

EMMANUEL KENNEDY DA COSTA TEIXEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS NA
ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE SOLO RESIDUAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e Classificação da
Biblioteca Central da UFV**

T

T266e
2014
Teixeira, Emmanuel Kennedy da Costa, 1987-
Estudo da influência da infiltração de águas pluviais na estabilidade de
um talude de solo residual / Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira. -
Viçosa, MG, 2014.
xiv, 76f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.72-76.

1. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 2. Infiltração de águas
pluviais. 3. Solos não saturados. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.151363

EMMANUEL KENNEDY DA COSTA TEIXEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS NA
ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE SOLO RESIDUAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2014.

Prof^ª. Christianne de Lyra Nogueira

Prof. Enivaldo Minette

Prof. André Geraldo Cornélio Ribeiro
(Coorientador)

Prof^ª. Izabel C. D A. Duarte Azevedo
(Coorientadora)

Prof. Roberto Francisco de Azevedo
(Orientador)

A Deus,
Aos meus pais Rogéria e Vanderlei,
À minha noiva Maryellen,
Ao meu irmão Leonamme,
À minha vó Maria (em memória).

AGRADECIMENTOS

A Deus, que protege e dá sabedoria todos os dias para mim e minha família. Graças a Ele alcanço mais essa etapa. A caminhada foi árdua, mas em cada derrota tinha certeza que uma vitória viria em seguida, pois Ele nunca me abandonou.

À minha mãe, Rogéria, que é a melhor mãe do mundo. Ela que sempre me incentivou a estudar e fez tudo pra que eu chegasse aonde cheguei. Tenho certeza que se pudesse ela teria enfrentado todas as dificuldades e desafios do mestrado junto comigo. Muito obrigado por sempre estar ao meu lado e pelo amor incondicional. Agradeço todos os dias por ter você e o meu pai na minha vida.

Ao meu pai, Vanderlei, que também é o melhor pai do mundo. Ele que por alguns anos enfrentou a estrada de madrugada pra me levar para o ponto de ônibus. Ele que me transmite o exemplo de homem, pai e esposo. Obrigado por ser tão paciente e pelo amor incondicional. Vocês são a razão de toda vitória que conquisto.

À minha noiva, Maryellen, que está ao meu lado a tanto tempo e que me ajuda a cada dia ser uma pessoa melhor. Essa vitória também é sua, pois em cada conquista busco ter uma vida melhor ao seu lado. Sem você perto de mim a caminhada teria sido mais difícil. Como é bom ter você ao meu lado e, principalmente, saber que você estará nas horas alegres e tristes. Te amo. Você é o amor da minha vida.

Ao meu irmão, Leonamme, que tantas vezes me ajudou em dias que o trabalho estava pesado. Obrigado por sempre estar disposto a ajudar. Obrigado pelos anos que fez da sua presença a minha perto dos nossos pais.

À toda minha família, pela confiança e apoio, não só pra mim, mas também para os meus pais que se encontram longe dos filhos.

Ao meu grande orientador, Roberto, pela confiança depositada em mim. Agradeço por ter aceitado me orientar mesmo sem nunca ter tido contato comigo e não me conhecer. Acho que não teria outra pessoa tão magnífica para me orientar. Não digo só pelo profissional, mas pela pessoa. Aprendi muito com você nesses dois anos. Pra mim que quero seguir carreira acadêmica você é um excelente exemplo a ser seguido. Obrigado pela paciência e sabedoria transmitida.

Aos meus coorientadores André e Izabel, pela ajuda fundamental ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil, Paulo (P3) e Paulo (Capelão), que gentilmente me ajudaram ao longo dessa pesquisa. Na simplicidade de vocês é possível adquirir certos conhecimentos que muitos não conseguem transmitir.

Ao meu amigo de laboratório, Eduardo, a quem devo toda a parte dos ensaios laboratoriais. Se conseguir obter os resultados dessa pesquisa é porque você com uma gentileza sem igual se propôs a me ajudar em tudo que precisava. Muitos foram os dias que foi ao laboratório só pra me ajudar. Muito obrigado pelos ensinamentos e ajuda.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação e Engenharia Civil, que me proporcionaram a oportunidade de obter esse título.

Ao Departamento de Educação Física, por ter me autorizado a estudar o talude situado nos seus limites.

À CNPq, pela concessão da minha bolsa de estudos.

Aos professores da Engenharia Civil, os quais me transmitiram todo o conhecimento e me ajudaram a ser melhor na minha profissão.

Ao professor Jackson, que conheci a pouco tempo, mas que tanto já me ajudou na vida profissional.

De maneira especial, à minha avó Maria, que, mesmo não estando presente fisicamente, sei que está muito alegre por mais essa etapa vencida. Muito obrigado pelo “dinheiro do táxi”, que por muito tempo me ajudou a me manter aqui. Fisicamente a senhora não está, mas na lembrança e no coração ficará para sempre.

BIOGRAFIA

Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira, filho de Vanderlei Teixeira Pereira e Rogéria Maria da Costa Teixeira, nasceu em Aimorés – MG, no dia 16 de dezembro de 1987.

Cursou o ensino médio no Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, em Colatina, onde concluiu em 2007.

Na Universidade Federal de Viçosa, graduou-se em Engenharia Ambiental em 2011.

Iniciou o mestrado em Engenharia Civil, com ênfase em Geotecnia, em 2012.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo geral	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
1.2. Organização da dissertação	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Fases do solo e índices físicos	4
2.2. Capilaridade.....	5
2.3. Sucção	7
2.4. Curva de retenção em solos não saturados.....	8
2.4.1. Equações propostas para representação da curva de retenção	11
2.4.2. Métodos de determinação da curva de retenção.....	13
2.5. Curva de condutividade hidráulica	17
2.6. Resistência em solos não saturados	20
2.7. Relação pluviosidade e escorregamento	27
2.7.1. Relação entre intensidade da chuva e a condutividade hidráulica saturada do solo	28
2.7.2. Redistribuição da umidade após o fim da precipitação	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1. Localização e levantamento topográfico.....	33
3.2. Sondagem.....	34
3.3. Ensaio de laboratório.....	35
3.4. Análise numérica	39

3.4.1.	Parâmetros geotécnicos.....	39
3.4.2.	Parâmetros de vegetação.....	40
3.4.3.	Parâmetros climáticos.....	41
3.4.1.	Parâmetros térmicos.....	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1.	Levantamento topográfico.....	45
4.2.	Sondagem.....	46
4.3.	Ensaio de laboratório.....	49
4.3.1.	Caracterização do solo.....	49
4.3.2.	Parâmetros de resistência.....	51
4.3.3.	Curvas de retenção de água.....	53
4.3.4.	Curvas de condutividade hidráulica.....	56
4.4.	Análise numérica.....	57
4.4.1.	Malha de elementos finitos e condições iniciais e de contorno.....	57
4.4.2.	Perfis de umidade volumétrica e sucção ao longo do ano.....	58
4.4.3.	Fator de segurança do talude.....	65
5.	CONCLUSÃO.....	70
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de fases dos solos não saturados.....	5
Figura 2.2 - Fenômeno provocado pela tensão superficial de um líquido: a) tubo capilar e b) meniscos capilares (Pinto, 2000).	6
Figura 2.3 - Distribuição de pressão da água em um horizonte de solo (Quevedo Quispe, 2008).	7
Figura 2.4 - Curva de retenção típica para um solo siltoso (Fredlund e Xing, 1994).....	9
Figura 2.5 - Curvas de retenção típicas para um solo arenoso, um solo siltoso e um solo argiloso (Fredlund e Xing, 1994).....	10
Figura 2.6 - Curvas de retenção para solos tropicais (Futai, 2002).	11
Figura 2.7 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total e b) medição da sucção matricial (Marinho, 1995).	15
Figura 2.8 - a) Montagem do ensaio (KHANZODE et. al. 2002); b) Esquema da peça adaptada para ensaio (Reis et. al. 2011).....	16
Figura 2.9 - Variação da condutividade hidráulica com a sucção (Cardoso JR, 2006).20	
Figura 2.10 - Modelo de equilíbrio para solos não saturados (Lee et al., 1993).	21
Figura 2.11 - Superfície de ruptura para um solo não saturado, representação proposta da Equação 13 (Fredlund et al., 1978).	24
Figura 2.12 - Relação entre a curva de retenção e a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado: a) curva de retenção e b) envoltória não linear de resistência (Vanapalli et al., 1996).....	25
Figura 2.13 - Relação entre I_p e o parâmetro K (Vanapalli e Fredlund, 2000).	26
Figura 2.14 - Comportamento do perfil de sucção durante uma infiltração para duas condições: a) $I < K_s$ e b) $I \geq K_s$ (Zhang et al., 2004).....	29

Figura 2.15 - Redistribuição da umidade volumétrica após a infiltração (Wang et al., 2004).	30
Figura 2.16 - Perfil da variação da pressão de água nos poros do solo em função do tempo (Fredlund e Rahardjo, 1993).	31
Figura 2.17 - Fatores de segurança em função do tempo (Fredlund e Rahardjo, 1993).	31
Figura 3.1 - Vista frontal do talude localizado no Departamento de Educação Física da Universidade Federal de Viçosa.	33
Figura 3.2 - Vista área do talude estudado e do talude rompido em 2011 (Google Earth).	34
Figura 3.3 - Sondagem à percussão na base do talude.	35
Figura 3.4 - Centrífuga médica Cientec CT - 600.	36
Figura 3.5 - Índice de área foliar.	40
Figura 3.6 - Profundidade da raiz.	41
Figura 3.7 - Ponto de murcha.	41
Figura 3.8 - Precipitação diária no período de 01/01/11 a 31/12/11.	42
Figura 3.9 - Temperaturas máximas e mínimas diárias no período de 01/01/11 a 31/12/11.	42
Figura 3.10 - Velocidade dos ventos diária no período de 01/01/11 a 31/12/11.	43
Figura 3.11 - Umidade relativa do ar máxima e mínima no período de 01/01/11 a 31/12/11.	43
Figura 4.1 - Levantamento topográfico.	45
Figura 4.2 - Perfil do talude a partir da seção AA'.	45
Figura 4.3 - Estratigrafia do talude e posição do lençol freático.	46
Figura 4.4 - Curva granulométrica da SPT - 01.	49

Figura 4.5 - Curva granulométrica da SPT - 02.	50
Figura 4.6 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação da Areia Fina no estado saturado.	52
Figura 4.7 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação da Areia Fina no estado natural.	52
Figura 4.8 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação do Silte Arenoso no estado saturado.	52
Figura 4.9 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação do Silte Arenoso no estado natural.	53
Figura 4.10 - Curva de retenção do solo Areia Fina (SPT - 01).	54
Figura 4.11 - Curva de retenção do solo Silte Arenoso (SPT - 02).	55
Figura 4.12 - Curva característica para a Areia Fina (SPT 01) e Silte Arenoso (SPT 02).	55
Figura 4.13 - Condutividade hidráulica para a amostra SPT - 01.	56
Figura 4.14 - Condutividade hidráulica para a amostra SPT - 02.	56
Figura 4.15 - Malha de elementos Finitos (491 nós e 451 elementos).	57
Figura 4.16 - Distribuição da poro-pressão ao longo da profundidade na condição inicial.	58
Figura 4.17 – Perfil de umidade volumétrica ao longo do ano próximo ao furo de sondagem SPT 02.	59
Figura 4.18 - Variação da umidade volumétrica ao longo do ano para três pontos do talude.	60
Figura 4.19 - Variação da umidade volumétrica ao longo do ano apenas para a areia fina.	61
Figura 4.20 - Perfil da poro pressão ao longo do ano para os nós da seção (1).	62

Figura 4.21 - Perfil da sucção entre os dias 62 e 70.	62
Figura 4.22 - Condições de poro-pressão no dia 65.	64
Figura 4.23 - Condições de poro-pressão no dia 66.	64
Figura 4.24 - Resultados das Análises de Estabilidade ao longo do período analisado (01/01/11 a 31/12/11).	65
Figura 4.25 - Variação do fator de segurança para alguns dias ao longo de 2012.	66
Figura 4.26 - Variação do fator de segurança de acordo com períodos secos e chuvosos ao longo do ano.	67
Figura 4.27 - Relação entre a variação do fator de segurança e a sucção ao longo do ano.	68
Figura 4.28 - Relação entre a variação do fator de segurança e a umidade volumétrica para um ponto na superfície do talude ao longo do ano.	68
Figura 4.29 - Resultado da análise de estabilidade de talude do dia mais crítico de 2011.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relações entre índices físicos para obtenção do teor de umidade volumétrico.....	5
Tabela 2.2 - Equações de ajuste para a curva de retenção	12
Tabela 2.3 - Técnicas de medição de sucção (adaptado de Marinho, 1997).....	13
Tabela 2.4 - Curvas de calibração para o papel Whatman N° 42	14
Tabela 2.5 - Função de condutividade hidráulica (Vilar, 2002).....	19
Tabela 4.1 - Resultados da sondagem SPT - 01	47
Tabela 4.2 - Resultado da sondagem SPT - 02.....	48
Tabela 4.3 - Caracterização dos dois tipos de solos coletados na seção AA'	50
Tabela 4.4 - Parâmetros de resistência dos solos que ocorrem na Seção AA' utilizados nas análises numéricas	51
Tabela 4.5 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pelo modelo de Fredlund & Xing (1994).....	54

RESUMO

TEIXEIRA, Emmanuel Kennedy da Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Estudo da influência da infiltração de águas pluviais na estabilidade de um talude de solo residual.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadores: Izabel Cristina d' Almeida Duarte Azevedo e André Geraldo Cornélio Ribeiro.

Taludes de solo e/ou rocha existem naturalmente, ou são construídos pelo homem em escavações (taludes de corte) ou aterro. Em países tropicais, como o Brasil, muitos taludes encontram-se em parte ou totalmente com os solos na zona vadosa. Nestes casos, ocorrem forças de sucção que aumentam a resistência dos materiais que compõem o talude. Quando acontece uma precipitação sobre o talude, parte das águas pluviais infiltra e, à medida que as camadas de solo vão sendo saturadas, as forças de sucção diminuem o que, eventualmente, pode ocasionar a ruptura do talude. Neste trabalho discute-se o efeito da infiltração das águas pluviais na variação dos fatores de segurança de um talude de solo residual de gnaiss localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao lado de outro talude onde houve um significativo escorregamento em dezembro de 2011. São apresentados resultados de ensaios de laboratório – caracterização, cisalhamento direto, curva de retenção de água e permeabilidade saturada – em amostras deformadas e indeformadas dos solos identificados no talude por meio de sondagem à percussão. Em seguida, descreve-se a variação da umidade volumétrica, da sucção e do fator de segurança do talude ao longo do ano de 2011, considerando os dados climáticos medidos na estação meteorológica da UFV – precipitação, temperatura, velocidade e direção dos ventos. O balanço hídrico e a infiltração de água no talude foram feitos com o auxílio do programa VADOSE/W e a análise diária de estabilidade feita com o programa SLOPE/W da GeoStudio. As análises mostraram que em períodos chuvosos o valor do fator de segurança diminui, tendo obtido o menor valor de 1,545, em dezembro, o que justifica numericamente a estabilidade observada em campo. Em períodos secos o valor tende a aumentar, porém em taxas menores quando comparados com a diminuição ocorrida em períodos chuvosos. Ao analisar a sucção e o fator de segurança conjuntamente ao longo do ano, observou-se que comportamento similar para as duas variáveis, ou seja, assim como descrito na literatura, quando a sucção diminuiu a resistência do talude também diminuiu, o que diminuiu o valor do fator de segurança.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Emmanuel Kennedy da Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february 2014. **Study of the influence of infiltration of rainwater in slope stability residual soil.** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-advisers: Izabel Cristina d' Almeida Duarte Azevedo and André Geraldo Cornélio Ribeiro.

Slopes of soil and/or rock exist naturally or are manmade in excavations (cut slopes) or landfills. When precipitation occurs on the slope, part of the rainwater infiltrates and, as the ground layers are being saturated, the suction forces decrease, eventually leading to the slope failure. This paper discusses the effect of infiltration of rainwater on the variation of safety factor values of a slope made of gneiss residual soil located at the Federal University of Viçosa (UFV) campus, next to another slope that failed in December, 2011. Results of laboratory tests - characterization, direct shear, water retention curve, and saturated permeability - in disturbed and undisturbed soil samples of the different soils existing in the slope and identified by standard penetration tests (SPT), are presented. Following, The variation of water content and suction in the slope are calculated, together with the safety factor along the year 2011, considering the climatic data measured at the UFV weather station - precipitation, temperature, speed and direction of winds. The infiltration of water in the slope was calculated using the commercial program VADOSE / W and the daily stability analyzes by the program SLOPE/W both from GeoStudio. The analyses showed that during rainy periods the value of the safety factor decreases, the lowest value being 1,545, in December. In dry periods, the safety factor tends to increase, but with lower rates compared to the decrease occurred during rainy periods. By analyzing the suction and the safety factor together throughout the year, it was observed that the behavior of the two variables is similar, ie, as described in the literature, when suction decreases, resistance also decreases, and the safety factor diminished.

1. INTRODUÇÃO

São recorrentes, principalmente em períodos chuvosos, notícias de rupturas de taludes, o que provocam perdas econômicas e humanas. Assim, essa temática é um problema na área de Engenharia Geotécnica.

Taludes são superfícies inclinadas que delimitam um maciço de terra ou de rocha. Os taludes naturais ou encostas são aqueles que ocorrem naturalmente. Os taludes também podem surgir de modo artificial provenientes de escavações e aterros.

Entre as causas que provocam a instabilidade de taludes, têm-se como fatores preponderantes para desestabilizar o maciço, a natureza do material envolvido, bem como, naturalmente, os agentes perturbadores de sua estabilidade. Vários são estes agentes, como: ações antrópicas e precipitação. Neste trabalho, dar-se-á relevância ao efeito que as águas pluviais podem ter na estabilidade/instabilidade do talude.

Nos taludes de solos não saturados, surgem as chamadas forças de sucção, que influenciam na resistência ao cisalhamento dos solos. O perfil de sucção varia com a profundidade, com as características dos solos e com as condições climáticas. Estas forças podem ser influenciadas pela ocorrência ou não de precipitação. Quando ocorre uma precipitação e a água infiltra no solo, ele vai sendo saturado e tendo as forças de sucção diminuídas, provocando, conseqüentemente, diminuição na sua resistência ao cisalhamento, fato que pode ocasionar a ruptura do talude.

Frequentemente os efeitos da sucção são ignorados em problemas de Engenharia Geotécnica. Provavelmente, este fato está relacionado com a dificuldade de se medir o valor de sucção em campo e o desconhecimento da distribuição da sucção no perfil do solo durante uma precipitação.

Para se analisar o comportamento da sucção em um talude durante um processo de infiltração de águas pluviais é necessário que se tenha conhecimento do estado inicial da sucção ao longo do perfil do terreno, da curva de retenção água do solo, do sua condutividade hidráulica saturada, da curva de condutividade hidráulica do solo, da duração e intensidade da chuva, do perfil geotécnico do terreno e da geometria do talude.

Diante deste contexto, neste trabalho, selecionou-se um talude e realizou-se um estudo sobre a infiltração de águas pluviais e resistência ao cisalhamento dos solos não saturados por meio de experimentos laboratoriais para caracterização, obtenção dos parâmetros de resistência e das propriedades hidráulicas (curva de retenção e de condutividade hidráulica) dos solos do talude escolhido. Realizou-se, também, um estudo numérico com o objetivo de avaliar a sucção no interior do talude e sua influência na estabilidade do mesmo, ou, mais precisamente, avaliar a variação do fator de segurança ao longo de um ano em função das condições climáticas.

1.1. Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é analisar a influência da infiltração das águas pluviais no valor do fator de segurança de um talude de solo residual.

1.1.1. Objetivos específicos

Estudo de caso visando analisar a estabilidade de um talude localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa ao longo de um ano utilizando análises numéricas.

1.2. Organização da dissertação

Esta dissertação foi dividida em cinco seções:

- Na seção 2, Revisão Bibliográfica, apresenta-se uma breve revisão sobre os fenômenos da capilaridade e sucção que ocorrem em solos não saturados, as formas de determinação dos parâmetros hidráulicos dos solos e a influência da precipitação na resistência dos solos.

- Na seção 3, Materiais e Métodos, descrevem-se os ensaios laboratoriais para caracterização dos solos do talude em estudo, determinação dos parâmetros de resistência e hidráulicos dos solos, bem como os parâmetros climáticos e de vegetação utilizados na análise numérica.

- Na seção 4, Resultados e Discussão, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos no laboratório e na análise numérica. Discute-se como a precipitação influenciou na estabilidade do talude estudado.

- Na seção 5, Conclusões, apresentam-se as conclusões alcançadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fases do solo e índices físicos

A maioria dos estudos de problemas geotécnicos se baseia nos conceitos clássicos da Mecânica dos Solos, os quais consideram o solo totalmente saturado ou seco. Barbour (1998) aponta as seguintes razões para isso: (i) As regiões nas quais a Mecânica dos Solos foi inicialmente desenvolvida eram úmidas, cujo lençol freático apresentava-se próximo à superfície, atribuindo aos solos condição de saturação. Nesta condição foi desenvolvido o Princípio das Tensões Efetivas de Terzaghi, criando as bases da Mecânica dos Solos e o seu rápido desenvolvimento (Silva, 2005); (ii) Sistemas de solos saturados, constituídos de duas fases (solo e água), são mais fáceis de estudar do que os sistemas multifásicos dos solos não saturados; e (iii) Por se tratar de uma situação mais crítica, em muitos casos, a suposição de que os solos são saturados e estão submetidos a pressões neutras positivas é conservadora.

Um solo não saturado é aquele formado pela fase sólida, constituída pelos grãos de solo, fase líquida, constituída pela água, fase gasosa, constituída pela mistura de vários gases e vapor de água, e uma última fase constituída pela interação água-ar, que segundo Fredlund et al. (1978), denomina-se película contráctil. Resumidamente, tem-se que o solo não saturado é aquele cujos espaços vazios (poros) são preenchidos por líquidos e gases.

A Figura 2.1 representa esquematicamente o diagrama de fases dos solos não saturados, onde (a) considera a membrana contráctil. Porém, como sua espessura é milimétrica, a subdivisão física da membrana contráctil é desnecessária quando se quer estabelecer relações massa-volume, considerando-se assim o esquema da Figura 2.1(b) como representativa.

A quantidade de água presente no solo é um parâmetro importante a ser conhecido. Ele é comumente representado pelo teor de umidade gravimétrico (w), que é a relação entre a massa de água presente no solo (M_w) e a massa de sólidos (M_s). Pode-se representar, também, a partir do teor de umidade volumétrico (θ_w), definido

como a razão entre o volume de água presente no solo (V_w) e o volume total do elemento (V).

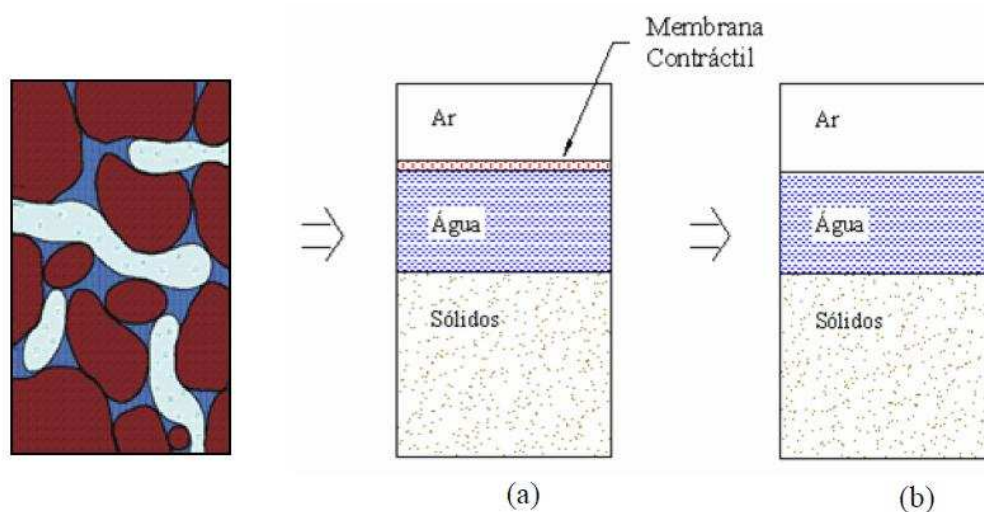


Figura 2.1 - Diagrama de fases dos solos não saturados.

O teor de umidade volumétrico é de difícil obtenção direta, pois envolve medidas de volume. Mas ele pode ser calculado por meio de correlações com o teor de umidade gravimétrico e outros índices físicos como a massa específica seca (ρ_d) e a da água (ρ_w), porosidade (n), grau de saturação (S), volume de vazios (V_v) e índice de vazios (e), como apresentado na Tabela 2.1 (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Tabela 2.1 - Relações entre índices físicos para obtenção do teor de umidade volumétrico

$$\theta_w = w \frac{\rho_d}{\rho_w} \qquad \theta_w = \frac{S \cdot V_v}{V} \qquad \theta_w = S \cdot n \qquad \theta_w = \frac{S \cdot e}{1 + e}$$

2.2. Capilaridade

Se um tubo de pequeno diâmetro é colocado em contato com a superfície livre da água, esta sobe até atingir uma posição de equilíbrio. Esse fenômeno está relacionado com a tensão superficial do líquido em contato com uma parede sólida e é conhecido como capilaridade.

Devido à tensão superficial, a superfície de água se contrai e deixa de ser plana. Assim, ocorre o surgimento de um diferencial de pressão entre as duas faces (água-ar),

o que resulta na ascensão capilar de altura h de formar a equilibrar as forças na direção vertical, sendo que esta altura é inversamente proporcional ao raio do tubo (r). Ressalta-se que esta ascensão independe da pressão atmosférica, porém a pressão na água depende dela. A Figura 2.2 ilustra o fenômeno capilar em um tubo. As tensões na água ao longo do tubo capilar são também apresentadas na Figura 2.2 (a). Nota-se que, à medida que aumenta o valor de h , maior (em valor absoluto) será o valor da tensão na água. Similar aos tubos capilares, a água nos vazios nos solos, nos contatos entre os grãos, Figura 2.2 (b), existe a formação de meniscos capilares e a água neste caso se encontra, também, sob uma tensão negativa (CARDOSO JR, 2006). A tensão superficial da água tende a aproximar as partículas (força P na Figura 2.2 b), aumentando as forças de atração entre os grãos do solo e surgindo, dessa maneira, uma coesão aparente. De acordo com Pinto (2000) a coesão aparente é frequentemente referida às areias, pois estas podem se saturar ou secar com facilidade. Entretanto, é nas argilas que ela atinge maiores valores, sendo a responsável em muitos casos pela estabilidade dos taludes.

