

6 Análise Numérica

Este capítulo tem como objetivo apresentar os dados de entrada e as simulações numéricas realizadas com o auxílio do programa *Vadose/W* e *GeoSlope/W*, ambos contidos no pacote *GEOSTUDIO* versão 2007.

6.1. Geometria do Problema

Para fazer a reconstituição do terreno, primeiramente foi calculada a área da cicatriz e a área afetada, com o auxílio do programa *AutoCad*. Então, multiplicou-se a área afetada pela espessura do material deslizado, obtida a partir dos resultados das sondagens. Com o volume do material deslizado e a área da cicatriz, dividiu-se um pelo outro a fim de se obter a espessura de material a ser adicionado na modelagem do terreno. Sendo estas espessuras de 1,2m para a Prainha e 3m para o Condomínio.

A geometria de cada talude analisado foi obtida a partir do modelo tridimensional obtido com o auxílio do programa *RockWorks 15*, gerado a partir das sondagens realizadas na área de estudo, compreendendo o período de setembro a outubro de 2012, conduzido pela empresa Tecnosonner Projetos e Construções. A localização dessas sondagens é apresentada na Figura 6.1.

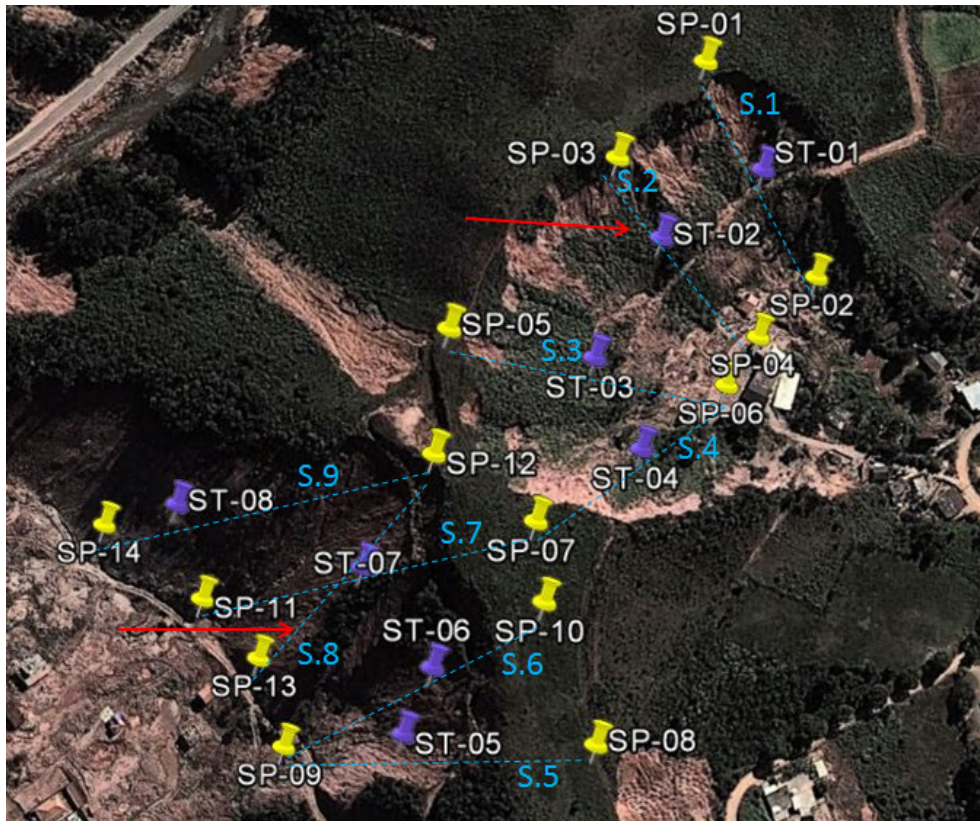
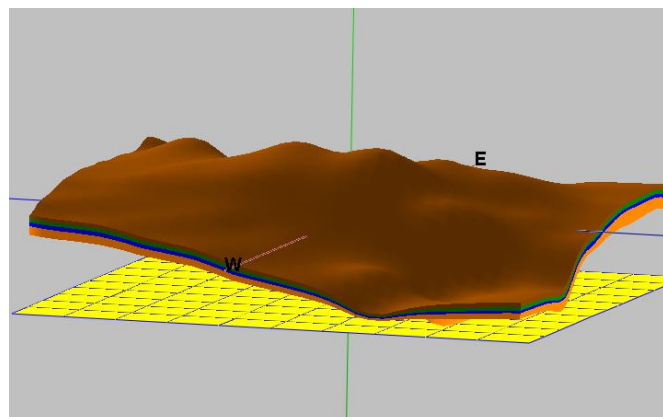


Figura 6.1 - Localização das sondagens realizadas na Prainha e no Condomínio e seções utilizadas para as análises.

Para a realização das análises foram utilizadas as seções transversais passantes pelo meio dos taludes da Prainha e do Condomínio por serem mais representativas da área, sendo estas a seção 2 e 8, como é assinalado na Figura 6.1. O modelo 3D de elevação foi realizado com o auxílio do programa *RockWorks 15*, como dito anteriormente, sendo utilizado o modelo de estratigrafia. O modelo gerado é mostrado na Figura 6.2, sendo a elevação máxima de 1117,6 metros e mínima de 1017,5 metros.



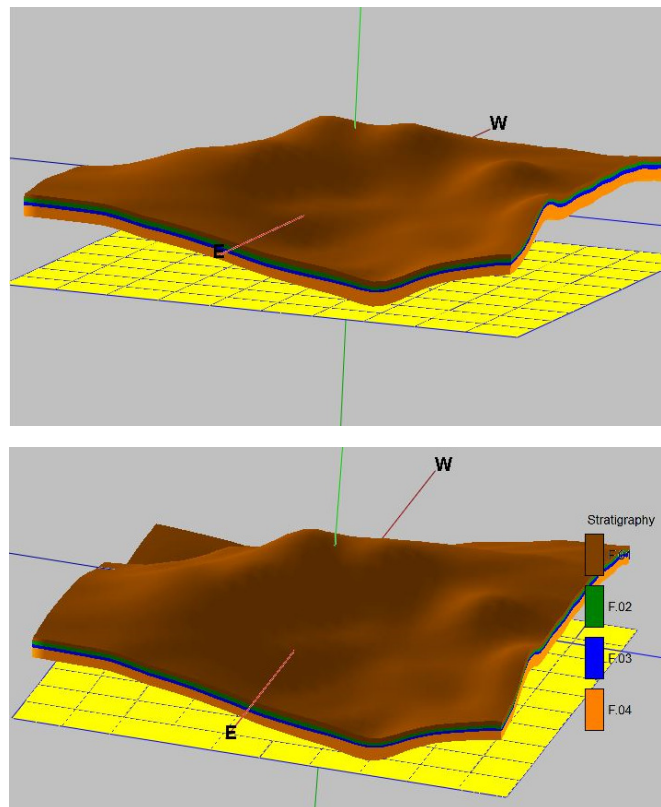


Figura 6.2 - Modelo de elevação da área de estudo.

6.2. Análise de Infiltração

Sabe-se que as maiores variações nas pressões de água, muitas vezes ocorrem na ou muito perto da superfície do solo, sendo estas dependentes do fluxo de água no estado líquido e de vapor de água na superfície do solo. Essas alterações no comportamento do solo tornam a avaliação do fluxo de água através da superfície do solo essencial para a realização da avaliação de estabilidade de encostas, o que se aplica também na avaliação de outros problemas no âmbito da mecânica dos solos (Wilson, 1990).

Para realizar a análise de infiltração foi utilizado o programa *Vadose/W* 2007, como dito anteriormente. O programa realiza a simulação de fluxo em meios não saturados e saturados, utilizando o método de elementos finitos para resolver a equação de Richards (1931). Suas aplicações compreendem, dentre outras, estudos de infiltração, projetos de camadas de aterros sanitários e de resíduos de mineração.

Dentre os fatores que influenciam na infiltração no solo pode-se citar a função de condutividade hidráulica do solo, curva característica, a precipitação e intensidade da mesma. A geometria do talude e a vegetação também interferem no processo de infiltração visto que esses dois condicionantes modificam o escoamento superficial.

Esta análise de infiltração foi desenvolvida a partir de uma simulação de fluxo em regime transiente. Para isso foi definido uma pressão inicial de -1 m para um perfil de sucção constante. De acordo com Borja *et al.*, 2011, apesar de ser considerada uma simplificação grosseira, estudos anteriores (Borja *et al.*, 2011 *apud* Abel *et al.*, 2010) sugerem que esta aproximação é relativamente insignificante comparado ao evento estudado.

6.2.1. Malha de Elementos Finitos

A malha de elementos finitos, definida de forma a proporcionar um equilíbrio entre a precisão no resultado e um tempo razoável para resolução das simulações numéricas pelo programa, foi de 0,4 metros para a Prainha e para o Condomínio, com a geometria das malhas composta de quadrados e triângulos. A Figura 6.3 mostra a indicação de cada material, e a Figura 6.4 e a Figura 6.5 mostram os perfis da Prainha e do Condomínio e suas respectivas malhas.

