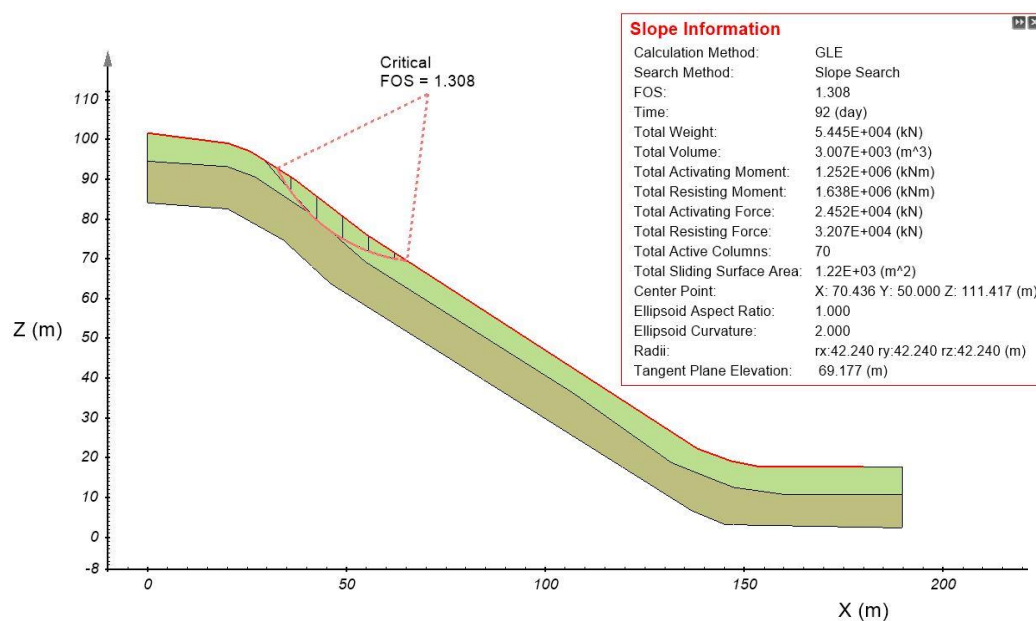


Figura 101 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 50 kPa.

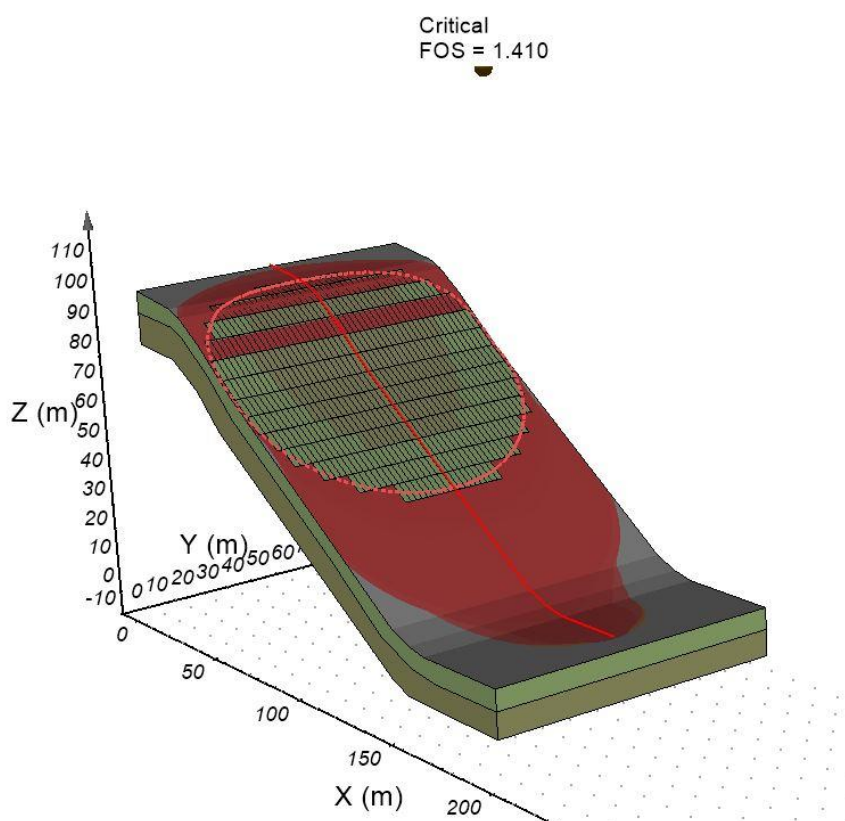
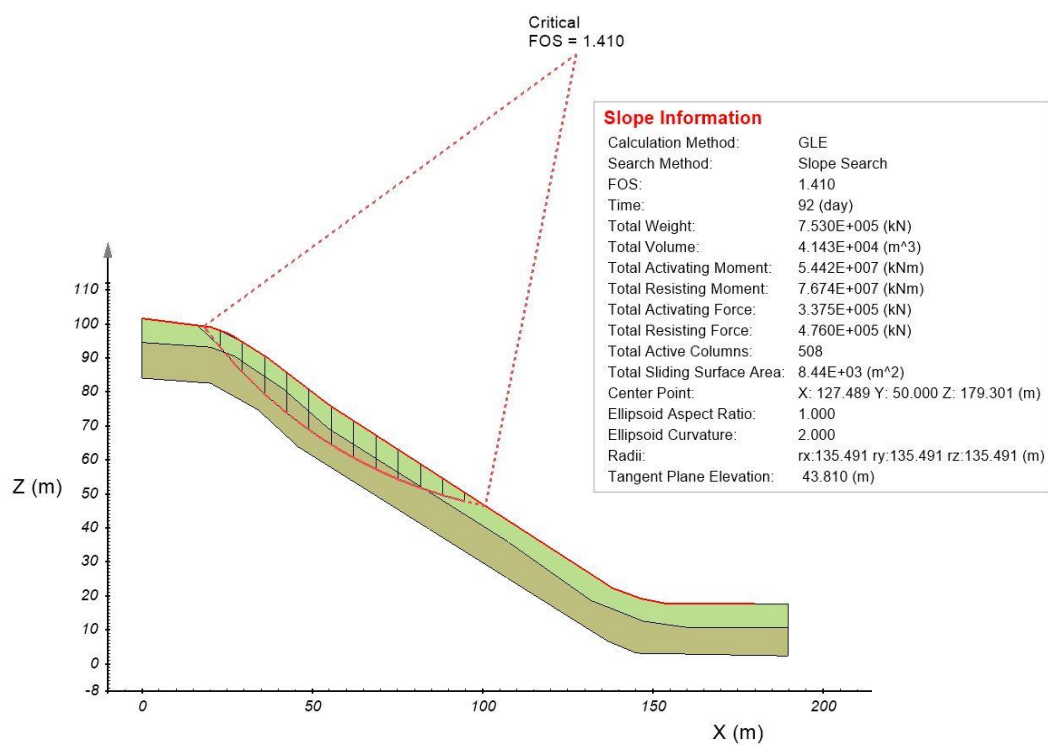


Figura 102 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 75kPa.