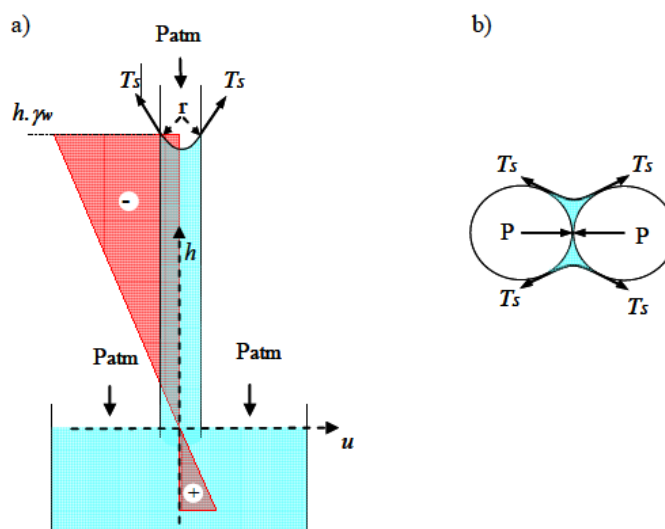


Figura 2.2 - Fenômeno provocado pela tensão superficial de um líquido: a) tubo capilar e b) meniscos capilares (Pinto, 2000).

A Equação 1 permite encontrar a altura de ascensão da água no tubo, sendo:

$$h = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: T_s – tensão superficial, ρ_w – massa específica da água, R_s – raio do menisco e g – aceleração da gravidade.

O ângulo de contato entre um tubo de vidro limpo e a água é nulo. Desta forma, o raio de curvatura, R_s , é igual ao raio do tubo (r) e o cálculo da altura de ascensão pode ser simplificado para a Equação 2. Assim, pode-se dizer que os poros do solo se assemelham ao raio do tubo: quanto menores os poros, maior a altura de ascensão.

$$h = \frac{2\Gamma_s}{\rho_w g r} \quad \text{Equação 2}$$

2.3. Sucção

A água no solo pode estar com pressões hidrostáticas maiores ou menores que a pressão atmosférica, tendo assim, respectivamente, um potencial de pressão positivo ou negativo. Em caso de pressão na água do solo inferior à pressão atmosférica, potencial negativo, esta pressão é denominada sucção. A Figura 2.3 ilustra a distribuição da pressão hidrostática de um solo.

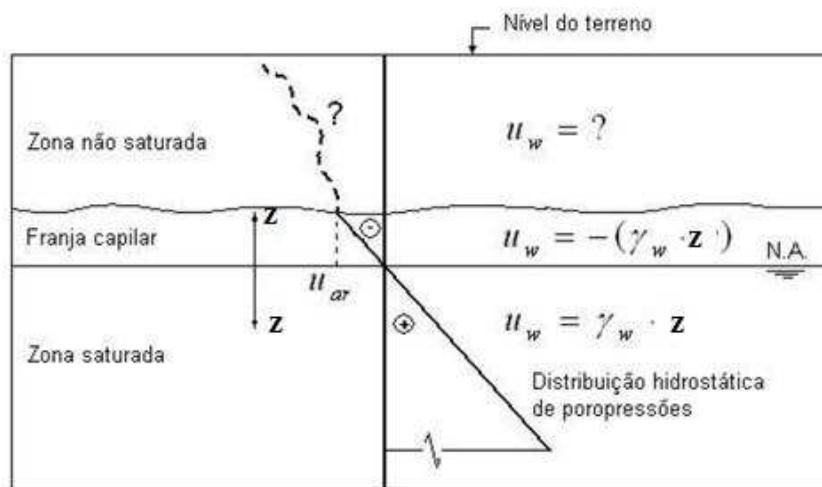


Figura 2.3 - Distribuição de pressão da água em um horizonte de solo (Quevedo Quispe, 2008).

A zona saturada é caracterizada pelo preenchimento total dos poros por água, sendo a carga de pressão positiva. Na franja capilar ocorre a ascensão capilar e cargas de pressão negativas.

Na zona não saturada, a pressão negativa da água provocada pela tensão superficial, é a diferença entre a pressão no ar (u_a), tomada na maioria dos casos como a pressão atmosférica (P_{atm}), e a pressão da água (u_w), e é denominada sucção matricial ($u_a - u_w$). Essa sucção pode ser representada pela Equação 3.

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{r}$$

Onde: r – é o raio capilar equivalente para os poros do solo.

A sucção total em um solo pode ser admitida como a soma entre a sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção osmótica é função da concentração química da água no interior do solo. A diferença de pressão necessária para anular o fluxo de uma solução de água pura para uma mais concentrada, através de uma membrana semipermeável, por osmose, é chamada de pressão osmótica ou sucção osmótica (MARINHO, 1997).

Na maioria dos solos a componente osmótica é desprezível, principalmente quando a umidade do solo é muito baixa ou quando a concentração salina é insignificante. Fredlund & Xing (1994) atentam que, para valores de sucção altos (maiores que 1.500 kPa), a sucção matricial e a sucção total podem ser geralmente assumidas como equivalentes.

2.4. Curva de retenção em solos não saturados

A curva de retenção representa a relação entre a sucção e a quantidade de água presente no solo, que apresentam a capacidade do solo em armazenar água. Em geral, é representada pela sucção versus umidade volumétrica (θ_w).

As principais características de uma curva de retenção são: valor de entrada de ar que corresponde à sucção na qual a água começa a sair dos maiores poros; umidade volumétrica residual, θ_r , que é a umidade que mesmo com elevados valores de sucção remove-se uma quantidade insignificante de água do solo; e a umidade volumétrica saturada, θ_s , que é igual à porosidade do solo, já que neste ponto todos os vazios estão preenchidos pela água.

A Figura 2.4 ilustra a curva de retenção típica de um solo siltoso proposta por Fredlund e Xing (1994). As linhas pontilhadas orientam na obtenção da umidade volumétrica residual e do valor da entrada de ar no solo. Por este procedimento, o valor de entrada de ar é caracterizado pela interseção entre a reta horizontal, que corresponde à

umidade volumétrica saturada, com a reta que passa pelos pontos intermediários da curva. A interseção desta mesma reta com a reta que aproxima a curva para altos valores de sucção determina o valor da umidade volumétrica residual. Os mesmos autores indicam que a umidade volumétrica nula parece ser essencialmente a mesma para todos os tipos de solos. Estão apresentadas na Figura 2.4 as curvas de retenção obtidas pelo caminho de umedecimento (tracejada) e pelo caminho de secagem (curva cheia). Percebe-se uma diferença no formato da curva de retenção quando essa é obtida por estas trajetórias diferentes: umedecimento ou secagem. Na secagem, toma-se a amostra de solo saturada e aplicam-se valores maiores de sucção objetivando a sua secagem. Por umedecimento, toma-se uma amostra de solo seca e umedece-a desta forma reduzindo progressivamente a sucção. Nesta dissertação a curva de retenção foi obtida pelo procedimento de secagem.

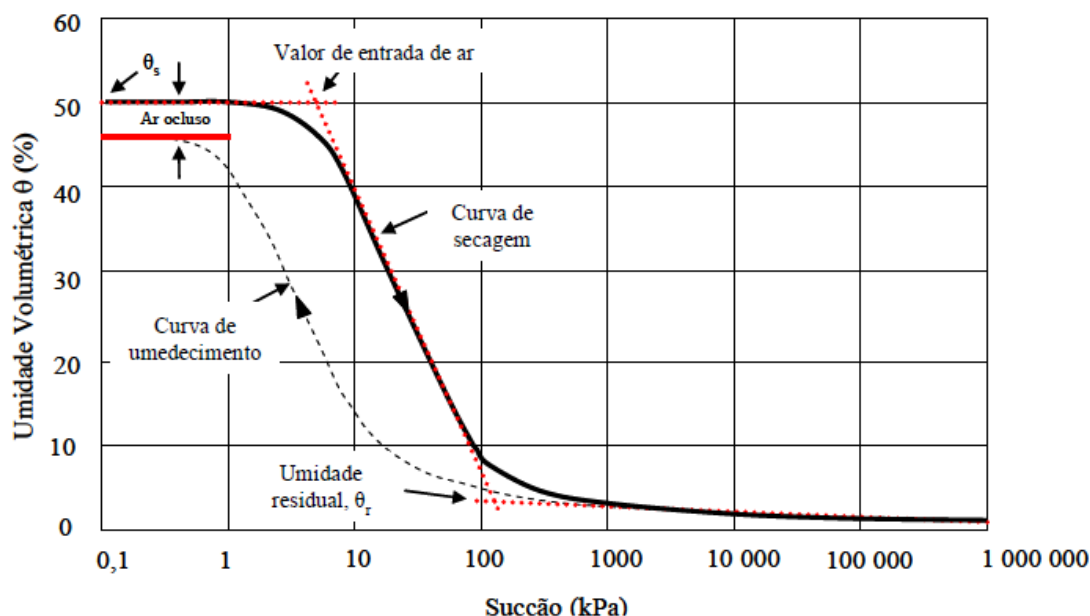


Figura 2.4 - Curva de retenção típica para um solo siltoso (Fredlund e Xing, 1994).

Alguns fatores interferem na curva de retenção para os solos não saturados. Um destes fatores é o tipo de solo.

Segundo Fredlund e Xing (1994), observando-se a Figura 2.5 que apresenta curvas de retenção para três solos típicos (areia, silte e argila), o teor de umidade volumétrica na condição saturada e o valor de entrada de ar geralmente aumentam com a plasticidade do solo.

Para baixos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo depende, principalmente, dos efeitos de capilaridade, que estão diretamente ligados com a distribuição granulométrica e estrutura do solo. Para altos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo dependerá dos mecanismos de adsorção, que são influenciados pela composição mineralógica e pela superfície específica das partículas (Fredlund e Xing, 1994).

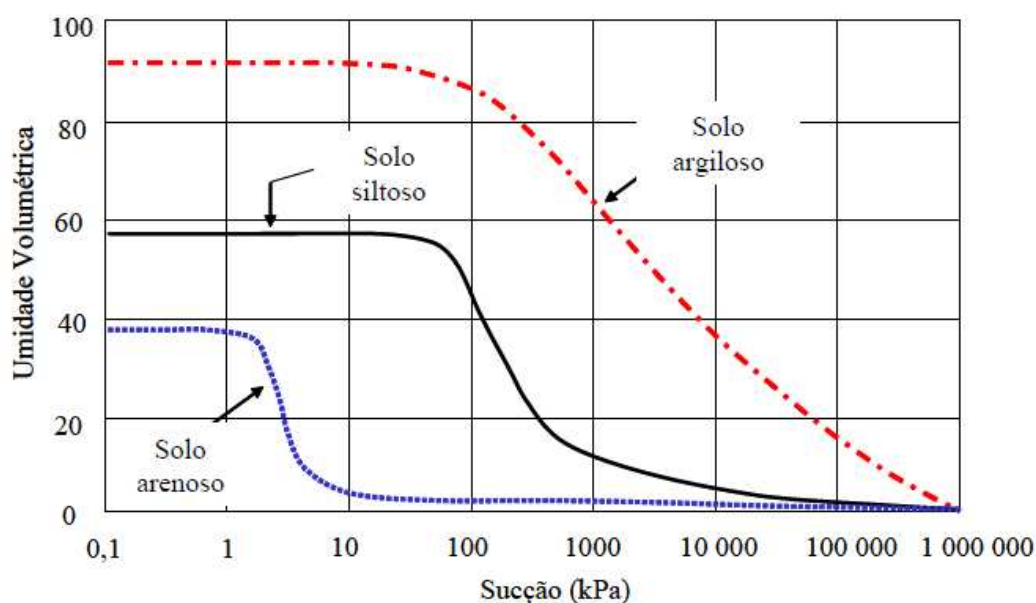


Figura 2.5 - Curvas de retenção típicas para um solo arenoso, um solo siltoso e um solo argiloso (Fredlund e Xing, 1994).

Os solos arenosos apresentam pequena variação nos diâmetros dos poros, dessaturando rapidamente após o valor da entrada de ar. Os solos argilosos dessaturam de forma mais lenta, apresentando uma inclinação da curva mais suave e uma distribuição nos vazios dos solos não-uniforme (CARDOSO JR, 2006). Além disso, o decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão de entrada de ar e suaviza a inclinação da curva (BARBOUR, 1998).

Os solos tropicais não apresentam necessariamente comportamento similar às curvas de retenção apresentadas na Figura 2.5. Devido à estrutura e à distribuição dos poros nestes solos, suas curvas de retenção podem apresentar patamares, causados pela ausência de poros que definem a faixa de sucção para este patamar (CARDOSO JR, 2006). Futai (2002) apresenta a curva de retenção de um solo laterítico que, mesmo sendo mais argiloso que um outro solo saprolítico, apresentou valor de sucção de entrada de ar menor (Figura 2.6).

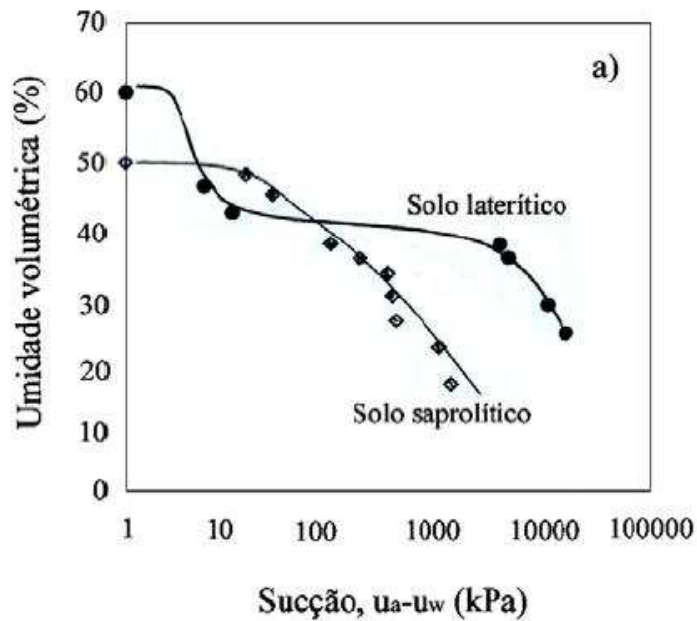


Figura 2.6 - Curvas de retenção para solos tropicais (Futai, 2002).

2.4.1. Equações propostas para representação da curva de retenção

Vários pesquisadores propuseram equações para definir a curva de retenção do solo. Em geral, cada autor apresentou a sua simplificação na equação a partir de resultados característicos de diversos solos. Segundo Silva (2005), as equações de Van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994) são largamente empregadas na literatura devido à sua versatilidade e por se ajustarem bem à maioria dos solos. A Tabela 2.2 apresenta algumas equações propostas.

Os parâmetros de cada equação podem ser obtidos através de procedimentos gráficos e com o auxílio de ferramentas de alguns softwares, como a planilha de cálculo Excel e o comando solver.

Tabela 2.2 - Equações de ajuste para a curva de retenção

Autor	Equação	Parâmetros
Gardner (1958)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n}$	α e n
Brooks e Corey (1964)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$	ψ_b e λ
van Genuchten (1980)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi_p)^n} \right]^m$	$m = 1 - \frac{1}{n}$ α e n
Fredlund e Xing (1994)	$\theta(\psi) = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + 10^6 \frac{\psi}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]} \right]^m$	n e m

Onde:

- $\theta(\psi)$, θ_s , θ_r – respectivamente, teor de umidade volumétrica para uma dada sucção, de saturação e residual;
- ψ – sucção;
- ψ_b – sucção de entrada de ar;
- ψ_r – sucção correspondente à umidade volumétrica residual;
- a – valor aproximado da sucção de entrada de ar;
- e – base do logaritmo neperiano, aproximadamente 2,77;
- ψ_p – carga hidráulica de pressão.

2.4.2. Métodos de determinação da curva de retenção

Várias são as técnicas utilizadas para determinação da curva de retenção. A Tabela 2.3 apresenta algumas técnicas utilizadas e os níveis de sucção aplicados em cada técnica. Tem-se que, das técnicas apresentadas, apenas a da placa de sucção mede diretamente o valor da sucção dos solos, nas demais, mede-se algum parâmetro sensível a mudança do conteúdo de água, por exemplo, umidade volumétrica, sendo necessárias curvas de calibração para cálculo da sucção.

Tabela 2.3 - Técnicas de medição de sucção (adaptado de Marinho, 1997)

Técnica	Sucção Mátrica	Sucção Osmótica	Sucção Total	Intervalo (kPa)
Psicrômetro		X	X	100 – 8000
Papel filtro	X		X	*0 – 29000
Tensiômetro	X		X	0 – 90
Placa de sucção	X			0 – 1500
Translação de eixos	X			0 – 15000
Centrífuga	X		X	0 – 235**

* Não é recomendado se determinar valor nulo de sucção pelo método do papel filtro devido à dificuldade de se alcançar este valor.

** Valor máximo alcançado na centrífuga utilizada neste trabalho.

A seguir, é descrito a técnica do papel filtro e da centrífuga, que foram utilizadas nessa dissertação para obtenção das curvas de retenção dos solos.

2.4.2.1. Método do papel filtro

A água da amostra de solo ao ser colocada em contato com um material poroso seco que possua capacidade de absorver água, como o papel filtro, irá fluir da amostra para o material poroso visando atingir o equilíbrio hidráulico. É a partir dessa assertiva que se baseia a técnica do Papel Filtro, onde se coloca um solo com determinada

umidade em contato com um papel filtro, cuja umidade é menor que a do solo. Assim haverá um fluxo de água do solo para o papel filtro até que o equilíbrio seja atingido. Tem-se que no equilíbrio a sucção do solo e do material poroso são iguais, porém com conteúdos de umidade diferentes.

Este método promove a determinação indireta da sucção, ou seja, mede-se um parâmetro sensível à variação da água no solo e a partir deste parâmetro, com o auxílio de uma curva de calibração do papel filtro, determina o valor da sucção. Na literatura existem várias curvas de calibração para os principais papéis filtros utilizados. Na Tabela 2.4 são apresentadas algumas curvas de calibração para o papel Whatman n° 42, que foi o utilizado neste trabalho. Em geral, as curvas são compostas por duas equações que indicam a diferente sensibilidade da resposta do papel filtro para altos e baixos níveis de sucção. Nesta dissertação, utilizou-se as equações propostas por Chandler et al. (1992).

Tabela 2.4 - Curvas de calibração para o papel Whatman N° 42

Autor	Curva de calibração	
Chandler et al. (1992)	$\log \psi = 4,84 - 0,0622 w_f$	$w_f \leq 47,0$
	$\log \psi = 6,05 - 2,48 \log w_f$	$w_f > 47,0$
Leong et al. (2002)	$\log \psi = 2,909 - 0,0229 w_f$	$w_f \geq 47,0$
Sucção matricial	$\log \psi = 4,945 - 0,0673 w_f$	$w_f < 45,3$
Leong et al. (2002)	$\log \psi = 8,778 - 0,222 w_f$	$w_f \geq 26,0$
Sucção total	$\log \psi = 5,31 - 0,0879 w_f$	$w_f < 26,0$

ψ é a sucção em kPa e w_f é a umidade do papel filtro

O papel filtro pode ou não ficar em contato direto com o solo. A Figura 2.7 ilustra as diferentes posições do papel filtro com relação ao solo. Para obtenção da sucção total, o papel filtro não fica em contato com o solo (Figura 2.7a) e, então, o ar que fica entre o papel e o solo atua como membrana semipermeável. Assim, a transferência é feita por intermédio de vapor, sendo que antes de ser absorvido pelo papel, o vapor supera as forças matricial e osmótica para sair do solo. No caso do contato direto, Figura 2.7 (b), ele atua como uma membrana permeável à água e

solutos, ou seja, a solução intersticial é permitida de se mover através do papel filtro junto com a água absorvida, assim é através da capilaridade que se dá a transferência de água do solo para o papel. Nesta situação o papel filtro permite a obtenção da sucção matricial.

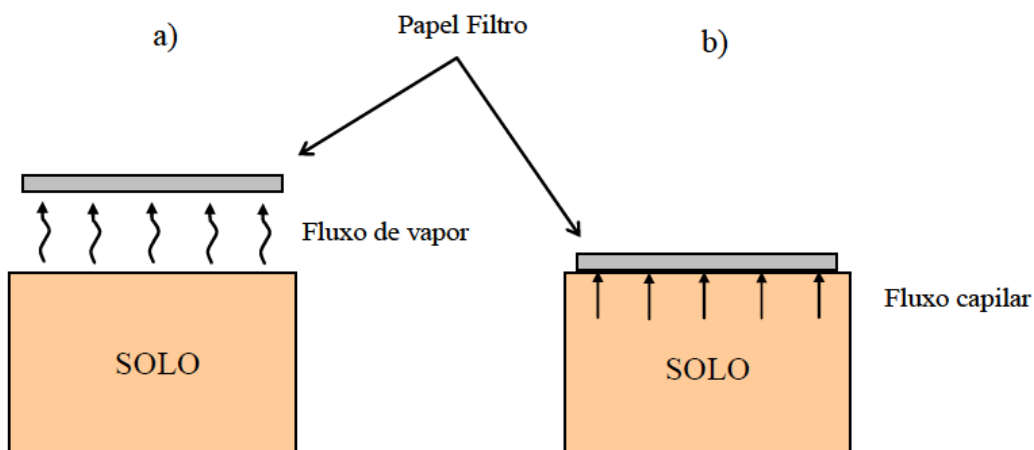


Figura 2.7 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total e b) medição da sucção matricial (Marinho, 1995).

Algumas limitações do método são: o tempo exigido para atingir o equilíbrio da sucção entre o papel e o solo, necessidade de medições exatas de massa do papel filtro e o efeito da variação da temperatura. Na literatura, várias são as propostas descritas para o tempo de equilíbrio. Segundo Marinho (1995) para sucção matricial o valor tende a ser de aproximadamente sete dias.

Como mencionado, a variação da temperatura é uma das limitações do método, já que pode provocar evaporação ou condensação, alterando, assim, o tempo de equilíbrio necessário. Assim, recomenda-se o uso de caixas isolantes, como caixa de isopor, para conservação das amostras durante o período de espera até a obtenção do equilíbrio.

Para obtenção da massa do papel filtro, um dos problemas é que quando desfeito o contato com o solo, o papel perde água rapidamente e quando retirado da estufa, absorve rapidamente água do ambiente, variando, assim, a massa do papel. De acordo com Marinho (1995), deve-se utilizar uma balança com precisão de leitura de 0,0005 g e um tempo de transferência de no máximo 5 segundos.

2.4.2.2. Método da centrífuga

Segundo Guimarães (2013), Gardner (1937) que havia trabalhado com sementes para obter a relação de umidade versus sucção, adaptou a técnica da centrífuga, calibrando papéis filtros colocados em contato com o solo úmido e medindo a tensão capilar de um solo para uma extensiva gama de teores de umidade, determinando o teor de umidade de equilíbrio. Os papéis filtro foram calibrados determinando-se o teor de umidade deles quando em contato com uma superfície de água livre em um campo centrifugado.

Khazode et al. (2002) e Reis et. al. (2011) adaptaram quatro células para usar em uma centrífuga para obtenção direta da CRA (Figura 2.8).

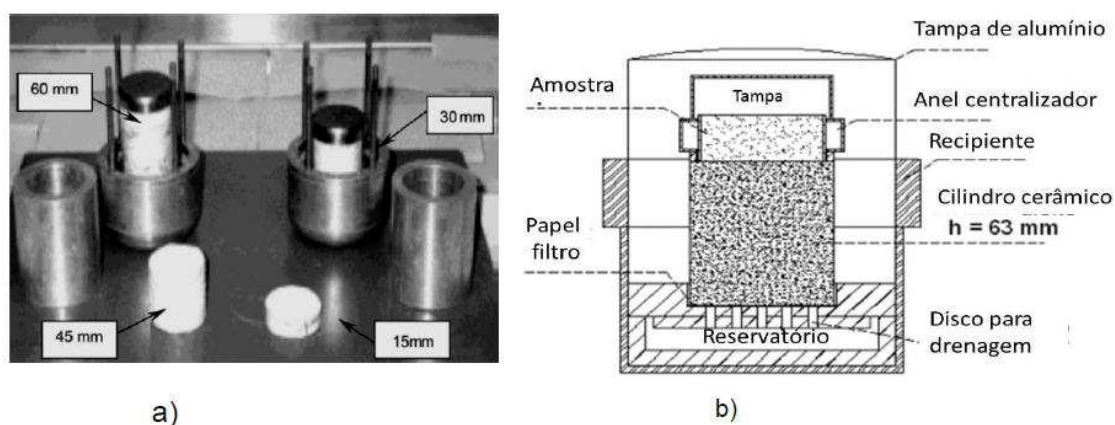


Figura 2.8 - a) Montagem do ensaio (KHANZODE et. al. 2002); b) Esquema da peça adaptada para ensaio (Reis et. al. 2011).

A centrífuga aumenta o campo gravitacional de um objeto, por meio de um movimento circular que gera uma aceleração centrífuga direcionada para fora do círculo, definido pelo movimento de rotação. O valor dessa aceleração centrífuga está relacionado com o raio e a velocidade angular do movimento de rotação.

A pressão (P_c), em centímetros de coluna d'água em qualquer ponto da amostra de solo centrifugada é calculada com base na Equação 4, proposta por Corey (1977).

$$P_c = \frac{\rho \omega^2}{2g} (r_2^2 - r_1^2) \quad \text{Equação 4}$$

Onde: ρ é a massa específica do fluido (g/cm^3), ω é a velocidade angular (rad/s), g é aceleração da gravidade ($g = 981 \text{ cm/s}^2$), r_2 (cm) é a distância onde o fluido encontra a pressão atmosférica e r_1 (cm) é a distância ao topo da amostra (cm).

O período de centrifugação, necessário ao equilíbrio da umidade no solo, em dada rotação, é fator determinante da precisão da curva de retenção de água (SILVA E AZEVEDO, 2002). Baseado nisso, recomenda-se períodos de centrifugação variando de 5 a 60 minutos, dependendo da faixa de tensão desejada, ressaltando-se, contudo, que esse período depende da composição granulométrica do solo. Freitas Júnior & Silva (1984) analisaram o efeito do período de centrifugação em amostras de um Latossolo Vermelho do Cerrado, e sugeriram que três horas são necessárias para obter-se o equilíbrio de umidade no solo em uma única operação. Esses estudos evidenciam que a questão do período de centrifugação necessário para o equilíbrio ainda precisa ser investigada, considerando-se, principalmente, a variação dessa resposta de acordo com o tipo de solo. Silva e Azevedo (2002) que estudaram a influência do período de centrifugação para obtenção da curva de retenção em solos do cerrado brasileiro mostraram que o período de centrifugação afeta, principalmente, os valores da umidade para sucções mais elevadas, alterando, portanto, a umidade residual. Silva e Azevedo (2002) concluíram que o período de centrifugação necessário para o equilíbrio da tensão da umidade do solo, na determinação da curva, pelo método tradicional da centrífuga, deve ser superior a 80 minutos.