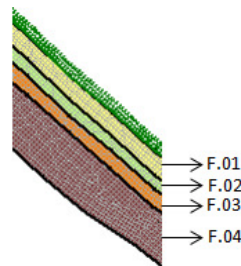


Figura 6.3 - Definição dos materiais.

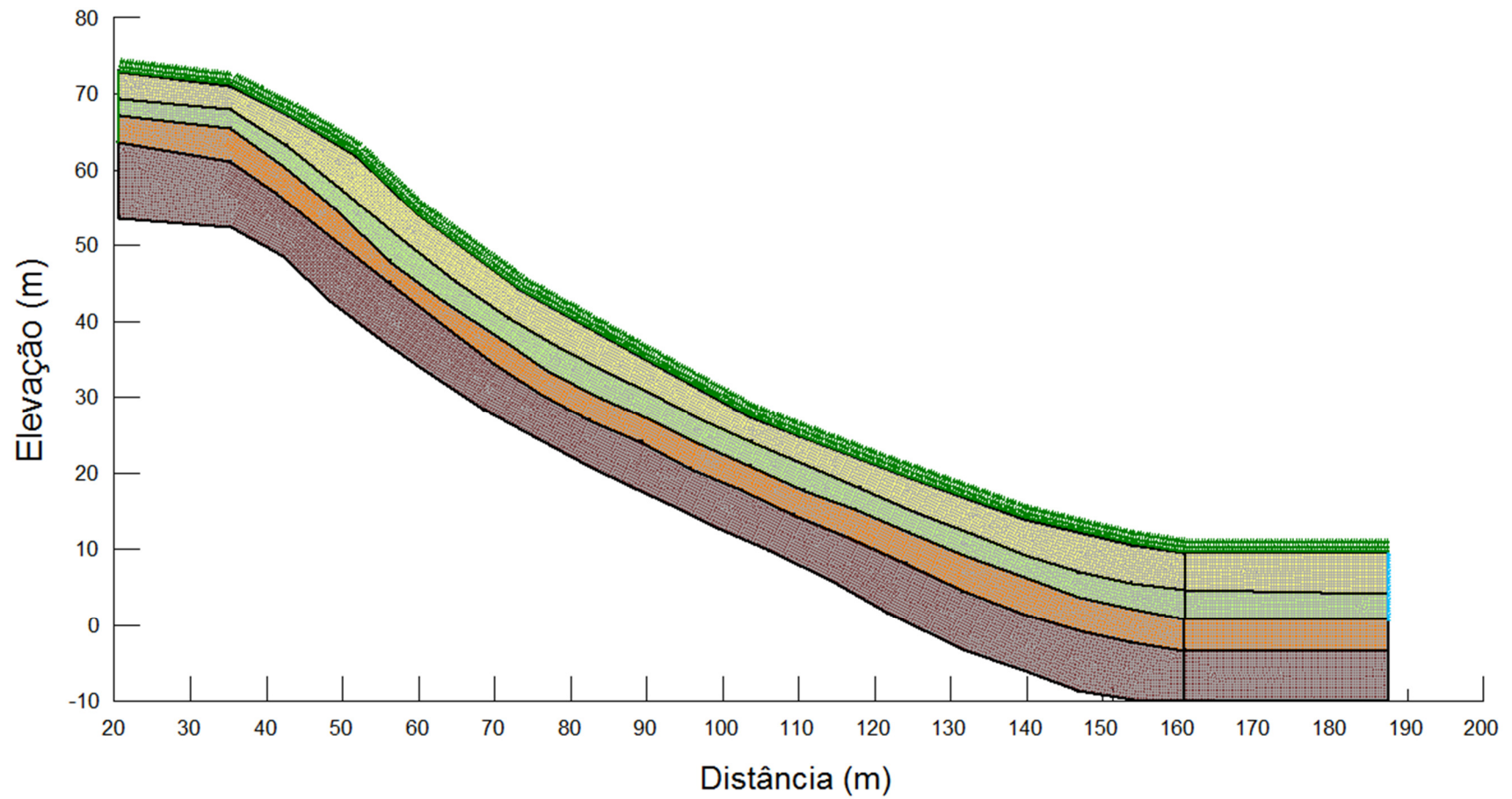


Figura 6.4 - Perfil da Prainha com malha 0,4 metros.

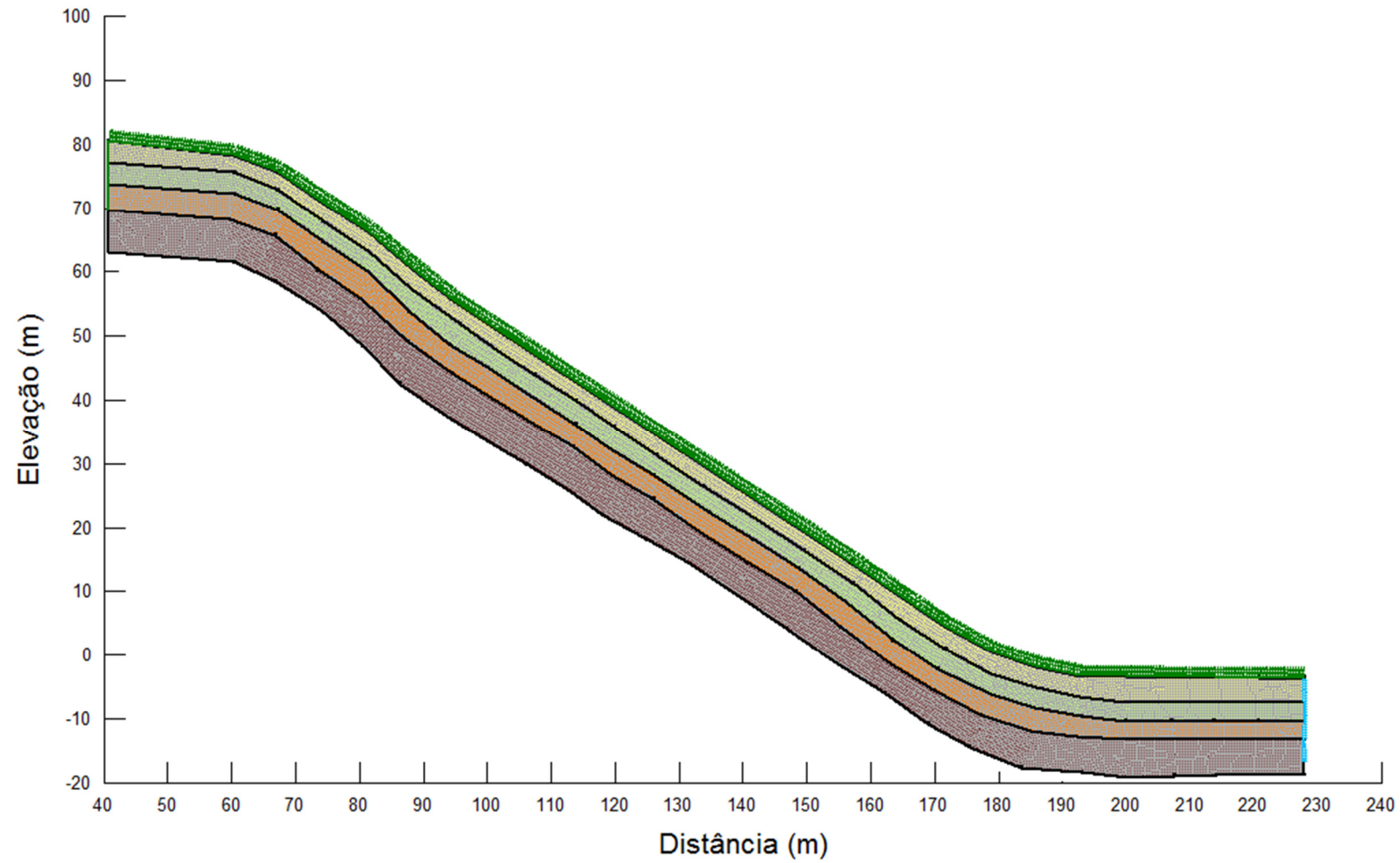


Figura 6.5 - Perfil do Condomínio com malha 0,4 metros.

É possível verificar que para a elaboração da malha procurou-se seguir os diferentes aspectos geométricos do problema, incluindo a atitude das camadas e o caimento do terreno.

6.2.2. Condições de Contorno

Para realizar a análise no programa foi necessário colocar os seguintes dados diários de entrada: evaporação, umidade relativa do ar máxima e mínima, precipitação, duração da precipitação, velocidade do vento (m/s) e temperaturas máxima e mínima, pois o programa utiliza esses dados para o cálculo da evaporação real através do método de Penmann-Wilson (1990).

Wilson (1990) cita que existem três fatores interligados que controlam o fluxo de água entre solo e atmosfera, sendo estes: o abastecimento de água, que é controlado por condições climáticas como precipitação, velocidade do vento e radiação solar; a capacidade da superfície de transmitir água, sendo esta função da permeabilidade e características de armazenamento do solo; e o consumo de água pelo tipo e densidade de vegetação.

