

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO SUPERFICIAL EM ÁREA POTENCIAL EM  
RELAÇÃO A PARÂMETROS HIDRÁULICOS**

Yumi Bucci Mori

Orientador: Fernando A. M. Marinho

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2016 / 50)

SÃO PAULO

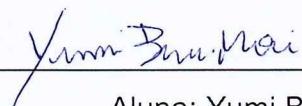
2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO SUPERFICIAL EM ÁREA POTENCIAL EM  
RELAÇÃO A PARÂMETROS HIDRÁULICOS**

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2016 / 68)

---



Aluna: Yumi Bucci Mori

---



Orientador: Fernando A. M. Marinho

São Paulo  
2016

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer o Professor e Orientador Fernando Marinho pela oportunidade dada de poder estudar uma área da geologia de grande importância para a sociedade. Agradeço o estímulo, o conhecimento e disponibilidade durante este trabalho.

À Carla Palomino e Antônio pela participação, contribuição e auxílio nesse processo. Ao Fernando Ribeiro, pela confiança em emprestar a estação total de última geração. À Prof. Bianca por emprestar o seu permeômetro, sem ele não teria sido possível desenvolver todo este trabalho.

A todos professores da Geologia. Pelo incentivo à ciência, incentivo a desenvolver senso crítico e por sempre demonstrarem paixão por esse curso maravilhoso. À todos funcionários do IGc também por tornarem a Geo uma segunda casa melhor. E à todos motoristas por aguentarem a turma em campo.

Às minhas rainhas Famosa Mimosa, Intrudida e Tati pela malhação, pelos almoços gordos e por todo carinho, apoio e companheirismo durante esses anos. Ao melhor grupo de todos, os campos não teriam sido os mesmos. Capado pelas nucas queimadas com lupa e pela parceria. Ao Lucas por carregar as amostras e por nos guiar pelo caminho certo sempre (rs). E de novo à Mimosa por sempre estar lá ♥ Ao Rrrrrrrronaldinho por ter sido o amigo mais insuportável, do contra e parceiro em todos os momentos. É #noix roni! À diretoria pelos anos de risadas, festas, conversas, viagens e etc. Apesar da distância que o tempo criou, as lembranças permanecem. E aos muuuitos outros amigos geológicos.

À atlética maravilhosa! Por terem trazido um sentido muito maior nessa universidade além de só se formar. Principalmente ao eterno presidente Molestado, sempre com o espírito positivo e feliz. Às meninas do fôlei/basquete pelas mil tretas e superação. A todos esquerdistas e grevistas que com muita luta, me ajudaram a ver o mundo de uma forma mais empática.

À todos amigos externos à geologia, que fizeram parte dos melhores anos da minha vida. Principalmente às melhores amigas do mundo e irmãs de alma ASL ♥ e às Aussie sisters também. Ao Allan, meu bonitinho, por entre tantos trancos e barrancos, sempre estar ao meu lado e me incentivando a ser o melhor de mim.

Por último, mas não menos importante agradeço à minha família por todo apoio incondicional, emocional, financeiro e por sempre acreditarem em mim. Nada disso teria sido possível sem vocês. Mami, Papi, Tizinha, Moni, Vovó e Pedrita, amo vocês!

Enfim, agradeço a cada um que faz parte desse meu mundão geológico. O TF é só o começo.

## RESUMO

Áreas urbanas em regiões tropicais estão sujeitas à fatores de risco ligados a períodos de alta pluviosidade, sendo deslizamento de encostas um dos principais problemas causados para a população. O estudo do comportamento de encostas vem sendo cada vez mais estudado a fim de determinar melhores métodos de monitoramento para evitar maiores transtornos à sociedade. A região metropolitana de São Paulo possui várias ocorrências desses eventos, principalmente em regiões onde ocorrem ocupações irregulares ou em regiões serranas no interior do estado.

No campus Cidade Universitária da USP em São Paulo é possível encontrar evidências de movimentos de massa em taludes construídos. Na Av. Intersetorial, próxima ao Hospital Universitário encontram-se dois pontos onde deslizamentos já ocorram. O presente projeto tem como finalidade estudar de forma prática e objetiva o comportamento de um talude que não apresenta indícios de ruptura, em relação a variação de pressão de água de acordo com a precipitação local e usando parâmetros hidráulicos do solo superficial.

Para a determinação da condutividade hidráulica da camada de solo superficial foi utilizado o mini-infiltrômetro a disco. Para tanto foi utilizado o método desenvolvido por Zhang (1977) para calcular os valores de K<sub>sat</sub> em cada ponto amostrado, dando uma média de  $7,14 \times 10^{-4}$  cm/s. Para profundidades de até 50 cm de solo nos mesmos pontos amostrais, foi utilizado outro equipamento, o permeâmetro de Guelph, e por meio dos cálculos baseados em Laplace, a condutividade hidráulica desta camada foi estimada em  $3,34 \times 10^{-4}$  cm/s. Curvas de retenção de água foram adotadas de modo a se obter a função de permeabilidade do solo.

Reunindo a informação da condutividade hidráulica do solo superficial do talude com a informação do regime de chuva do local, foram realizadas análises numéricas de fluxo em regime transiente e em seguida análises de estabilidade para diversos momentos do talude. A análise de fluxo permitiu o entendimento da distribuição das pressões de água dos poros ao longo do tempo. Os resultados das análises de fluxo foram implementados nas análises de estabilidade, gerando os fatores de segurança esperados para determinadas situações no tempo.

## ABSTRACT

Urban areas in tropical regions are subjected to risk factors associated to periods with intensive rainfall activity. Landslides are one of the main concern for the population. The study of the behaviour of these slopes has been focus of many studies, with the objective to determine the best way to monitor and avoid disasters to the society. The metropolitan region of São Paulo has many occurrences of these events, mainly in regions where the inhabitation is not regulated or in mountain regions of the countryside.

At the Campus of the University of São Paulo, in São Paulo city, it can be found evidences of mass movements in constructed slopes. Near to the Veterinarian Hospital, there are two points where landslides have already occurred. This project has an objective to develop a practical and objective study focusing the behaviour of a stable slope, using local precipitation data and hydraulic parameters of the superficial soil.

In order to determine the hydraulic conductivity of the superficial soil layer, the mini-disk infiltrometer was used. For the calculations of  $K_{sat}$  in each sampled point, the Zhang (1977) method was applied, giving as a result an average of  $7,14 \times 10^{-4}$  cm/s. For depths higher than 50 cm, another equipment was used, the Guelph permeameter. In this case, the calculations based in Laplace were applied to determine the value of  $3,34 \times 10^{-4}$  cm/s. Retention curves were adopted in order to define the permeability function of the soil.

Gathering information on the hydraulic conductivity of the surface of the slope soil with information from local rainfall regime, numerical analysis were performed of the transient flow and then stability analyses using limit equilibrium for various times of the slope. The flow analysis allowed understanding the distribution of pore water pressures over time. The results from the flow analysis were implemented in the slope stability studies generating safety factors with time.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. EMBASAMENTO TEÓRICO.....	2
3.1. Deslizamentos de encostas .....	2
3.2. Propriedades físicas do solo .....	3
3.2.1. Condutividade Hidráulica .....	3
3.2.2. Parâmetros Geotécnicos .....	5
3.3. Estudos desenvolvidos .....	9
3.4. Equipamentos para medição da condutividade hidráulica do solo .....	10
3.4.1. Infiltrômetro a disco .....	10
3.4.2. Permeâmetro de Guelph .....	12
4. ÁREA DE ESTUDO .....	17
4.1. Localização da área.....	17
4.2. Geologia Regional .....	18
4.2.1. Geologia Local.....	19
4.3. Clima .....	20
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
5.1. Levantamento Topográfico .....	20
5.2. Localização dos pontos .....	21
5.3. Ensaios de condutividade .....	22
5.3.1. Infiltrômetro (Mini Disk Portable Infiltrometer) .....	22
5.3.2. Permeâmetro de Guelph .....	23
5.4. Ensaios de laboratório .....	25
5.5. Análise de fluxo e estabilidade.....	25
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	25
6.1. Topografia .....	25
6.2. Análise granulométrica .....	26
6.3. Resultados de Condutividade Hidráulica .....	31

6.3.1.	Infiltrômetro (Mini Disk Portable Infiltrometer) .....	31
6.3.2.	Permeâmetro de Guelph .....	31
6.4.	Análise de fluxo e estabilidade.....	33
7.	CONCLUSÃO .....	47
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

ANEXO A – Figuras

ANEXO B – Resultados Obtidos

## **1. INTRODUÇÃO**

Taludes em áreas urbanas, tanto cortes como aterros, devem ser projetados de modo a evitar transtornos e risco à população. Quando se trata de taludes em regiões de ocupações irregulares os problemas são ainda maiores. Tanto em taludes projetados como nos criados sem qualquer orientação técnica os escorregamentos acontecem por um conjunto de fatores que, em geral, têm como elemento deflagrador a água. A infiltração da água gera uma redução da tensão efetiva que induz uma diminuição da resistência do solo gerando a ruptura.