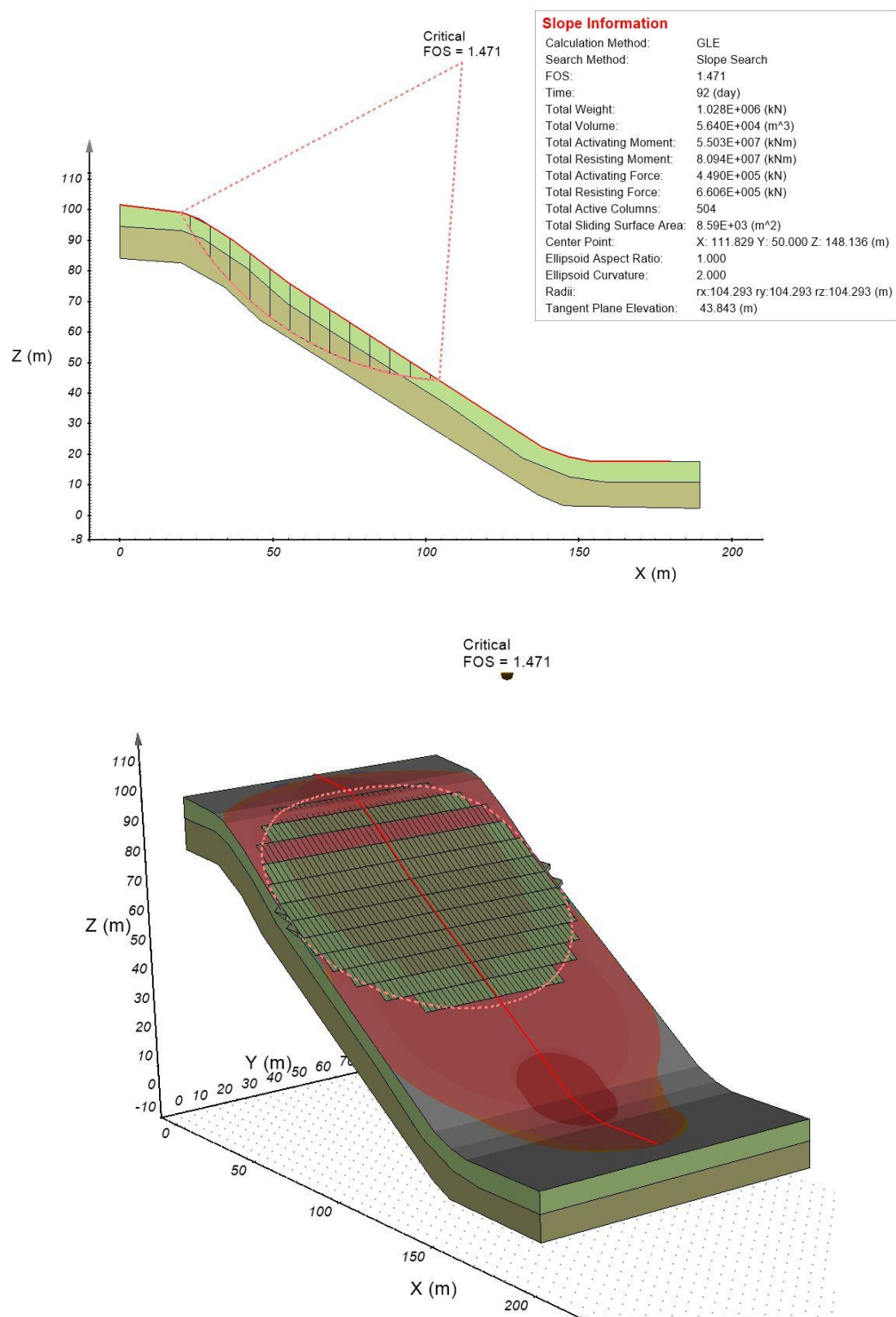


Figura 103 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 100 kPa.

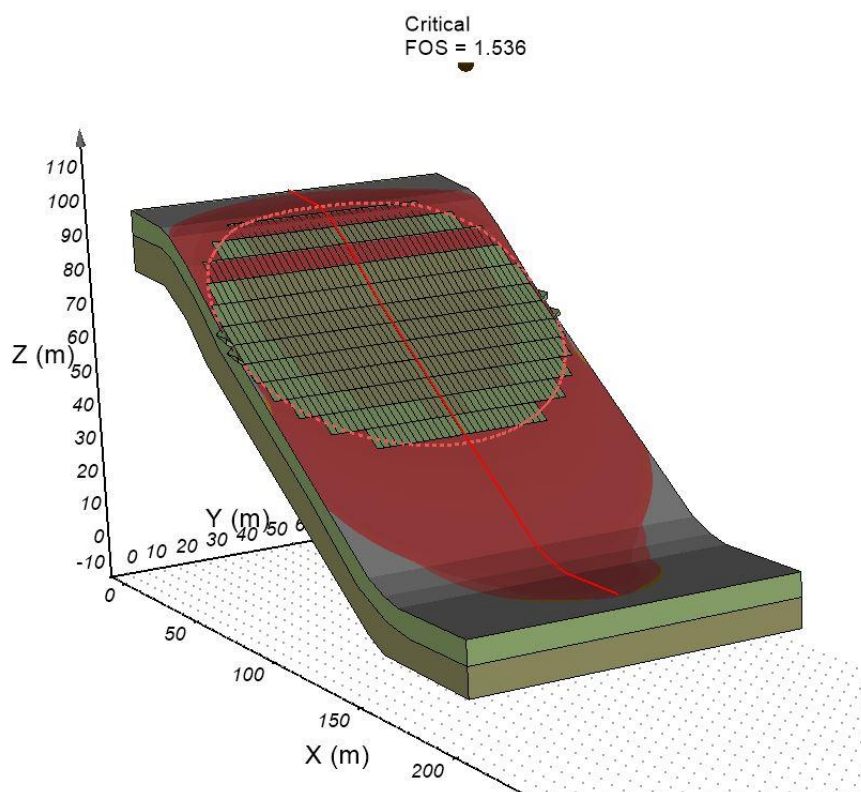
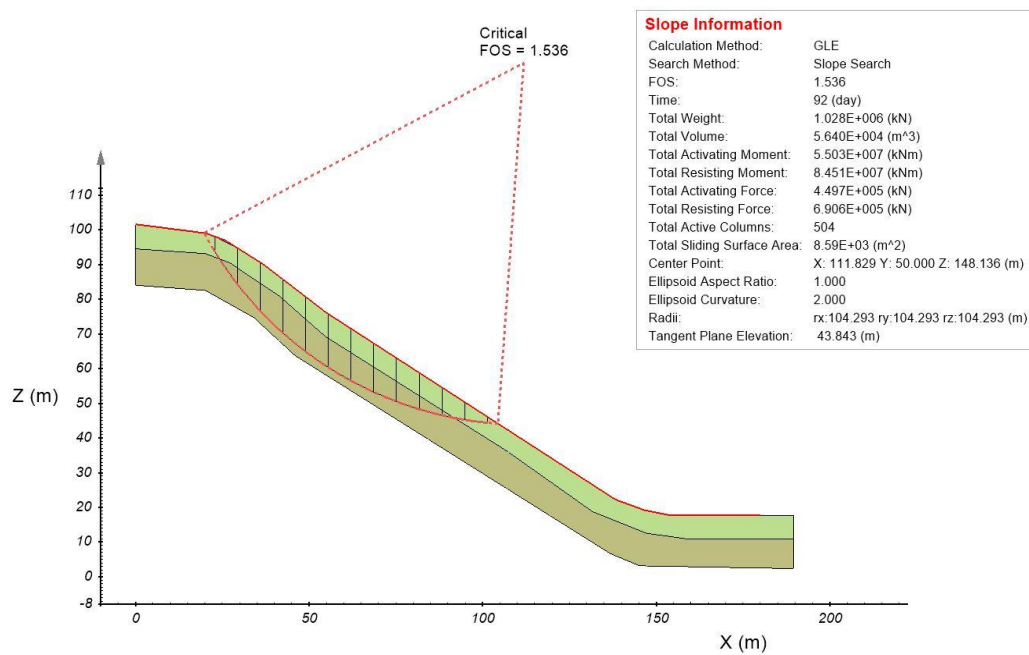


Figura 104 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 150 kPa. .