Os dados de precipitação diária foram obtidos através do histórico de chuvas fornecido pelo INEA (Instituto Estadual do Ambiente), coletados de cada estação de Nova Friburgo. As estações analisadas, assim como as distâncias para a área de estudo, estão apresentadas na Tabela 6.1. A Figura 6.6 mostra a localização de cada uma dessas estações.

Tabela 6.1 - Estações Pluviométricas em Nova Friburgo e suas distâncias para a área de estudo.

Estação	E	S	Distâncias (km)
Conselheiro Paulino	755618,77	7539796,58	12,6
Nova Friburgo	754005,39	7534160,21	12,0
Olaria	753193,96	7530941,99	13,0
Sítio Santa Paula	750131,5	7535493,96	7,9
Ypu	754798,04	7532365,32	13,6

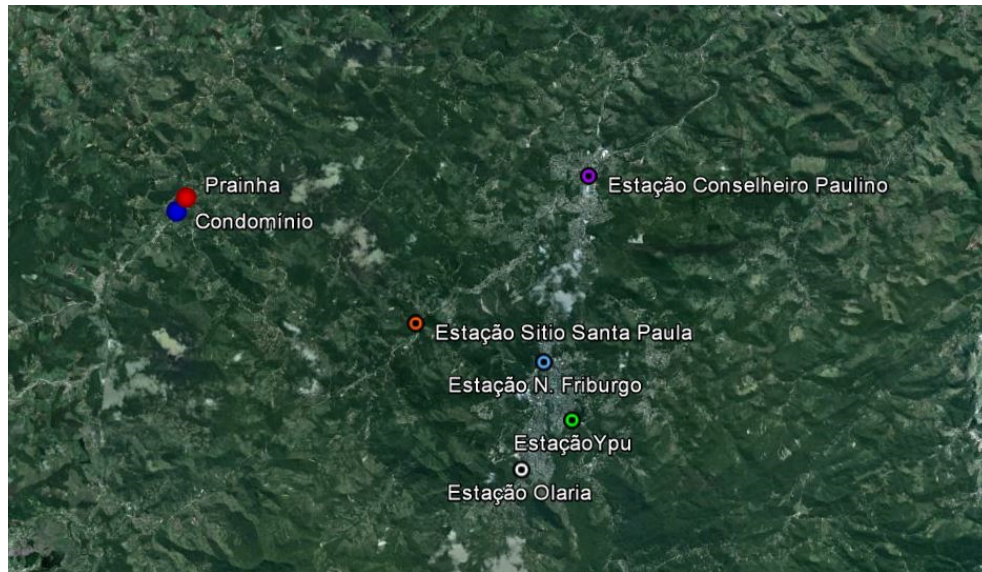
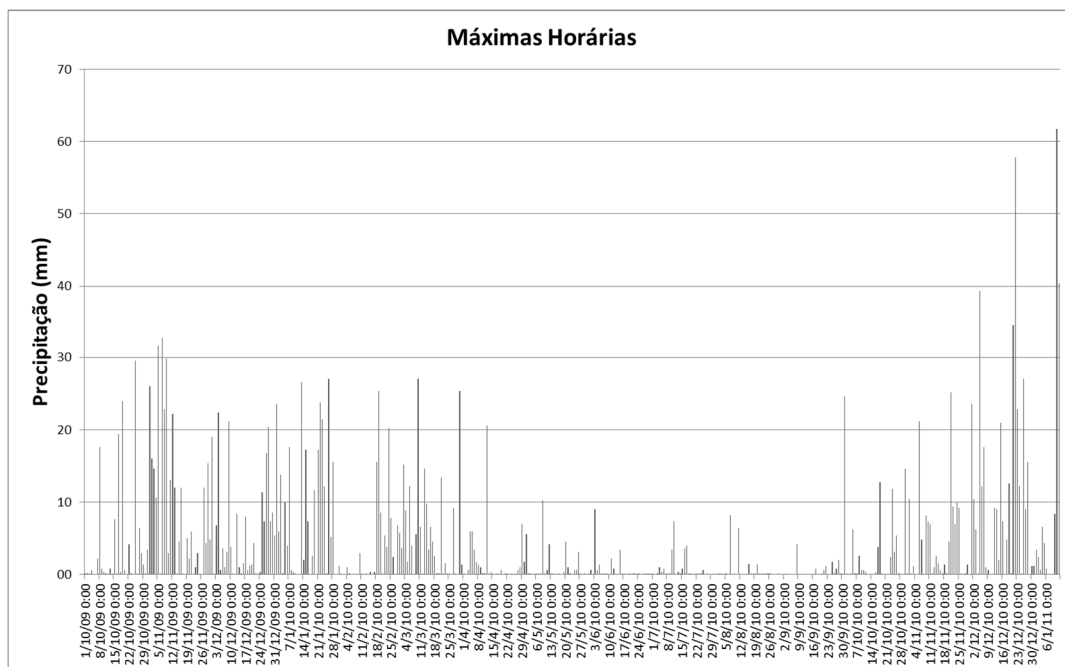


Figura 6.6 - Localização das estações pluviométricas e da área de estudo.

Fonte: Google Earth.

Um resumo dos dados obtidos é apresentado na Figura 6.7, que mostra os gráficos de chuva máxima horária, diária e mensal respectivamente, sendo apresentados os dados de precipitação de 1/10/2009 até 12/01/2011 às 7 horas.



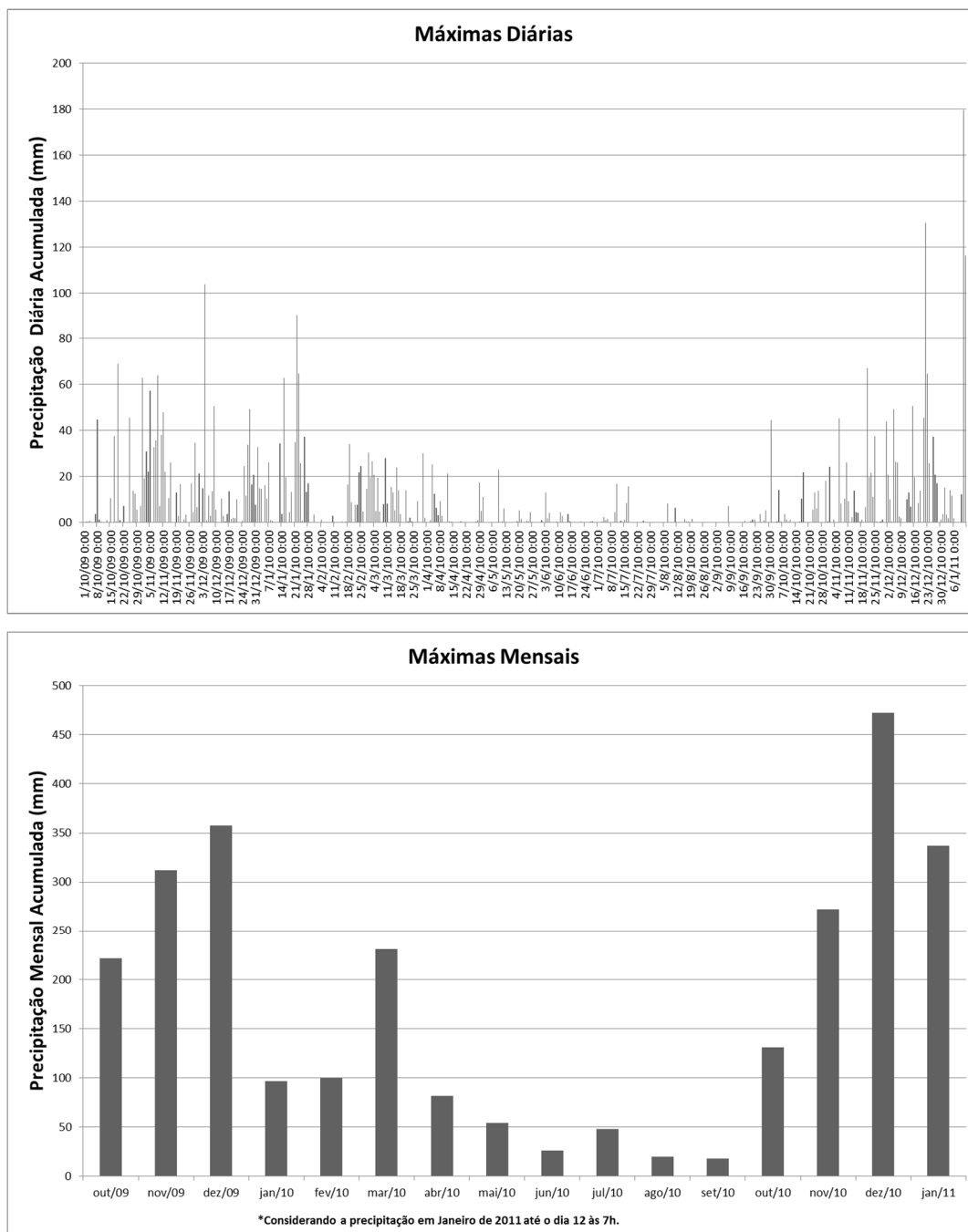


Figura 6.7 - Gráficos de precipitação acumulada por hora, dia e mês respectivamente.