A infiltração de água no solo depende de fatores associados às condições superficiais do local (que inclui a vegetação e drenagem superficial), da saturação do solo no momento da precipitação, das características hidráulicas do solo e da geometria do talude e da região onde a precipitação ocorre. Este conjunto de aspectos e parâmetros determinará a quantidade de água que irá infiltrar ou escoará superficialmente.

A condutividade hidráulica indica a distância que a água percorre dentro do solo por unidade de tempo. Quando o solo se encontra saturado, ou seja, todos os vazios preenchidos com água, tem-se a maior condutividade hidráulica. Desta forma, é a condutividade hidráulica na condição saturada que limita a entrada de água no solo. Em outras palavras, a água não consegue infiltrar a uma velocidade maior do que a condutividade hidráulica saturada. A determinação deste parâmetro, juntamente com a dados de retenção do solo possibilitam avaliar o padrão de fluxo em uma determinada situação para um dado talude. Este panorama de infiltração, inferido por meio de estudos numéricos irá possibilitar avaliar a variação do coeficiente de segurança no tempo e especificamente durante uma chuva.

O presente projeto permitiu a obtenção de dados de condutividade hidráulica em campo que associados a informações sobre a capacidade de retenção de água e dados de resistência da literatura, permitiu definir os parâmetros do solo para as análises de fluxo e estabilidade. Além dos dados sobre o solo foi necessário a obtenção de dados pluviométricos do local, para avaliar o comportamento do talude. O talude estudado está localizado no Campus da USP na cidade de São Paulo e trata-se de um corte.

## **2. OBJETIVOS**

O principal objetivo do trabalho é avaliar a condição de estabilidade de um talude localizado no campus da Cidade Universitária da Universidade de São Paulo, utilizando parâmetros obtidos em campo, na literatura e por meio de análise de fluxo e equilíbrio limite. Assim, será possível estabelecer fatores de segurança para o talude em estudo quando combinados com dados pluviométricos, nas diversas estações do ano.

### **3. EMBASAMENTO TEÓRICO**

#### **3.1. Deslizamentos de encostas**

Deslizamentos ou escorregamentos são movimentos gravitacionais de massa relacionados com processos de desestabilização de encostas. O estudo e o monitoramento preventivo desse fenômeno tornam-se essenciais a partir do momento em que causa acidentes envolvendo destruição de propriedades, pessoas feridas ou ocorrências de mortes. Em um estudo realizado por Lopes et al. (2007), foi feito um inventário por meio de sensoriamento remoto de fotos aéreas tiradas das encostas da Serra do Mar em 1985 e 1994, onde foram identificadas, respectivamente, 1742 e 853 cicatrizes de escorregamento, com áreas em torno de 370 m<sup>2</sup>. Esses números indicam que os taludes naturais estão sujeitos a rupturas e qualquer intervenção antrópica deve ser feita utilizando-se as técnicas de investigação e análises adequadas.

A presença de taludes próximos a áreas urbanizadas cria um risco para as atividades locais. Em janeiro de 1985, na região de Cubatão, a Refinaria Presidente Bernardes da Petrobrás foi atingida por um escorregamento que causou um acidente ambiental devido ao rompimento de uma tubulação destinada ao transporte de amônia. A partir desta ocorrência Tatizana et al. (1986 apud Tatizana et al. 1987) desenvolveram o CPC (Coeficiente de Precipitação Crítica) que mede a suscetibilidade de escorregamentos frente a um evento chuvoso, analisando tanto chuvas acumuladas como chuvas horárias intensas. Este índice tem sido usado pelo Governo de São Paulo no plano de contingências para a Serra do Mar para antecipar condições pluviométricas que possam gerar escorregamentos. Salienta-se que o uso deste tipo de abordagem é empírico e que a sua aplicação em outras regiões pode não obedecer ao mesmo padrão.

Em todo o país tem-se notícias de acidentes causados por deslizamentos de terra em períodos chuvosos. São acidentes que envolvem desde interrupção e danos a rodovias, destruição de residências, soterramento de pessoas, dentre outros.

Pisani (2003) divide, de uma maneira mais geral, as causas para desestabilização de encostas entre agentes naturais e antrópicos. Dentre os agentes naturais estão os tipos de solo, relevo, vegetação, índice pluviométrico e lençol freático. Já os agentes antrópicos envolvem cortes de taludes, aterros realizados sem cuidado técnico, desmatamento, gerenciamento inadequado de águas e drenagens, acúmulo de detritos, sobrecarga de construções e cultivo de espécies inadequadas. Embora a pluviometria possa ser considerada o fator desencadeador das instabilizações, o problema está associado a um conjunto de fatores. Deve-se realizar um estudo geológico-geotécnico para conhecer como cada fator influencia a estabilidade e em qual deles se pode atuar para aumentar o coeficiente de segurança.

O material que compõe o talude já tem uma tendência natural de escorregar devido a força da gravidade. Quando as tensões atuantes sobre o corpo superam as tensões resistentes, o talude se rompe. O equilíbrio do talude é medido pelo fator de segurança. Os esforços que são considerados nas análises estão ligadas à geometria da encosta, cargas externas atuantes, peso específico do material, variação da poro-pressão da água, grau de saturação do solo e parâmetros de resistência do solo.

### 3.2. Propriedades físicas do solo

#### 3.2.1. Condutividade Hidráulica

Para a melhor compreensão da dinâmica interna de uma encosta, é essencial que seja conhecida o comportamento do fluxo de água no subsolo. O primeiro experimento laboratorial quantitativo relacionado à hidrogeologia foi realizado pelo engenheiro hidráulico francês Henry Darcy. Neste experimento, o fluxo da água é analisado em um meio arenoso (Freeze & Cherry, 1979).

Este ensaio é composto por um tubo cilíndrico, com seção A, preenchido por areia. O tubo é tampado nas extremidades por um dispositivo que está acoplado a outro conduto menor para permitir a entrada ou a saída da água que será introduzida no experimento. São introduzidos também dois manômetros neste tubo principal, nas alturas  $z_1$  e  $z_2$  (datum  $z=0$ ) e com distância  $\Delta L$  entre eles.

A água é inserida na extremidade superior de forma a preencher todos os poros vazios do meio arenoso até sair pela extremidade inferior e atingir o ponto onde este fluxo ( $Q_2$ ) seja constante e igual ao fluxo de entrada ( $Q_1$ ). Os manômetros irão registrar as alturas  $h_1$  e  $h_2$  do nível dos fluidos.