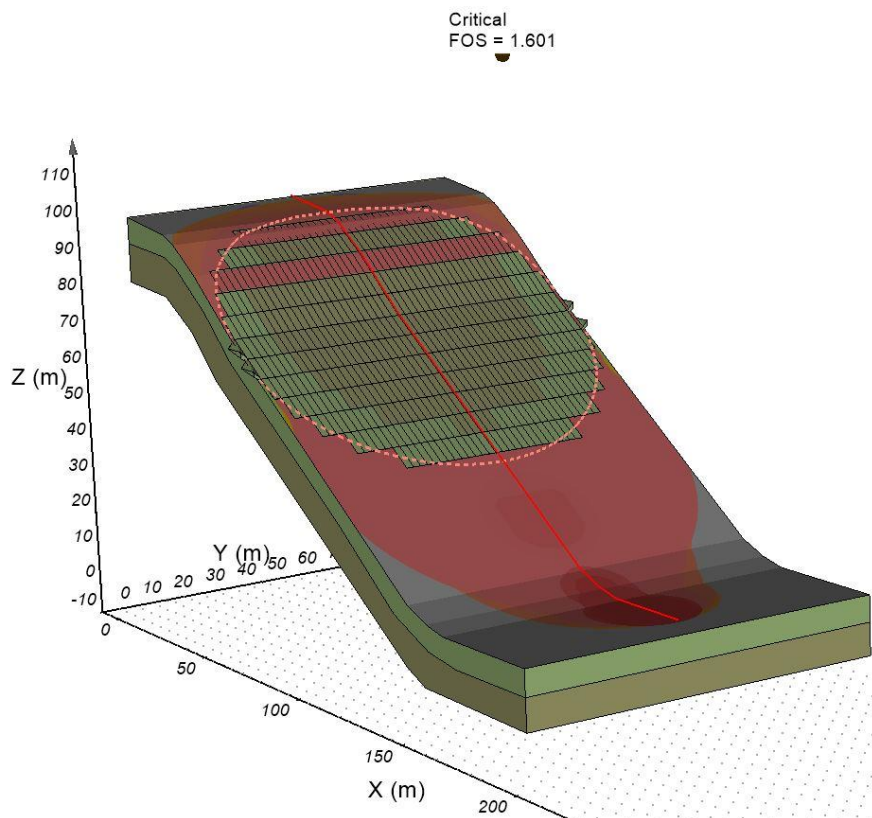
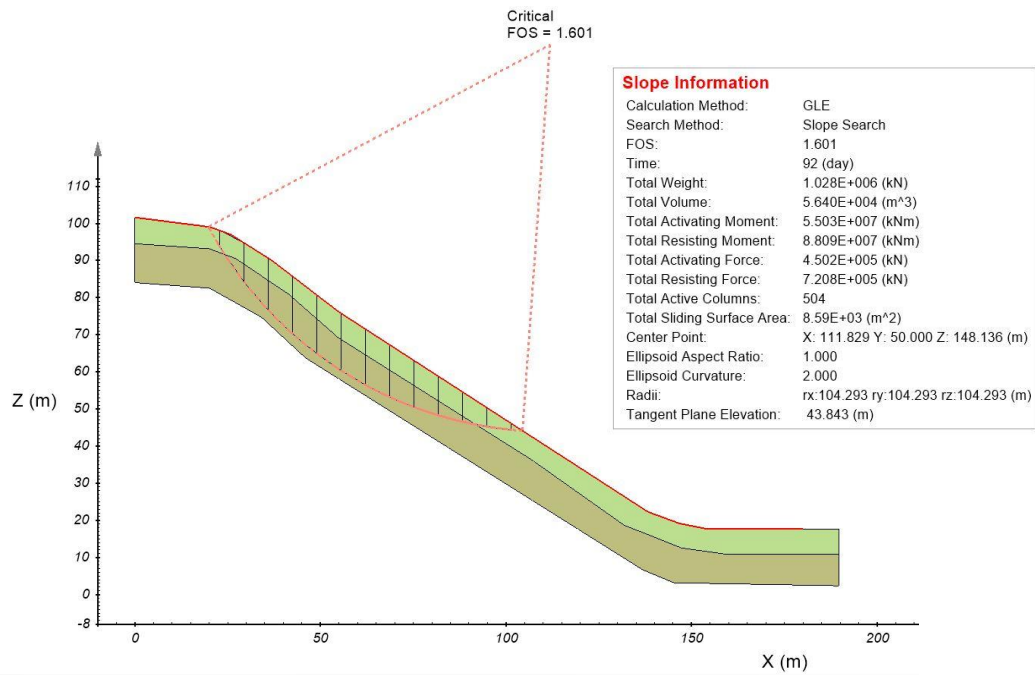
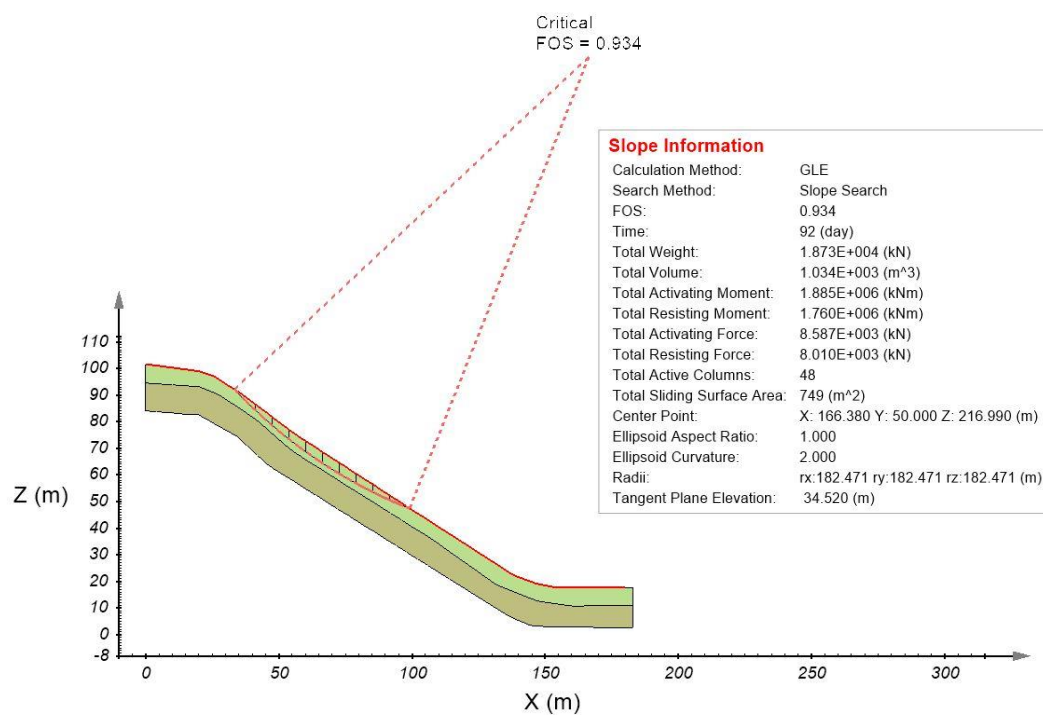


Figura 105 – Análise de estabilidade no modelo 3D Plano para a sucção inicial de 200 kPa.