Para definir as precipitações a serem utilizadas nas análises, realizou-se uma seleção das maiores precipitações medidas nas estações citadas anteriormente (Tabela 6.1), estabelecendo assim a situação mais crítica. A Figura 6.8 mostra os dados de precipitação diária utilizados para a realização das análises.

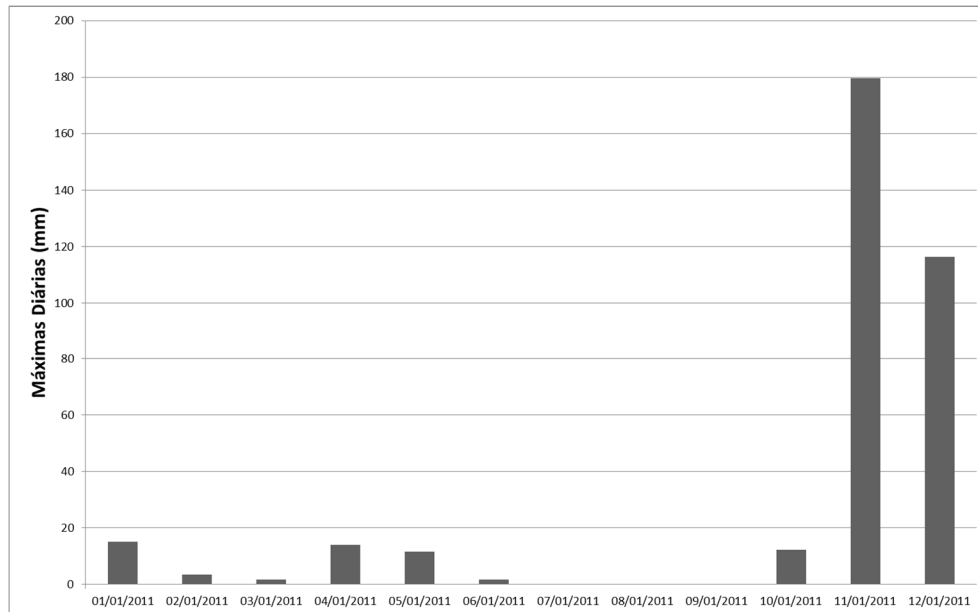


Figura 6.8 - Dados de precipitação diários de janeiro de 2011.

Os dados de temperaturas máxima e mínima, velocidade do vento e umidade relativa do ar foram obtidos na base de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e, a partir desses dados e dos dados de chuva, foi calculada a evaporação através das equações de balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955) e Fenn *et al.* (1975). A Figura 6.9, a Figura 6.10 e a Figura 6.11 apresentam os valores diários utilizados na análise numérica.

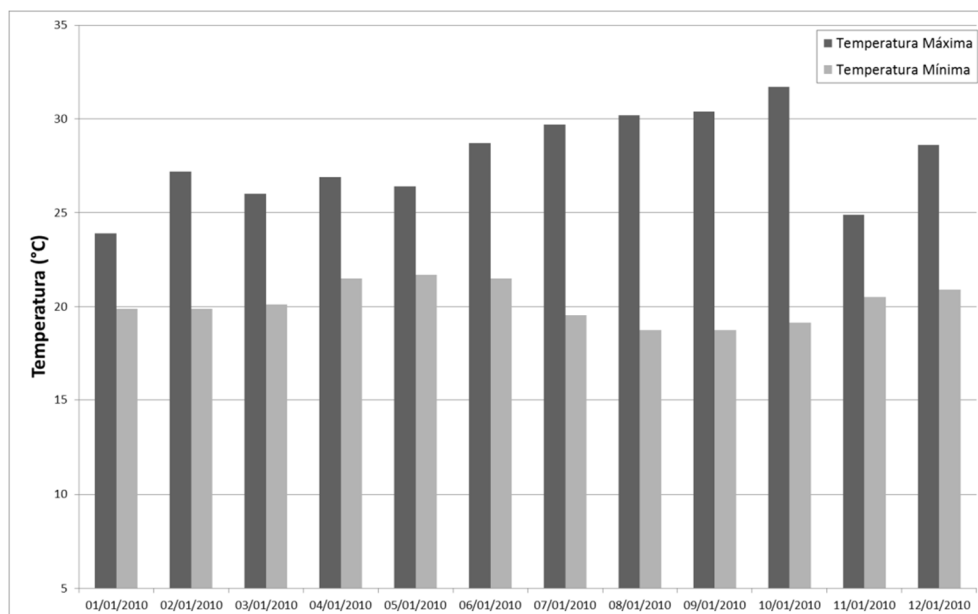


Figura 6.9 - Dados de temperatura máxima e mínima diárias utilizadas nas análises.

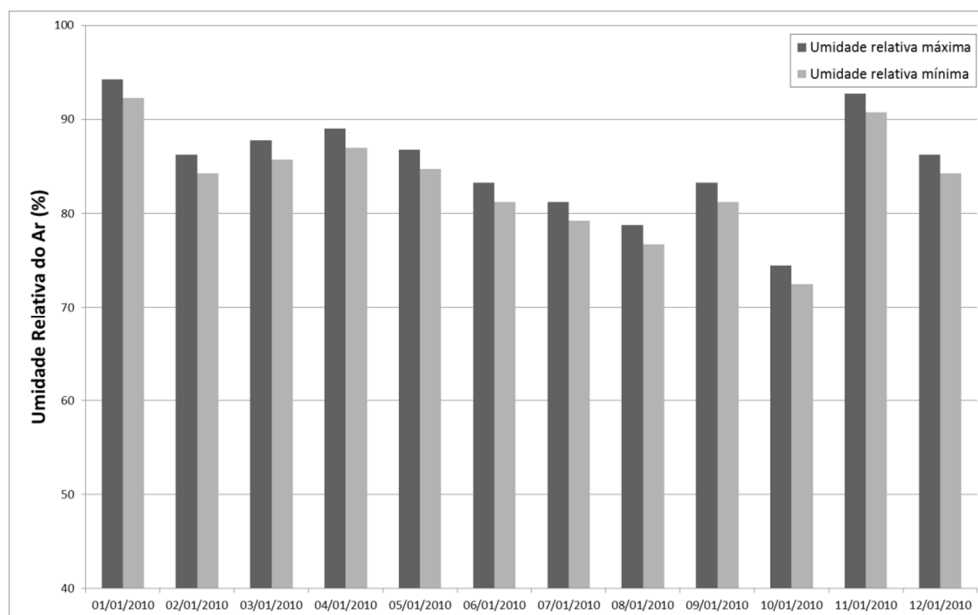


Figura 6.10 - Dados de umidade relativa do ar máxima e mínima diárias.

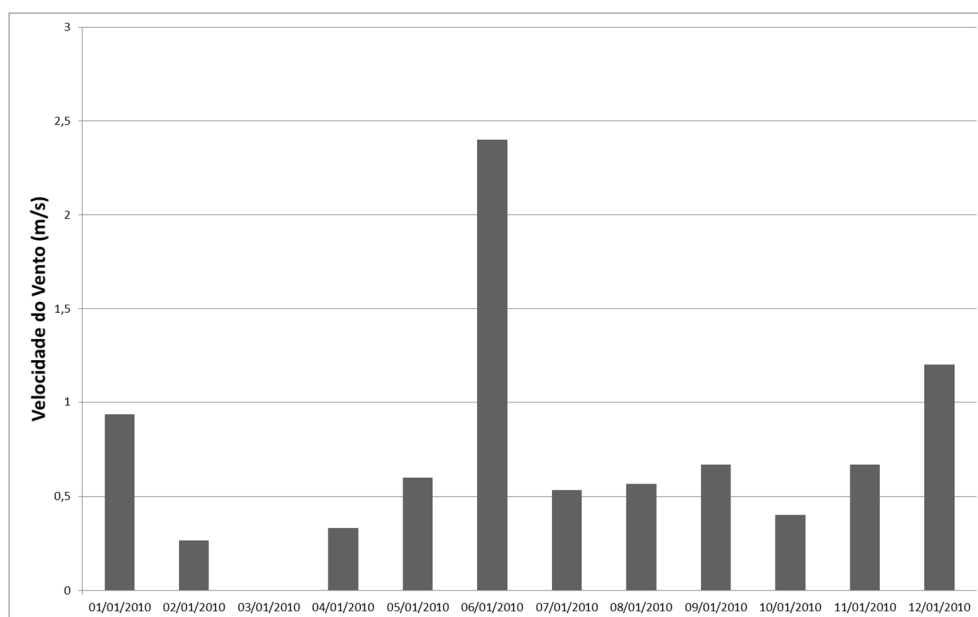


Figura 6.11 - Dados de velocidade do vento.

O programa ainda exige, como dado de entrada, parâmetros de condutividade térmica e calor específico volumétrico, sendo adotados, para estes, valores típicos sugeridos pelo manual do programa. A condutividade térmica

adotada foi de $216 \text{ kJ/dia.m.}^\circ\text{C}$ e o calor específico adotado foi de $1875 \text{ kJ/m}^3.^\circ\text{C}$, de acordo com o recomendado por GEO-STUDIO (2008).