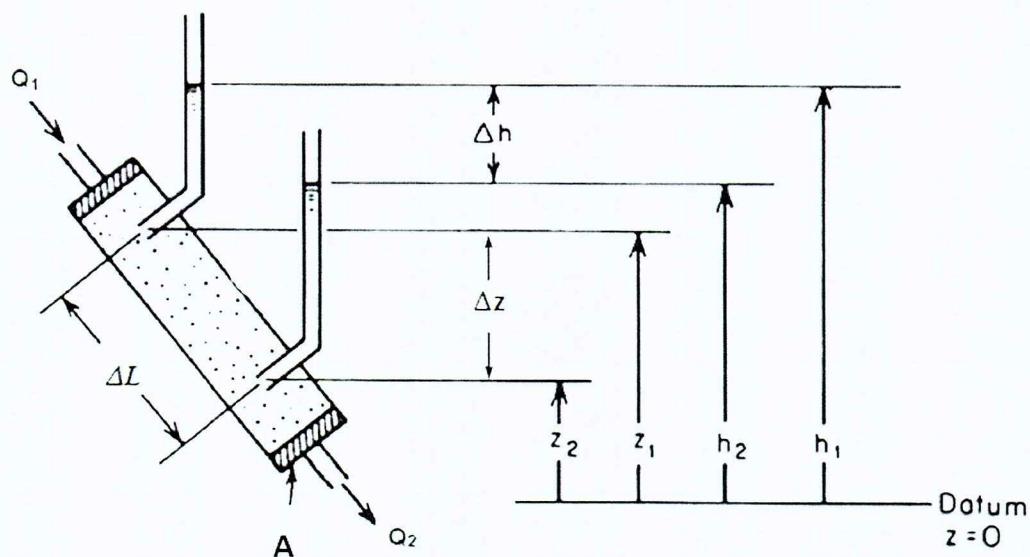


Figura 1. Experimento de Darcy (modificado de Freeze & Cherry, 1979).

A partir destes dados, Darcy desenvolveu a fórmula para quantificar a constante de proporcionalidade ( $K$ ), que nomeou de condutividade hidráulica. O parâmetro  $K$  possui as mesmas dimensões que a velocidade [L/T].

$$Q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} A \quad (1)$$

O termo  $\frac{\Delta h}{\Delta l}$  pode ser encontrado na literatura reduzido ao termo  $i$ , chamado de gradiente hidráulico. Vale ressaltar que quando a condutividade ( $K$ ) e o gradiente ( $i$ ) são mantidos constantes, a lei de Darcy é válida para qualquer direção no espaço (Freeze & Cherry, 1979). Além disso, a condutividade hidráulica é função do meio e do fluido, dependendo diretamente de fatores como a permeabilidade do solo ( $k$ ), viscosidade ( $\mu$ ), massa específica da água ( $\rho$ ) e da atração da gravidade ( $g$ ). Entretanto, para os estudos desenvolvidos de percolação da água em solo, os fatores  $\mu$ ,  $\rho$  e  $g$  podem ser considerados constantes, ou seja, a condutividade hidráulica torna-se sinônimo de permeabilidade. E dependem da distribuição e geometria dos poros que compõe os espaços vazios do solo (Silveira, 1993 apud Vieira, 2001).

A condutividade hidráulica dos solos tem uma alta variação, onde geralmente varia de  $10^{-9}$  cm/s para solos argilosos a 1,0 cm/s para areia pura. Valores menores de  $K$  para um meio argiloso são provavelmente devidos à resistência que a parede dos poros exerce sobre o fluido, sendo que nesse caso os poros são pequenos. Isso se deve ao fato de que partículas de tamanho pequeno (como argilas quando comparadas com areia) possuem área específica maior aumentando a resistência nas moléculas de água. Outro fator que pode ser levado em consideração é que em um meio onde há uma grande variedade de tamanho de poros, o fluido tende a ser conduzido mais rápido do que um meio com uma baixa variedade de tamanho de poros. Isso é possível se os poros e macroporos formam caminhos preferenciais através do solo (Tindall & Kunkel, 1999).

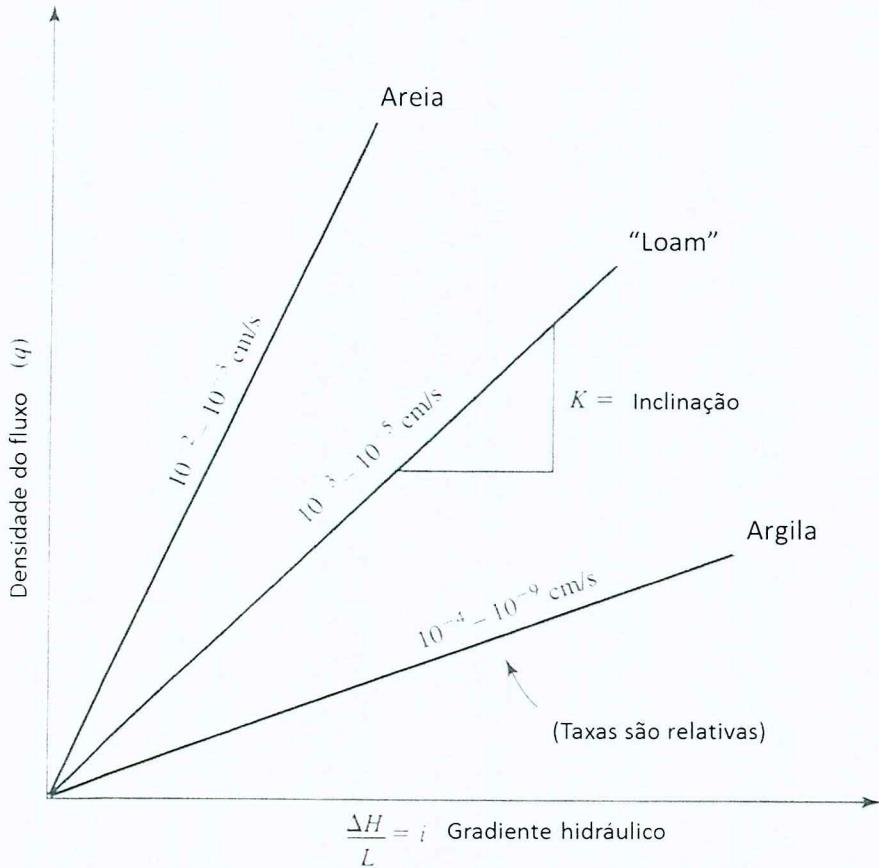


Figura 2. Gráfico da densidade do fluxo versus gradiente hidráulico para vários tipos de solo (Tindall & Kunkel, 1999).

Além do comportamento da água no meio saturado, como acima descrito, a infiltração da água no solo é controlada por seu estado de saturação. Quando o solo está com um grau de saturação menor que 100% a sua condutividade hidráulica aumenta. A variação da condutividade hidráulica com o grau de saturação não é simples de ser obtida e em geral é determinada por meio de um modelo que correlaciona a curva de retenção de água com a condutividade hidráulica saturada (e.g. Fredlund & Rahardjo, 1993).

### 3.2.2. Parâmetros Geotécnicos

O cálculo da estabilidade de taludes exige, além da definição da estratigrafia, a determinação de parâmetros geotécnicos de resistência. No campo os solos podem se encontrar na condição saturada ou não saturada. Solos encontrados acima do nível d'água estão na condição não saturada e possuem uma pressão de água negativa que colabora para a estabilidade do talude. No caso dos solos que se encontram saturados ou que podem ficar saturados, a tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ) pode ser considerada como a única variável necessária para definir o estado de tensão do solo e para descrever seu comportamento mecânico, seguindo a equação 2:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2)$$

onde  $\sigma'$  é a tensão normal efetiva,  $\sigma$  é a tensão normal total e  $u_w$  é a poro-pressão atuante no solo. Assim, é necessário o conhecimento da pressão da água para que seja possível definir o estado de tensão efetivo.

No caso dos solos não saturados, o estudo do estado de tensões não é tão simples. A partir da equação de equilíbrio para a estrutura do solo, Fredlund e Rahardjo (1977) extraíram arranjos de tensões fisicamente medidas:  $(\sigma-u_a)$ ,  $(\sigma-u_w)$  e  $(u_a-u_w)$  sendo “ $\sigma$ ” tensão normal, “ $u_a$ ” pressão de ar e “ $u_w$ ” pressão de água. Usando uma dessas pressões como referência, existem três possíveis combinações para demonstrar o estado de tensão do solo não saturado, a Tabela 1 a seguir exemplifica esse modelo:

Pressão de Referência	Variáveis de estado de tensão
Ar, $u_a$	$(\sigma-u_a)$ e $(u_a-u_w)$
Água, $u_w$	$(\sigma-u_w)$ e $(u_a-u_w)$
Total, $\sigma$	$(\sigma-u_a)$ e $(\sigma-u_w)$

Tabela 1. Possíveis combinações de varáveis de estado de tensão para solos não saturados (modificado de Fredlund e Rahardjo (1993).