Critical
FOS = 0.934

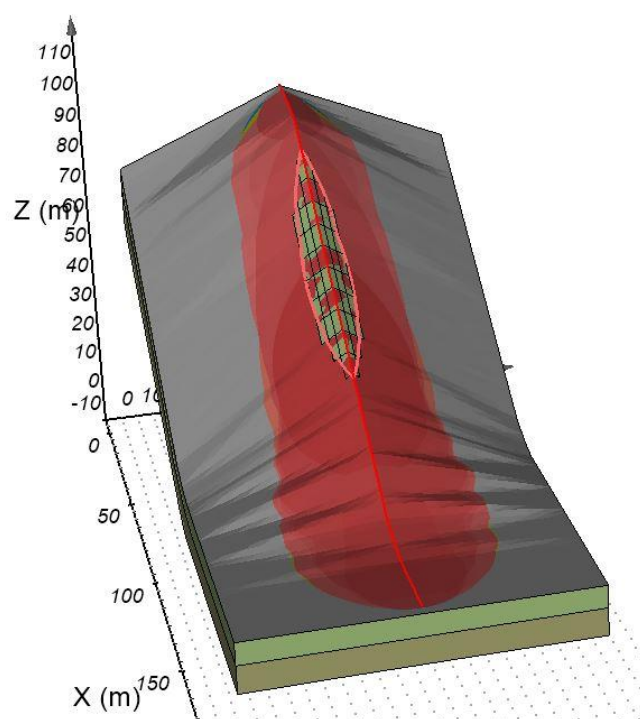


Figura 106 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 50 kPa.

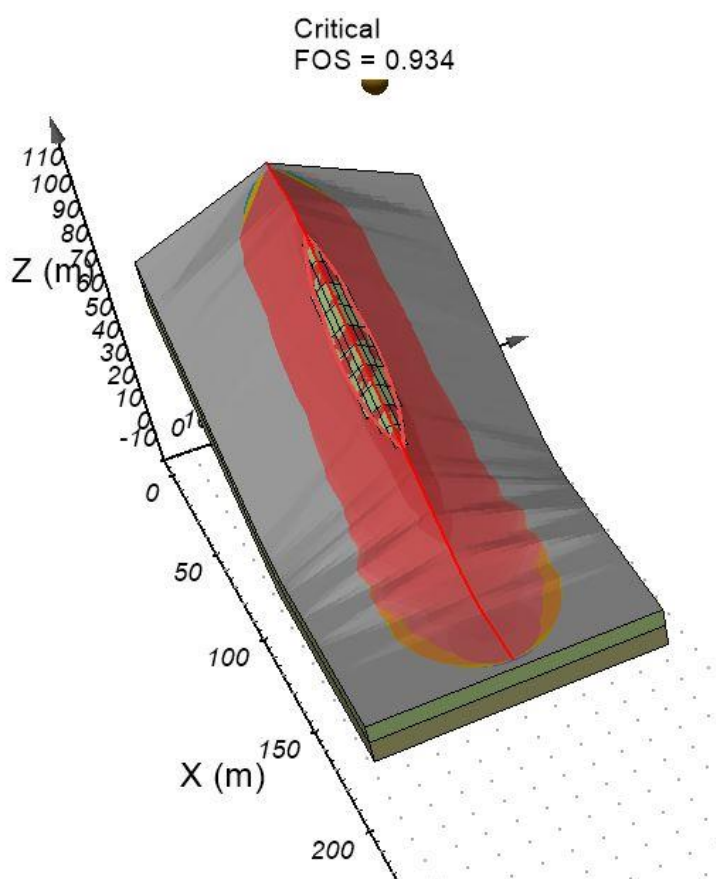
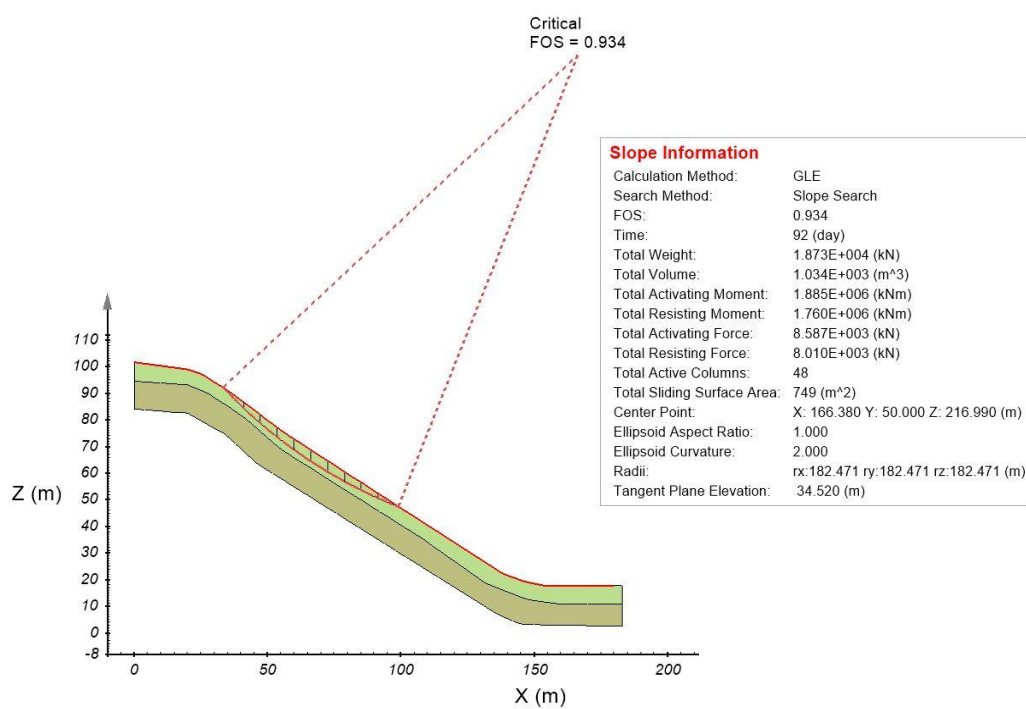


Figura 107 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 75kPa.

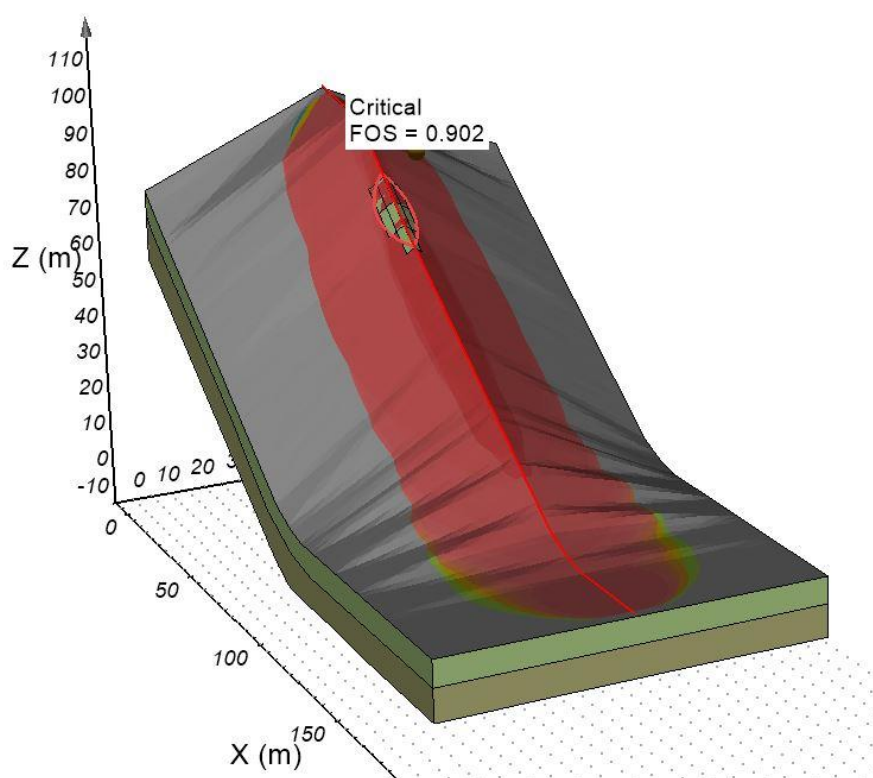
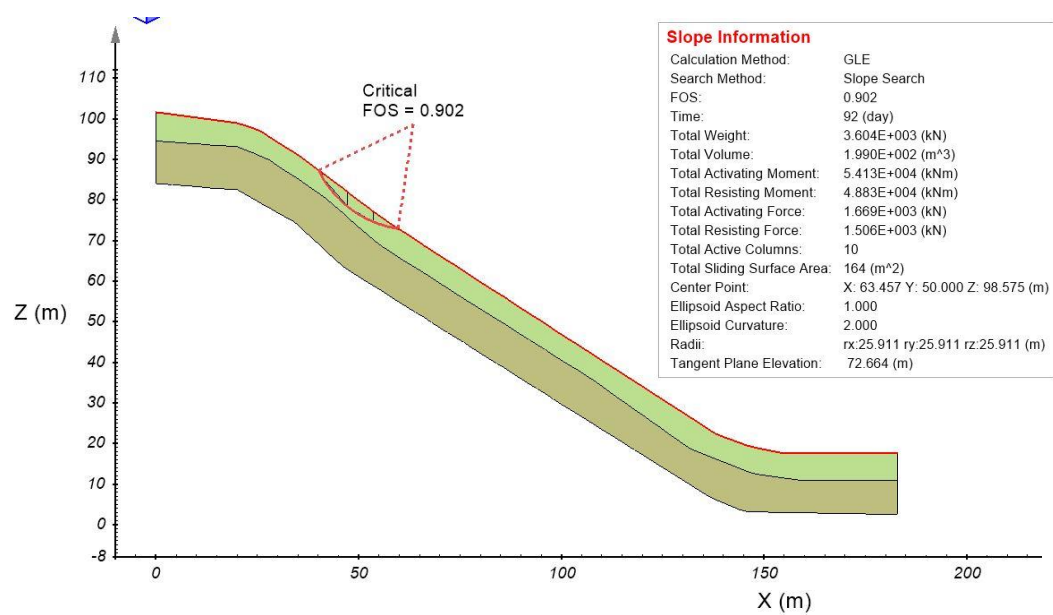