Também foi adicionada uma face percolante no pé do talude, visto que, sem essa condição, já na análise preliminar a água se acumulava no pé do talude até atingir a superfície do terreno, o que não condizia com as informações obtidas com as sondagens realizadas no local. As outras condições de contorno são mostradas na Figura 6.12 e na Figura 6.13.

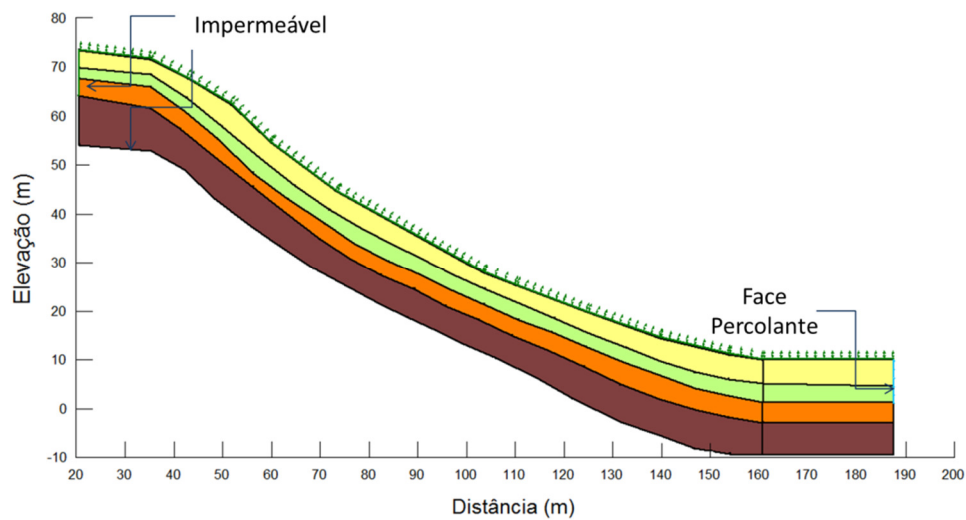


Figura 6.12 - Condições de contorno da simulação numérica da Prainha.

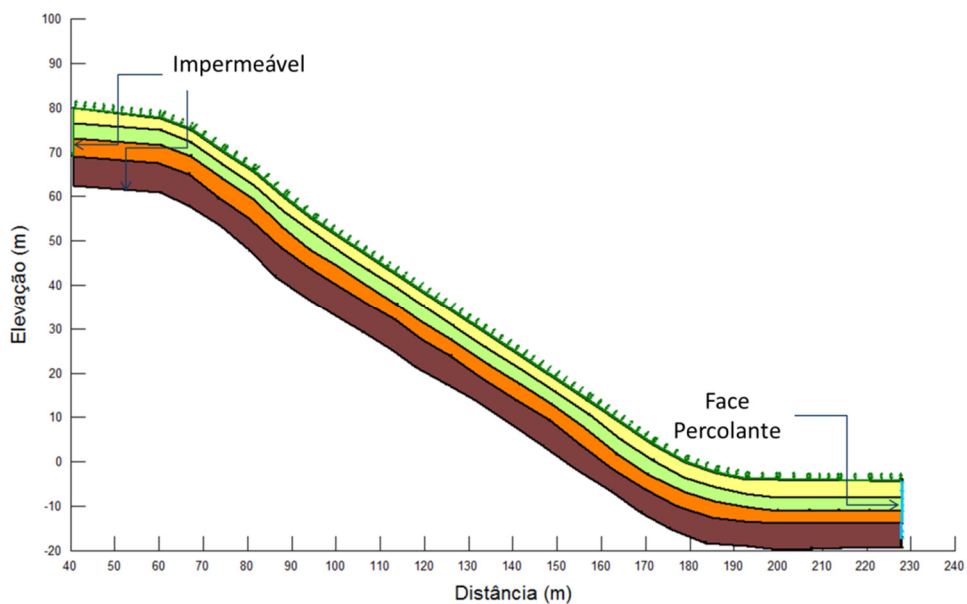


Figura 6.13 - Condições de contorno da simulação numérica do Condomínio.

6.2.3. Propriedades dos Materiais

Para as propriedades hidráulicas dos materiais foram utilizadas as curvas características obtidas pelo método do papel filtro. O ajuste foi realizado mediante a utilização do modelo de van Genuchten, como mostrado no capítulo 4. A permeabilidade adotada dos materiais F.01, F.02 e F.04 foi a obtida nos ensaios de laboratório. A permeabilidade do material F.03 foi baseada nos resultados obtidos em laboratório e no campo através do permeômetro de Guelph, sendo utilizados valores entre estes resultados visto que, quando foi realizada a análise utilizando os resultados de laboratório, o resultado não foi condizente com as observações de campo, visto que utilizando as permeabilidades medidas em campo o nível d'água se elevava até o topo do terreno. Foi efetuado ajuste pela utilização do modelo de van Genuchten (1980), como mostrado na Figura 6.14. As permeabilidades utilizadas são mostradas na Tabela 6.2.

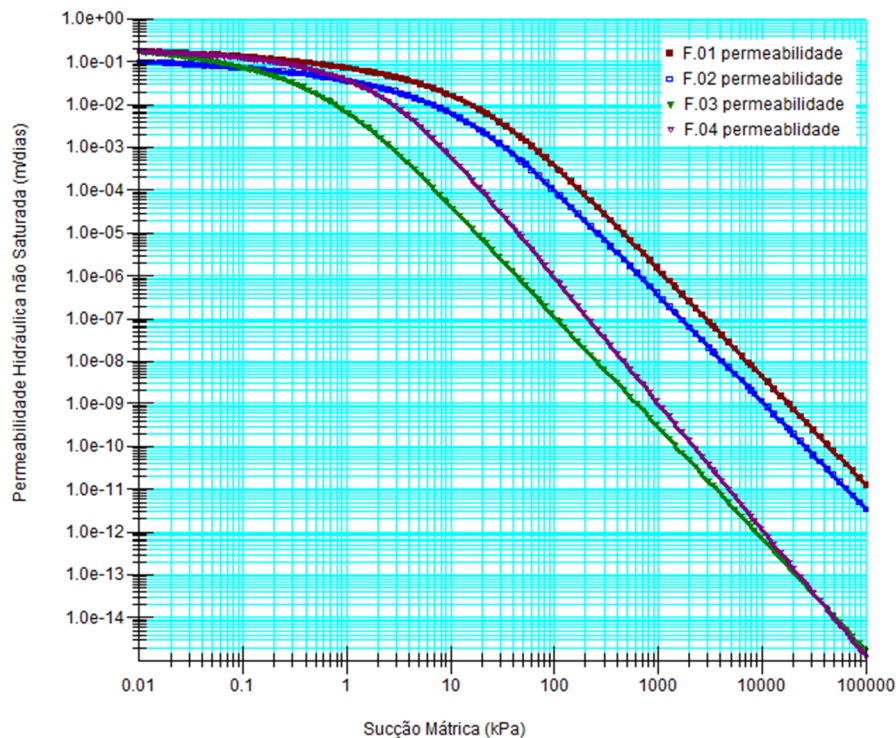


Figura 6.14 - Curvas de função de permeabilidade dos materiais utilizados nas análises.

Tabela 6.2 - Permeabilidades utilizadas nas análises.

Solo	K_{sat} (cm/s)	K_{sat} (m/dia)
F.01	2,08E-04	1,79E-01
F.02	1,17E-04	1,01E-01
F.03	1,97E-04	1,70E-01
F.04	1,99E-04	1,72E-01

O valor do coeficiente de variação volumétrica M_v foi o indicado pelo manual do programa a ser adotado como sendo 1×10^{-5} 1/kPa para todos os materiais, porém a não utilização deste parâmetro não apresentou mudanças nos resultados.

6.3. Análise de Estabilidade

Os mecanismos de ruptura podem ser divididos em planar, em cunha, por tombamento e circular. A ruptura planar ocorre quando a ruptura se dá numa descontinuidade hidráulica ou mecânica, como uma estratificação, uma falha, sendo que a condição básica para ocorrer este tipo de ruptura é a presença de uma descontinuidade mergulhando a favor do talude e com a mesma direção (Bautista, 2007).

A ruptura em cunha corresponde ao deslizamento formado por dois planos de descontinuidades, na direção da sua linha de interseção. Devem aflorar na superfície do terreno e atender as mesmas condições da ruptura planar. Geralmente apresenta-se em maciços com várias famílias de descontinuidades.

A ruptura por tombamento apresenta-se em taludes de maciços rochosos e em geral apresentam-se como blocos individualizados por um conjunto de descontinuidades ortogonais.

O tipo de ruptura circular pode ocorrer em maciços que apresentam um comportamento isotrópico e onde os planos de descontinuidades não controlam o comportamento mecânico (Bautista, 2007).

De acordo com Fernandes *et al.*, 2001, existem vários mecanismos que levam à instabilização de encostas. Dentre eles pode-se destacar o aumento da poropressão, relacionado com a saturação do solo. Tal processo torna-se importante nas porções côncavas do relevo ou *hollows*, pois possuem os fluxos de

água, tanto superficiais quanto subsuperficiais, que convergem, favorecendo o desenvolvimento de condições de saturação e conseqüentemente escorregamentos (Fernandes e Amaral, 1996).