Para a prática de engenharia a combinação  $(\sigma-u_a)$  e  $(u_a-u_w)$  é a mais utilizada, e é vantajosa por separar os efeitos e as variáveis da tensão normal da poro-pressão da água. São, portanto, referenciadas como tensão normal e sucção mátrica, respectivamente. Na medida em que o grau de saturação do solo se aproxima de 100%, a poro-pressão da água “ $u_w$ ” aproxima-se da pressão do ar nos poros “ $u_a$ ” e a sucção mátrica ( $u_a-u_w$ ), consequentemente, reduz para zero. A sucção é, portanto, a pressão de água negativa nos poros e serve como ferramenta para indicar a capacidade do solo de reter água.

Para demonstrar o comportamento do solo na condição não saturada, utiliza-se a curva de retenção da água (CRA) (Marinho, 2013). Essa curva, observada na Figura 3. define a relação entre a quantidade de água – expressa em conteúdo gravimétrico ( $w$ ), volumétrico ( $\theta$ ) ou grau de saturação ( $S$ ) – e a sucção. O valor de entrada de ar indicado na Figura 2. é referente à sucção mátrica necessária para a entrada de ar nos poros maiores e normalmente aumenta com a plasticidade do solo. O conteúdo residual de ar é o quando é necessária uma grande mudança para remover a água do solo.

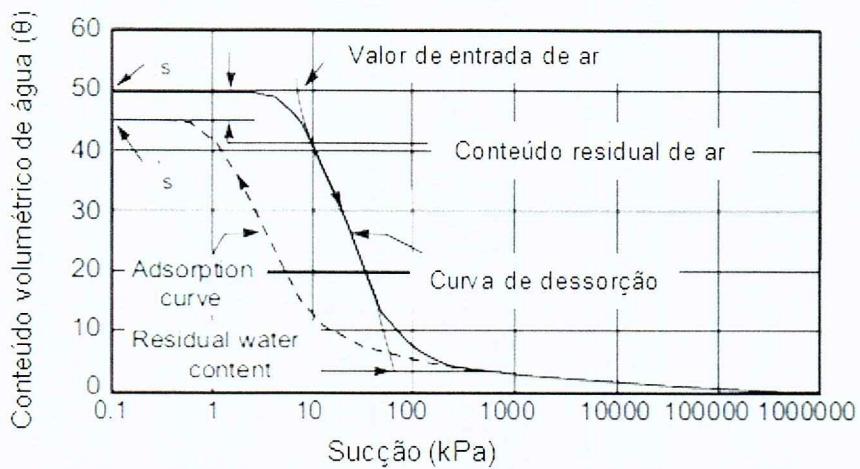


Figura 3. Curva de retenção de água característica (modificado de Fredlund e Xing, 1994)

Quanto à análise de resistência ao cisalhamento, Fredlund et al. (1978 apud Fredlund et al. 2002) propôs a seguinte equação:

$$\tau_{rr} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan\phi' + (u_a - u_w)_f \tan\phi^b \quad (3)$$

Onde  $\tau_{rr}$  é a tensão cisalhante,  $c'$  é a coesão efetiva,  $(\sigma_f - u_a)_f$  é a tensão normal líquida na ruptura,  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno,  $(u_a - u_w)_f$  é a sucção mátrica na ruptura e  $\phi^b$  é o ângulo que indica a taxa de aumento da resistência ao cisalhamento relativa à sucção mátrica (inclinação da curva tensão cisalhante x sucção mátrica). Tais parâmetros podem ser observados na Figura 4.

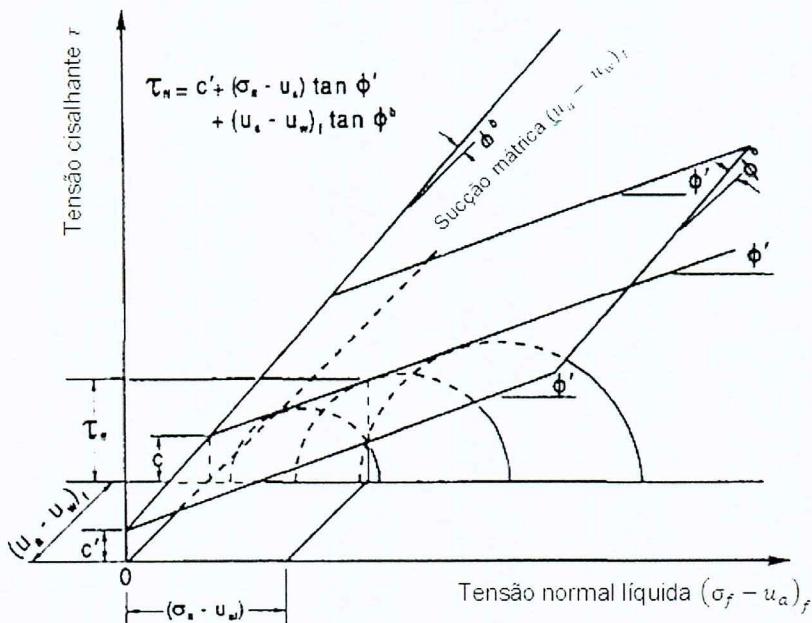


Figura 4. Envoltória de Mohr-Coulomb estendida (modificado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

Salienta-se que quando o solo é submetido a saturação a equação anterior (3) se reduz a equação de resistência dos solos saturados (2) e pode ser aplicada igualmente.

As pressões dos poros refletem o estado do fluxo da água subterrânea em uma determinada encosta. Através de análises numéricas, analíticas ou analógicas, é possível construir esta rede de fluxo. Ela é construída com base na configuração do nível d'água e distribuição de cada tipo de solo, além das suas propriedades. A figura 5 demonstra uma rede de fluxo de água subterrânea típica em encostas.

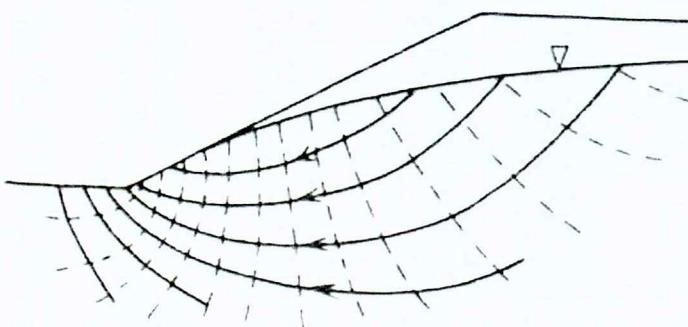


Figura 5. Fluxo típico da água subterrânea em encostas (Freeze & Cherry, 1979).

O estudo da estabilidade de um talude com regime de água estacionário, ou seja, em equilíbrio, é relativamente simples. Porém quando é necessária a análise envolvendo a precipitação, o regime de fluxo é transitório, e exige uma análise não linear que só pode ser estudada utilizando-se ferramentas numéricas. A resposta do talude a precipitação envolve uma interação entre o estado saturado e não saturado que leva a uma variação da pressão da água, indo de pressões negativas a eventuais valores positivos e ao aumento no nível d'água local. Este comportamento é, muitas vezes, difícil de ser previsto. A dimensão deste aumento, a duração deste aumento, a diferença de tempo entre o período de chuva e a resposta do nível d'água, dependem da geometria do talude, da duração e da intensidade da chuva, das condições iniciais da umidade do solo e também das propriedades hidrogeológicas saturadas e não saturadas do material, como a permeabilidade do solo (Freeze & Cherry, 1979).