Figura 108 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 100 kPa.

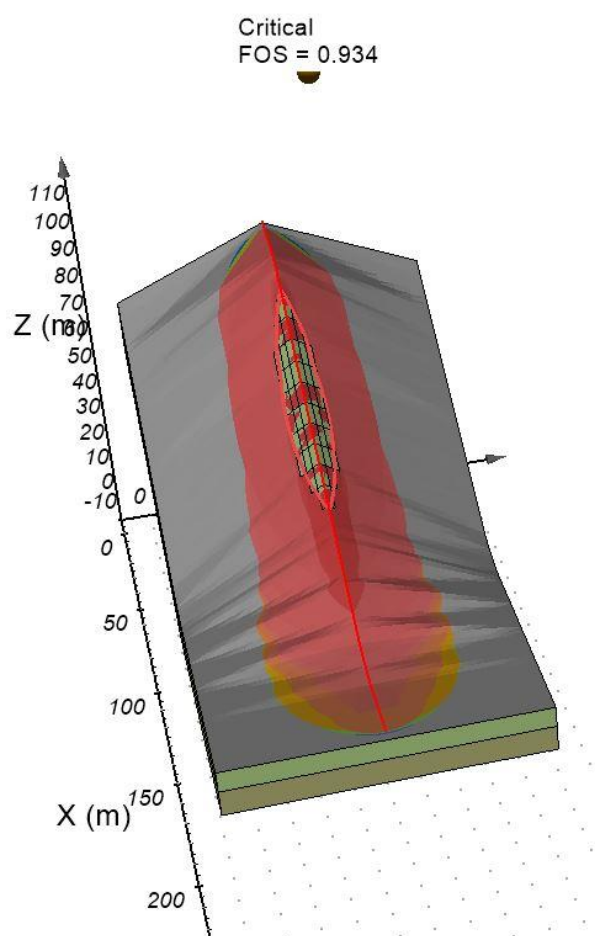
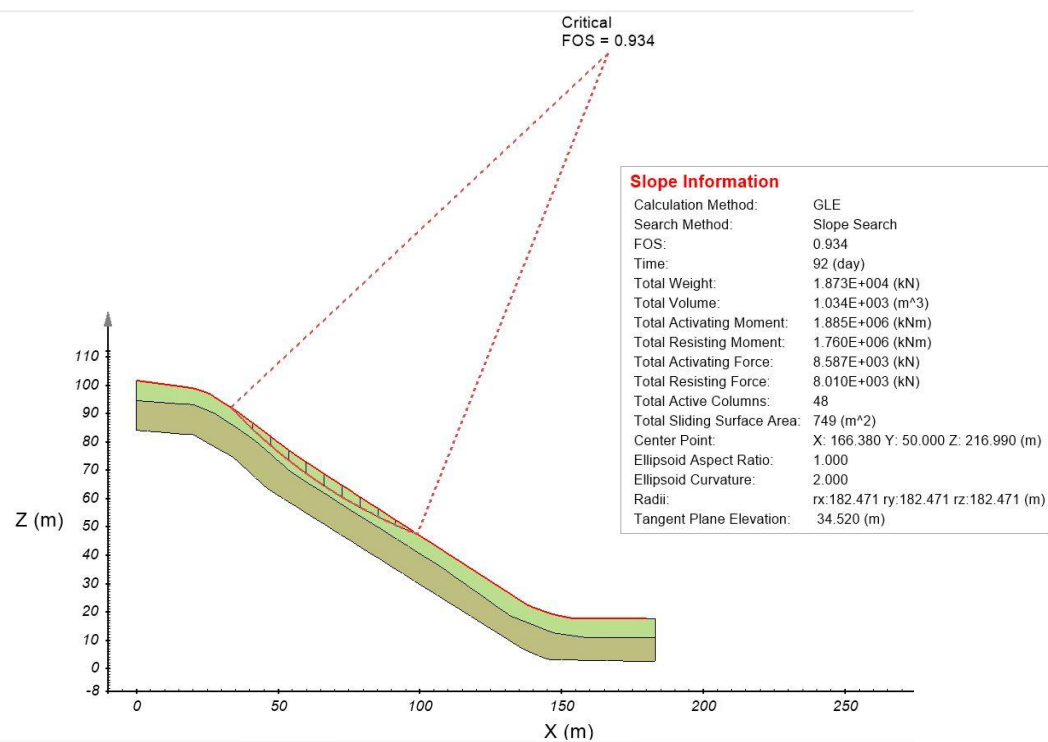


Figura 109 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 150 kPa.