2.5. Curva de condutividade hidráulica

O fluxo de água no solo pode ser descrito a partir da lei de Darcy. Por esta lei tem-se que o fluxo em uma massa de solo é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (Equação 5).

$$v = -k \cdot i \quad \text{Equação 5}$$

Onde: v é velocidade do fluxo; k é a condutividade hidráulica; e i é o gradiente hidráulico igual a $\partial h / \partial z$, em que h é a carga total e z define a posição do ponto em um fluxo uni-dimensional.

Para solos saturados, condutividade hidráulica pode ser admitida constante durante o fluxo. Porém, para um solo não saturado esta condutividade é função da sucção ou da umidade volumétrica presente no solo, e passa a ser designado como a curva de condutividade hidráulica, que é uma medida da capacidade do solo transportar água. Assim, derivando-se a carga total (h) em função de z, para solos não saturados, pode-se reescrever a equação de Darcy:

$$v = -k(\psi) \left(1 - \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad \text{Equação 6}$$

O fluxo de água em uma massa de solo é diretamente proporcional à área transversal dos poros preenchidos com água. No meio não saturado, como os poros também estão preenchidos por ar, este ar cria caminhos mais longos e tortuosos, o que dificulta o fluxo de água. Assim, com o aumento do valor da sucção, os vazios ocupados pela água diminuem e conseqüentemente a condutividade diminui.

Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), a condutividade hidráulica pode ser determinado a partir de técnicas diretas e indiretas. As primeiras estão relacionadas aos ensaios laboratoriais de permeabilidade. As últimas se baseiam, entre outros, na Curva de Retenção, surgindo desta forma modelos estatísticos e modelos empíricos, sendo que também é necessário o valor da condutividade hidráulica saturada. A Tabela 2.5 apresenta alguns destes modelos.

De acordo com Leong & Rahardjo (1997) os problemas associados com a determinação da função permeabilidade da forma indireta são:

- Os pontos da curva de retenção próximos da umidade volumétrica residual tornam-se imprecisos e difíceis de serem determinados;
- A amostra do solo poderá se retrair para altos valores de sucção, acarretando erros na determinação da curva de retenção do solo. O mesmo problema poderá ocorrer se a amostra expandir, dificultando a determinação do volume do corpo de prova e conseqüentemente da curva de retenção.

Tabela 2.5 - Função de condutividade hidráulica (Vilar, 2002)

Autor	Condutividade hidráulica	Parâmetros
Gardner (1958)	$k(\psi) = \frac{k_s}{1 + \alpha \psi^n}$ $k(\psi) = k_s \alpha \psi^{-n}$	α e n
Brooks and Corey (1964)	$k(\psi) = k_s \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^{(2+3\lambda)}$	ψ_b e λ
van Genuchten (1980)	$k(\psi) = k_s \left\{ \frac{[1 - (\alpha\psi)^{n-1}][1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{(m/2)}} \right\}^2$	$m = 1 - \frac{1}{n}$ α e n
Fredlund e Xing (1994)	$k(\psi) = k_s \Theta^{0.5} (1 - (1 - \Theta^{(1/m)})^m)^2$	m

Onde:

- Ψ – sucção;

- Ψ_b – sucção de entrada de ar;

- k_s – condutividade hidráulica saturada;

- n , m , λ , α são parâmetros obtidos na curva de retenção de água do solo;

- Θ – teor de umidade volumétrica efetiva dada por:
$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Em que:

- θ_r – umidade volumétrica residual; e

- θ_s – umidade de saturação.

A Figura 2.9 ilustra a variação da permeabilidade em dois estágios de fluxo para uma mesma razão de variação de sucção. No estágio 1, o solo se encontra com um valor de sucção menor do que o valor de entrada de ar, permanecendo a condutividade hidráulica inalterada. Para o estágio 2, inicialmente, o solo se encontra com uma sucção maior que o valor de entrada de ar e, portanto, com um valor de permeabilidade menor do que na condição saturada (CARDOSO JR, 2006).

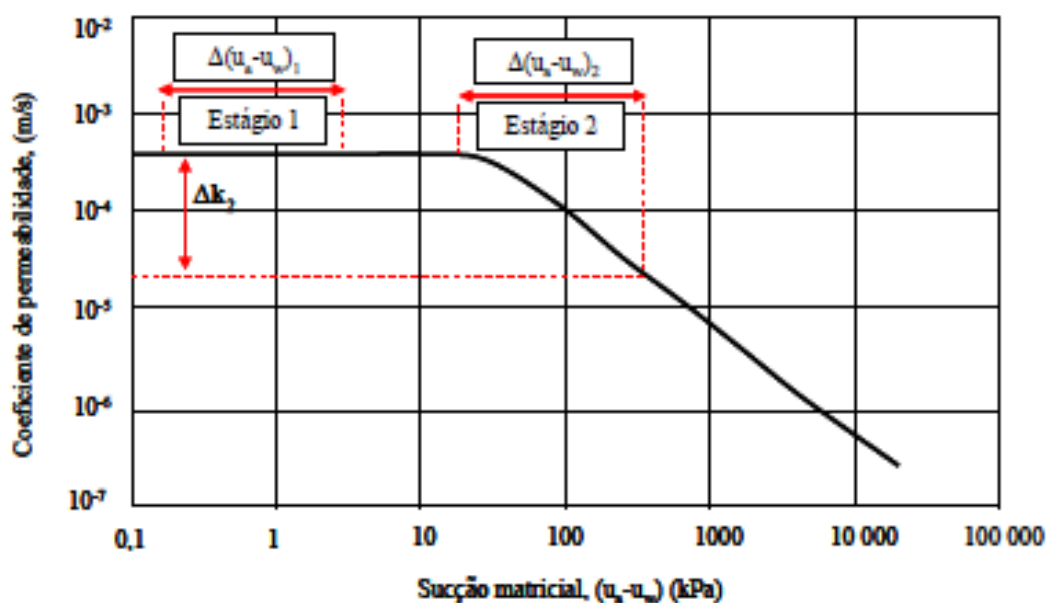


Figura 2.9 - Variação da condutividade hidráulica com a sucção (Cardoso JR, 2006).

2.6. Resistência em solos não saturados

É recorrente na Engenharia Geotécnica se analisar a estabilidade de um talude adotando-se o modelo de resistência ao cisalhamento dos solos saturados de Terzaghi usando-se o critério de Mohr-Coulomb (Equação 7).

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \operatorname{tg} \phi' \quad \text{Equação 7}$$

Onde: τ – tensão cisalhante; c' – coesão efetiva do solo; σ – tensão normal; u_w – pressão neutra nos poros do solo; $(\sigma - u_w)$ – tensão efetiva normal; e ϕ' – ângulo de atrito efetivo do solo.

Entretanto, a equação acima não se aplica em casos de solos não saturados, pois as fases ar e água estão presentes nos vazios e, normalmente, sob pressões diferentes.

Um solo não saturado pode ser caracterizado como um sistema trifásico, sólido, líquido e gasoso. O meio multifásico deixa de ser contínuo caso exista água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo. Assim, desde que se assuma que um fluido compressível preencha os poros, o solo não saturado pode ser analisado como um sistema bifásico, como os solos saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Lee et al. (1983) propõe um modelo, apresentado na Figura 2.10, que se aproxima da lei de tensão efetiva. Nesta figura, tem-se uma seção a partir de uma camada de solo submetida a uma tensão total σ . Para estudar as condições de tensão no contato das partículas, para estabelecer a condição de equilíbrio, considerou-se uma superfície horizontal ondulada que se desenvolve entre os pontos de contato.

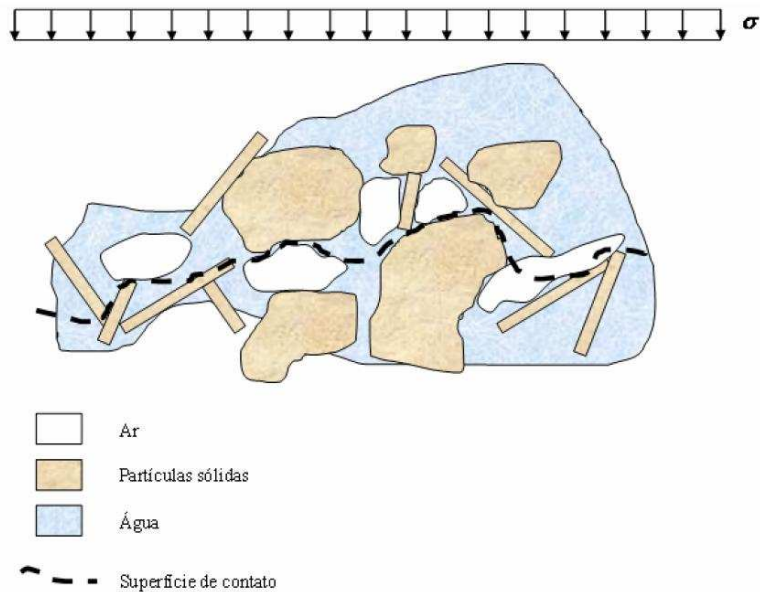


Figura 2.10 - Modelo de equilíbrio para solos não saturados (Lee et al., 1993).

Fazendo-se o equilíbrio na seção horizontal da Figura 2.10, tem-se a Equação 8 e a Equação 9:

$$\sigma A = \sigma_s A_s + u_w A_w + u_a A_a \quad \text{Equação 8}$$

$$\sigma = \sigma_s \frac{A_s}{A} + u_w \frac{A_w}{A} + u_a \left(1 - \frac{A_s}{A} - \frac{A_w}{A} \right) \quad \text{Equação 9}$$

Tendo:

σ_s – tensão de contato entre os grãos;

A_s – área de contato dos grãos;

u_w – pressão da água;

u_a – pressão do ar;

A_w – área da superfície da água;

A_a – área da superfície do ar, sendo $A_a = A - A_s - A_w$; e

A – área total

Considerando-se $\sigma' = \sigma_s A_s/A$ como tensão efetiva e desprezando A_s/A pode ser muito pequeno, obtém-se a Equação 10 e a Equação 11:

$$\sigma = \sigma' + u_w \frac{A_w}{A} + u_a - u_a \frac{A_w}{A} \quad \text{Equação 10}$$

ou

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \text{Equação 11}$$

em que:

$\chi = \frac{A_w}{A}$ - porção da seção da Figura 2.10 com água;

$(\sigma - u_a)$ – tensão normal líquida; e

$(u_a - u_w)$ – sucção matricial.

A Equação 11 é a equação de Bishop (1955) para tensão efetiva para solos não saturados, que tinha a ideia básica de reformular o princípio das tensões efetivas proposto por Terzaghi, por meio da inclusão de um parâmetro que representa a influência da sucção na tensão efetiva dos solos (MACHADO e VILAR, 1998). Em um solo saturado o parâmetro χ é igual a 1 e para solo seco é igual a 0. Para solos não

saturados, χ é função do grau de saturação e vários outros fatores, incluindo-se tamanho das partículas, forma, sucção, história de tensão, etc.

Substituindo-se a Equação 11 no critério de Mohr-Coulomb para solos saturados (Equação 7), a resistência para os solos não saturados fica expressa pela Equação 12.

$$\tau = c' + \{(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)\} \text{tg } \phi' \quad \text{Equação 12}$$

Quando o solo está saturado, χ é igual a 1, a Equação 12 se torna a Equação 7. Portanto, a Equação 12 é uma extensão da equação proposta por Terzaghi (1936).

Algumas dificuldades associadas à determinação do parâmetro χ limitam a aplicabilidade da proposta de Bishop (LU e LIKOS, 2006). Assim, Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram que a resistência ao cisalhamento de solos, considerando o estado de tensão variável, fosse descrita como na Equação 13:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \text{tg } \phi' + (u_a - u_w) \text{tg } \phi^b \quad \text{Equação 13}$$

Onde: ϕ^b – taxa de ganho de ângulo de atrito do solo com relação à sucção matricial.

A Equação 13 é uma extensão da equação de Terzaghi. Quando o solo está saturado, a pressão do ar e a sucção são nulas, ϕ^b é igual a ϕ' , dessa maneira, a Equação 13 reverte na Equação 7 (CARDOSO JR, 2006).

A proposta de Fredlund et al. (1978) pode ser representada em um gráfico de três dimensões, como mostrado na Figura 2.11. Na ordenada, tem-se a tensão cisalhante (τ) e as variáveis de estado de tensão ($\sigma - u_a$) e ($u_a - u_w$) estão nas abscissas. O plano frontal ($\sigma - u_a$ versus τ) representa a condição de saturação do solo, quando a sucção é zero.

Na Figura 2.11 e na Equação 13, o aumento na resistência ao cisalhamento devido ao aumento na tensão normal é caracterizado pelo ângulo de atrito ϕ' . Por outro lado, o ganho de resistência cisalhante devido ao aumento da sucção é caracterizado pelo ângulo ϕ^b (CARDOSO JR, 2006).

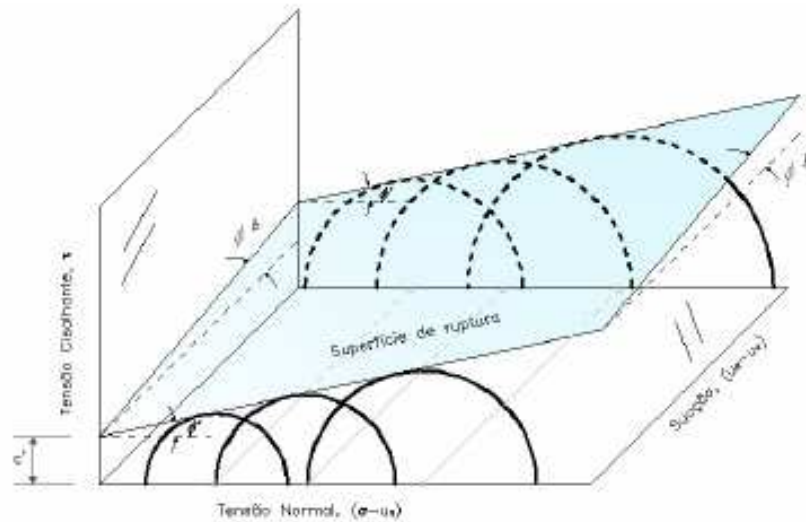


Figura 2.11 - Superfície de ruptura para um solo não saturado, representação proposta da Equação 13 (Fredlund et al., 1978).

A superfície de ruptura idealizada por Fredlund et al. (1978) e representada pela Equação 13, é plana, ou seja, os valores de ϕ^b e ϕ' constantes. Porém, Escário e Sáez (1986), Fredlund e Rahardjo (1993), Abramento (1988) e Oliveira Marinho (2003) obtiveram resultados que mostram que o aumento da resistência devido o aumento da sucção não é necessariamente constante, variando em função do nível de sucção presente no solo.

Alguns estudos sobre modelos de previsão de resistência dos solos não saturados têm sido feitos. Dentre eles está o de Vanapalli et al. (1996), no qual se afirma que a mudança na resistência ao cisalhamento de um solo não saturado está relacionada com a área dos meniscos de água em contato com as partículas ou agregados do solo, ou seja, está associada à curva de retenção do solo. A Figura 2.12 apresenta as três fases da curva de retenção propostas por Vanapalli et al. (1996). De acordo com essa proposta, baseada no modelo apresentado por White et al. (1970), a primeira fase é denominada estágio de efeitos de contorno, a segunda chamada de estágio de dessaturação e a terceira chamada de zona residual de dessaturação.

Na primeira fase o solo está saturado. Nesta fase, a resistência ao cisalhamento aumenta de forma linear com o aumento da sucção (reta AB, na Figura 2.12b). A segunda fase se inicia a partir do valor de entrada de ar do solo até o valor da umidade residual (Figura 2.12a). Nesta fase, os meniscos de água existentes no interior do solo estão isolados, e, ao longo dessa fase, a resistência ao cisalhamento cresce de forma não linear (Figura 2.12b, trecho BC). Na última fase, para se retirar uma pequena

quantidade de água do solo é necessário um elevado aumento no valor da sucção. A partir do início dessa última fase, a resistência ao cisalhamento pode aumentar, diminuir ou permanecer constante (Figura 2.12b, trecho CD) (CARDOSO JR, 2006).

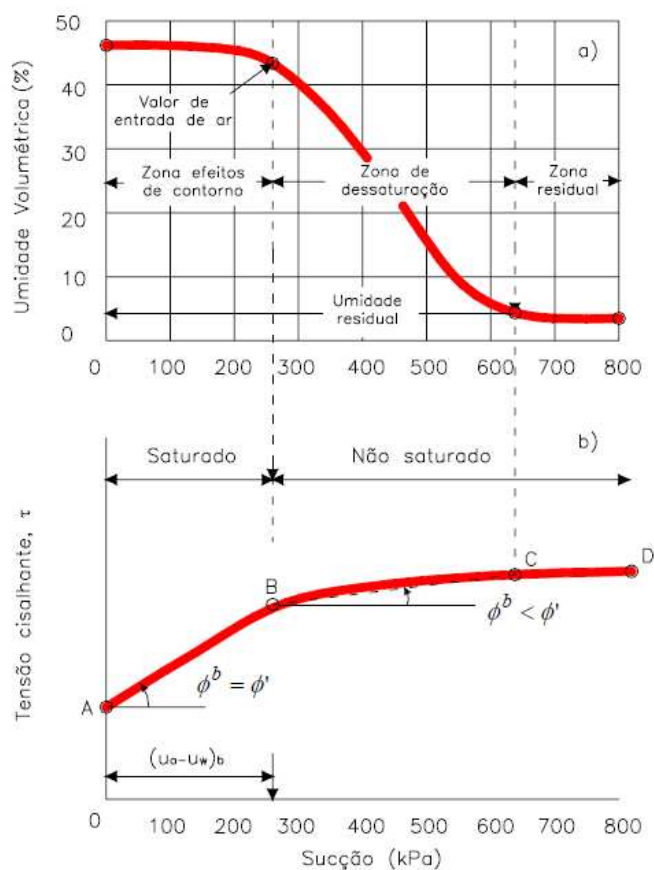


Figura 2.12 - Relação entre a curva de retenção e a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado: a) curva de retenção e b) envoltória não linear de resistência (Vanapalli et al., 1996).

O fato do comportamento da resistência ao cisalhamento poder variar na última fase está associado com os diferentes tipos de solo. Em siltes e, principalmente, areias que dessaturam relativamente rápido, a tendência é uma diminuição na resistência. Vanapalli et al. (1996) explica que nesses solos, na condição de sucção residual, a pequena quantidade de água existentes nos poros não é capaz de transmitir uma sucção efetiva entre os agregados ou partículas dos solos. Em argilas, nesta última fase, um valor relativamente alto de água pode existir nos poros entre os agregados, na forma adsorvida, transmitindo uma efetiva sucção nos pontos de contato entre os grãos, aumentando a resistência ao cisalhamento mesmo após a umidade residual do solo.

Visando propor um modelo para relacionar a resistência ao cisalhamento com a sucção, autores como Vanapalli et al. (1996) e Fredlund et al. (1996), propuseram que esta relação pode ser representada pela Equação 14.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) (\chi^k) \operatorname{tg} \phi' \quad \text{Equação 14}$$

A constante k representa um parâmetro de ajuste a valores obtidos experimentalmente. Vanapalli e Fredlund (2000) apresentaram uma relação entre os valores de k e o índice de plasticidade (IP) do solo, conforme apresentado na Figura 2.13. Segundo Cardoso Jr (2006), estes autores afirmaram que o valor de k pode ser influenciado por outros parâmetros, tais como a estrutura do solo, a energia e forma de compactação entre outros.

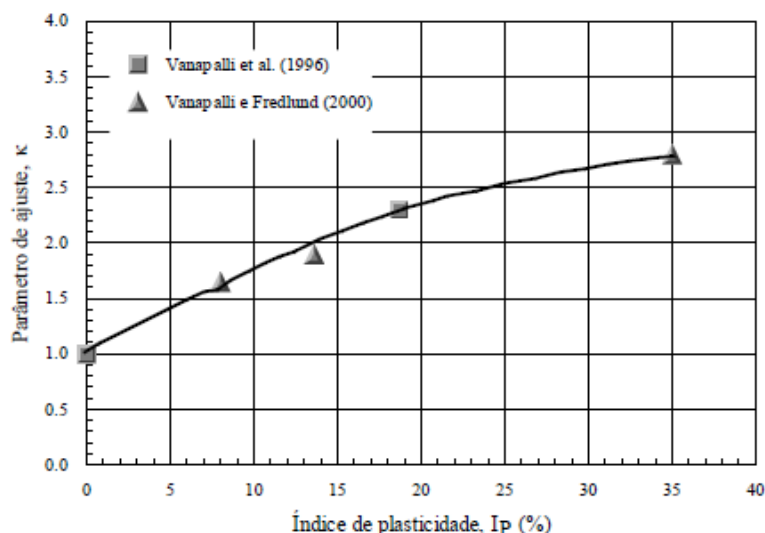


Figura 2.13 - Relação entre I_p e o parâmetro K (Vanapalli e Fredlund, 2000).

Vanapalli et al. (1996) seguindo o mesmo raciocínio da proposta da Equação 14, apresentaram a proposta de modelagem para prever a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado sem o uso do parâmetro k. A Equação 15 abaixo representa esta proposta.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) [\Theta \operatorname{tg} \phi'] \quad \text{Equação 15}$$

Em que Θ é o teor de umidade volumétrica normalizada definida anteriormente.

Ou seja, obtém-se a resistência do solo não saturado a partir do conhecimento da sua curva de retenção de água, evitando-se a necessidade de se fazer ensaios de resistência em solos não saturados. Este foi o procedimento usado nesta dissertação.

2.7. Relação pluviosidade e escorregamento

Inúmeros fatores são considerados na tentativa de análise de condições que conduzem ao aparecimento de escorregamentos. Porém, a chuva, trata-se do aspecto mais importante. De acordo com Guidicini e Nieble (1983), quase todos os escorregamentos registrados em nosso meio fisiográfico estão associados a episódios de elevada pluviosidade, de duração compreendida entre algumas poucas horas até alguns dias. Entretanto, não se pode afirmar que a ocorrência de um elevado índice de pluviosidade é condição necessária, mas nem sempre suficiente para o desencadeamento de escorregamentos.

Segundo Tatizana et al (1987), as ações das precipitações nos taludes são as seguintes:

- Alteração dos parâmetros de resistência dos materiais: diminuição da coesão aparente, diminuição da sucção, dissolução da cimentação;
- Aumento da solicitação externa: aumento do peso específico dos materiais que formam o talude;
- Avanço da frente de saturação no maciço, provocando o desenvolvimento de pressões neutras positivas nos solos, supressões nas discontinuidades rochosas e forças de percolação; e
- Alteração do perfil da encosta por erosão de materiais.

Vargas Jr. et al. (1986), adotando parâmetros geotécnicos típicos dos solos saprolíticos de gnaiss do Rio de Janeiro, realizaram um estudo para avaliar a variação do fator de segurança em função do avanço de uma frente de umedecimento, em um talude com ângulo de inclinação de 60° e altura de 20 m. Para solos pouco permeáveis concluíram que as chuvas necessárias para que haja escorregamentos precisam ser da ordem de 50 a 60 horas. Em solos mais permeáveis para que haja escorregamento é necessário chuvas de grande intensidade e pouca duração, caracterizando eventos com período de retorno elevado. Ao correlacionar a variação do fator de segurança em função do avanço da frente de umedecimento para diversas superfícies de ruptura,

concluíram que a situação crítica ocorre quando a frente de umedecimento atinge a superfície de ruptura na profundidade de aproximadamente quatro metros no interior do talude.

2.7.1. Relação entre intensidade da chuva e a condutividade hidráulica saturada do solo

Segundo Cardoso e Futai (2005), o impacto da chuva sobre o regime hidráulico no perfil do solo pode ser considerado como um estado de transição entre o estado inicial (condição hidrostática) e o estado final (condição de fluxo estacionário). Partindo-se do regime inicial, ou seja, condição hidrostática, um evento chuvoso inicia um processo de ajuste hidráulico para uma nova condição de contorno de fluxo e, se o evento chuvoso permanece durante um longo período, ocorrerá um estado de infiltração estacionário próximo à superfície. Sob condição hidrostática não existe fluxo. Na condição estacionária, a quantidade de água que entra no maciço está em equilíbrio com a água que sai.

Durante uma precipitação o valor da sucção tende a diminuir, porém pode ser que não chegue a um valor nulo. A sucção será nula apenas quando ocorrer uma precipitação de longa duração e a sua intensidade se aproximar do valor da condutividade hidráulica saturada do solo na superfície. Assim, Zhang et al. (2004), relacionou a variação da sucção em um perfil de um talude homogêneo com a permeabilidade no estado saturado (k_s), com o tempo, para uma determinada intensidade pluviométrica constante (I).

- Intensidade pluviométrica menor do que a condutividade hidráulica saturada do solo ($I < k_s$): Neste caso, não há formação de uma frente de saturação, ocorre apenas uma frente úmida que eleva a umidade do solo em seu interior do valor inicial para um valor final, que corresponde à umidade para a qual a condutividade hidráulica iguala a velocidade de infiltração. Aqui, não se chegará até um valor nulo de sucção (Figura 2.14a).

- Intensidade pluviométrica maior ou igual à condutividade hidráulica saturada do solo ($I \geq k_s$): Neste caso, a abundância de água na superfície propicia a formação de uma

frente de saturação responsável pela elevação da umidade do solo em seu interior até a máxima umidade possível de ser atingida por percolação. A sucção irá se anular na superfície e a diferença entre a quantidade de água da precipitação menos a capacidade de infiltração do solo irá escoar superficialmente (Figura 2.14b).

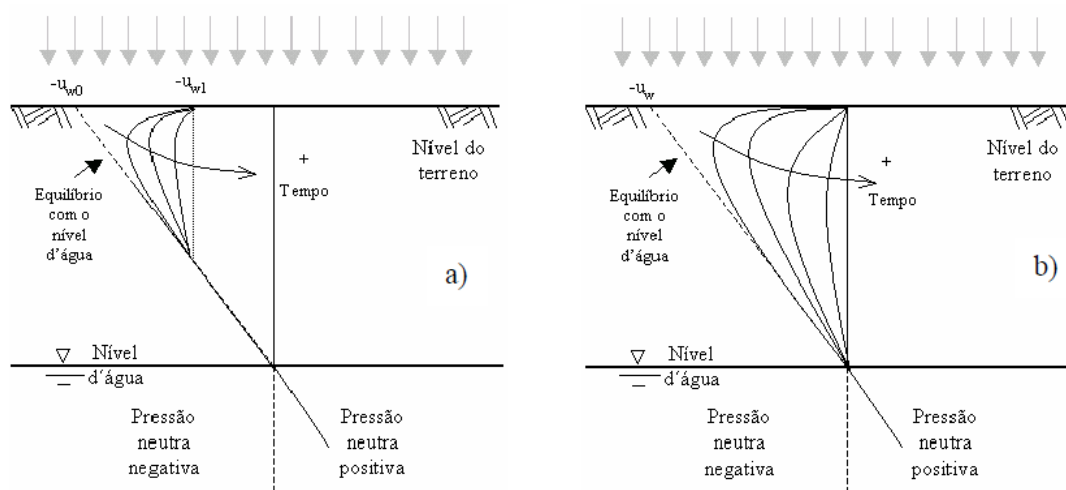


Figura 2.14 - Comportamento do perfil de sucção durante uma infiltração para duas condições: a) $I < K_s$ e b) $I \geq K_s$ (Zhang et al., 2004).