Fernandes *et al.*, 2001 ainda cita como um outro mecanismo de instabilização de encostas ainda pouco conhecido, o da perda da sucção relacionada ao avanço da frente de infiltração, sendo que neste caso a ruptura ocorre sem que a saturação seja alcançada, sendo este mecanismo estudado por de Campos e Vargas Jr. desde 1984.

A análise de estabilidade foi realizada com o auxílio do programa *GeoSlope/W* da *GEOSTUDIO* 2007, utilizando dados de poropressão obtidos através da análise de infiltração.

O método utilizado para o cálculo do fator de segurança foi o método de equilíbrio limite através do método rigoroso de Morgenstern-Price para superfície de ruptura qualquer.

Os parâmetros de resistência adotados para a análise foram os obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto, como mostrado no capítulo 5, e o parâmetro que quantifica o aumento de resistência devido a um aumento na sucção (ϕ^b) adotado foi de 30° para solos residuais. Os dados de coesão e ângulo de atrito utilizados são mostrados na Tabela 6.3.

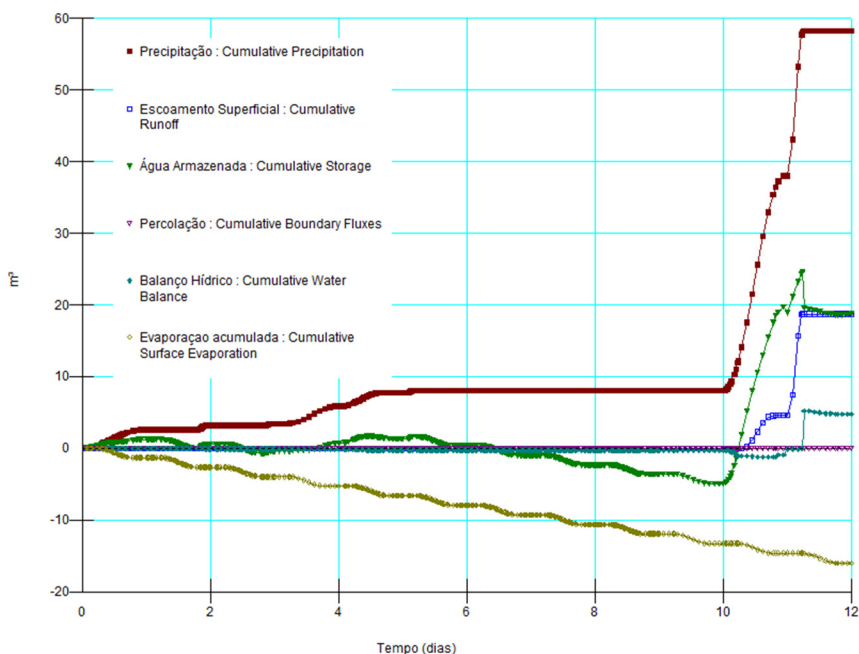
Tabela 6.3 - Parâmetros de resistência utilizados para a análise de estabilidade.

Amostra	c'	ϕ'	R^2
F.01 e F.02	2,66	26,04	0,95
F.03 e F.04	0,00	36,72	0,98

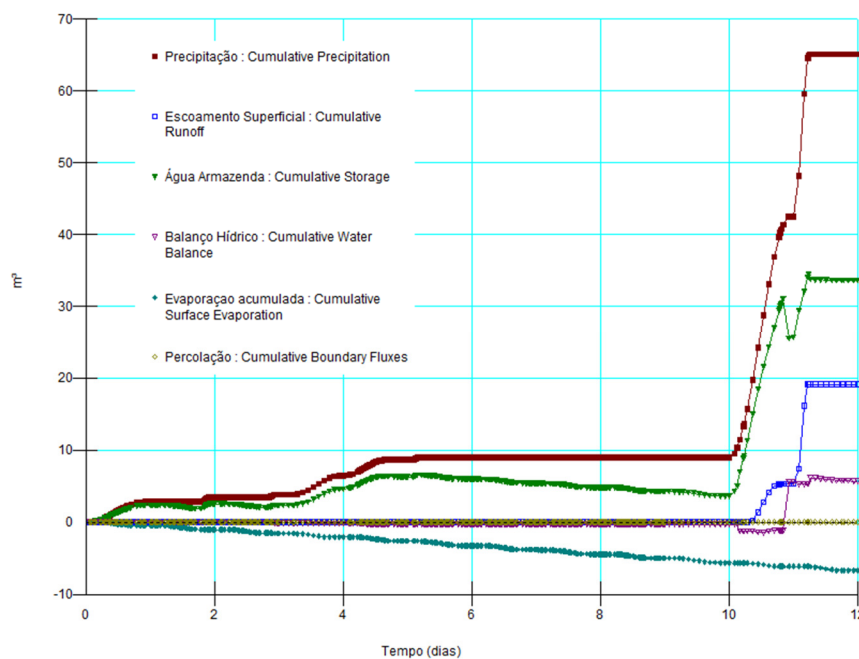
6.4. Análise dos Resultados

As saídas gráficas das análises de infiltração são mostradas da Figura 6.15 à Figura 6.18. Como a solução numérica é sempre uma aproximação, é necessário avaliar se essa aproximação está satisfatória, isto é, deve-se verificar se a simulação está, pelo menos, conservando massa satisfatoriamente. Se a simulação não conserva massa, essa aproximação não está satisfatória, e é necessário, por

exemplo, refinar a malha, ou diminuir a tolerância de convergência. Analisando os gráficos apresentados na Figura 6.15, nos quais é mostrado o balanço hídrico da Prainha (a) e do Condomínio (b), verifica-se que balanço hídrico obtido foi satisfatório, sendo satisfeita a conservação de massa, necessária para a aceitação dos resultados.



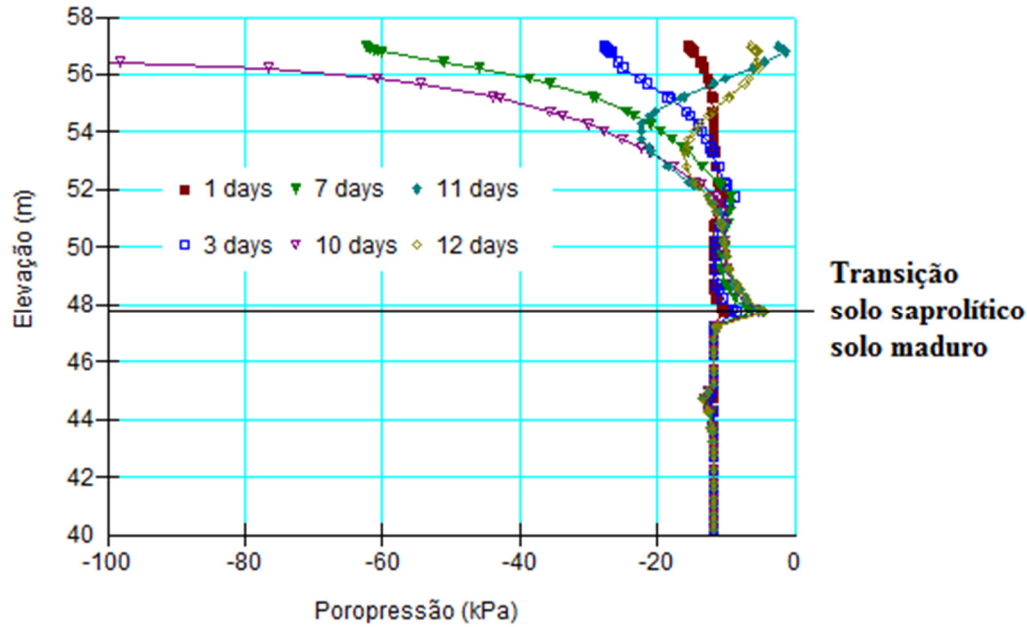
(a)



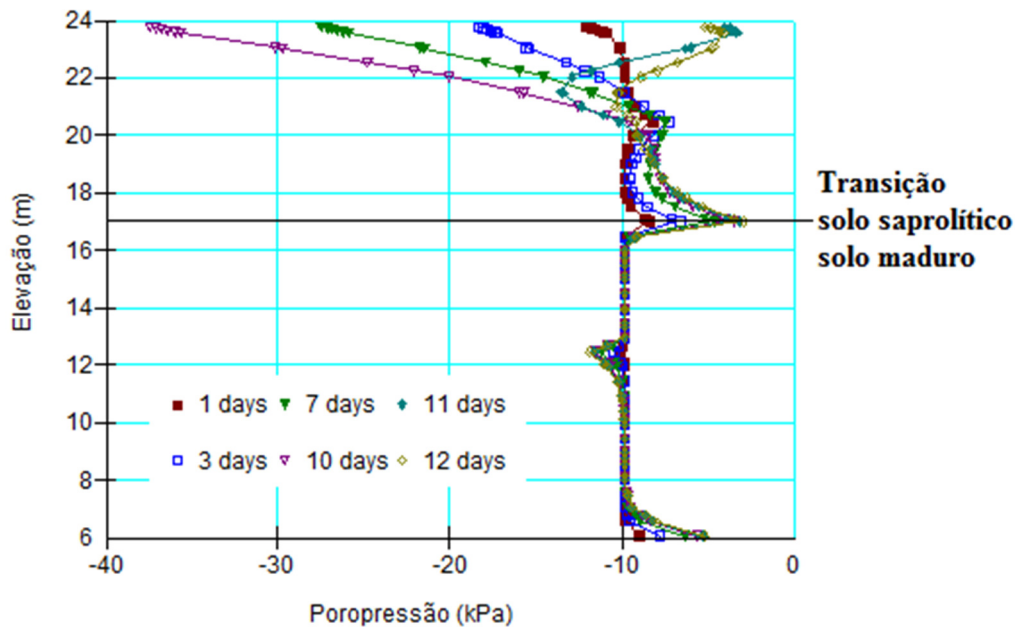
(b)

Figura 6.15 - Balanço Hídrico do sistema: (a) Prainha e (b) Condomínio.