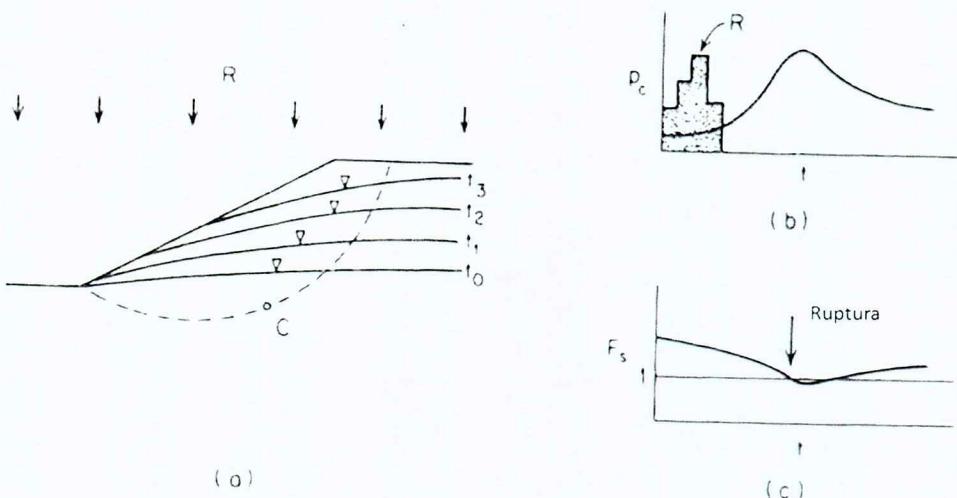


Figura 6; (a) Talude recebendo chuva (R) ao longo do tempo (t). C representa um ponto ao longo de uma possível superfície de ruptura; (b) variação da pressão dos poros ( $P_c$ ) ao longo do tempo (t), com quantidade de chuva (R); (c) momento de ruptura quando o fator de segurança é  $<1$ .

Considerando a figura 6a o talude em questão recebe determinada quantidade de chuva e, consequentemente, o nível d'água sobe ao longo do tempo ( $t_0, t_1, t_2, t_3\dots$ ). Dado um ponto C ao longo de uma possível superfície de ruptura, a pressão dos poros neste ponto irá aumentar conforme a água da chuva infiltra no solo (figura 6b), com isso o fator de segurança será reduzido. No momento que este fator atinge valor inferior a 1,0, o talude rompe (figura 6c). Sendo assim, o mecanismo desencadeante da ruptura do talude, é o aumento da pressão dos poros (Freeze & Cherry, 1979).

### 3.3. Estudos desenvolvidos

Com o objetivo de estudar o comportamento de taludes sob diversas condições estudos teóricos, experimentais e empíricos têm sido realizados. Como anteriormente mencionado Tatizana et al. (1987) relacionou índices pluviométricos com ocorrências de deslizamentos na Serra do Mar em um estudo empírico. Lopes et al. (2007) através do sensoriamento remoto identificam cicatrizes de escorregamentos e apontam as áreas da Serra do Mar mais propícias para instabilidade de encostas, este estudo envolveu aspectos teóricos e experimentais. Vieira e Marinho (2001) monitoraram um talude de solo residual de gnaisse localizado no campus na USP para avaliar a variação do perfil de sucção e a influência da geometria do talude no movimento de água sazonalmente. Sestrem et al. (2015) monitoraram um talude de modo a compreender a relação entre dados pluviométricos, nível d'água e as variações de sucção, tendo como objetivo entender os mecanismos que promovem a instabilidade do talude. Há, portanto, diversos procedimentos para se estudar e entender: onde, por que, e quando um talude pode ser tornar instável.

### **3.4. Equipamentos para medição da condutividade hidráulica do solo**

#### *3.4.1. Infiltrômetro a disco*

Infiltrômetros a disco com sucção controlada permitem a determinação de propriedades hidráulicas do solo superficial não saturado através de medidas no campo. Pode ser aplicado em diversas áreas, como na agricultura para conhecimento da disponibilidade da água no solo e como a vegetação pode influenciar, em pesquisas geotécnicas para análise de taludes, investigações ambientais onde a água pode servir como agente condutora de contaminantes, determinação da qualidade do solo em áreas queimadas, entre outros.

A estrutura do equipamento é bem simples, assim como o seu manuseio. As dimensões da base de disco, ou capacidade e graduação volumétrica podem variar de acordo com os fabricantes, porém o princípio é o mesmo. Um tubo graduado funciona como reservatório da água que será infiltrada através da base de disco em contato com o solo. Um outro reservatório tubular é conectado através de um cilindro de aeração, e possui também no topo o cilindro que determina a pressão constante que será aplicada na base, controlando a infiltração da água no solo (Antonino et al, 2001). Esse controle é feito através da eliminação de macroporos com a entrada de ar menor do que a sucção do infiltrômetro. Quando a água está sobre o efeito de sucção, não entra nos macroporos, caminha pelo solo da maneira que as forças hidráulicas determinam. Dessa forma é possível analisar a condutividade hidráulica do solo mais uniformemente, evitando a variabilidade dos macroporos e outros vazios que podem ocorrer no material. (Decagon Services Inc, 2014).

Em campo, os dados que devem ser coletados são a sucção aplicada, o tipo de solo e a variação do volume de água infiltrada no solo, medida no tubo reservatório, em relação com o tempo.

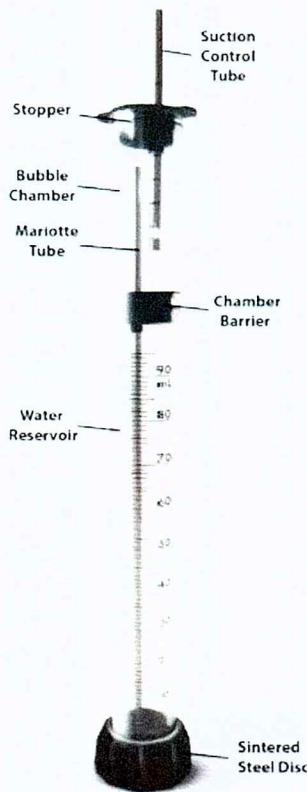


Figura 7. *Mini Disk Portable Tension Infiltrometer (Decagon Services)*.

Para o cálculo da condutividade hidráulica e/ou sorvidade do solo em questão, diferentes autores propuseram seus respectivos métodos, tais como Van Genuchten (1980), Zhang & Van Genuchten (1994), Zhang (1997). Este projeto irá utilizar o método de Zhang (1997) aplicado pela Decagon Services Inc. (2014). Este método requer a medição da infiltração acumulada ( $I$ ) versus tempo de acordo com a equação 4:

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t} \quad (4)$$

Onde  $C_1$  é um parâmetro relacionado com a condutividade hidráulica e  $C_2$  é outro parâmetro relacionado com a sorvidade do solo.  $C_1$  é a inclinação da curva que relaciona a infiltração acumulada versus raiz quadrado do tempo.

Para cálculo da condutividade hidráulica, a equação 5 servirá como base para os cálculos.

$$k = \frac{C_1}{A} \quad (5)$$

Onde  $k$  é a condutividade hidráulica do solo e  $A$  é um valor que relaciona os parâmetros de van Genuchten ( $n/ho$ ) com a sucção de um determinado tipo de solo e raio do disco do infiltrômetro. Esses valores podem ser obtidos a partir da Tabela 2.