2.7.2. Redistribuição da umidade após o fim da precipitação

O estudo da redistribuição da umidade depois de cessada a fonte de água se dá pelo fato da redistribuição ser um agente preparatório a um escorregamento, pois se tem o aumento da saturação do perfil do solo e, conseqüentemente, redução no valor de sucção. Caso ocorra posteriormente uma precipitação de grande intensidade, a frente de umedecimento avançará em profundidades maiores e, dessa maneira, aumentará a probabilidade de deslizamento.

Carvalho (1989), afirma que ao cessar a água livre na superfície do terreno a frente de umedecimento encontra-se a certa profundidade. Este fato propicia que um perfil do solo apresente duas zonas: a região acima da frente de umedecimento, onde se tem umidade máxima e sucção mínima; e uma segunda região inferior que se tem umidade e sucção próxima da situação inicial. Assim, há um fluxo de água da região superior, mais úmida, para a inferior, devido à existência de um gradiente hidráulico.

Ao atingir o equilíbrio, o perfil possui umidade final superior à inicial, mas inferior à máxima umidade atingida no interior da frente de umedecimento.

Wang et al. (2004), apresenta três propostas de perfis de redistribuição da umidade. Na Figura 2.15 (a), a redistribuição mantém quase que o mesmo formato do perfil de infiltração e o valor da umidade volumétrica diminui em função do avanço da frente de umedecimento. Esta proposta é característica de solos finos. Na Figura 2.15 (b), a umidade volumétrica sofre uma queda abrupta a partir de certa profundidade (L), mantendo-se constante ao longo da redistribuição. A última proposta (Figura 2.15c), a umidade volumétrica mantém-se constante no avanço da redistribuição, enquanto que a umidade na superfície diminui gradativamente com o tempo.

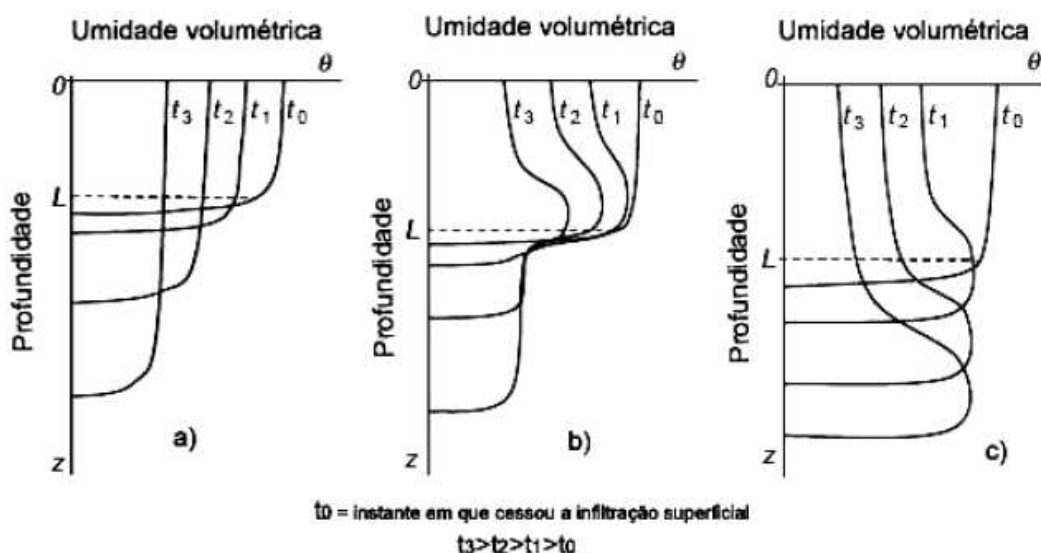


Figura 2.15 - Redistribuição da umidade volumétrica após a infiltração (Wang et al., 2004).

Fredlund e Rahardjo (1993) estudaram o comportamento da sucção de um talude heterogêneo em Hong Kong durante um evento chuvoso, sendo avaliada a variação do fator de segurança do talude antes, durante e depois da precipitação. Avaliou-se o comportamento do talude durante 1080 minutos tendo uma chuva de intensidade de 47 mm/h e duração de 480 minutos.

Pela Figura 2.16, percebe-se que uma sucção de aproximadamente 65 kPa na superfície do talude, no início da chuva (tempo 0), sendo que essa sucção se anulou no final do evento. Após o cessamento da chuva (após 480 min), a sucção na superfície

tende a voltar para o valor inicial, no entanto, para maiores profundidade a sucção diminui.

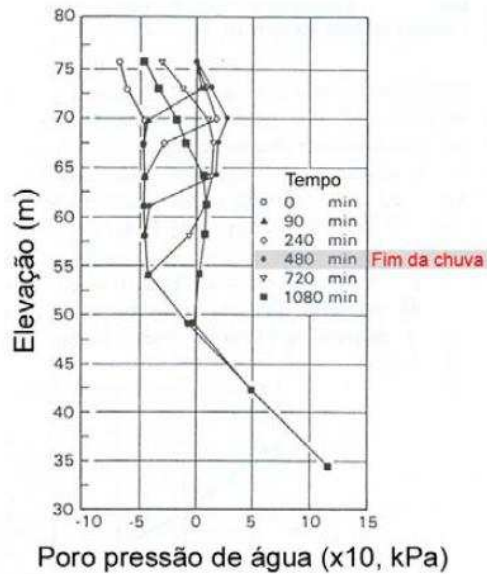


Figura 2.16 - Perfil da variação da pressão de água nos poros do solo em função do tempo (Fredlund e Rahardjo, 1993).

A partir dos perfis de sucção do talude em função do tempo, os autores determinaram os fatores de segurança do talude, também em função do tempo, para uma superfície fixa de deslizamento considerada crítica (Figura 2.17). Como ϕ^b não é linear, os fatores de segurança foram verificados para várias razões entre ϕ^b e ϕ' .

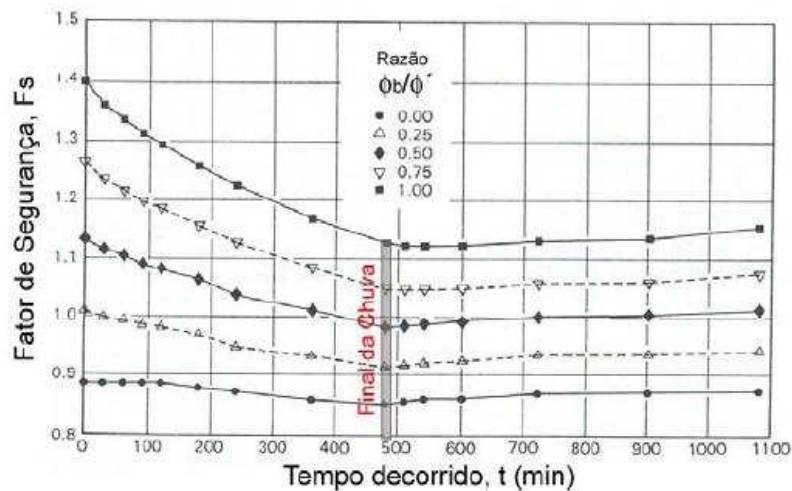


Figura 2.17 - Fatores de segurança em função do tempo (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Tem-se que o fator de segurança diminui durante o evento chuvoso, alcançando um valor mínimo no final da precipitação. Após a chuva cessar há um acréscimo no valor do fator de segurança. Contudo os autores ressaltam que a superfície de ruptura

pode ser diferente para períodos durante e após a precipitação e comentam que a superfície crítica pode ser mais profunda com o avanço da frente de umedecimento no talude, alterando-se, nesse caso, o tempo do fator de segurança crítico.

Com relação à razão entre ϕ^b e ϕ' , quanto maior, mais acentuada é a queda na segurança do talude durante o processo de infiltração. Os autores ressaltam que o aumento do fator de segurança após a chuva ter cessado parece ocorrer em uma razão menor do que a redução do fator durante o período de chuva.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e levantamento topográfico

O talude estudado encontra-se situado no campus da Universidade Federal de Viçosa, mais especificamente no Departamento de Educação Física, como pode ser observado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Vista frontal do talude localizado no Departamento de Educação Física da Universidade Federal de Viçosa.

A escolha deste talude se deve ao fato da praticidade em conseguir autorização para fazer o levantamento topográfico, a coleta de amostras e as visitas em campo, já que ele está dentro dos limites da UFV. Outro fator interessante para se estudar a sua estabilidade foi ter ocorrido uma ruptura em 2011 no talude ao lado, como mostra a Figura 3.2.

Neste talude realizou-se o levantamento topográfico, pois se precisa fornecer aos softwares VADOSE/W e SLOPE/W, utilizados na análise numérica, a sua geometria.



Figura 3.2 - Vista área do talude estudado e do talude rompido em 2011 (Google Earth).

3.2. Sondagem

Para composição da estratigrafia do talude, realizou-se sondagem à percussão (SPT) em dois pontos ao longo do terreno, um na cota mediana e outro na base do talude. Para melhor compor a estratigrafia, seria interessante fazer um terceiro furo na crista, porém, infelizmente, não foi possível transportar o tripé de sondagem e o tambor com água até este ponto. A Figura 3.3 apresenta o primeiro furo de sondagem (SPT – 1) sendo realizado em campo.

Todo procedimento de sondagem foi realizado seguindo a NBR 6484 “Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio” (SPT- Standard Penetration Test).

A cada metro que se aprofundava, retirava-se amostra de solo com auxílio do amostrador. Cada amostra de solo retirada foi caracterizada tátil-visualmente seguindo a NBR 7250.

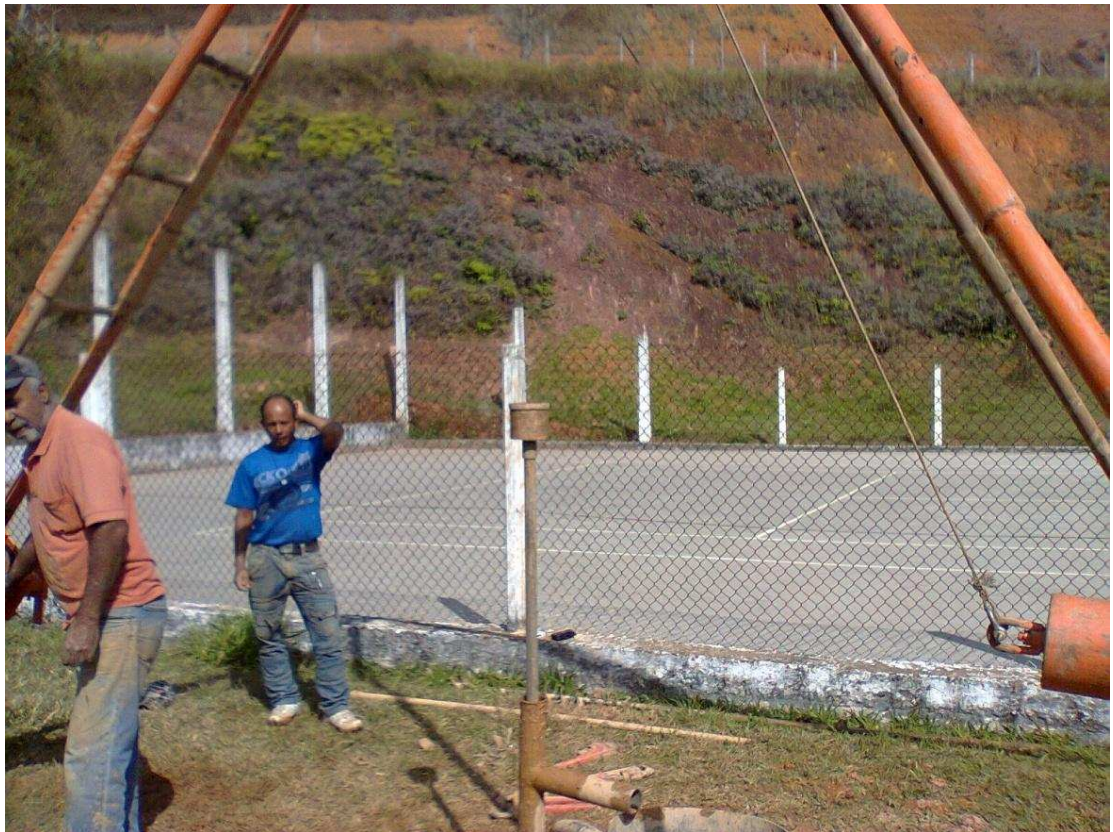


Figura 3.3 - Sondagem à percussão na base do talude.

Para realização dos ensaios de laboratório para caracterização dos solos e obtenção das suas propriedades hidráulicas, próximo a superfície de cada furo de sondagem retirou-se amostras deformadas de solos. Já para obtenção de parâmetros de resistência e da condutividade hidráulica saturada, retiraram-se três amostras indeformadas superficiais próximas a cada furo de sondagem seguindo a NBR 9820.

3.3. Ensaios de laboratório

Para caracterização dos solos realizaram-se os seguintes ensaios: análise granulométrica seguindo a NBR 7181, massa específica dos sólidos de acordo com a NBR 6508 e limites de consistência pelas normas NBR 6459 e NBR 7180.

Os parâmetros de resistência foram obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto de amostras indeformadas naturais e saturadas. Para cada furo de sondagem realizaram-se três ensaios com amostras indeformadas naturais e três com elas saturadas, sendo as amostras obtidas na mesma profundidade próximas aos furos de sondagem.

Realizou-se o ensaio com permeâmetro de carga variável para determinação da condutividade hidráulica saturada do solo.

A curva de retenção de água no solo foi obtida a partir do método do papel filtro em conjunto com uma centrífuga médica Cientec CT-6000 (Figura 3.4), de modo a se obter uma única curva para cada amostra, uma vez que a utilização da centrífuga é adequada para sucções baixas, da ordem de 235 kPa, atual limite do equipamento desenvolvido, e os pontos que necessitem de sucções mais altas foram obtidos através do método do papel filtro.



Figura 3.4 - Centrífuga médica Cientec CT - 600.

Na obtenção da parte inicial da curva, utilizando-se a técnica da centrífuga, a sucção é dada de acordo com a Equação 4.

Sendo:

$$- \omega = \frac{2\pi}{60 \text{Rotações}} ,$$

onde as rotações usadas foram: 300, 500, 800, 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2200 e 2500 rpm;

- r_2 igual a 17,406 cm e r_1 a 15,406 cm.

O processo de moldagem das amostras para realização do método da centrífuga foi realizado seguindo o seguinte procedimento adotado por Guimarães (2013):

- O solo é umedecido até atingir o teor de umidade desejado e deixado em descanso por 24 horas em embalagem plástica.
- De posse do volume do anel, teor de umidade e peso específico dos sólidos, determina-se a massa de solo úmido a ser colocado no molde de PVC, confeccionado especificamente para este fim. O diâmetro interno do molde tem o mesmo diâmetro externo do anel amostrador da centrífuga.
- O solo é compactado de forma estática, utilizando um cilindro de PVC, que possui o mesmo diâmetro do anel amostrador. Para realizar a compactação, utilizou-se uma prensa.
- Utiliza-se um extrator para retirar a amostra, em que se mantém fixo o molde e empurra-se a parte interna, composta do anel amostrador e cilindro.

Para o resto da curva, utilizou-se a técnica do papel filtro de acordo com a ASTM D-5298 (Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper). Para obtenção dos pontos foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42, seguindo os seguintes procedimentos:

- As amostras foram homogeneizadas e umedecidas de acordo com os teores de umidades de campo;
- Compactaram-se 10 corpos de prova para amostras de solo retiradas de cada furo de sondagem. Estes corpos foram moldados dentro de um anel de PVC de 47,14 mm de diâmetro interno e 20 mm de altura, determinando-se seus teores de umidades;
- Saturou-se os corpos de prova aspergindo água destilada sobre eles;
- Os corpos de prova foram levados para o sol para secagem até que cada um atingisse o teor de umidade volumétrico estabelecido;
- Procedeu-se então a colocação de dois papéis filtro, um na face superior e outro na inferior de cada corpo de prova, e este conjunto era imediatamente envolto em filme plástico devidamente identificado e levado à câmara úmida em um saco plástico, onde permaneceu por sete dias.
- Após o período de sete dias, os corpos de prova foram abertos, e os papéis filtro foram retirados com auxílio de uma pinça e colocados em um recipiente, não devendo ficar exposto ao ar por mais que 5 segundos, e pesados em uma balança analítica com precisão de 0,0005g . Em seguida, o papel filtro úmido foi colocado na estufa a uma temperatura de 105°C, por um período máximo de 2 horas, e

novamente pesado para obtenção do seu peso seco. Conhecida a umidade do papel filtro, utilizaram-se as curvas de calibração para determinação do valor da sucção do corpo de prova.

No presente trabalho não foi realizado o ensaio de calibração do papel filtro, tendo-se utilizado as curvas de calibração de Chandler et al. (1992), dadas pela Equação 16 e Equação 17:

- Para umidade do papel filtro maior que 47%:

$$\text{Sucção(kPa)} = 10^{(4,842-0,0622w)} \quad \text{Equação 16}$$

- Para umidade do papel filtro menor ou igual a 47%:

$$\text{Sucção(kPa)} = 10^{(6,050-2,48\log w)} \quad \text{Equação 17}$$

Em que “w” é o teor de umidade gravimétrico.

Os pontos das curvas de retenção obtidos experimentalmente foram ajustados pela equação de Fredlund and Xing (1994) (Equação 18), uma vez que o programa VADOSE/W utiliza-se de tal equação para ajustar as curvas de retenção de água no solo.

$$\theta(\psi) = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]} \right]^m \quad \text{Equação 18}$$

Os parâmetros “n” e “m” são parâmetros de ajustes, e foram obtidos com o auxílio de uma planilha feita com o programa Excel utilizando a ferramenta “solver”.

A curva de condutividade hidráulica foi obtida de forma indireta a partir da curva de retenção, da condutividade hidráulica saturada e da equação de Fredlund and Xing (Equação 19).

$$K = K_s \Theta^{0,5} (1 - (1 - \Theta^{(1/m)})^m)^2 \quad \text{Equação 19}$$

3.4. Análise numérica

A análise numérica foi feita com auxílio dos programas, da GeoStudio, VADOSE/W, o qual possibilita a avaliação do efeito da infiltração de água no talude, e SLOPE/W, com o qual se pode descrever a variação do fator de segurança do talude ao longo do ano. Estes softwares, bastante difundidos no meio técnico, se caracterizam principalmente pela capacidade de realização simultânea de análises de percolação, diante da variação das condições climáticas, e de estabilidade, ambas considerando-se a teoria de solos não saturados.

As análises visaram investigar os fatores de segurança do talude ao longo do ano de 2011, pois neste ano ocorreu uma ruptura no talude ao lado, e foram realizadas em duas etapas. Na primeira etapa, feita com o programa VADOSE/W, obteve-se diariamente as sucções em todos os pontos do talude. Na segunda etapa, estes valores de sucções foram importados para o programa SLOPE/W, onde se calculou diariamente os fatores de segurança mínimos de qualquer superfície do talude através do método de Bishop. Utilizou-se esse método devido a sua facilidade de utilização e por ser amplamente empregado em análises de estabilidade de taludes.

A partir do levantamento topográfico, estabeleceu-se o perfil estratigráfico de uma seção transversal do talude, tendo os solos obtidos nos dois furos de sondagem. De posse desse perfil, com o programa VADOSE/W definiu-se a malha de elementos finitos considerando os diferentes materiais com seus respectivos parâmetros e as condições de contorno de drenagem e climáticas.

No programa SLOPE, definiu-se os parâmetros de resistência de cada material, o raio e a grade de centros das superfícies circulares estudadas e se obteve o menor fator de segurança ao longo dos 365 dias do ano.

O VADOSE/W necessita dos parâmetros de entrada descritos a seguir.

3.4.1. Parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos para as amostras dos solos retiradas próximas aos dois furos de sondagem são: curvas de retenção de água, curvas de condutividade hidráulica, condutividade hidráulica saturada e características dos materiais, sendo todos determinados em laboratório. Os valores destes parâmetros serão apresentados no capítulo dos resultados.

3.4.2. Parâmetros de vegetação

Os parâmetros vegetais são: índice de área foliar, profundidade da raiz e ponto de murcha. Estes parâmetros foram estimados com base no banco de dados do programa VADOSE/W, porque não foi possível medi-los no campo.

O VADOSE/W permite a avaliação de alguns dos efeitos da vegetação na infiltração de água nos solos, porém há a limitação de poder ser considerado apenas um tipo de vegetação. No talude deste trabalho há as seguintes condições: áreas expostas sem vegetação; áreas com vegetação rasteira; e áreas com vegetação arbórea. Por simplificação, nesta modelagem optou-se por considerar apenas a existência de vegetação rasteira em todo o talude. Em função disto, foram utilizados parâmetros de referência fornecidos pelo próprio software para modelagem deste tipo de vegetação. Nas Figura 3.5 a Figura 3.7 são apresentadas as curvas de cada uma das respectivas propriedades consideradas.

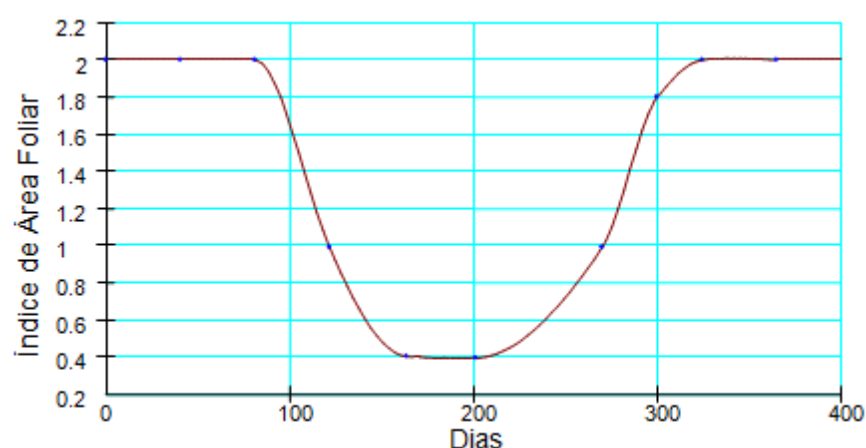


Figura 3.5 - Índice de área foliar.

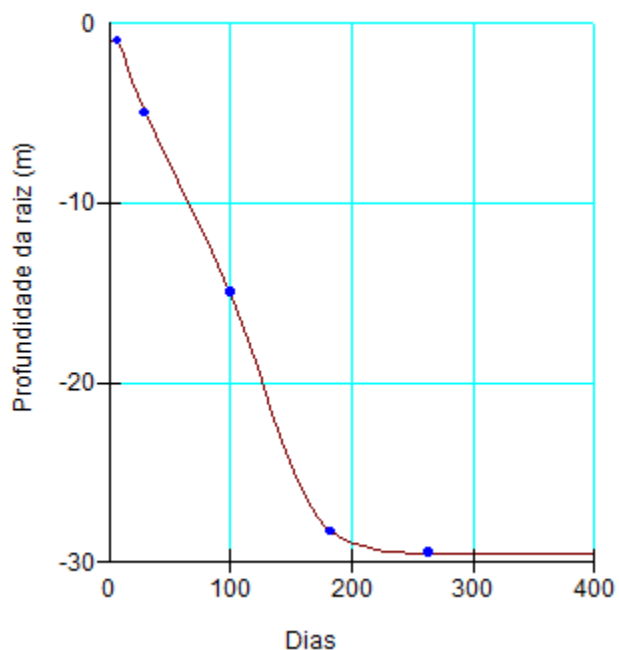


Figura 3.6 - Profundidade da raiz.

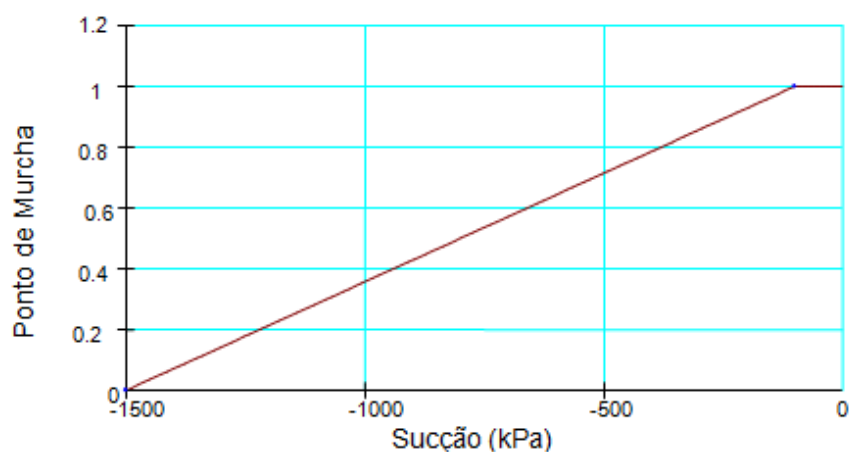


Figura 3.7 - Ponto de murcha.

3.4.3. Parâmetros climáticos

Os parâmetros climáticos diários são: precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, os quais foram obtidos a partir do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, que recebe informações de várias estações meteorológicas, inclusive da estação localizada em Viçosa, sendo os dados desta estação utilizados neste trabalho. Estes parâmetros são apresentados nas Figura 3.8 a Figura 3.11. Estes dados foram registrados de janeiro a dezembro de 2011. Utilizou-se este período, pois neste ano ocorreu uma ruptura no talude ao lado do

referido talude de estudo deste trabalho. Assim, espera-se estudar o comportamento do talude de estudo neste ano de 2011.