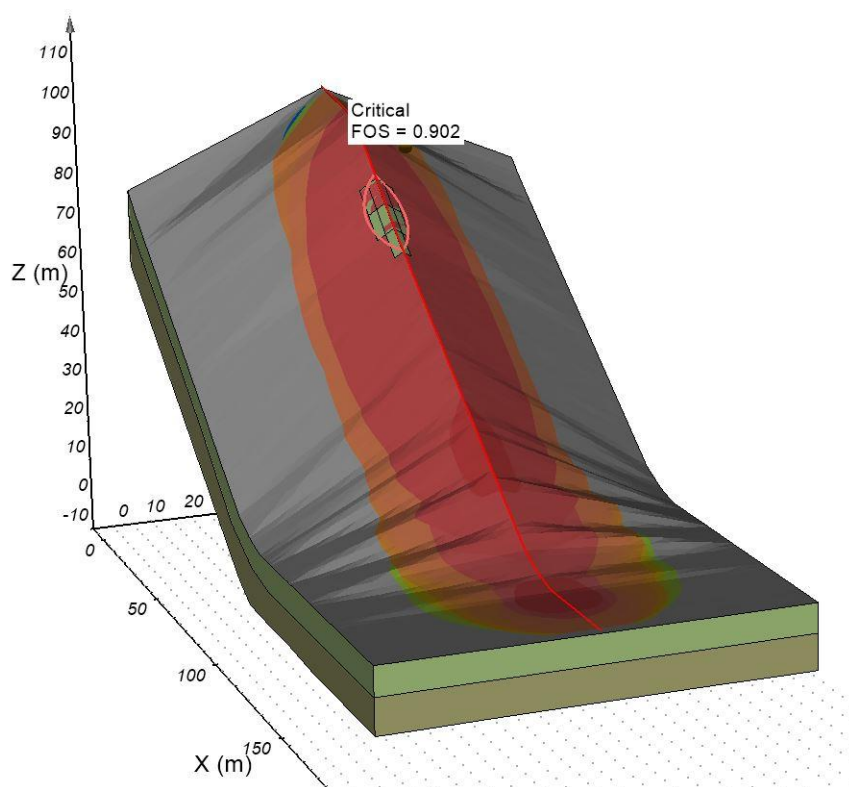
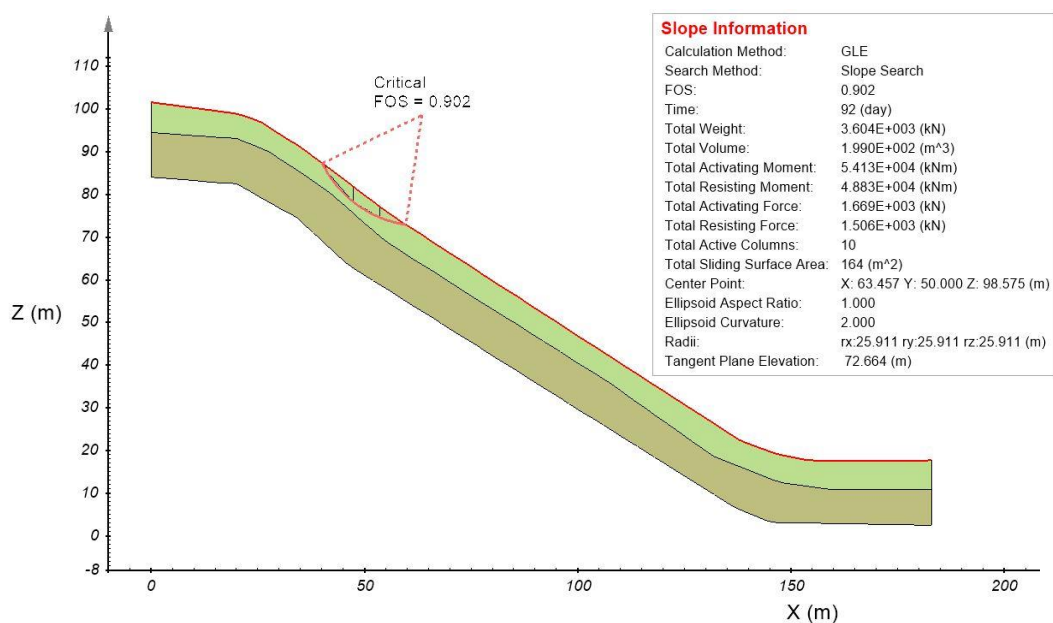


Figura 110 – Análise de estabilidade no modelo 3D Convexo para a sucção inicial de 200 kPa.

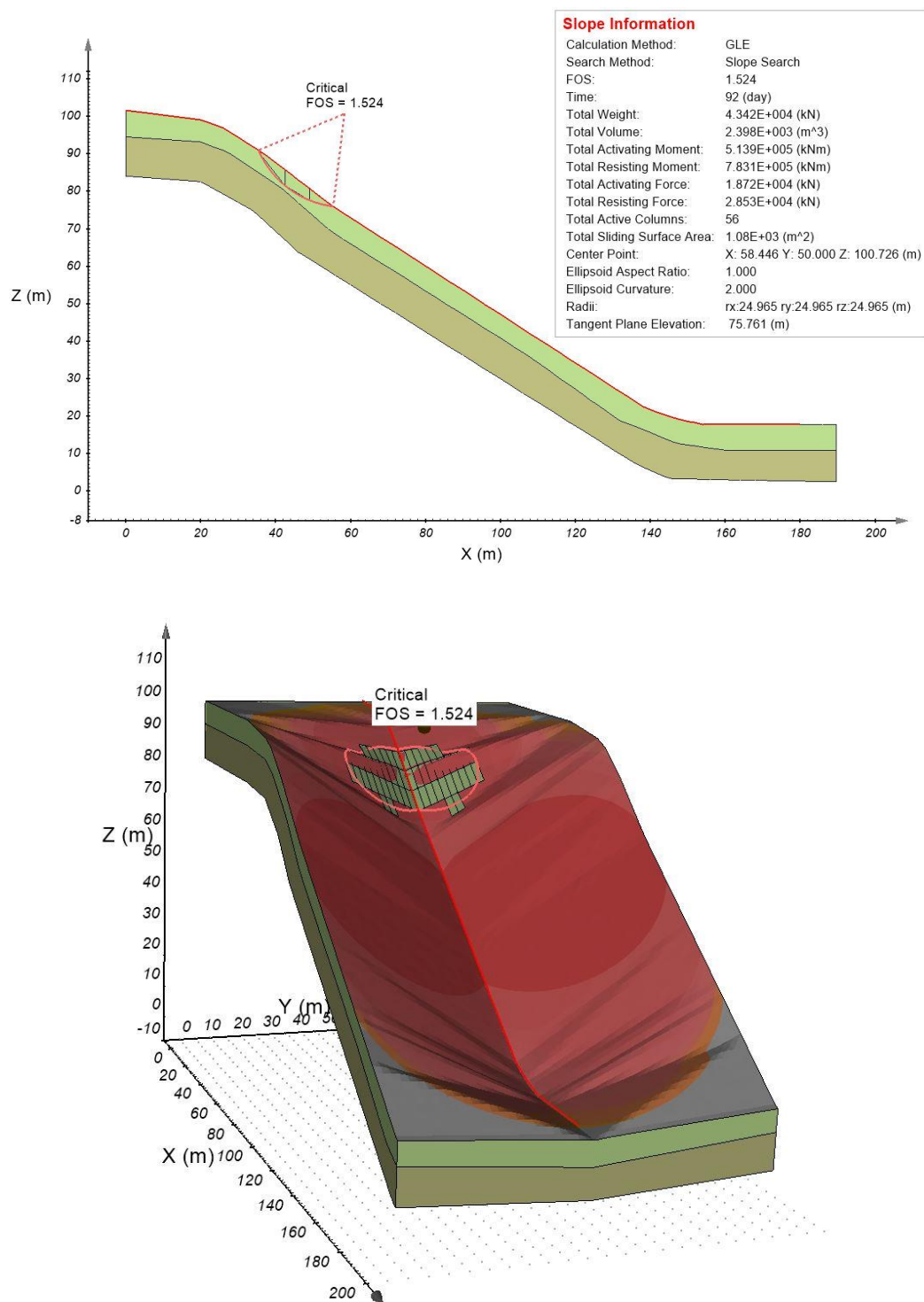


Figura 111 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 50 kPa.