Texture	Radius	2,25	A								
			-0,5	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	
sand	alpha	0,145	2,68	2,835701	2,40407	1,727908	1,241921	0,892621	0,641565	0,46112	0,331427
loamy sand		0,124	2,28	2,9853	2,786831	2,4286	2,116417	1,844363	1,60728	1,400674	1,220625
sandy loam		0,075	1,89	3,877062	3,887982	3,909913	3,931969	3,954148	3,976453	3,998884	4,021441
loam		0,036	1,56	5,461148	5,717657	6,267384	6,869965	7,530482	8,254505	9,048139	9,918077
silt		0,016	1,37	7,921451	8,177401	8,714378	9,286617	9,896433	10,54629	11,23883	11,97683
silt loam		0,02	1,41	7,102076	7,367933	7,929874	8,534674	9,185601	9,886173	10,64018	11,45169
sandy clay loam		0,059	1,48	3,210664	3,523317	4,242925	5,109507	6,153081	7,409796	8,923184	10,74567
clay loam		0,019	1,31	5,857535	6,10902	6,644845	7,227667	7,861609	8,551155	9,301181	10,11699
silty clay loam		0,01	1,23	7,893227	8,094056	8,511175	8,949789	9,411007	9,895994	10,40597	10,94223
sandy clay		0,027	1,23	3,336287	3,570465	4,089288	4,683501	5,364059	6,143508	7,036218	8,058649
silty clay		0,005	1,09	6,076318	6,169307	6,359575	6,55571	6,757895	6,966316	7,181164	7,402639
clay		0,008	1,09	3,998056	4,096399	4,300401	4,514562	4,739389	4,975412	5,223189	5,483306

Tabela 2. Parâmetros de Van Genuchten para 12 tipos de solo, para um disco com raio de 2,25 cm e valores de sucção variando entre 0,5 e 7,0 cm. Sand=Areia; Silt=Silte; Clay=Argila; Loam=40% areia, 40% silte e 20% argila. (Retirado de New-Minidisk-Infiltrometer-Macro-V.4, Decagon Services Inc, 2014)

Apesar de serem práticos por conta da sua facilidade de transporte, manuseio e processamento de dados, os resultados de condutividade hidráulica do solo obtidos pelo infiltrômetro estão limitados às condições do solo superficial. Existem outros permeâmetros que são utilizados em profundidade que permitem a determinação de propriedades hidráulicas do solo, e são principalmente utilizados em áreas como hidrogeologia e geotecnia em projetos de canais e reservatórios, modelagem hidrológica, transporte de saltos e padrão de infiltração em taludes.

### 3.4.2. Permeômetro de Guelph

O método do permeômetro de Guelph é colocado por Soto (2009) como um dos de maior aceitação, pela praticidade de manuseio, exatidão de resultados e com menor perturbação no solo. O princípio desse tipo de ensaio, com carga hidráulica constante, é segundo o Sifão de Mariotte. Para a instalação do equipamento é necessário fazer um furo a trado no solo com fundo plano. Ele mede a condutividade hidráulica saturada de campo ( $K_{sat}$ ) acima do lençol freático.

A área precisa ser preparada para a instalação do permeômetro de Guelph. É necessário fazer um furo cilíndrico no solo com raio ( $a$ ) medido e a base deste furo deve ser plana. O equipamento, muito parecido com o infiltrômetro, é composto por um tubo principal reservatório graduado onde será inserida a água, conectado através de um tubo interno de ar, com a porção inferior que será conectada com a base do solo para a infiltração. O tubo interno de ar tem controle da carga hidráulica constante ( $H$ ) que será aplicada dentro do furo (Figura 8).

O sistema do aparelho consiste em aplicar uma carga hidráulica constante ( $H$ ) em furo de raio determinado ( $a$ ), medindo a variação da água ( $R$ ) que passa por uma determinada área ( $A$ ) do tubo cilíndrico que seria o reservatório principal graduado em intervalos de tempo ( $t$ ) constantes. Ou seja, o princípio é a medição do fluxo  $Q$ . Depois de certo tempo, a região em volta do furo estará saturada, gerando assim um bulbo de saturação (Figura 9), cujas dimensões vão variar de acordo com o material do solo. Quando a taxa de infiltração no solo torna-se constante, é possível obter o valor do fluxo. Tendo o valor da taxa de infiltração, os parâmetros geométricos do equipamento e conhecendo o tipo do solo, é possível calcular a condutividade hidráulica do solo (Santos, 2005).

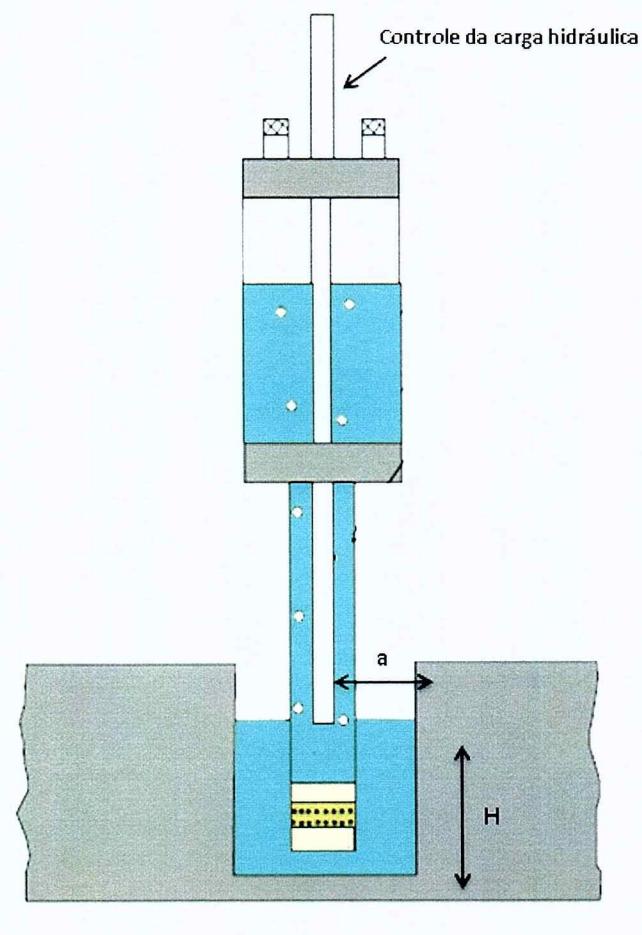


Figura 8. Esquema de funcionamento do permeâmetro de Guelph (Modificado de Santos, 2005)

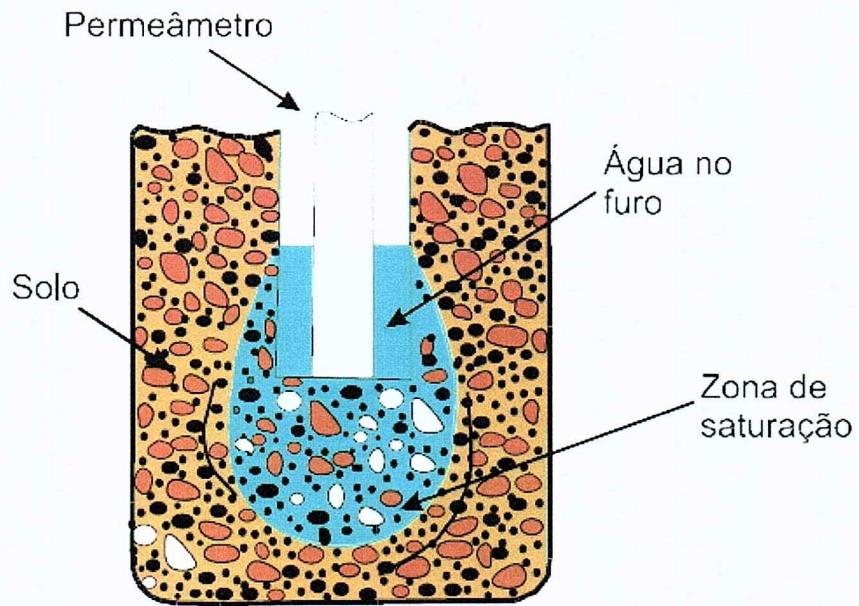


Figura 9. Bulbo de saturação (retirado de Santos, 2005).

O modelo inicial para determinar a condutividade hidráulica do solo através do uso de permeômetro foi desenvolvido por Reynolds et al. (1983). A equação 6 quantifica o valor da condutividade saturada ( $K_{sat}$ ).

$$K_{sat} = \frac{CQ}{2\pi H^2 \left[ 1 + \frac{C}{2} \left( \frac{a}{H} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

Onde  $a$  é o raio do furo,  $C$  é a constante de proporcionalidade adimensional,  $Q$  é o fluxo constante medido em campo ( $Q = R \times A$ ) e  $H$  é a carga constante aplicada. O parâmetro  $C$  representa a distribuição do gradiente de pressão em torno do furo e depende diretamente do raio do furo  $a$ , da carga  $H$  e do tipo de material (Reynolds et al. 1983 apud Vieira 2001).