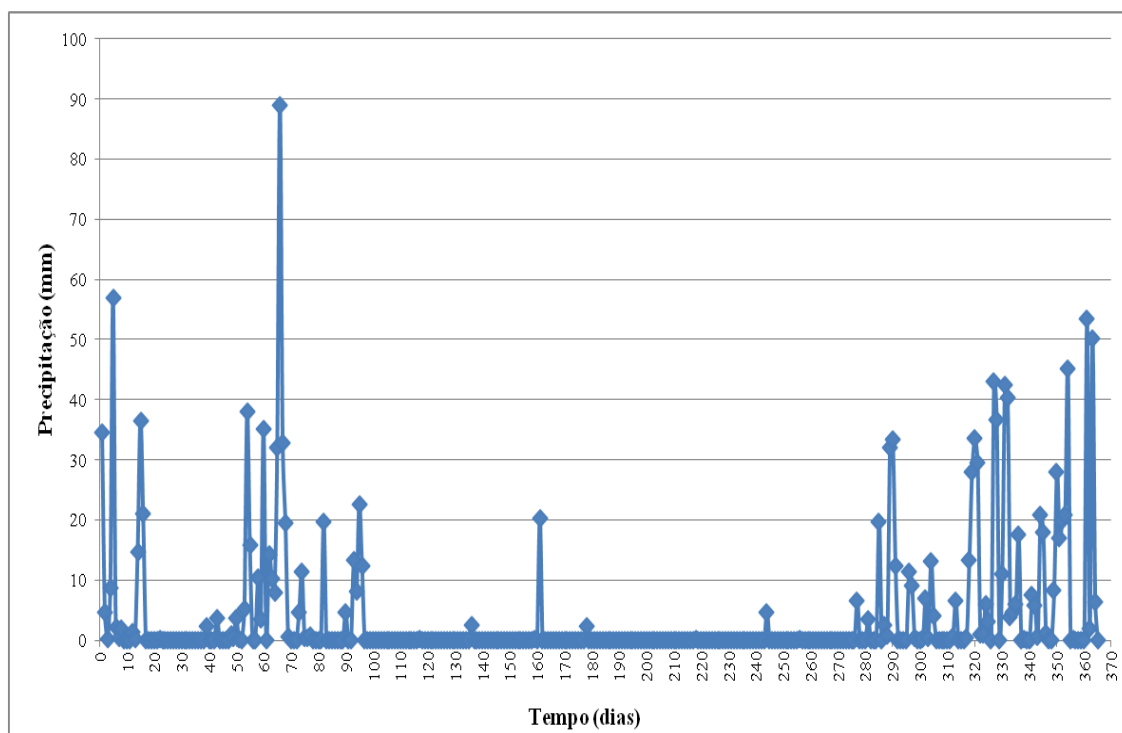


Figura 3.8 - Precipitação diária no período de 01/01/11 a 31/12/11.

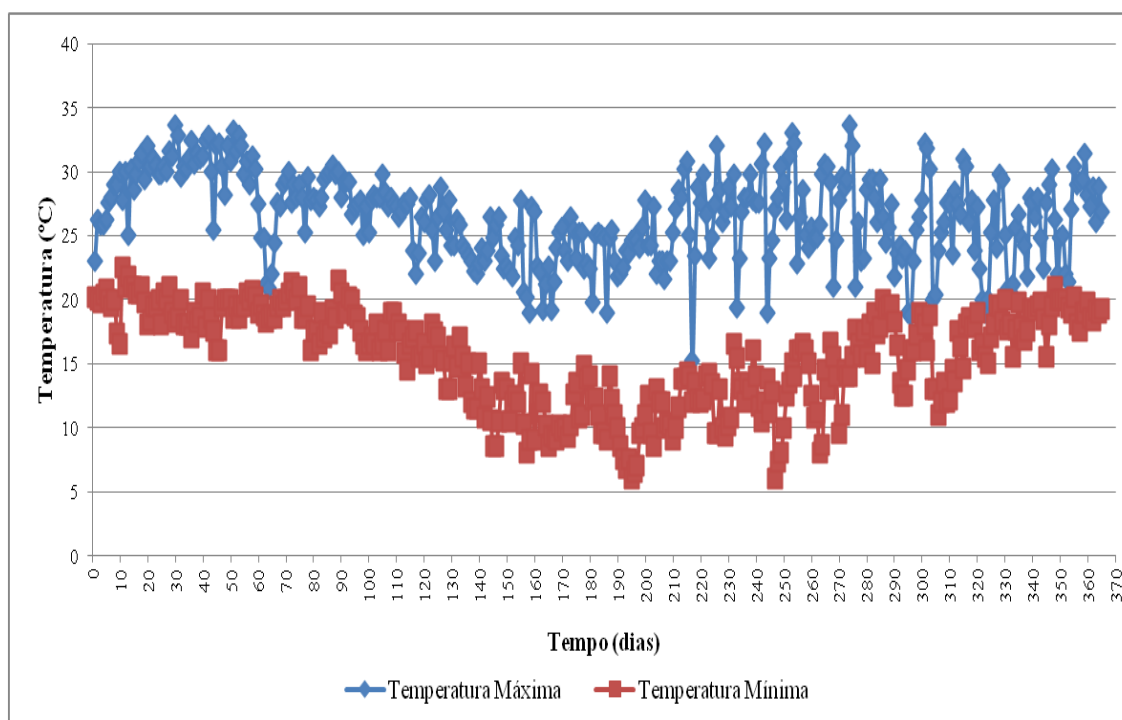


Figura 3.9 - Temperaturas máximas e mínimas diárias no período de 01/01/11 a 31/12/11.

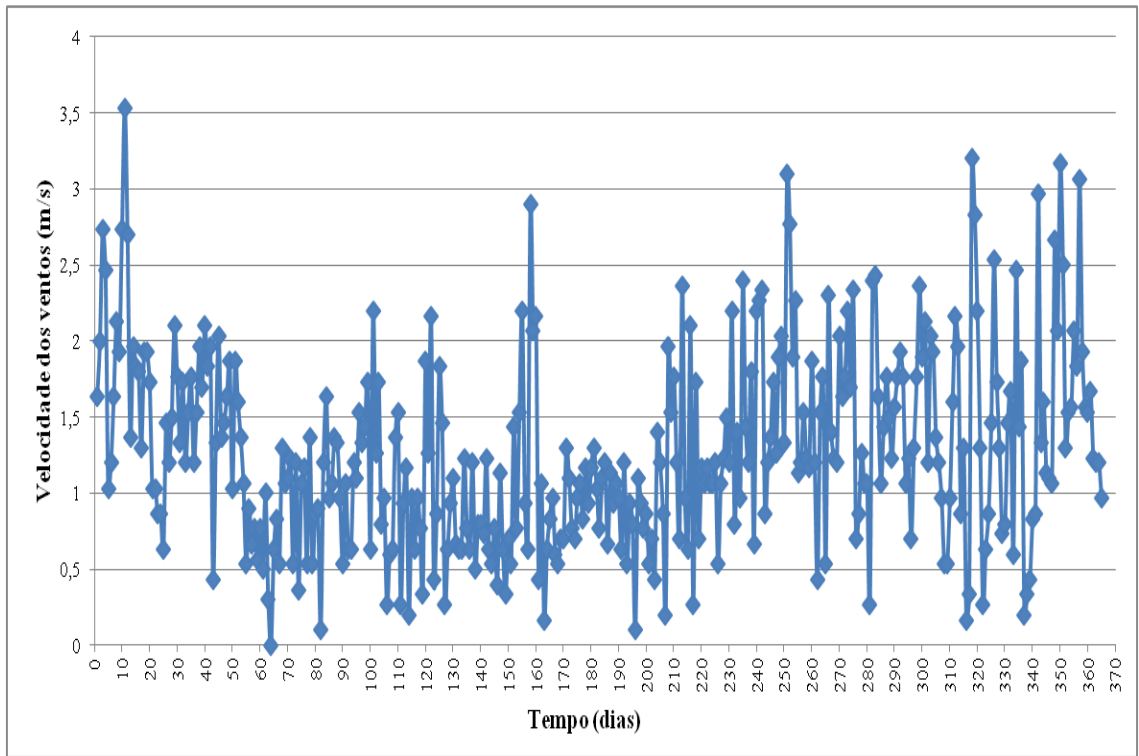


Figura 3.10 - Velocidade dos ventos diária no período de 01/01/11 a 31/12/11.

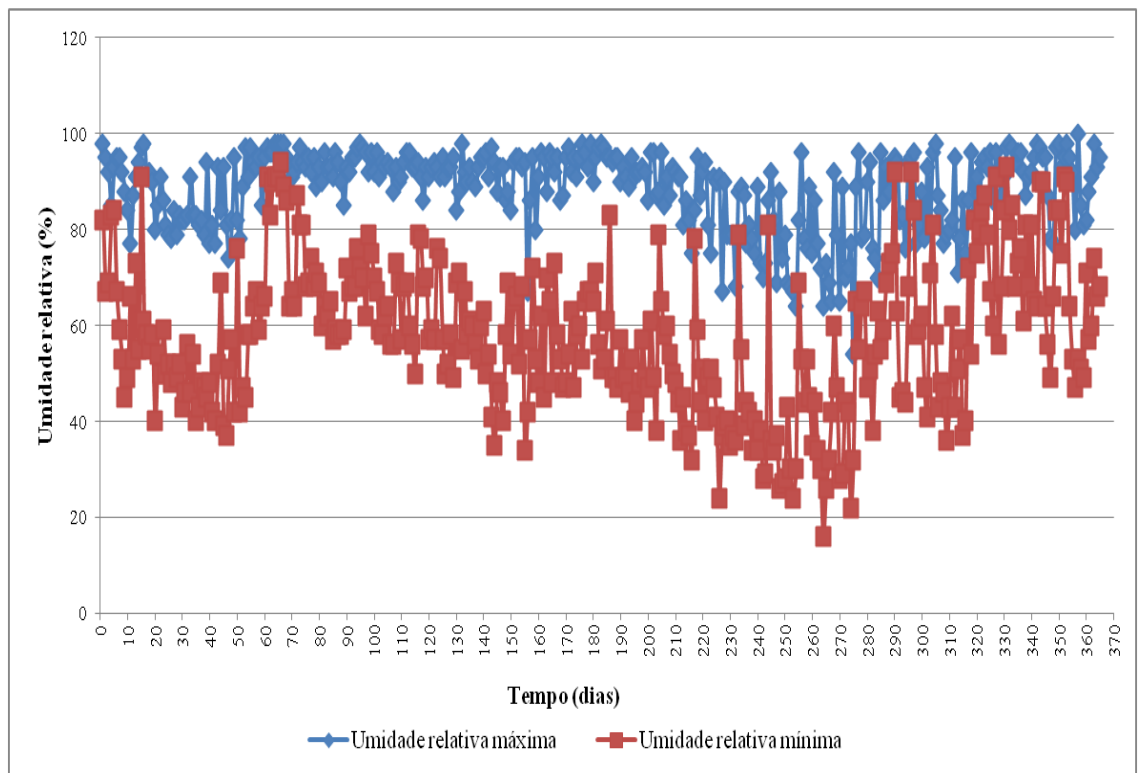


Figura 3.11 - Umidade relativa do ar máxima e mínima no período de 01/01/11 a 31/12/11.

3.4.1. Parâmetros térmicos

Os parâmetros térmicos, condutividade térmica e calor específico, não foram determinados previamente em laboratório. Trabalhos anteriores, como Ribeiro (2011), mostraram que a influência desses parâmetros não era grande, principalmente o calor específico dos solos. Por isso, usaram-se os valores recomendados no manual do próprio programa VADOSE/W.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Levantamento topográfico

O resultado do levantamento topográfico é apresentado na Figura 4.1. A Figura 4.2 apresenta o perfil obtido a partir da seção AA'. Nestas figuras são indicados os dois locais onde foram realizadas as sondagens (SPT 01 e SPT 02). O talude apresenta um ângulo de inclinação de aproximadamente 28° , sendo classificado como muito íngreme.

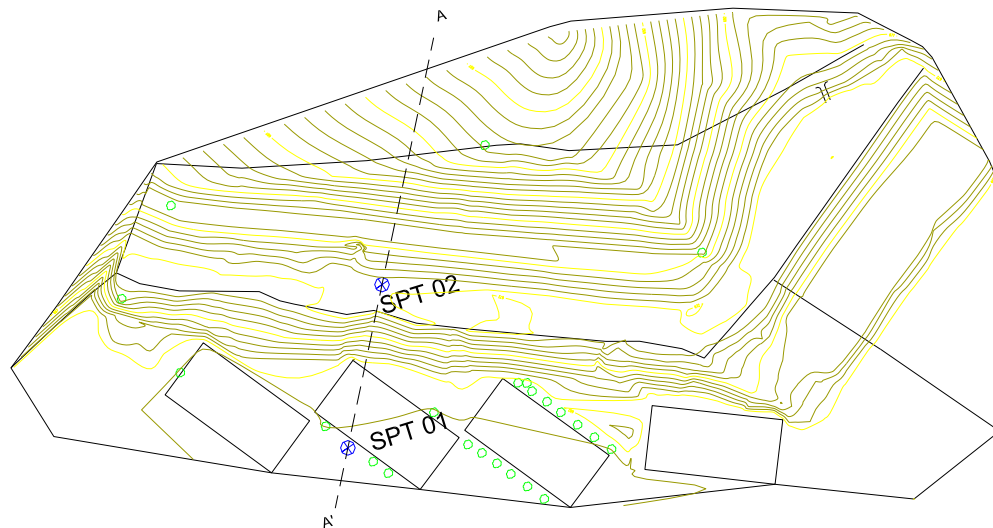


Figura 4.1 - Levantamento topográfico.

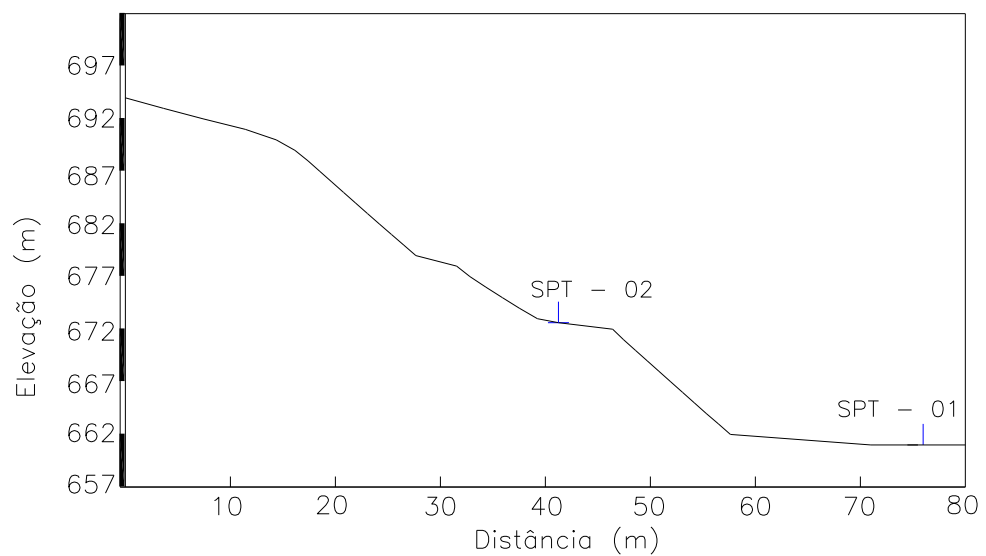


Figura 4.2 - Perfil do talude a partir da seção AA'.

4.2. Sondagem

A primeira sondagem (SPT – 01) foi realizada na cota inferior do talude. Entretanto, devido à existência de quadras de tênis próximas ao pé do talude, a sondagem (SPT – 01) teve que ser realizada a aproximadamente 15 metros do término do talude. O segundo furo de sondagem (SPT – 02) foi realizado no platô mediano do talude. O resultado da sondagem SPT - 01 e SPT - 02 são apresentadas, respectivamente, nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2.

No furo de sondagem SPT – 02 o nível do lençol freático foi encontrado a 11,0 metros de profundidade, enquanto que no furo de sondagem SPT – 01, o nível estava a 4,0 m, sendo ambos os valores em relação à superfície do terreno.

Assim, de posse dos materiais observados na sondagem e do perfil topográfico, construiu-se a estratigrafia apresentada na Figura 4.3. Observa-se que o talude apresenta uma camada superficial de um Silte Arenoso, sobreposto a uma camada mais profunda constituída quase que totalmente por uma Areia Fina.

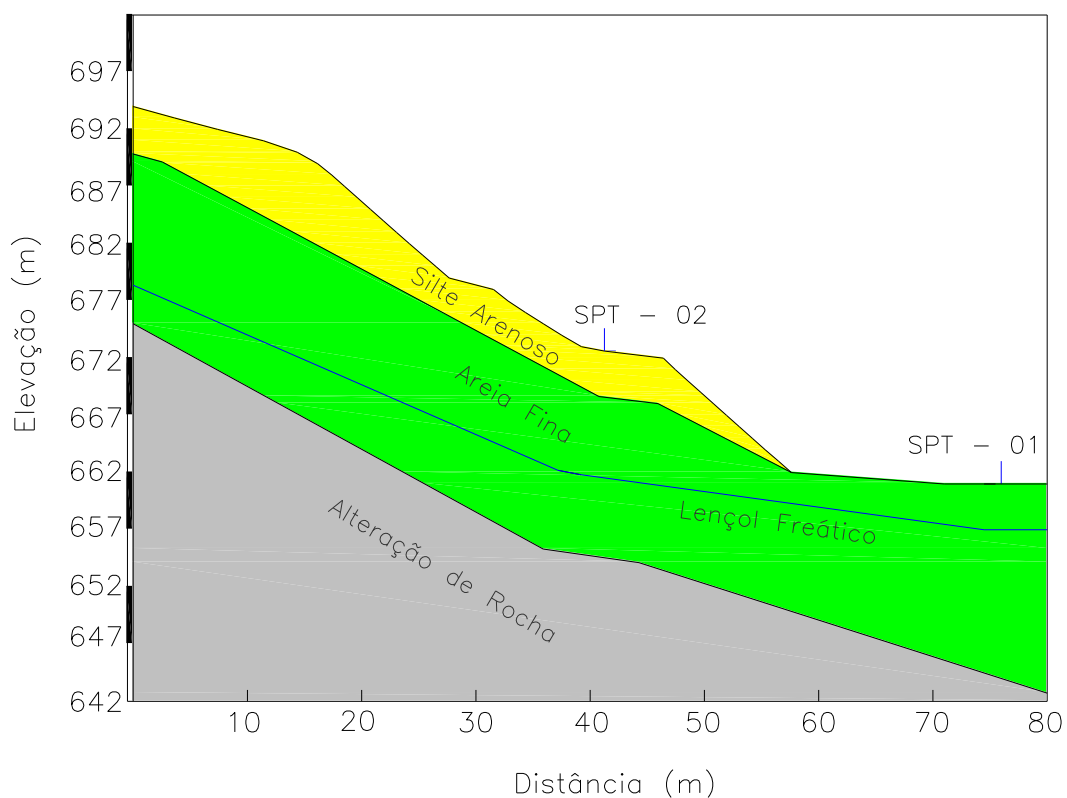


Figura 4.3 - Estratigrafia do talude e posição do lençol freático.

Tabela 4.1 - Resultados da sondagem SPT - 01

Avanço	Amostra		Prof. (m)		Nº de golpes			Classificação do material	Resistência (SPT)
	Nº	Tipo	De	A	15 (cm)	15 (cm)	15 (cm)		
S	1	R	1,0	1,45	5	7	9	Areia Fina	
S	2	R	2,0	2,45	3	5	6	Areia Fina	
T	3	R	3,0	3,45	3	4	6	Areia Fina	
T	4	R	4,0	4,45	3	6	8	Areia Fina	
T	5	R	5,0	5,45	3	5	8	Areia Fina	
T	6	R	6,0	6,45	3	4	5	Areia Fina	
T	7	R	7,0	7,45	8	6	5	Areia Fina	
T	8	R	8,0	8,45	5	3	3	Areia Fina	
T	9	R	9,0	9,45	4	5	8	Areia Fina	
T	10	R	10,0	10,45	6	7	9	Areia Fina	
T	11	L	11,0	11,45	3	4	5	Areia Fina	
T	12	R	12,0	12,45	4	5	7	Areia Fina	
T	13	R	13,0	13,45	5	8	14	Areia Fina	
T	14	R	14,0	14,45	6	14	13	Areia Grossa com pedregulho	
T	15	R	15,0	15,45	5	8	11	Areia Grossa com pedregulho	
T	16	R	16,0	16,45	10	12	17	Areia Grossa com pedregulho	
T	17	R	17,0	17,45	10	14	20	Alteração de rocha	

Notas:

- Na coluna avanço, "S" indica a seco e "T" trépano.
- Na coluna amostra, "R" indica representativa e "L" lavada.

Tabela 4.2 - Resultado da sondagem SPT - 02

Avanço	Amostra		Prof. (m)		Nº de golpes			Classificação do material	Resistência (SPT)
	Nº	Tipo	De	A	15 (cm)	15 (cm)	15 (cm)		
S	1	R	1,0	1,45	3	5	7	Silte arenoso	
S	2	R	1,9	2,35	3	5	10	Silte arenoso	
T	3	R	3,0	3,45	4	7	11	Silte arenoso	
T	4	R	4,0	4,45	5	8	10	Areia Fina	
T	5	R	5,0	5,45	5	8	12	Areia Fina	
T	6	R	6,0	6,45	6	11	22	Areia Fina	
T	7	R	7,0	7,45	7	13	18	Areia Fina	
T	8	R	8,0	8,45	6	11	13	Areia Fina	
T	9	R	9,0	9,45	11	13	23	Areia Fina	
T	10	R	10,0	10,45	8	13	14	Areia Fina	
T	11	R	11,0	11,45	5	6	7	Areia Fina	
T	12	R	12,0	12,45	6	9	13	Areia Fina	
T	13	R	13,0	13,45	3	4	7	Silte arenoso	
T	14	R	14,0	14,45	3	4	8	Silte arenoso	
T	15	R	15,0	15,45	3	5	6	Areia Fina	
T	16	R	16,0	16,45	4	6	11	Areia Fina	
T	17	R	17,0	17,45	7	5	11	Areia Fina	
T	18	R	18,0	18,45	9	15	18	Alteração de rocha	
T	19	R	19,0	19,45	12	35	20/5	Impenetrável	

Notas:
 - Na coluna avanço, "S" indica a seco e "T" trépano.
 - Na coluna amostra, "R" indica representativa e "L" lavada.

4.3. Ensaios de laboratório

4.3.1. Caracterização do solo

As amostras de solos deformados coletadas superficialmente próximas aos furos de sondagem confirmam a classificação tátil – visual realizada durante a sondagem. O solo coletado próximo do furo de sondagem SPT – 01 apresenta 69% de areia, 28% de silte e 4% de argila (Figura 4.4). Enquanto que o solo coletado próximo do furo SPT – 02 encontrou-se a curva granulométrica da Figura 4.5, na qual se observa que o material tem 29% de areia, 54% de silte e 17% de argila.

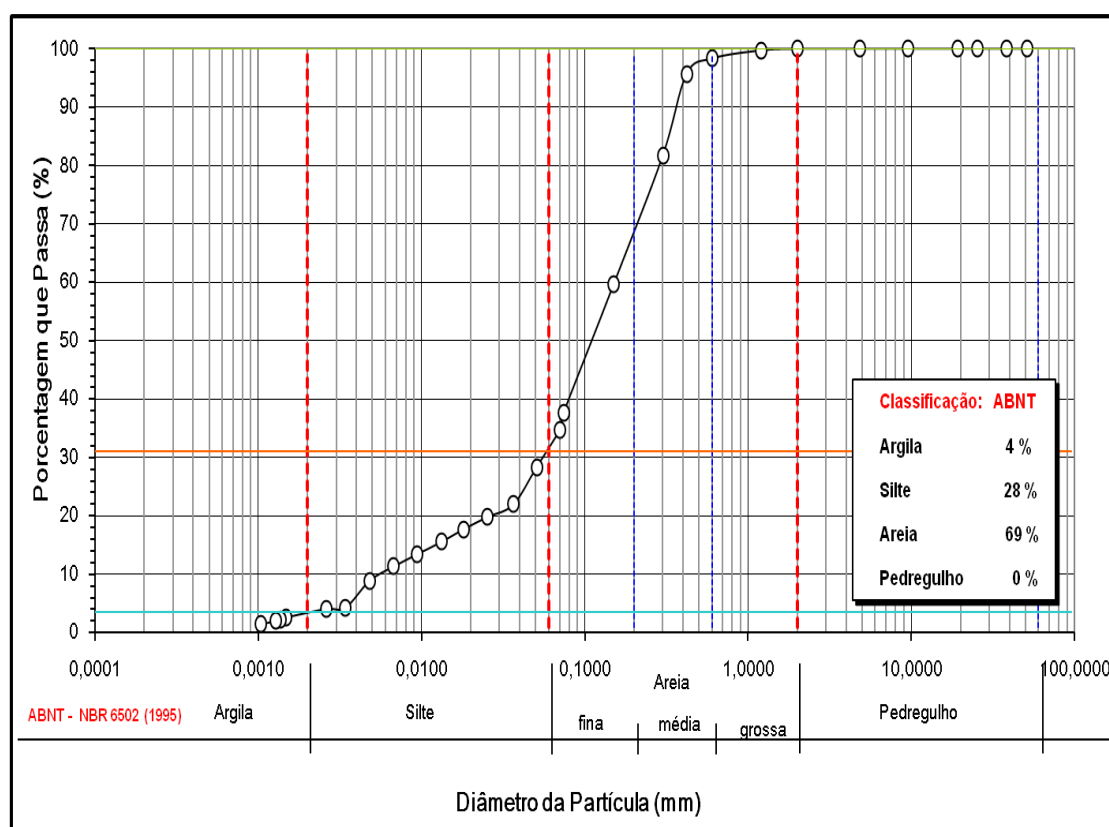


Figura 4.4 - Curva granulométrica da SPT - 01.

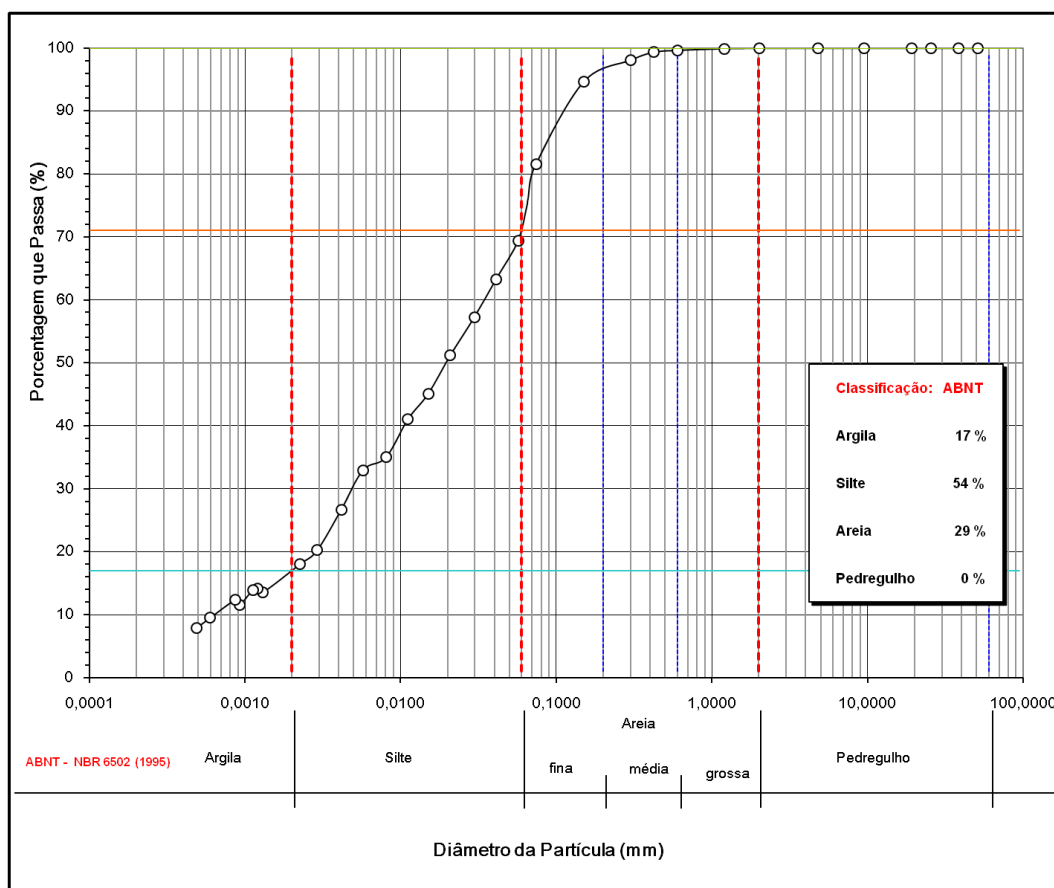


Figura 4.5 - Curva granulométrica da SPT - 02.