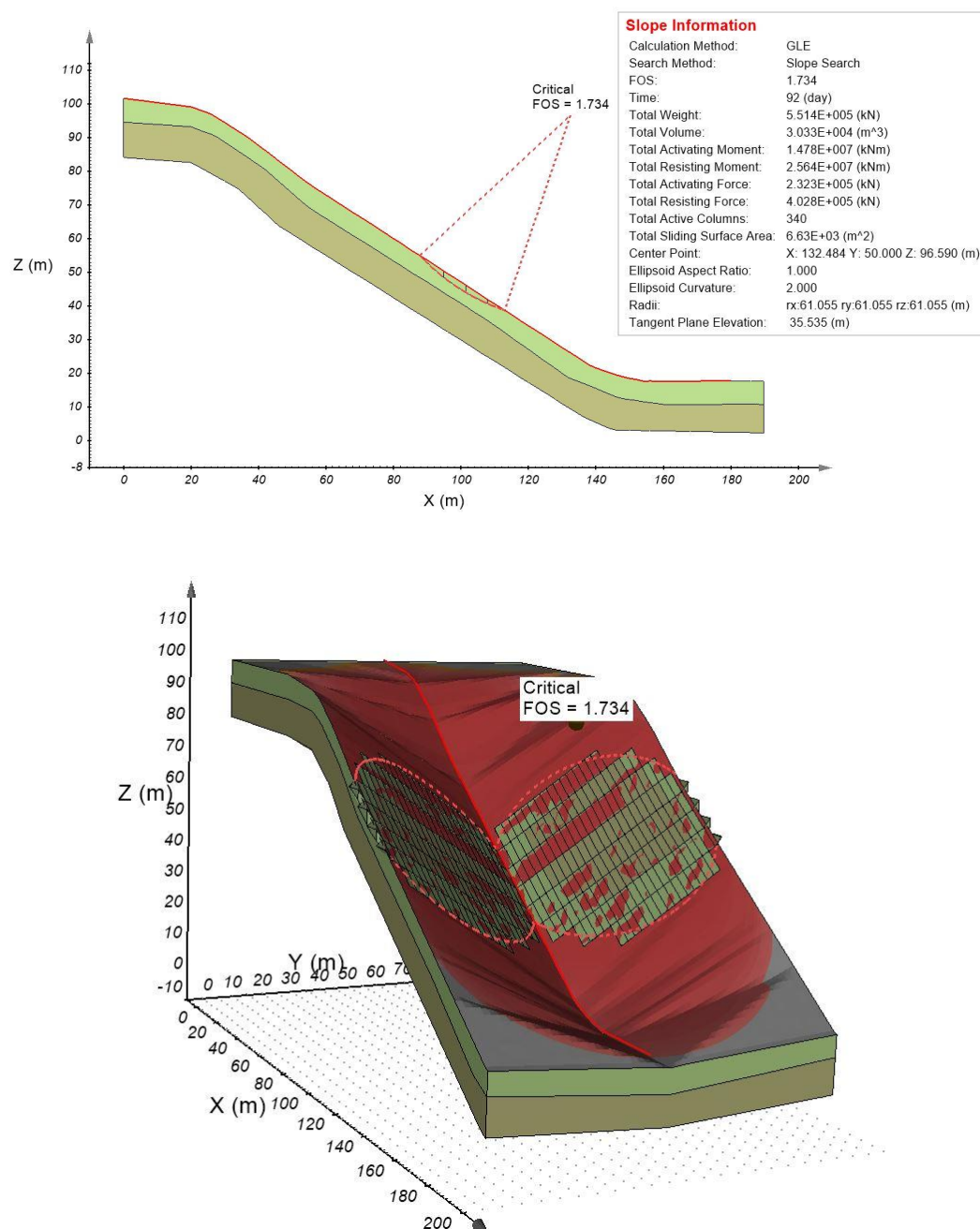


Figura 112 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 75kPa.

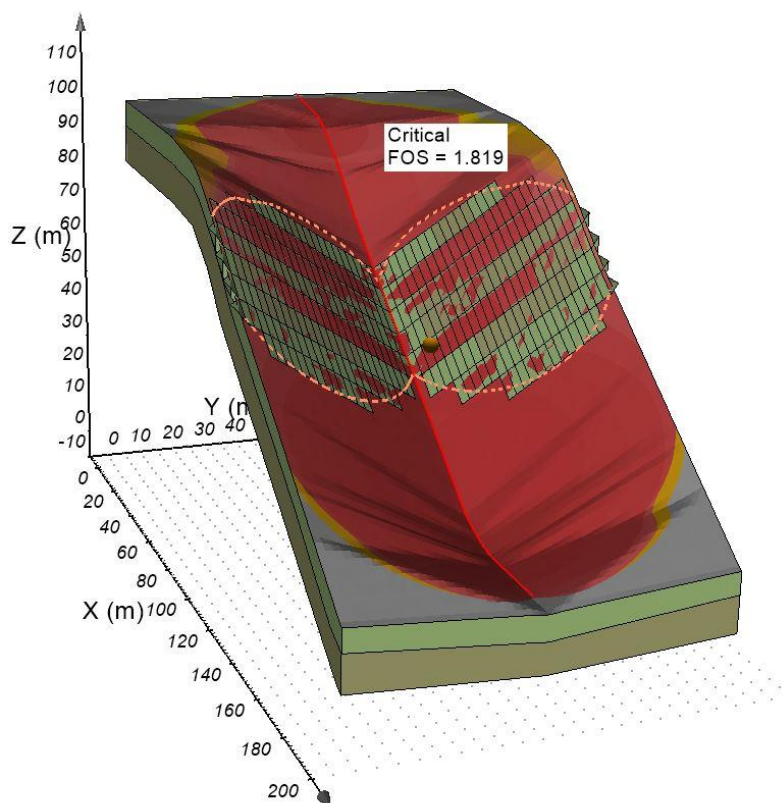
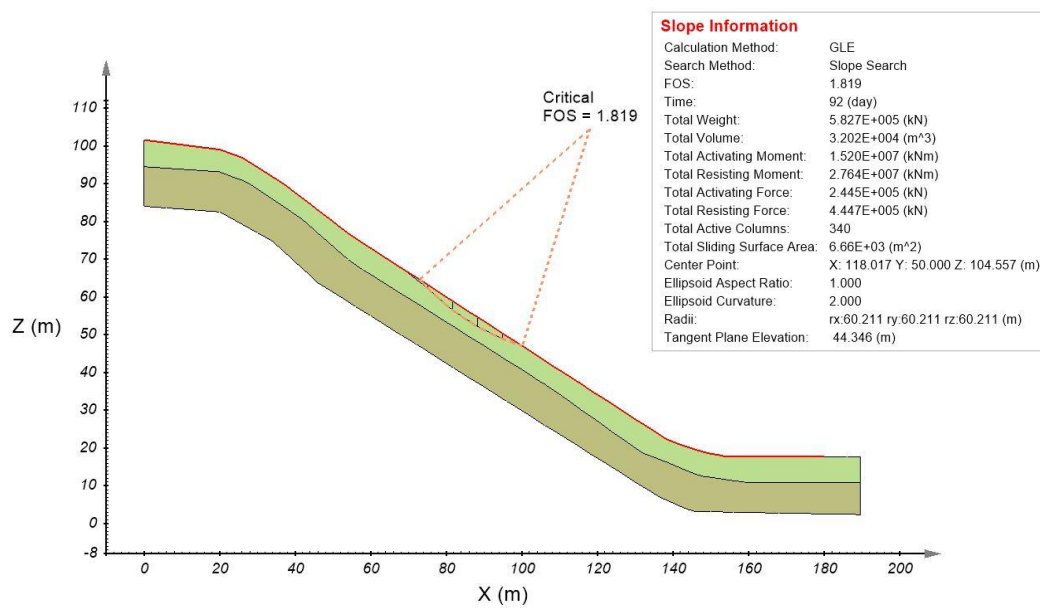


Figura 113 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 100 kPa.