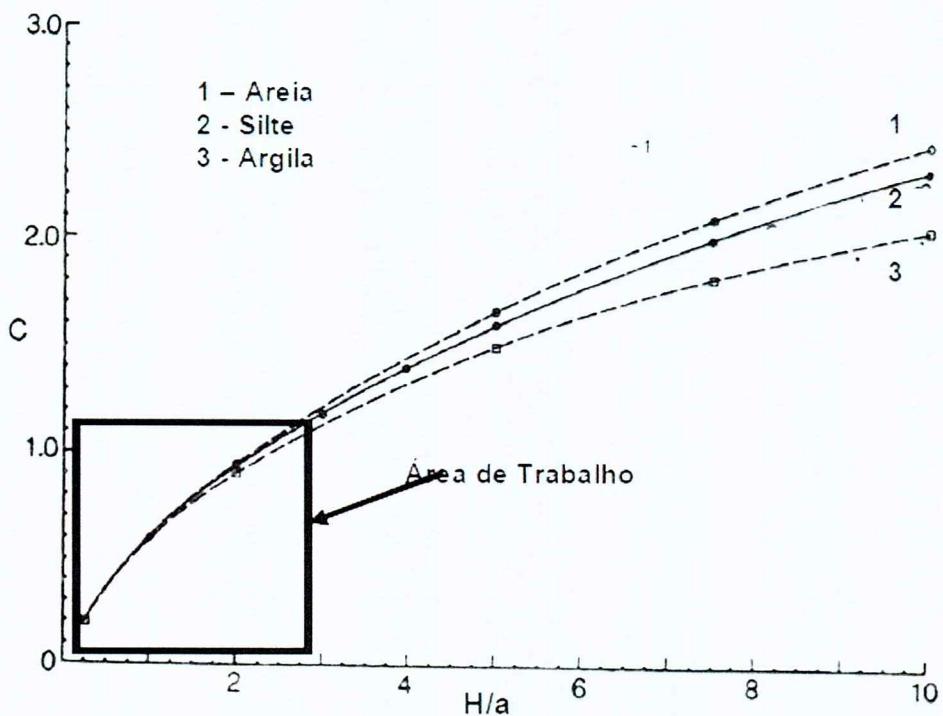


Figura 10. Variação do parâmetro  $C$  em função do raio do furo  $a$  e da carga constante  $H$  para três tipos de materiais. (Retirado de Vieira, 2001).

Em 1985, Reynolds & Elrick aprimoraram o modelo inicialmente desenvolvido. Consideraram também o efeito da capilaridade do solo não saturado. É baseado na equação de Richards (1931, apud Soto 2009) para fluxo permanente em furo cilíndrico:

$$Q = \left[ \frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2 \right] K_{fs} + \left[ \frac{2\pi H}{C} \right] \phi_m \quad (7)$$

Onde  $Q$  é a vazão a carga constante;  $H$  é a altura de água constante no furo de sondagem;  $K_{fs}$  é a condutividade hidráulica saturada média in situ;  $a$  é o raio do furo de sondagem;  $C$  é um parâmetro denominado “fato de forma” de acordo com a classe do solo e  $\phi_m$  é o potencial de fluxo matricial. Essa equação leva em conta as forças de capilaridade do solo. Porém através desse método, duas incógnitas são geradas:  $K_{sat}$  e  $\phi_m$ . Para resolver este problema, em campo são aplicadas duas cargas hidráulicas distintas  $H_1$  e  $H_2$ , gerando o fluxo  $Q_1$  e  $Q_2$ . Portanto, o método das equações simultâneas é utilizado a fim de eliminar o termo  $\phi_m$ .

$$Q_1 = \left[ \frac{2\pi H_1^2}{C_1} + \pi a^2 \right] K_{fs} + \left[ \frac{2\pi H_1}{C_1} \right] \phi_m \quad (8)$$

$$Q_2 = \left[ \frac{2\pi H_2^2}{C_2} + \pi a^2 \right] K_{fs} + \left[ \frac{2\pi H_2}{C_2} \right] \phi_m \quad (9)$$

A partir dessas equações são gerados os termos  $G_1$  e  $G_2$ :

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\mu [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (10)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\mu [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (11)$$

Assim  $K_{sat}$  pode ser finalmente calculado:

$$K_{sat} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (12)$$

Porém o solo insaturado é heterogêneo quanto à porosidade. Pode apresentar macroporos e estes não estão previstos nos cálculos. Por isso, através deste método, valores irreais (negativos, por exemplo) podem ser obtidos. Por conta disso, Elrick et al. (1989) desenvolveram outro método, considerando dessa vez um fator  $\alpha$  com base nas características do meio poroso (Tabela 3). Neste método utiliza-se apenas um valor de carga hidráulica ( $H$ ) para o cálculo da condutividade.

$$K_{sat} = \frac{CQ}{[2\pi H^2 + C\mu a^2 + \left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)]} \quad (13)$$

Características do meio poroso	Valor do parâmetro $\alpha$ correspondente [cm <sup>-1</sup> ]
Material argiloso compacto e estrutura como sedimentos marinhos.	0,01
Solos com textura fina (argiloso) e sem estrutura.	0,04
Solos estruturados argilosos e siltosos e também areias finas e solos razoavelmente estruturados.	0,12
Areias grossas e cascalhos. Podem ser incluídos solos altamente estruturados com grandes fraturas e macroporos.	0,36

Tabela 3. Valores de  $\alpha$  de acordo com diferentes carcterísticas dos solos ensaiados (Reynolds et al. 1992 apud Vieira, 2001).

Desconsiderando a influência da área não saturada e das propriedades capilares da região em torno do bulbo de saturação, Vieira (2001) cita outro método baseado em Laplace e desenvolvido a partir da equação 14, aplicando somente uma carga hidráulica também.

$$K_{sat} = \frac{CQ}{(2\pi H^2 + C\pi a^2)} \quad (14)$$

## 4. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. Localização da área

A área de estudo está localizada no campus Cidade Universitária da Universidade de São Paulo. Foi escolhido como local de estudo um talude que está entre duas porções que já apresentam evidências claras de movimentação de massa de solo. O talude situa-se na Av. Intersetorial próximo à Faculdade de Medicina Veterinária, conforme ilustrado pelas figuras 11 e 12.



Figura 11. Local da área de estudo indicado pela seta vermelha. Mapa da Região Metropolitana de São Paulo, Instituto Geográfico e Cartográfico.