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores das massas específicas dos sólidos, dos limites de Atterberg e das condutividades hidráulicas saturadas dos dois tipos de solos coletados na seção AA' do talude.

Tabela 4.3 - Caracterização dos dois tipos de solos coletados na seção AA'

Solo	Limites de Atterberg (%)			γ_s (g/cm ³)	k_s (m/d)
	LL	LP	IP		
Areia Fina	38	21	17	2,706	0,216
Silte Arenoso	59	32	27	3,046	0,059

De acordo com o Sistema Universal de Classificação dos Solos estes dois materiais, Areia Fina e Silte Arenoso, são classificados, respectivamente, como SC e MH.

O valor do peso específico dos sólidos do material Silte Arenoso, 3,046 g/cm³, está acima do valor normalmente encontrado para solos da região de Viçosa. No entanto, este resultado corresponde à média de dois ensaios que apresentaram resultados parecidos. Seria necessária uma análise mineralógica para tentar esclarecer

os resultados encontrados. Tal análise não foi feita por se considerar que ultrapassaria o escopo do trabalho.

4.3.2. Parâmetros de resistência

Os parâmetros de resistência (Tabela 4.4) foram obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto em cada um dos solos que ocorrem no talude na seção AA'. Realizou-se ensaio com amostras saturadas e amostras naturais.

Tabela 4.4 - Parâmetros de resistência dos solos que ocorrem na Seção AA' utilizados nas análises numéricas

Solo	Estado da amostra	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (k/Pa)	ϕ' (°)
Areia Fina	Saturada	15,71	15,63	27,95
	Natural	15,51	50,86	28,00
Silte Arenoso	Saturada	14,60	44,86	19,35
	Natural	15,08	60,86	34,56

Observa-se que o Silte Arenoso, como se espera, apresentou coesão (c') maior, quando comparado com a Areia Fina, tanto para amostra saturada quanto para natural. Como sugerido pela literatura, o valor do ângulo de atrito (ϕ') da Areia Fina foi igual para o estado saturado e o natural. Entretanto, isso não foi observado para o Silte Arenoso. Uma possível explicação pode ser a diferença entre as amostras ensaiadas. Em ambos estados, ensaiaram-se três amostras indeformadas do material. Durante a moldagem das amostras, observou-se que elas não ficaram totalmente homogêneas, o que pode ter levado a ângulos de atritos diferentes.

Os valores do peso específico natural (γ_{nat}) obtidos para os dois solos estão abaixo dos valores normalmente encontrados para solos da região. Possivelmente isso se deve ao fato das amostras coletadas serem superficiais.

Da Figura 4.6 até a Figura 4.9 são apresentadas as curvas obtidas no ensaio de cisalhamento direto de acordo com as tensões normais utilizadas, 50, 150 e 300 kPa.

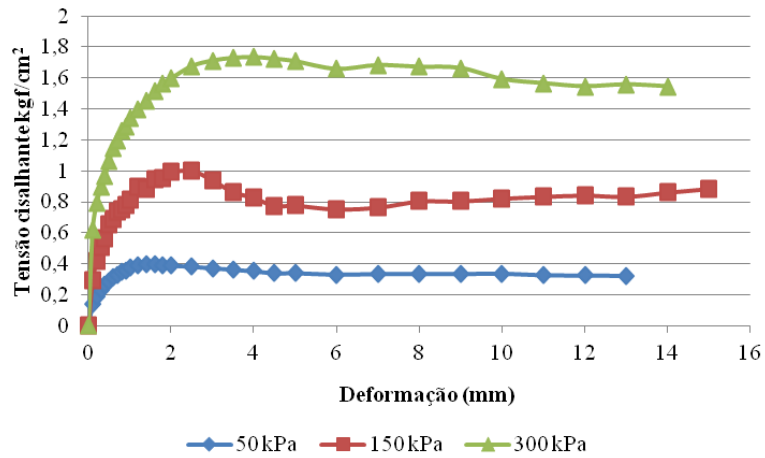


Figura 4.6 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação da Areia Fina no estado saturado.

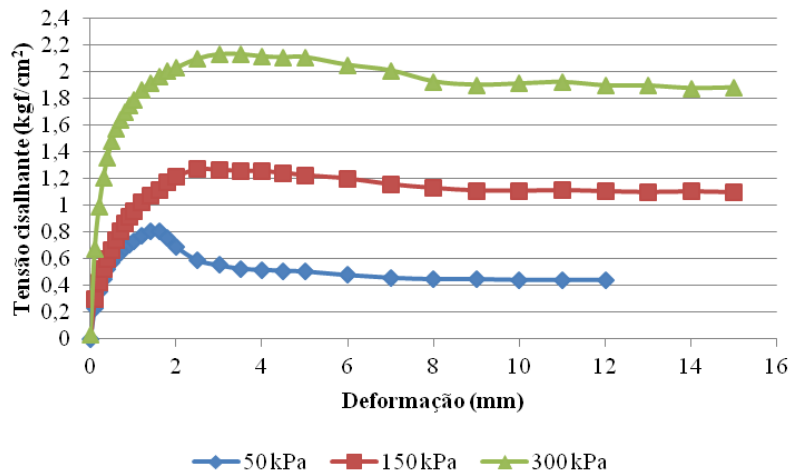


Figura 4.7 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação da Areia Fina no estado natural.

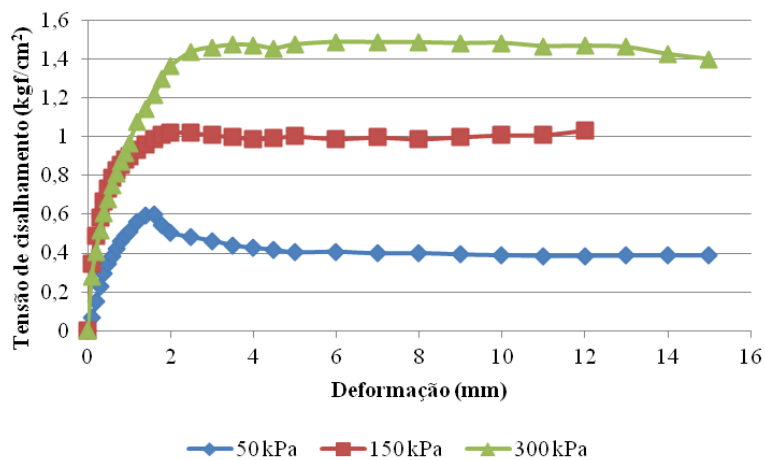


Figura 4.8 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação do Silte Arenoso no estado saturado.

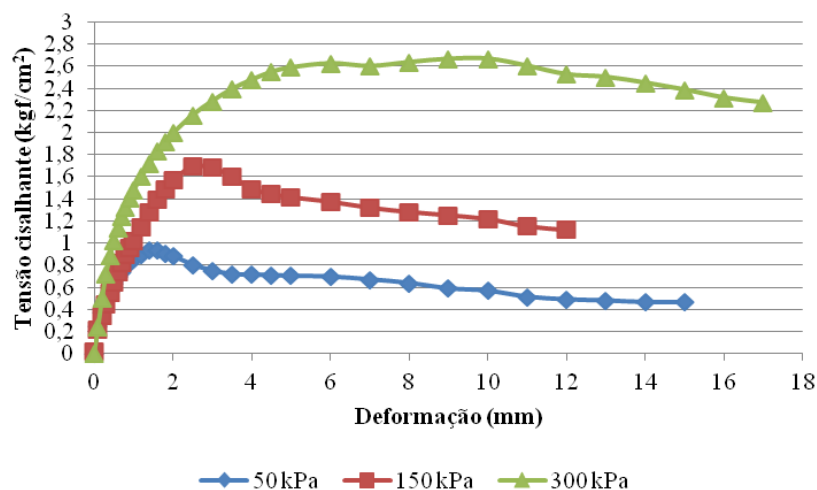


Figura 4.9 - Curva de tensão de cisalhamento versus deformação do Silte Arenoso no estado natural.

Nas análises numéricas, utilizaram-se os parâmetros de resistências obtidos para as amostras saturadas, porque como os ensaios foram lentos, postulou-se que os parâmetros obtidos eram efetivos.

4.3.3. Curvas de retenção de água

Os pontos de baixa sucção das curvas de retenção de água foram obtidos no laboratório utilizando uma centrífuga, enquanto que os pontos de alta sucção foram obtidos a partir do método do papel filtro. A curva que melhor se ajustou aos pontos obtidos em laboratório foi a da equação proposta por Fredlund e Xing (1994).

Na Tabela 4.5 são apresentados os parâmetros do modelo de Fredlund & Xing (1994) para o ajuste das curvas de retenção de água no solo com base nos dados obtidos pelo método do papel filtro e utilizando a ferramenta Solver da planilha eletrônica Excel.

A Figura 4.10 apresenta a curva de retenção para o solo da SPT – 01. Para este solo, obteve-se sucções na centrífuga até, aproximadamente, 134 kPa. A partir deste valor, as sucções foram obtidas pelo método do papel filtro. O erro mínimo entre a curva teórica de Fredlund e Xing e os dados obtidos em laboratório para a amostra SPT – 01 foi de 2,29%.

Tabela 4.5 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pelo modelo de Fredlund & Xing (1994)

Solo	Parâmetros					
	a (kPa)	n	m	ψ_r (kPa)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)
Areia Fina	50	21,29	0,95	700	0,07	0,417
Silte Arenoso	145	4,83	0,61	840	0,09	0,536

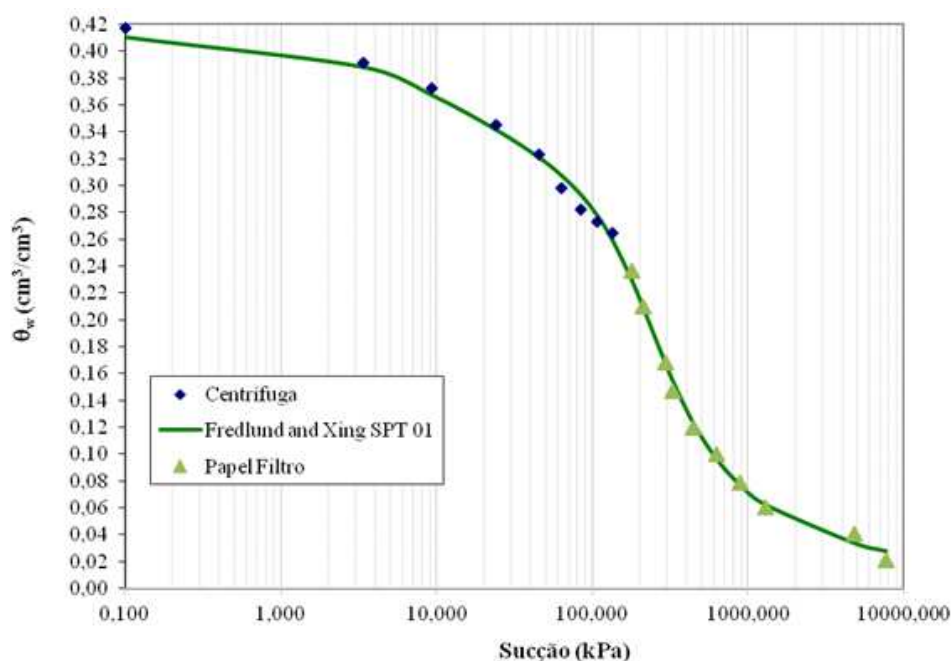


Figura 4.10 - Curva de retenção do solo Areia Fina (SPT - 01).

Na Figura 4.11, tem-se a curva de retenção do solo Silte Arenoso (SPT – 02) obtida com a centrífuga até sucções, aproximadamente, de 230 kPa. Os demais pontos foram obtidos pelo método do papel filtro. Neste caso, o erro encontrado entre a curva teórica e os dados de laboratório foi de 2,25%.

Na Figura 4.12 apresentam-se as duas curvas de retenção obtidas neste trabalho. Pode-se notar que o solo mais arenoso (SPT – 01) perde água com muito mais facilidade que o solo siltoso (SPT – 02). Este solo, por sua vez, necessita de amplas variações de sucção para modificar sensivelmente o valor da umidade. Outro ponto

importante, é que o decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão de entrada de ar e suaviza a inclinação da curva de retenção de água. Porém, esta assertiva não pode ser observada nitidamente. Uma possível explicação é o fato do solo mais fino ter 29% de partículas do tamanho areia.

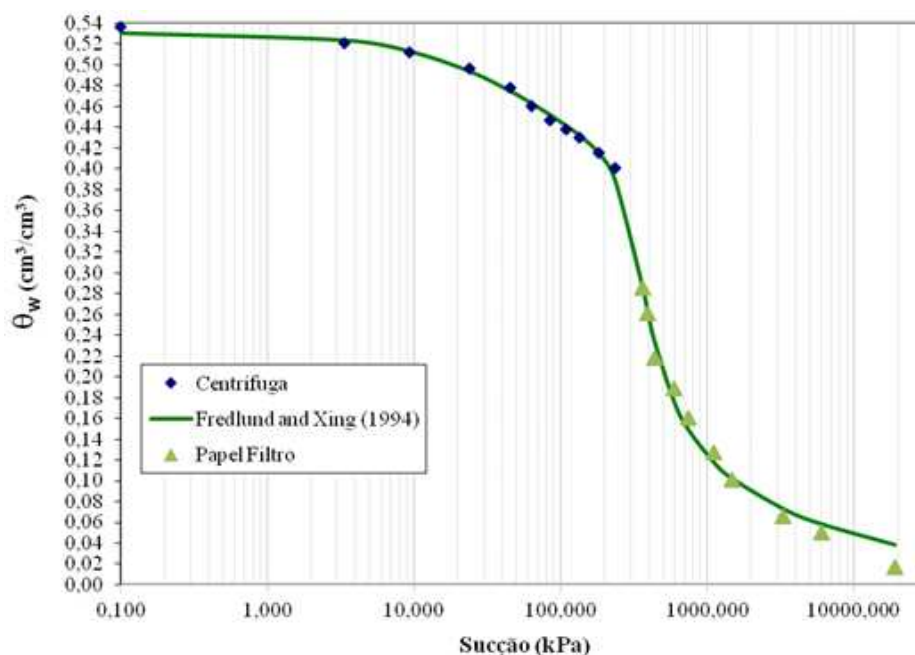


Figura 4.11 - Curva de retenção do solo Silte Arenoso (SPT - 02).

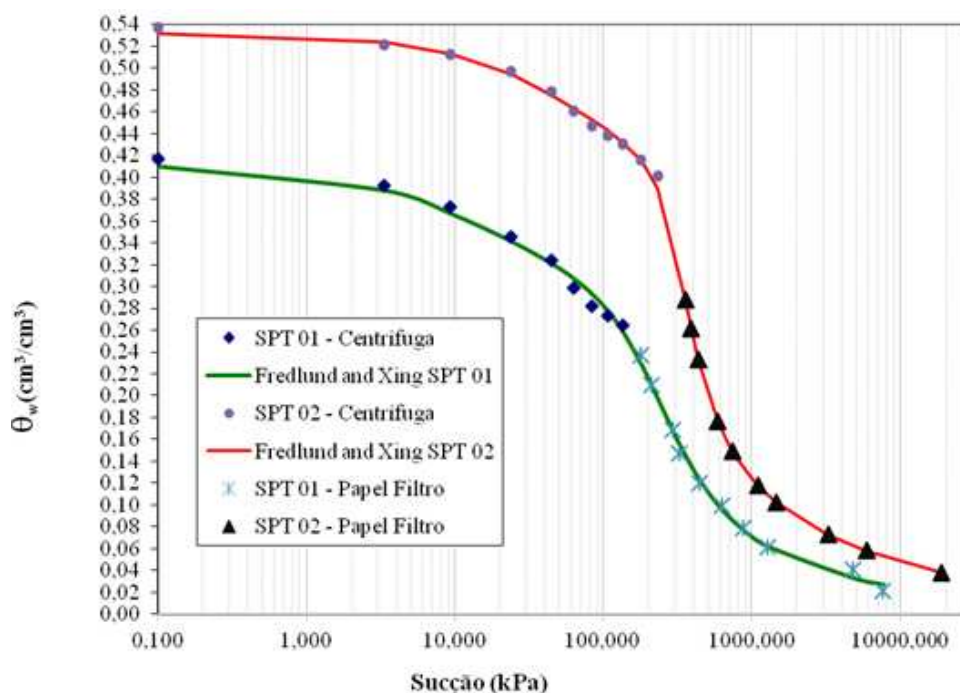


Figura 4.12 - Curva característica para a Areia Fina (SPT 01) e Silte Arenoso (SPT 02).

4.3.4. Curvas de condutividade hidráulica

As curvas de condutividade hidráulica foram obtidas de forma indireta a partir dos dados das curvas de retenção de água, das condutividades hidráulicas saturadas e da equação proposta por Fredlund e Xing (Equação 19).

Nas Figura 4.13 e Figura 4.14 estão plotados os valores da condutividade hidráulica obtidos de forma indireta, para as amostras SPT – 01 e SPT – 02, respectivamente.

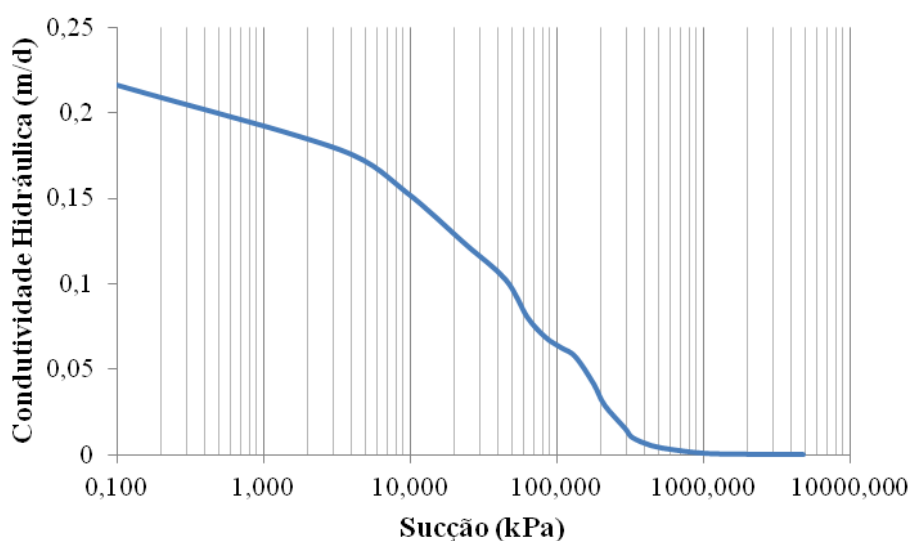


Figura 4.13 - Condutividade hidráulica para a amostra SPT - 01.

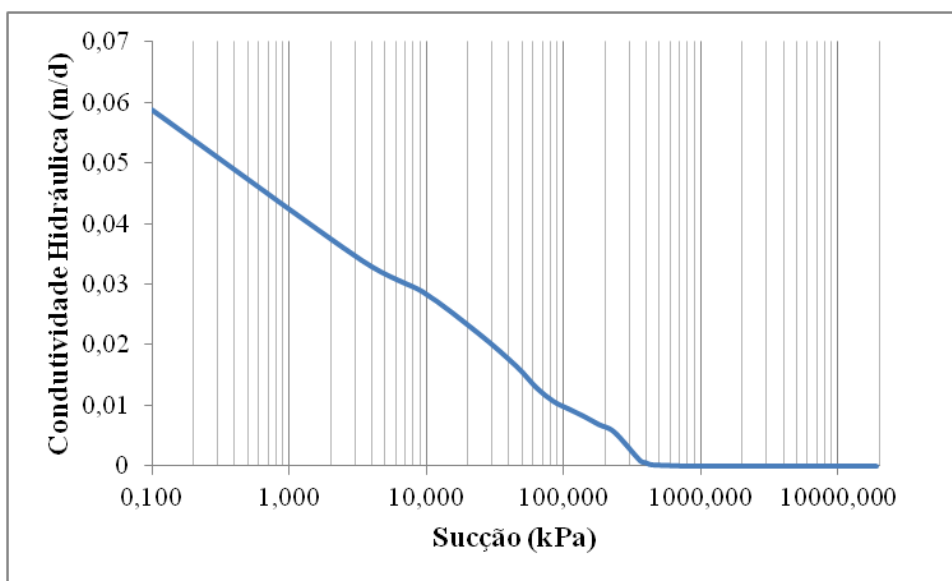


Figura 4.14 - Condutividade hidráulica para a amostra SPT - 02.

4.4. Análise numérica

4.4.1. Malha de elementos finitos e condições iniciais e de contorno

A Figura 4.15 apresenta a malha de elementos finitos usada na modelagem numérica da seção transversal do talude destacada na Figura 4.1. As linhas e setas verdes localizadas na superfície apresentam as condições climáticas de vegetação introduzidas no VADOSE/W. Adotou-se a hipótese que há uma distribuição linear da sucção ao longo da profundidade.

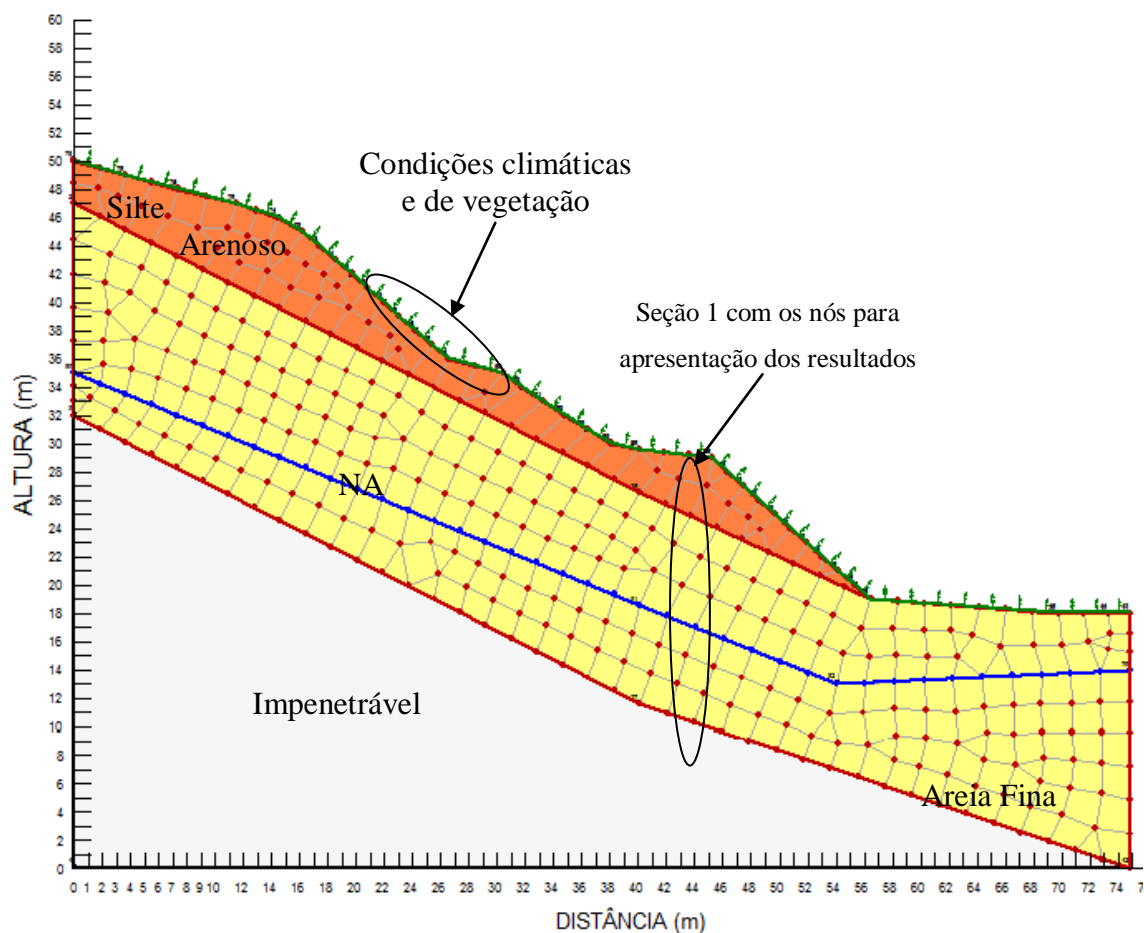


Figura 4.15 - Malha de elementos Finitos (491 nós e 451 elementos).

Inicialmente, levando-se em conta a posição do lençol freático criou-se o estado de sucção inicial e teores de umidades volumétricas iniciais.

Para apresentação dos resultados obtidos no VADOSE/W, adotou-se aleatoriamente os nós apresentados na seção (1) destacada na Figura 4.15. Estes nós estão contidos ao longo dos dois solos do talude, Silte Arenoso e Areia Fina.

A Figura 4.16 apresenta os valores de poro-pressão ao longo da profundidade para a seção apresentada na Figura 4.15 na condição inicial. A sinuosidade da distribuição é devida aos pontos da seção 1 não estarem na mesma vertical

Após a obtenção das condições iniciais, procedeu-se à análise transiente, impondo-se as condições climáticas na superfície do talude e, diariamente, avaliando-se os valores de umidade do talude e, em seguida, por meio do programa SLOPE/W, calculando-se o fator de segurança mínimo e a superfície crítica correspondente.