A Figura 6.16 mostra os gráficos de poropressão para a Prainha e para o Condomínio, respectivamente. Pode-se observar, no caso da Prainha, que na cota de 48m, aproximadamente, e no Condomínio, por volta da profundidade 17m a poropressão aumenta à medida que se aproxima do dia do evento.



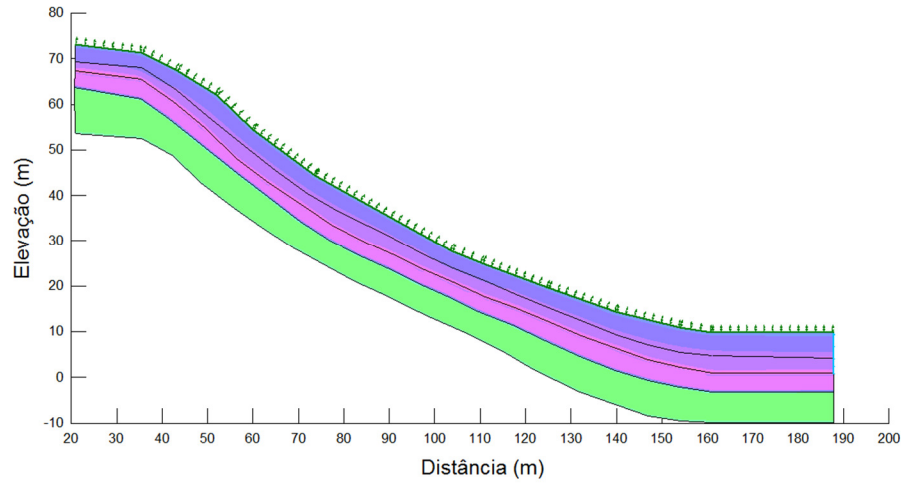
(a)



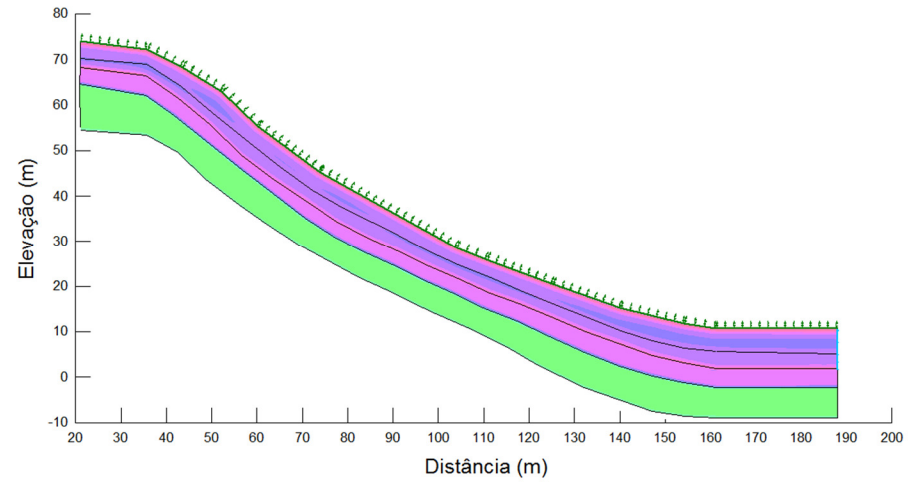
(b)

Figura 6.16 - Perfil de poropressão: (a) Prainha e (b) Condomínio.

Na Figura 6.17 e na Figura 6.18 pode-se observar o perfil de saturação ao longo da profundidade para a Prainha e para o Condomínio, sendo mostrados os perfis para antes e para o dia do evento. A escala de cores utilizada foi a seguinte: verde, para aproximadamente saturação de 0,5; roxo 0,65; rosa 0,8; laranja 0,9 e amarelo para 1. Verifica-se que no dia do evento a superfície do terreno ficou mais próxima da saturação.

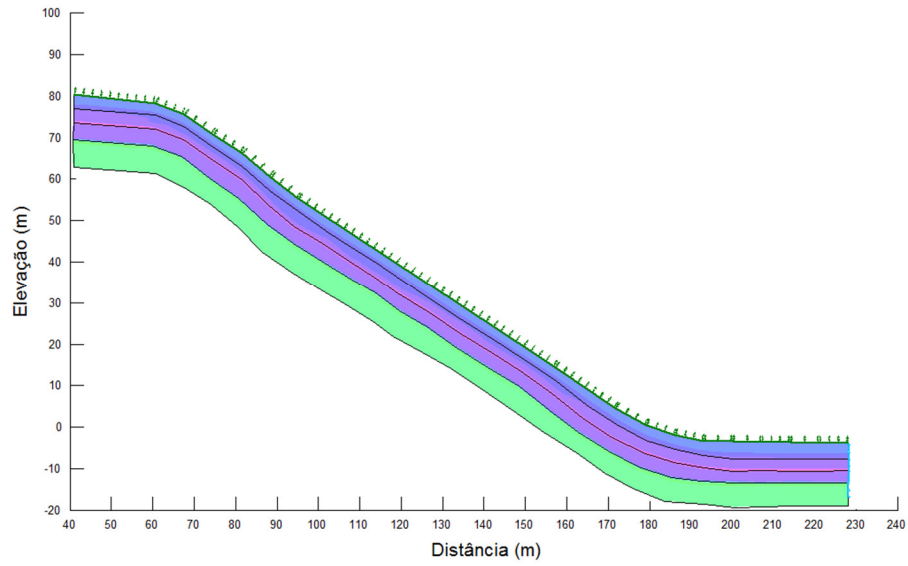


(a)

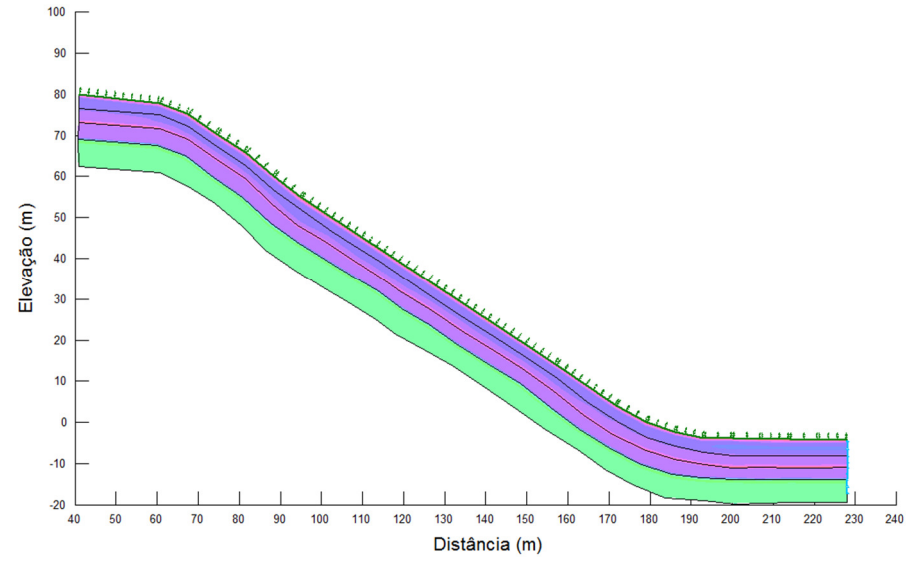


(b)

Figura 6.17 - Perfil de Saturação da Prainha: (a) antes do evento e (b) no dia do evento.