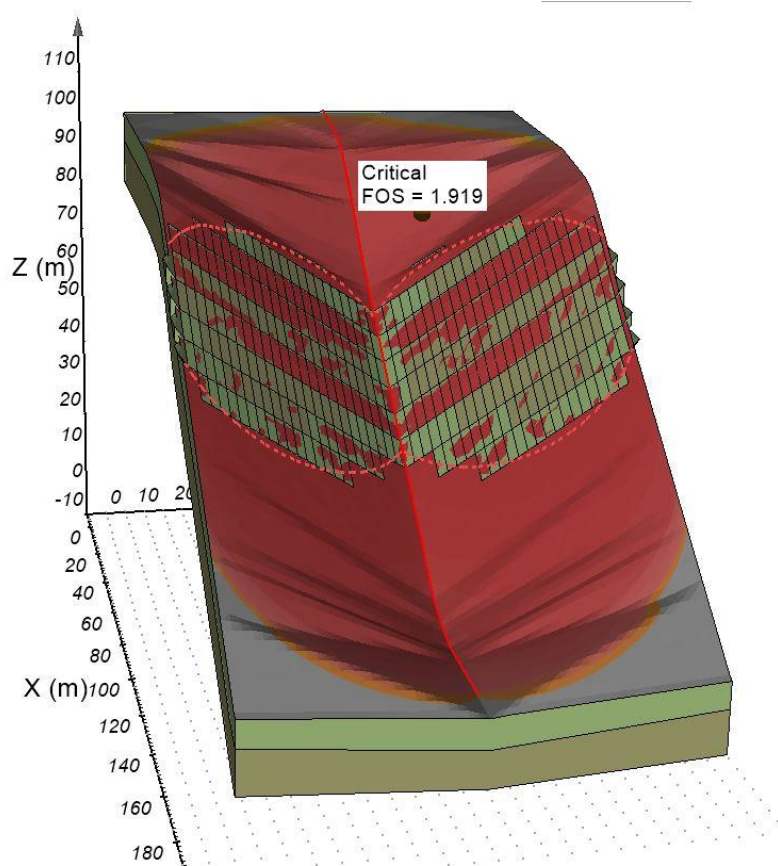
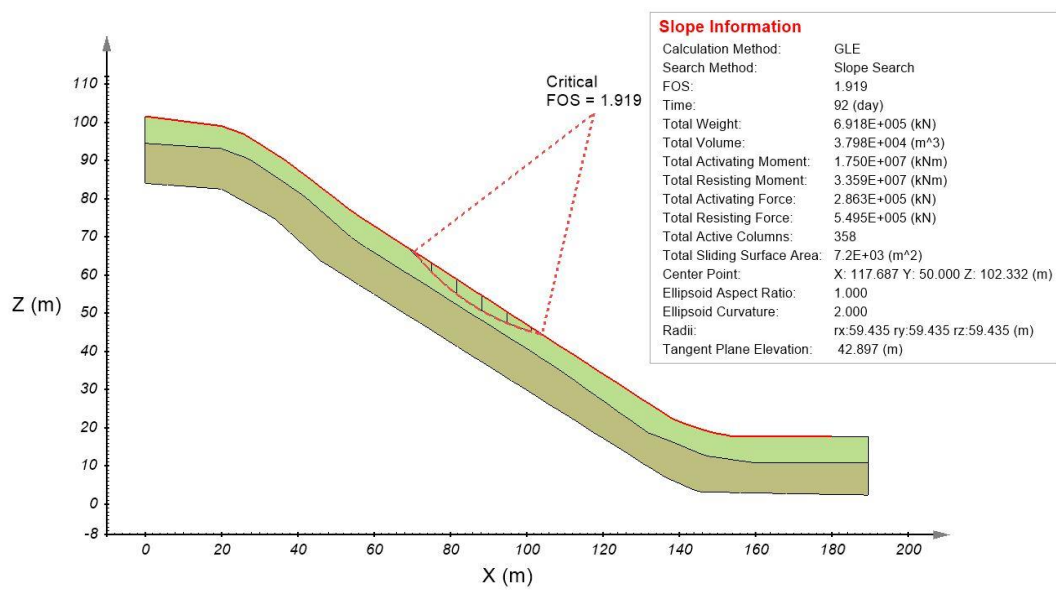


Figura 114 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 150 kPa.

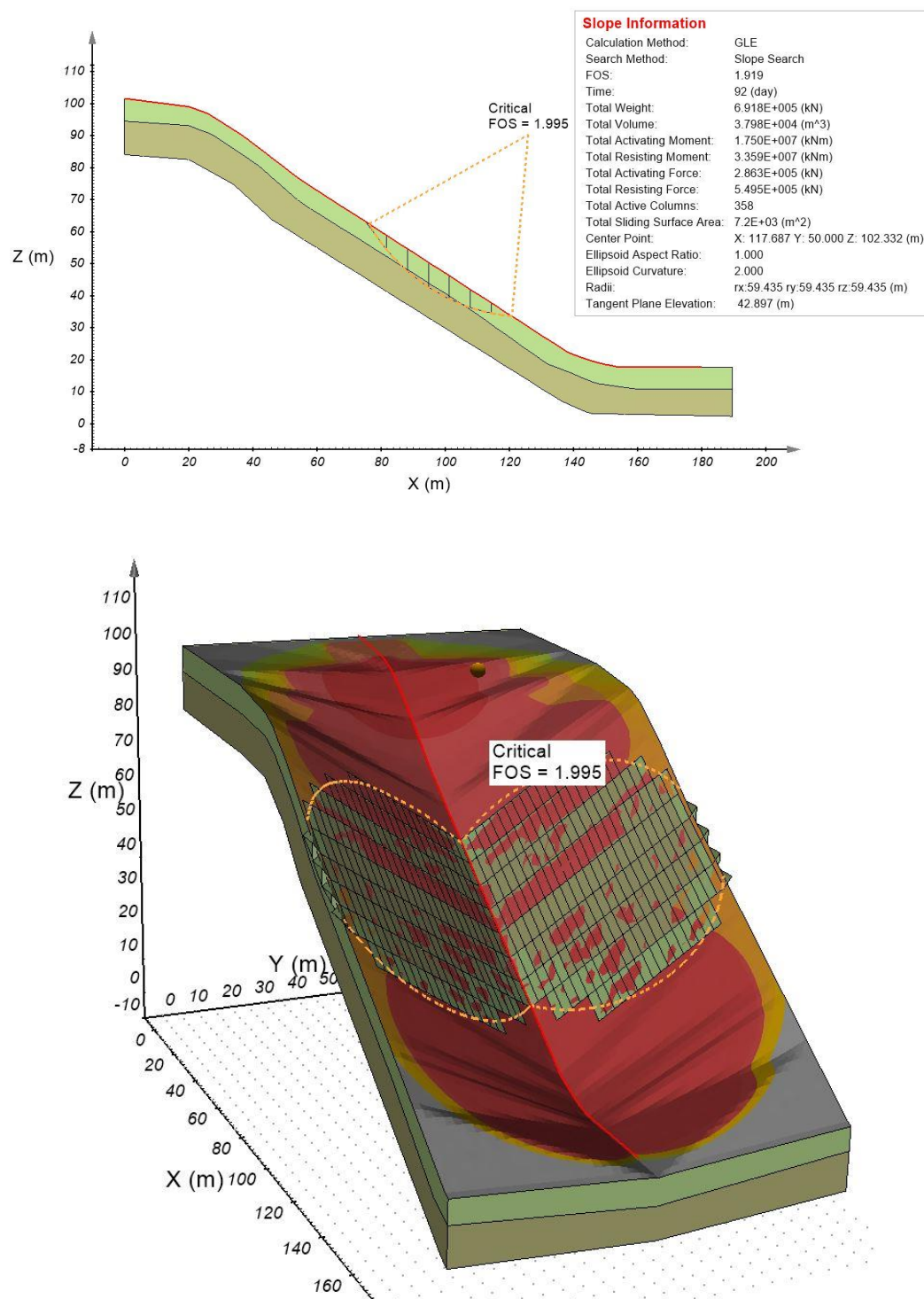


Figura 115 – Análise de estabilidade no modelo 3D Côncavo para a sucção inicial de 200 kPa.