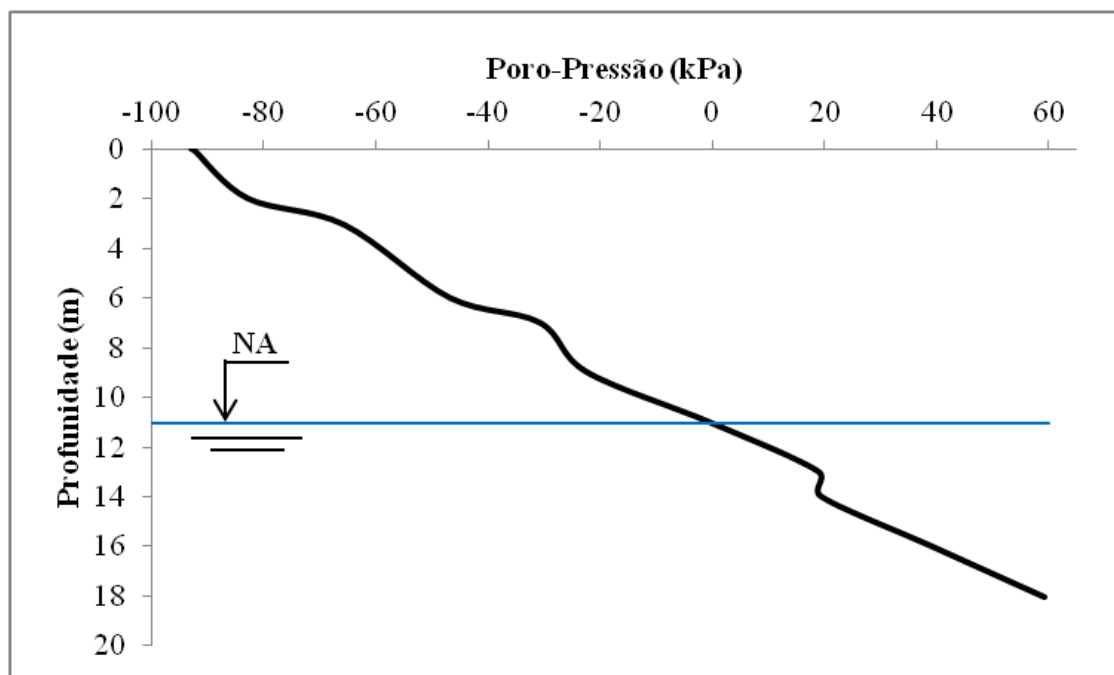


Figura 4.16 - Distribuição da poro-pressão ao longo da profundidade na condição inicial.

4.4.2. Perfis de umidade volumétrica e sucção ao longo do ano

Na Figura 4.17 está apresentada a variação da umidade volumétrica ao longo do ano para os nós mostrados na Figura 4.15. As curvas apresentam a umidade volumétrica para diferentes dias. O dia 0 representa o estado inicial. Entre os dias 1 e 19 de 2011 houve um período chuvoso, cuja precipitação acumulada foi de 183,8 mm.

Após este último dia há um curto período de seca até próximo do dia 50. Entre os dias 50 e 100 a precipitação acumulada foi de 414,4 mm. A partir daí inicia-se o período de seca que se estende até próximo do dia 284. Neste período o total precipitado foi de 41,0 mm. Do dia 284 a 365 ocorre o período mais chuvoso do referido ano, acumulando um total de 782,9 mm. Nesta figura, analisando o ponto da superfície, profundidade 0 m, tem-se nos dias 0, 19, 50, 100, 284 e 365, respectivamente, os seguintes valores de umidade volumétrica: 0,443; 0,480; 0,434; 0,523; 0,466 e 0,526. Assim, tem-se que, como era esperado, a umidade volumétrica variou com as condições climáticas impostas no talude.

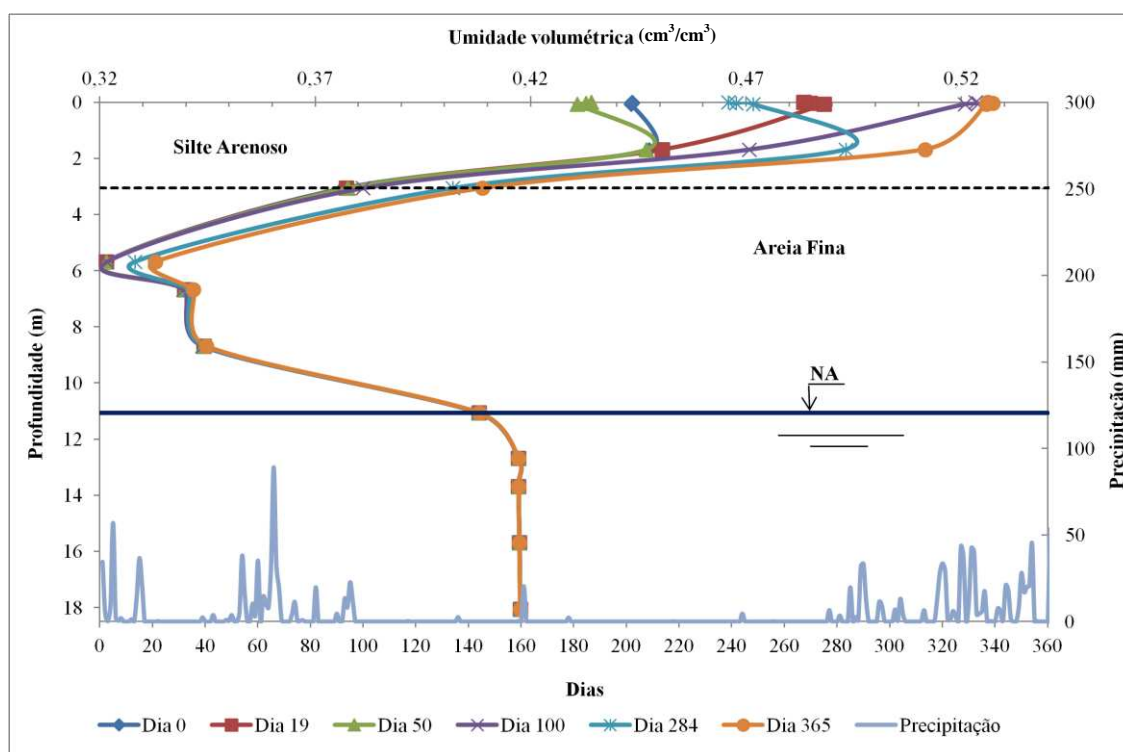


Figura 4.17 – Perfil de umidade volumétrica ao longo do ano próximo ao furo de sondagem SPT 02.

Ainda na Figura 4.17, observa-se que os valores de umidade volumétrica nos pontos próximos a superfície, localizados no Silte Arenoso, naturalmente oscilam em amplitudes maiores comparados com os pontos na Areia Fina que está em uma profundidade maior. Além disso, como o solo superior possui menor valor de condutividade hidráulica saturada que o solo inferior, a precipitação infiltrada demora a atingir o solo inferior. Essa assertiva é ilustrada pelas curvas do teor de umidade volumétrica dos dias 100 e 284, que são o último dia do período chuvoso do início do ano de 2011 e o último dia do período seco, respectivamente. No dia 100, para o ponto situado na superfície, situado no Site Arenoso, há um elevado valor do teor de umidade

volumétrico de 0,523. Após um período seco, no dia 284 o valor diminui para, aproximadamente, 0,466. Analisando o ponto de profundidade próxima a 6,0 m, situado na Areia Fina, observa-se o contrário do ponto anterior. No dia 100 a umidade volumétrica ainda é igual ao valor do dia 0, que é de 0,322, o que demonstra que o precipitado neste período ainda não atingiu a camada de solo desta profundidade. Com mais tempo para a infiltração, este valor aumenta para 0,328 no dia 284.

A Figura 4.18 apresenta a variação da umidade volumétrica para um ponto na superfície do talude, situado no Silte Arenoso, na profundidade 3,0 m, na interface dos dois materiais, e na profundidade 7,0 m, meio da camada de Areia Fina. Essa figura confirma o exposto anteriormente, que quanto mais profundo menor a variação desta propriedade física. A partir de 7,0 m não há variação ao longo do ano.

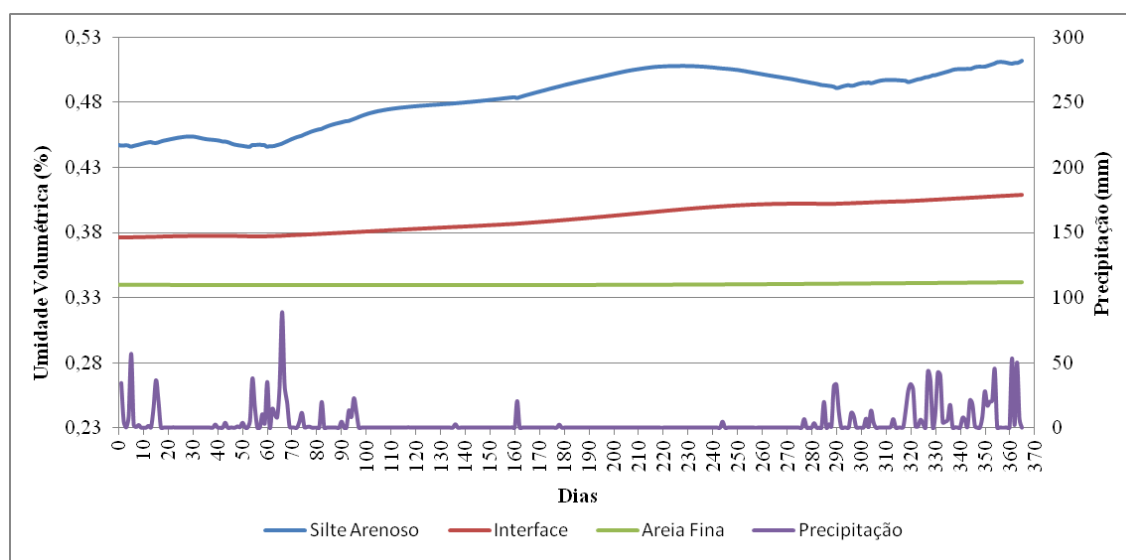


Figura 4.18 - Variação da umidade volumétrica ao longo do ano para três pontos do talude.

Para analisar melhor a variação da umidade volumétrica na Areia Fina, adotou-se uma seção (2) com novos nós todos situados neste material, como apresentado na Figura 4.15.

A Figura 4.19, apresenta que a variação da umidade volumétrica da Areia Fina para um ponto na superfície que é influenciado pelas condições climáticas. Também se observa a influência do lençol freático nos valores dessa propriedade física do solo. Devido à capilaridade, à medida que se analisa pontos mais próximos a zona saturada, a umidade volumétrica aumenta.

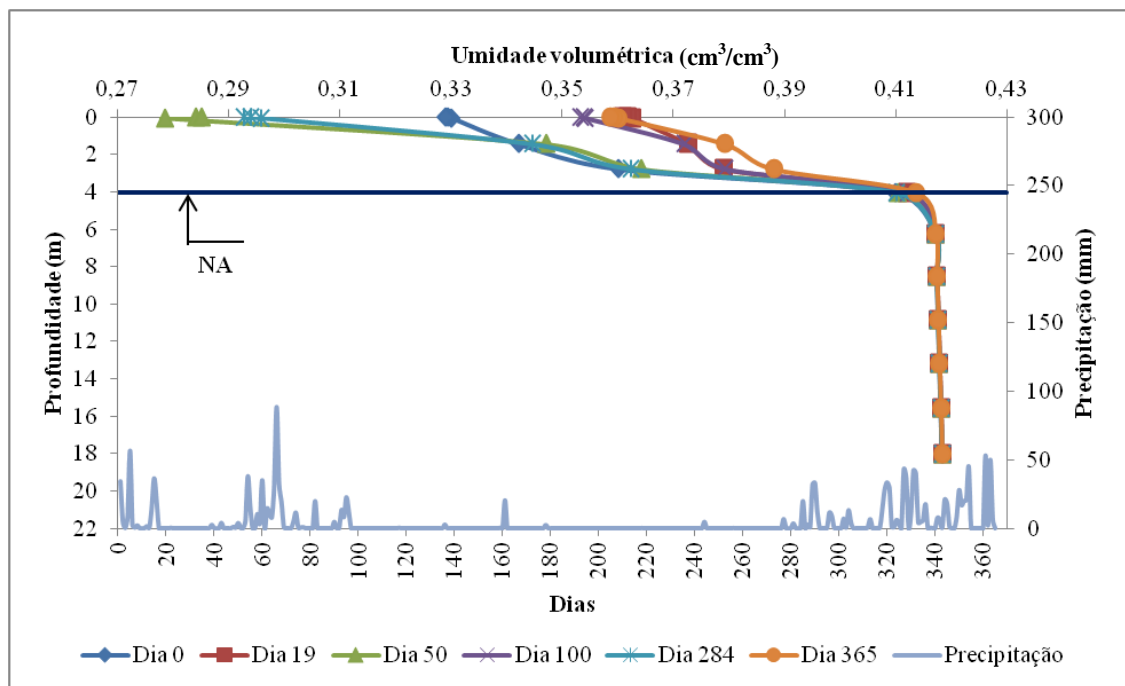


Figura 4.19 - Variação da umidade volumétrica ao longo do ano apenas para a areia fina.

Pela Figura 4.20, tem-se a variação da poro-pressão para os mesmos períodos apresentados para a umidade volumétrica. Acima do lençol freático a poro-pressão é negativa (sucção), sendo que a sucção favorece a estabilidade do talude, ou seja, quanto maiores os valores de sucção, maiores os valores do fator de segurança do talude. A sucção e a umidade volumétrica apresentam correlação negativa, ou seja, quando a umidade volumétrica aumenta, a sucção diminui. Na Figura 4.20 ao analisar um ponto na superfície, para os dias 0, 19, 50, 100, 284 e 365, os valores da sucção, respectivamente, são: 92,83; 41,38; 118,43; 2,21; 55,98 e 1,31. Novamente se tem maior variação quanto mais superficial for o ponto analisado. Apenas próximo ao dia 100 a Areia Fina começa a apresentar variação no valor da sucção para os pontos deste material de menor profundidade. Pontos situados a partir de 9,0 m de profundidade não apresentam variação da sucção ao longo do ano.

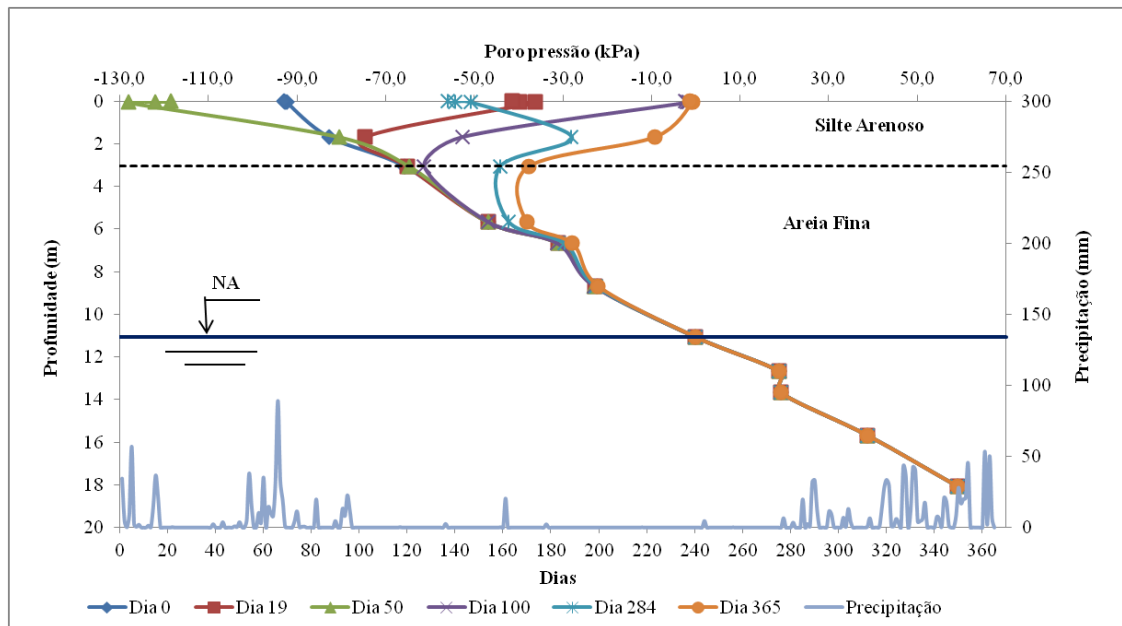


Figura 4.20 - Perfil da poro pressão ao longo do ano para os nós da seção (1).

A Figura 4.21 apresenta a variação da sucção no período entre os dias 62 e 70.

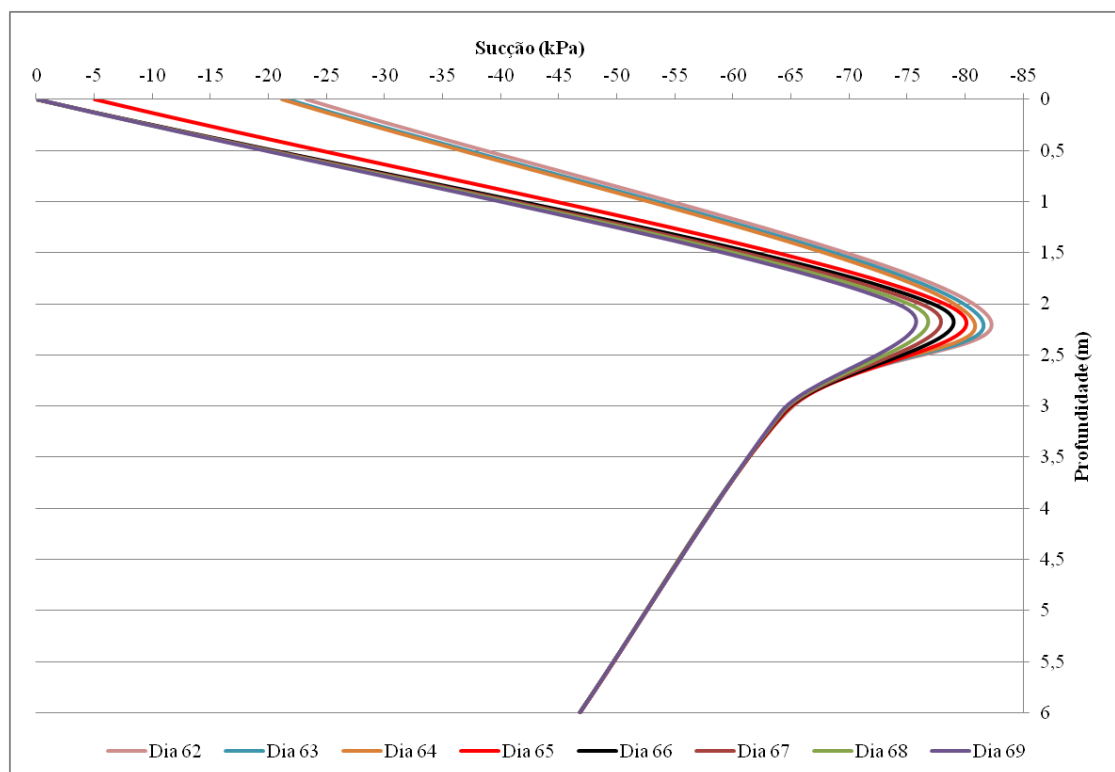


Figura 4.21 - Perfil da sucção entre os dias 62 e 70.

Nos dias 62, 63 e 64, as alturas precipitadas foram, respectivamente, 14,4; 10,3 e 8,0 mm, acumulando um total de 32,7 mm. Tem-se que, pela Figura 4.21, nesses dias não se observa variação significativa no valor da sucção ao longo da profundidade, ficando o valor próximo de 22,0 kPa. No dia 65 houve uma precipitação de 32,1 mm,

fazendo com que a sucção diminuísse consideravelmente para próximo de 5,0 kPa, porém ainda não se tem sucção nula, como a partir do dia 66.

As precipitações ocorridas nos dias 66, 67, 68 e 69 foram respectivamente: 89,0; 32,9; 19,6 e 0,7 mm. O solo Silte Arenoso, no qual está localizado o ponto de profundidade zero, possui uma condutividade hidráulica saturada de 58,7 mm/d, valor inferior à precipitação de 89,0 mm ocorrida no dia 66. Tem-se, também, que nem tudo que precipita é infiltrado, já que pode haver escoamento superficial.

Ocorre que a sucção é nula apenas quando ocorrer uma precipitação de longa duração e a sua intensidade se aproximar do valor da condutividade hidráulica saturada do solo na superfície. Assim, a Figura 4.21 apresenta resultados similares aos obtidos por Zhang et al. (2004), que relacionaram a variação da sucção com a permeabilidade no estado saturado (k_s), com o tempo, para uma determinada intensidade pluviométrica constante (I).

Quando a intensidade pluviométrica é menor do que a condutividade hidráulica saturada do solo, como nos dias 62, 63 e 64, não há formação de uma frente de saturação, ocorre apenas uma frente úmida que eleva a umidade do solo em seu interior do valor inicial para um valor final. Aqui, não se chega até um valor nulo de sucção. Entre esses dias, nos quais se teve um acumulado de 32,7 mm, não se observa grandes reduções no valor da sucção. Por exemplo, tomando-se a profundidade de 1,0 m, os valores ficaram em torno de 53,0 e 55,0 kPa.

Quando a intensidade pluviométrica é maior ou igual à condutividade hidráulica saturada do solo, como no dia 66, a abundância de água na superfície propicia a formação de uma frente de saturação responsável pela elevação da umidade do solo em seu interior até a máxima umidade possível de ser atingida por percolação. Neste caso, a sucção na superfície se anula. Porém, antes mesmo da saturação superficial ocorrida no dia 66, a precipitação de alta intensidade ocorrida no dia 65 já provocou considerável redução na sucção. Neste dia choveu 32,1 mm, valor quase igual ao acumulado nos três dias anteriores. Isso fez com que o valor de sucção diminuísse para 45,0 kPa, aproximadamente, caracterizando o início da formação da frente de saturação.

Os pontos azuis superficiais nas Figura 4.22 e Figura 4.23 apresentam a sucção nula. No dia 65 (Figura 4.22) a superfície começa a saturar em alguns pontos, ficando completamente saturada no dia 66 (Figura 4.23).

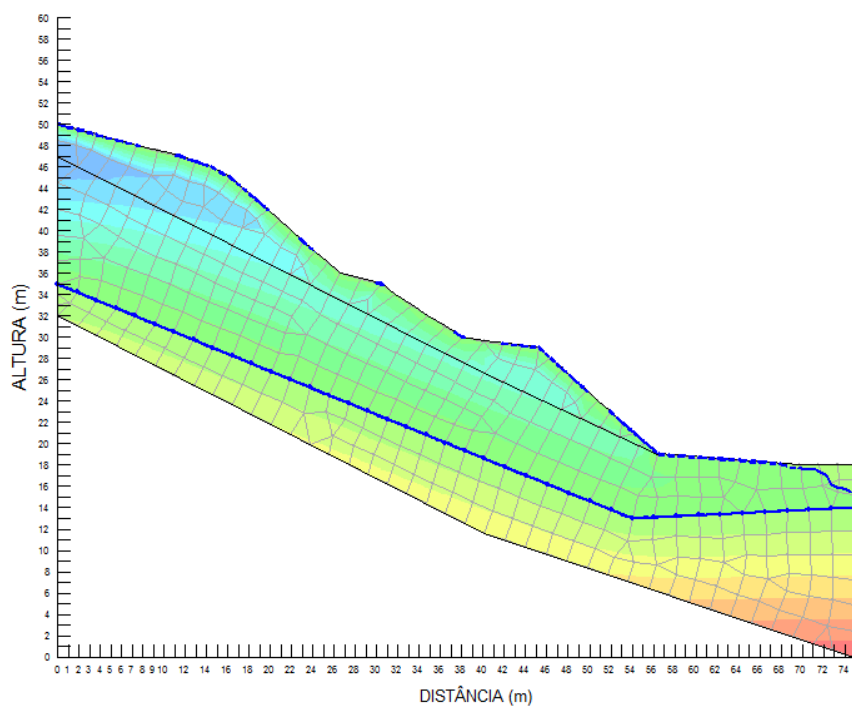


Figura 4.22 - Condições de poro-pressão no dia 65.

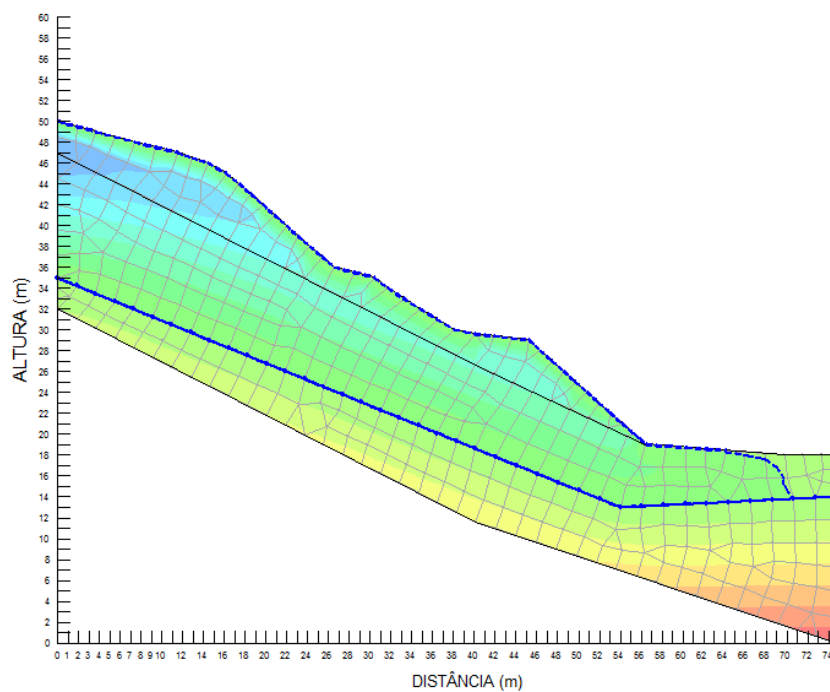


Figura 4.23 - Condições de poro-pressão no dia 66.

4.4.3. Fator de segurança do talude

Na Figura 4.24 é apresentada a variação dos fatores de segurança ao longo do período analisado. Todos os fatores de segurança foram calculados pelo método de Bishop buscando a superfície com fator de segurança mínimo. Nota-se que apesar das precipitações de longa duração diminuir o fator de segurança do talude, o menor valor encontrado é de 1,545 nos dias 354 e 365. Assim, apesar de no período de dezembro de 2011 ter ocorrido uma ruptura no talude ao lado do estudado, que apresenta outra condição de topografia, observa-se numericamente o que já se constatou em campo, ou seja, a precipitação acumulada no referido mês não foi capaz de romper o talude estudado nesta dissertação. Nota-se que fator de segurança varia apenas a partir da segunda casa decimal, isso porque o SLOPE/W calcula o valor de segurança na base da superfície de ruptura, local em que pouco se variou o valor da sucção ao longo do ano.