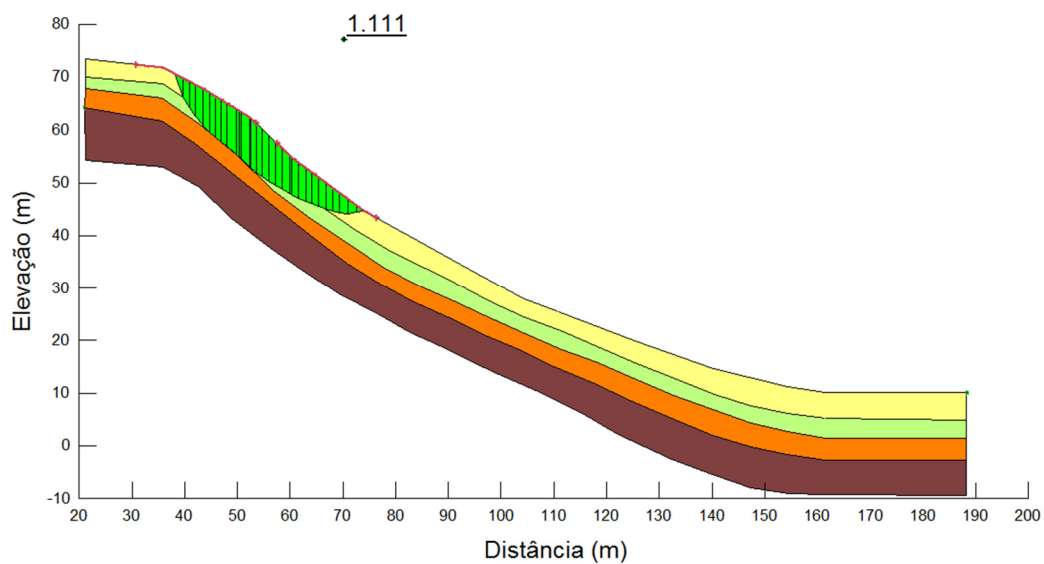
(a)



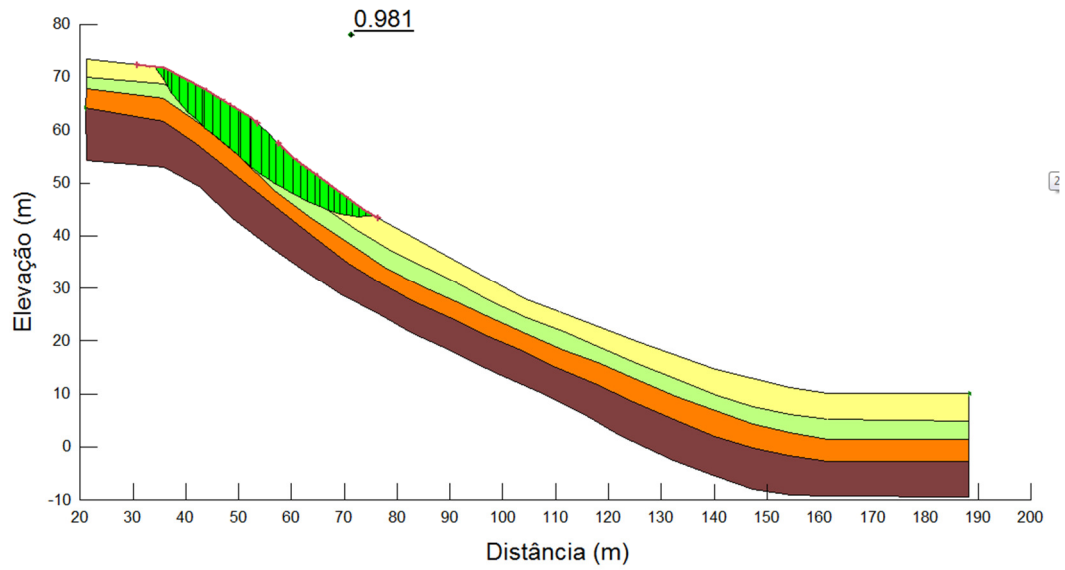
(b)

Figura 6.18 - Perfil de Saturação do Condomínio: (a) antes do evento e (b) no dia do evento.

As análises de estabilidade mostraram que a ruptura ocorreu na profundidade na qual a poropressão aumentou, como mostrado na Figura 6.16. Tanto no caso da Prainha quanto do Condomínio, o mecanismo de ruptura observado nas análises de estabilidade foi planar e a superfície de ruptura encontrou-se na transição do solo maduro para o solo jovem ou saprolítico. Na Prainha essa superfície de ruptura encontrou-se no topo do talude e no Condomínio, na base, como mostrado na Figura 6.19 e na Figura 6.20. Estes resultados já haviam sido indicados por Lago *et al.*, 2011 e Correia *et al.*, 2011, sendo apontados que as chuvas extremas com a colaboração das concavidades presentes nas encostas estudadas, teriam sido suficientes para provocar a elevação da poropressão nas encostas da Prainha e do Condomínio, e conseqüentemente, os deslizamentos.

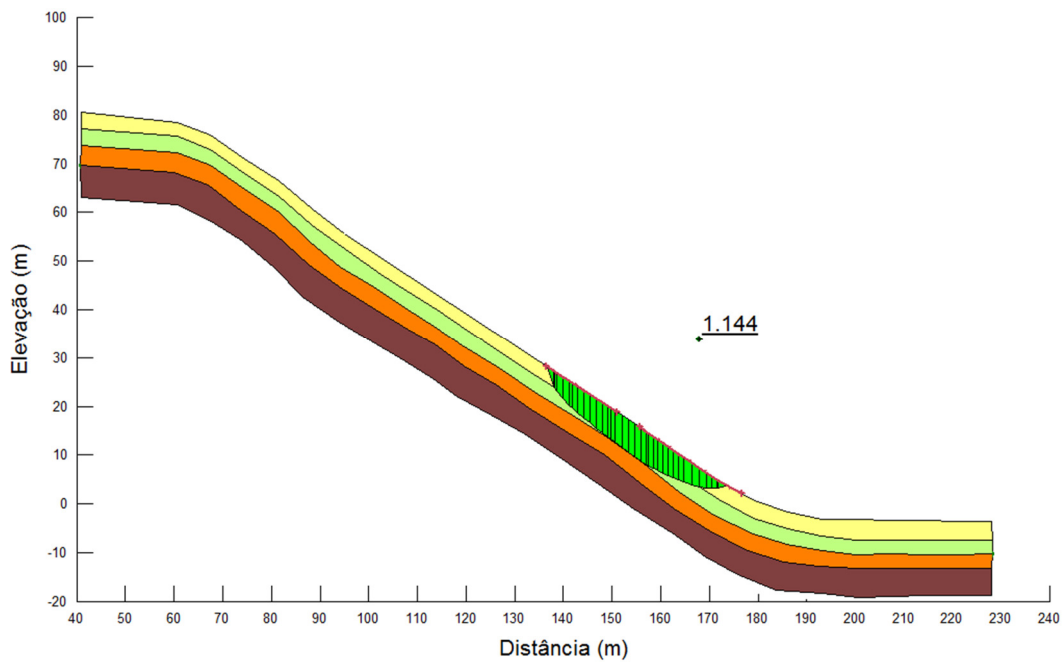


(a)

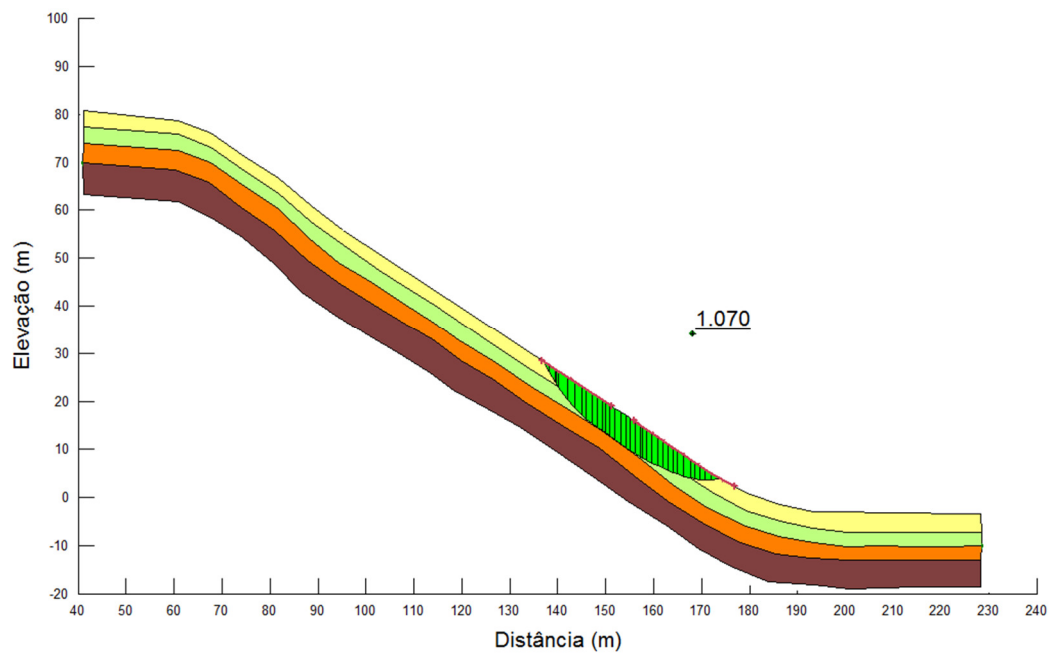


(b)

Figura 6.19 - Análise de Estabilidade para o talude da Prainha, sendo (a) para antes do evento e (b) para o dia do evento.



(a)



(b)

Figura 6.20 - Análise de Estabilidade para o talude do Condomínio, sendo (a) para antes do evento e (b) para o dia do evento.

Os fatores de segurança encontrados nas análises antes do evento foram de 1,111 e 1,144 para a Prainha e para o Condomínio respectivamente. Para o dia do evento foi encontrado o fator de segurança de 0,981, para a Prainha, e 1,07 para o Condomínio.