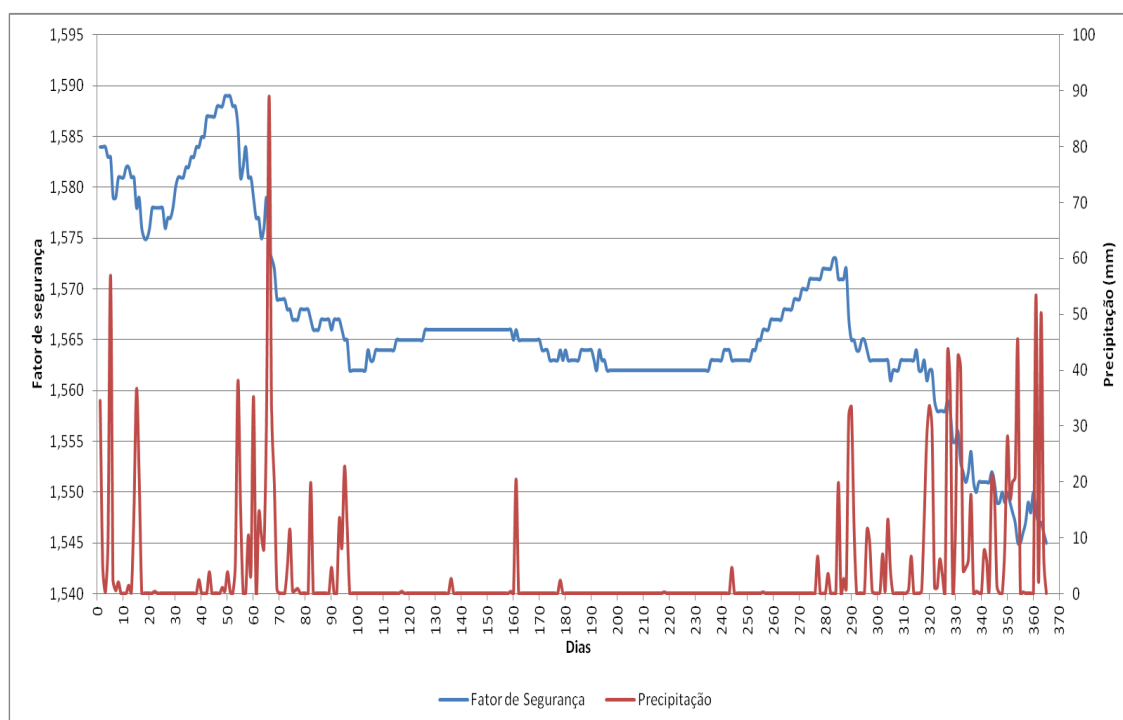


Figura 4.24 - Resultados das Análises de Estabilidade ao longo do período analisado (01/01/11 a 31/12/11).

Como o valor do fator de segurança decresceu acentuadamente durante o período chuvoso no final de 2011, questionou-se se em 2012 este valor continuaria a diminuir ao longo do ano. Assim, de posse dos dados climáticos de 2012, analisou-se o valor do fator de segurança para alguns dias deste ano, de forma a se ter o seu comportamento. A Figura 4.25 apresenta estes valores. Nela, percebe-se um

comportamento similar ao ano de 2011, ou seja, longos períodos chuvosos tendem a diminuir o valor do fator de segurança e longos períodos secos tendem a aumentar estes valores. Entretanto, os máximos valores encontrados em 2012 foram menores que os máximos de 2011. Isso pode ser explicado pelo fato deste último ano ter sido mais chuvoso que o anterior. Enquanto o período seco se iniciou no dia 100 e terminou por volta do dia 285 em 2011, em 2012 este período foi mais curto, iniciando após o dia 160 e terminando no dia 255.

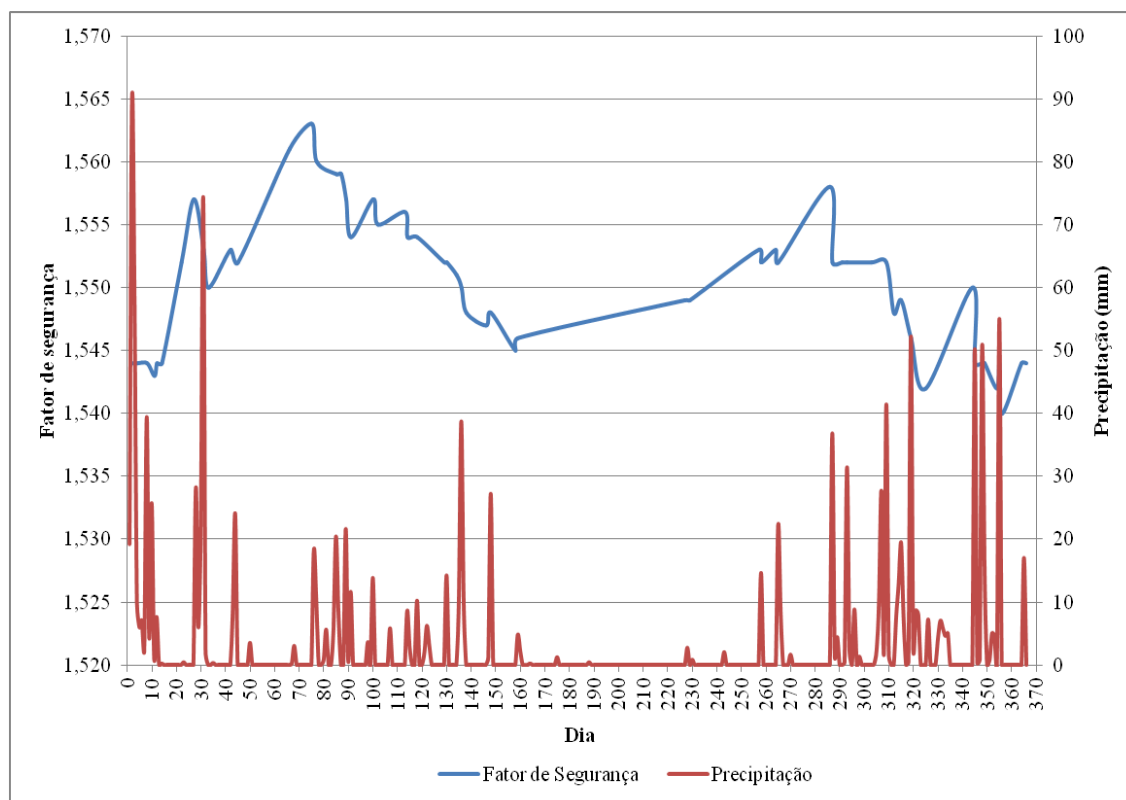


Figura 4.25 - Variação do fator de segurança para alguns dias ao longo de 2012.

A Figura 4.26 apresenta o valor do fator de segurança para o último dia de períodos secos e chuvosos ocorridos ao longo do ano de 2011. Nos primeiros 19 dias do ano, a precipitação acumulada foi de 183,8 mm, o que diminuiu o fator de segurança de 1,584 para 1,575. Entre os dias 20 e 50, houve um período seco cuja precipitação acumulada foi de apenas 11,7 mm, elevando o fator para 1,589. Um novo período chuvoso ocorreu até o dia 100. Neste período se acumulou 414,4 mm, provocando uma queda no valor do fator de segurança para 1,562. A partir daí há um longo período seco de, aproximadamente, seis meses, tendo precipitado apenas 41 mm. Assim, o fator de segurança subiu para 1,573. Porém, como pôde ser observado na Figura 4.24, ao longo deste período o valor tendeu a ficar entre 1,563 e 1,564, só tendo acréscimo mais

expressivo nos últimos 20 dias deste período. Assim, tem-se que o aumento do fator de segurança após a chuva ter cessado parece ocorrer em um razão menor do que a redução do fator durante o período de chuva, fato que também foi observado por Fredlund e Rahardjo (1993). Após o dia 284 tem início o último e mais chuvoso período do ano, tendo acumulado 782,9 mm, o que fez com que o fator de segurança alcançasse seu menor valor, 1,545.

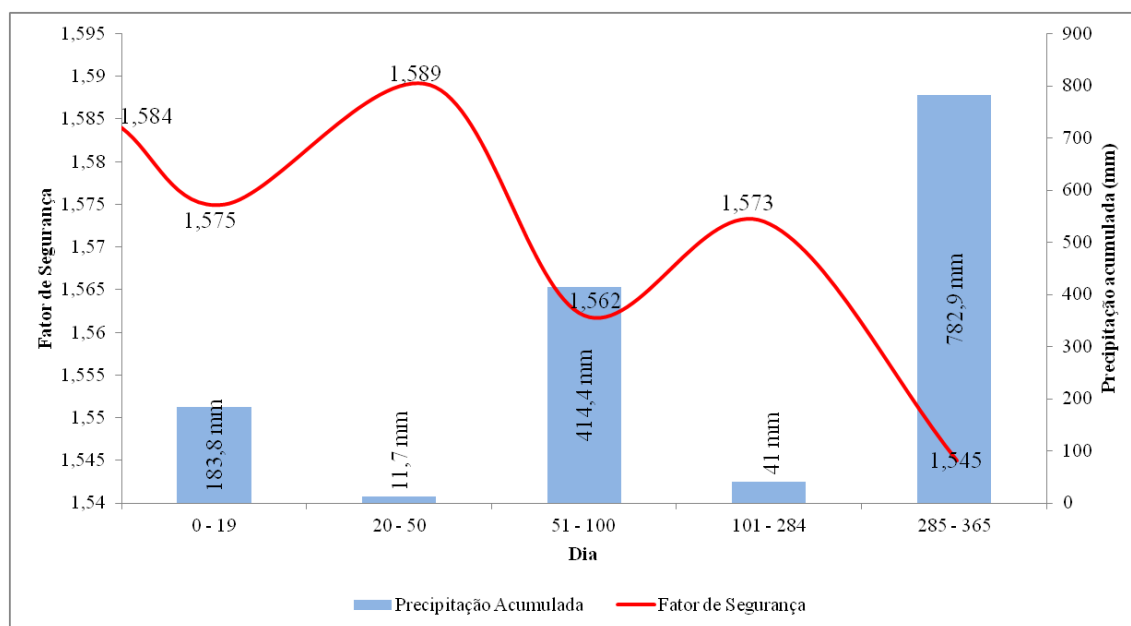


Figura 4.26 - Variação do fator de segurança de acordo com períodos secos e chuvosos ao longo do ano.

Analisando a Figura 4.27, percebe-se que o valor do fator de segurança é diretamente proporcional à sucção. Na figura estão apresentados os valores destas duas variáveis para um ponto próximo à superfície, já que, como discutido anteriormente, os pontos próximos à superfície sofrem variações maiores de umidade volumétrica. Os valores apresentados são referentes aos dias 19, 50, 100, 284 e 365. Assim, como estes dias representam o fim de um período seco ou chuvoso, tem-se que a medida que ocorre um período de chuva, como entre os dias 0 e 19, a frente de infiltração avança no talude aumentando a umidade volumétrica, o que diminui a sucção e, conseqüentemente o valor do fator de segurança, sendo que para o período seco, como entre os dias 100 e 284, o contrário também é verdadeiro.

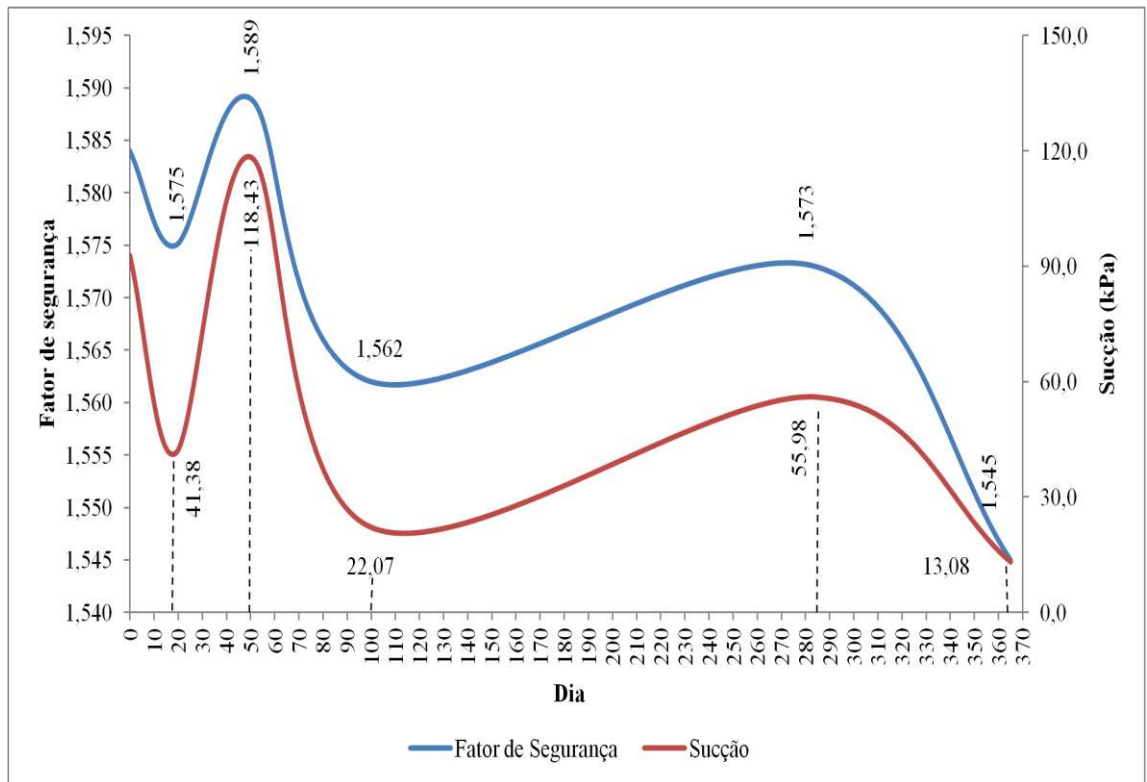


Figura 4.27 - Relação entre a variação do fator de segurança e a sucção ao longo do ano.

Pela Figura 4.28, observa-se a correlação negativa entre o fator de segurança e a umidade volumétrica para um ponto na superfície do talude, ou seja, quando há infiltração a umidade volumétrica aumenta e diminui, assim, o valor do fator de segurança.

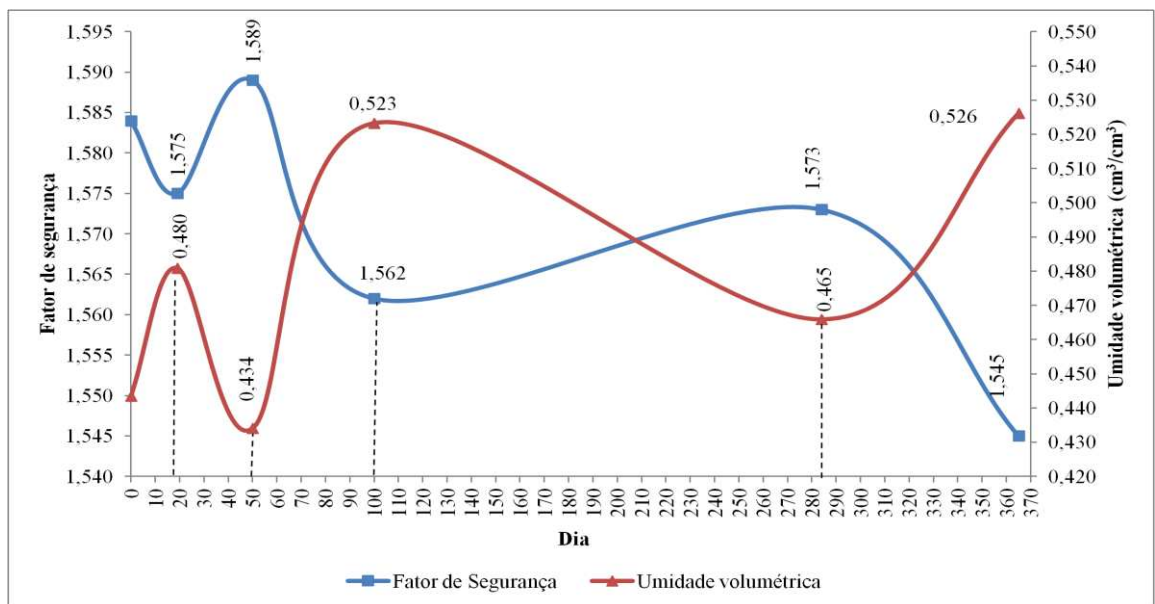


Figura 4.28 - Relação entre a variação do fator de segurança e a umidade volumétrica para um ponto na superfície do talude ao longo do ano.

A Figura 4.29 apresenta a superfície crítica de ruptura do talude para o dia 365, no qual se encontrou o menor fator de segurança para o ano de 2011. Observou-se que essa superfície crítica pouco variou ao longo do ano.

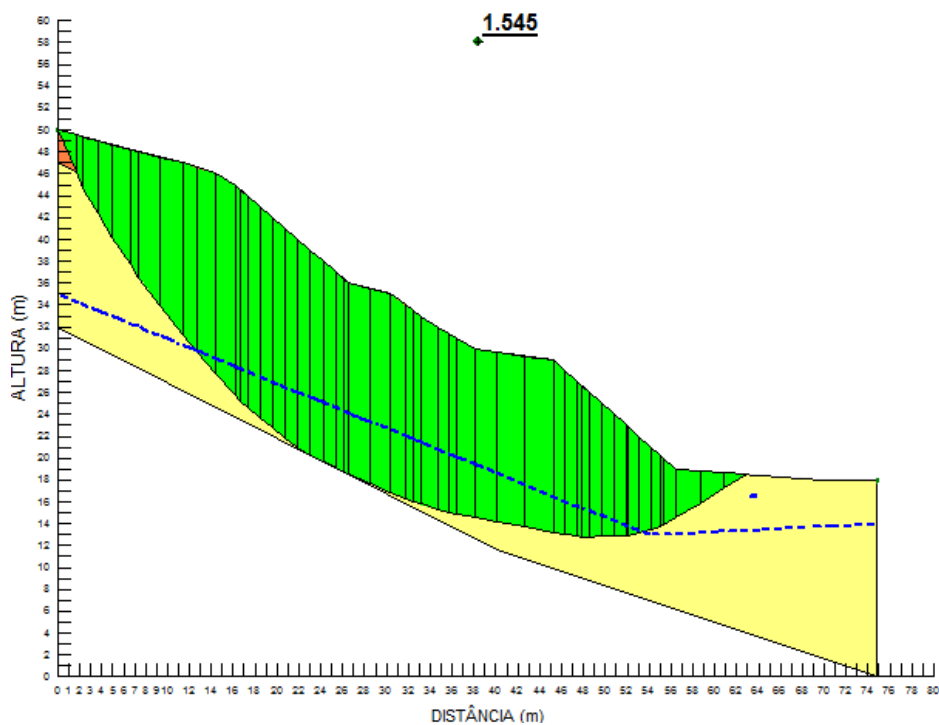


Figura 4.29 - Resultado da análise de estabilidade de talude do dia mais crítico de 2011.

5. CONCLUSÃO

A seção estudada do talude foi considerada composta basicamente por dois tipos de solo, Silte Arenoso que compõe uma camada mais fina e superficial e Areia Fina na camada de maior profundidade. O Silte Arenoso possui menor condutividade hidráulica saturada, quando comparado com a Areia Fina, o que dificulta a infiltração de águas pluviais e aumenta o escoamento superficial.

Os parâmetros de resistência, obtidos a partir de amostras saturadas no ensaio de cisalhamento, apresentaram-se dentro da normalidade com relação à coesão para os dois solos, sendo o Silte Arenoso mais coesivo. Pela literatura o valor do ângulo de atrito deveria ser próximo tanto em amostras saturadas quanto em naturais, o que só foi observado para a Areia Fina.

As curvas de retenção obtida, para valores mais baixos de sucção, com uma pequena centrífuga e, para valores mais elevados de sucção, pelo método do papel filtro, mostraram-se satisfatórias, e foram ajustadas utilizando a equação de Fredlund e Xing. O erro neste ajuste foi de 2,29% para a curva da Areia Fina e 2,25% para o Silte Arenoso.

A modelagem feita no VADOSE/W propiciou analisar o efeito das condições climáticas na variação da umidade volumétrica e da poro-pressão ao longo de todo o talude. Para pontos localizados próximos à superfície teve-se maior variação da umidade volumétrica, quando comparada com os localizados a profundidades maiores, sendo que, para a seção do talude para a qual os resultados de umidade foram apresentados, a partir de uma profundidade de 7,0 m não se observou variação no valor dessa grandeza durante o ano. Este fato está relacionado com a ocorrência de uma camada superficial de Silte Arenoso que possui baixa condutividade hidráulica saturada. Com relação à sucção, observou-se que a camada de Silte Arenoso apresenta maiores valores quanto mais profundo for o ponto analisado, sendo estes valores diminuídos após determinadas precipitações. Já a Areia Fina, por se encontrar parte dela acima do lençol freático e parte abaixo, quanto mais profunda a camada menor a sucção.

O talude estudado apresenta variação no valor do fator de segurança ocasionado pela infiltração de águas pluviais. Quanto maior a duração e intensidade da precipitação, menores foram os valores do fator de segurança encontrados. Isso se deve ao fato do acréscimo do teor de umidade volumétrica diminuir o valor da sucção o que, por sua vez, diminui a resistência do talude. No entanto, como as variações de sucção foram pequenas e pouco profundas, a variação do fator de segurança também foi pequena.

Durante o período seco a variação do fator de segurança foi baixa, sendo mais acentuada em períodos chuvosos. O menor valor encontrado foi de 1,545 nos dias 354 e 365, o que justifica a estabilidade do talude mesmo tendo ocorrido neste período uma ruptura no talude ao lado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMENTO, M. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: considerações teóricas e estudo experimental sobre solo coluvionar das encostas da Serra do Mar. 1988. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo – Departamento de Estruturas e Fundações, São Paulo, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solo, Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica – Procedimento. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9820: Coleta de amostras indeformadas de solos em furos de sondagem - Procedimento, Rio de Janeiro, 1997. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2001. 17 p.

ASTM D-5298-03. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter Paper, 2003.

BARBOUR, S. L. The soil-water characteristic curve: a historical perspective. Canadian Geotechnical Journal, v. 35, p. 873-894, 1998.

BISHOP, A. W. The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad, v. 106, n. 39, p. 859-863, 1955.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Papers n. 3, Colorado State University, 1964.

CARDOSO JR., C. R. Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes. 2006. 172 f. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, 2006.

CARDOSO JR, C. R.; FUTAI, M. M. Simulação do efeito de um fluxo transiente na estabilidade dos taludes. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE

ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 4., 2005, Salvador. Anais. Salvador, 2005. p. 453-463.

CARVALHO, C. S. Estudo da infiltração em encostas de solos insaturados na Serra do Mar. 1989. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Estruturas e Fundações, São Paulo, 1989.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. Proc. Of the Institute of Civil Engineering, 92 - n.2 - p.82-89, 1992.

COREY, A.T. Mechanics of heterogeneous fluids in porous media. Water Resources Publication, Littleton, Colo, 1977.

ESCÁRIO, V.; SÁEZ, J. The shear strength of partly saturated. Geotechnique, v. 36, p. 453-456, 1986.

FREDLUND, D. G., MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated-soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 3, n. GT5, p. 447-466, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soil. Canadian Geotechnical Journal, v. 15, n. 3, p. 313 – 321, 1978.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York: John Wiley & Sons, 517p, 1993.

FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, p. 521–532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v. 33, p. 440-448, 1996.

FREITAS JÚNIOR, E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 19, n. 11, p. 1423-1428, 1984.

FUTAI, M. M. Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não saturados: Aplicação a um caso de voçorocamento. 2002. 559 f. Tese (doutorado) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

GARDNER, R. A. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. Soil Science, v. 43, p. 277–283, 1937.

GARDNER, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, v. 85, p. 228–232, 1958.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e escavação. Edgard Blucher, 320p, 1983.

GUIMARAES, L.M. Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrífuga de pequenas dimensões. 2013. 133 f. Tese (doutorado) - Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

KHANZODE, R. M.; VANAPALI, S. K.; FREDLUND, D.G. Measurement of soil-water characteristic curves for fine-grained soils using a small-scale centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*. 39, p. 1209-1217, 2002.

LEE, I. K.; WHITE, W., INGLES, O. G. *Geotechnical engineering*, Melbourne: Pitman Publishing Pty, 508 p., 1983.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. Permeability functions for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, v. 123, n 12, p. 1118-1126, 1997.

LEONG, E.C.; HE, L. & RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Journal Geotechnical Test*, v. 25, p. 322-333, 2002.

LU, N., LIKOS, W. J. Suctions stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 2, p.131-142, 2006.

MACHADO, S. L., VILAR, O. M. – Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: ensaios de laboratório e determinação expedita. *Solos e rochas*, São Paulo, v. 21, n. 2, p.65-78, 1998.

MANNICH, M. Desenvolvimento de soluções analíticas e numéricas da equação de Richards. 2008. Dissertação (mestrado) - Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2008.

MARINHO, F. A. M.; CHANDLER, R. J. Cavitation and the direct measurement of soil suction. *Fisrt International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, p. 623-630, 1995.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos não saturados. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS*, 3, Rio de Janeiro, RJ, 1997. Anais. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, v. 2, p. 373-397, 1997.

MCDUGALL, J. R.; PYRAH, I. C. Simulating transient infiltration in unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 35, p.1093-1100, 1998.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. Unsaturated shear strength behaviour of a compacted residual soil. In: *2nd ASIAN CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS – GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ISSUES*, Osaka, Japan, 2003.

PINTO, C. S. *Curso básico de mecânica dos solos*. Ed. Oficina de textos, São Paulo, 247 p., 2000.

QUEVEDO QUISPE, R. J. Implementação numérica para análise de fluxo transiente 3D em barragens. 2008. 109 f. Dissertação (mestrado) - Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

REICHARDT, K. Processos transferência no sistema solo-planta-atmosfera, 4ª Ed. Campinas: Fund. Cargill. 466p., 1985.

REIS, R. M.; STERCK, W. N.; RIBEIRO, A. B.; DELL'AVANZI, E.; SABOYA, F.; TIBANA, S.; MARCIANO, C. R.; SOBRINHO, R. R. Determination of the soil-water retention curve and the hydraulic conductivity function using a small centrifuge. *Geotechnical Testing Journal*, v. 34, n. 5, 2011.

RIBEIRO, A. G. C. Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais. 2011. 161 f. Tese (doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2011.

RUSSELL, M.B., AND RICHARDS L.A. The determination of soil moisture energy relations by centrifugation. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.3, p.65-69, 1938.

SILVA, A. M. Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros. 2005. 136 f. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1487-1494, 2002.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE, 1987. v. 2, p. 225-236.

TERZAGHI, K. Mechanism of landslides. 1950. Tradução – “Mecanismos de escorregamentos de terra”, de E. Pichler. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, São Paulo, 1936.

VAN GENUCHTEN, M. T. H. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soils Science Society of American Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUF AHL, D. E; CLIFTON, A. G. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 33, p. 379-392, 1996.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G. Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength. *Advances in Unsaturated Geotechnics*, p. 143-159, 2000.

VARGAS Jr.; E. A.; COSTA FILHO, L. M.; CAMPOS, L. E. P.; A study of the relationship between the stability of slopes in residual soils and rain intensity. *International Symposium on Environmental Geotechnology, Bethlehem, USA, Proceedings*, p. 491-500, 1986.

VILAR, O.M. Resistência ao cisalhamento (Apostila). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2002.

WANG, Z.; JURY, W. A.; TULI, A.; KOM, D. Unstable flow during redistribution: Controlling factors and practical implications. *Vadose Zone Journal*. v. 3, p. 549-559, 2004.

WHITE, N. F.; DUKE, H. R.; SUNADA, D. K.; COREY, A. T. Physics of desaturation in porous materials. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings ASCE*, v. 96, p. 165-191, 1970.

ZHANG, L. L.; FREDLUND, D. G.; ZHANG, L. M.; TANG, W. H. Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 41, p. 569-582, 2004.