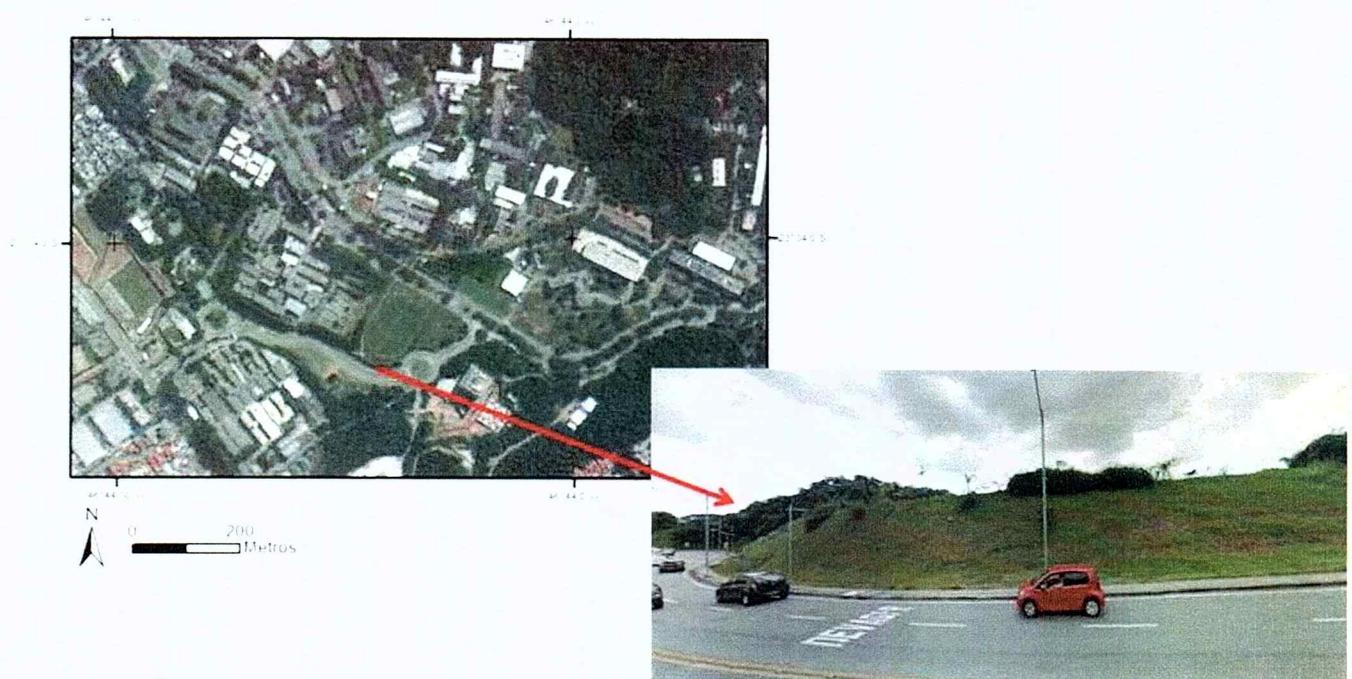


Figura 12. Local dos estudos.

#### 4.2. Geologia Regional

A geologia da Região Metropolitana de São Paulo, onde está inserida a área de estudo, pode ser compreendida entre três grandes compartimentos: o embasamento pré-cambriano, sedimentos Paleógenos a Neógenos (Terciários) da Bacia de São Paulo e coberturas quaternárias. O mapa geológico do município de São Paulo pode ser observado na Figura 1 do Anexo A.

O embasamento Pré-Cambriano da região pode ser representado pelo Complexo Embu, que juntamente com o complexo Pilar, compõe o Grupo Açuengui (Hasui et al. 1976), composto por rochas ortognáissicas migmatizadas e deformadas (Hasui et al 1976), rochas metassedimentares de alto grau metamórfico (Fernandes, A. 1991) e sericita e filitos de baixo grau. Também compõe o embasamento, os Grupos São Roque e Serra do Itaberaba, constituídos por rochas metassedimentares e metavulcânicas. Além das Suítes Graníticas intrusivas, com tamanhos variados, desde stocks a batólitos, sendo de origem sintectônica e pós-tectônica (Rodrigues, 1998).

Os sedimentos terciários da Região Metropolitana de São Paulo são representados pela Bacia de São Paulo. Sedimentos Paleógenos estão restritos à Formação Resende, que é composta por depósitos de leques aluviais (Riccomini, C. 1989); Formação Tremembé, referente a depósitos de lagos do tipo playa-lake também de idade Oligocênica; e Formação São Paulo,

correspondente a depósitos de sistema fluvial meandrante (Suguio et al. 1972) tem sua área de exposição principalmente no demoninado “espião central paulista” e também ocorre com frequência na Zona Oeste e em Osasco (Rodrigues 1998). A Formação Itaquaquecetuba do Neógeno representa uma fase de sistema fluvial entrelaçado (Riccomini et al 1989). Esses sedimentos ocorrem estratigraficamente sob os depósitos holocénicos dos Rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí (Rodrigues, 1998). Apresenta contatos erosivos e seus afloramentos são restritos a áreas de exploração de areias e cascalhos para materiais industriais.

A cobertura de sedimentos quaternários foi em sua maioria, depositada no final do Pleistoceno. Os depósitos mais antigos são datados por volta de 50 ka AP em sedimentos de corpos coluviais e aluviais (Turcq e Melo 1989 apud Rodrigues, 1998).

#### *4.2.1. Geologia Local*

No mapa geológico do município de São Paulo disponibilizado pela prefeitura de São Paulo é possível ver que a Área de Estudo (Cidade Universitária) está, predominantemente, localizada sobre os depósitos cenozoicos. Representada principalmente pela Formação Itaquaquecetuba descrita como um sistema fluvial entrelaçado composto por conglomerados e areias com lamitos e argilitos subordinados e estão recobertos por sedimentos quaternários; Formação São Paulo descrita como sistema fluvial meandrante com predominância de depósitos arenosos e subordinadamente argilas e conglomerados; e pela Formação Resende, um sistema de leques associados à planície aluvial de rios entrelaçados, composta por lamitos, arenitos e conglomerados. Este mapa, adaptado de Rodriguez (1998) está presente no Anexo A.

A Associação Brasileira de Engenharia de Fundações e Serviços Geotécnicos (ABEF) publicou em 1989 um documento com diversos resultados de ensaios geotécnicos realizados no campus Cidade Universitária da USP em parceria com a Escola Politécnica.

Este documento descreve o subsolo da área de estudo como solo saprolítico migmatítico, coberto por uma camada fina de solo coluvial e uma argila siltosa marrom amarelada. Este solo saprolítico apresenta uma profundidade superior a 20 m e é basicamente constituído por silte arenoso micáceo roxo avermelhado com ocorrências de silte arenoso fino.

As bandas são irregulares e constituídas por intercalações de zonas xistosas roxo avermelhadas com zonas caoliníticas derivadas do intemperismo de feldspatos. Existem veios de quartzo com espessuras variáveis (3 cm) discordantes com a foliação remanescente e associadas às zonas caoliníticas. Essa foliação foi descrita com orientação principal Leste-Oeste e mergulho subvertical (variando entre 80° e 85° para sul). Outras descontinuidades com forma irregular são observadas associadas com óxidos de ferro e

outros hidróxidos. Além disso, os resultados dos ensaios SPT indicam que tratam-se de solos densos.

#### **4.3. Clima**

O clima da Região Metropolitana de São Paulo, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, pertence à categoria Cwa (Clima subtropical de inverno seco e verão quente). É o clima da maior parte do Estado de São Paulo, ocorrendo também em outras regiões do país como no centro e Sul de Minas Gerais, sudoeste do Espírito Santo e no sul do Mato Grosso do Sul.

O mês mais chuvoso do ano é representado por fevereiro com uma média de 221,5 mm e o mês de agosto o mais seco com 43,9 mm. Fevereiro também é o mês mais quente com média da temperatura do ar em 22,4°C e julho o mês mais frio com média de 15,8°C. A umidade relativa do ar varia de 74% a 80% ao longo do ano. Além disso julho é o mês com a maior incidência solar e dezembro o menor.

Considerando que se trata de uma região com grande influência urbana e antrópica, Pereira Filho et al. (2007) analisaram os dados meteorológicos de 1936 a 2005 da Estação Meteorológica do IAG/USP. Este trabalho apresenta que em 70 anos houve um aumento da temperatura do ar em 2,1°C, sendo que a média global aumentou 1°C nesse mesmo período. Aumento da precipitação em 395 mm e decréscimo da umidade relativa do ar em 7%. Essas mudanças climáticas são devido à influências antrópicas regionais como expansão da área urbana, aumento da poluição do ar, redução de áreas vegetadas e aos gases de efeito estufa num âmbito mais global. Além disso, os eventos de enchente da RMSP estão relacionados com a ilha de calor e circulação da brisa marítima no período chuvoso.

### **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **5.1. Levantamento Topográfico**

Para locar os pontos de amostragem, a primeira etapa consistiu no levantamento topográfico do talude a ser estudado. O primeiro levantamento topográfico foi feito de modo convencional, porém com escala e densidade de pontos inadequada para este estudo, já que se trata de uma análise em escala métrica e o levantamento foi realizado com escala decimétrica. Portanto esses dados foram descartados.

O segundo levantamento foi realizado com a um estação que locou os pontos e escaneou o talude tridimensionalmente com escala detalhada. O levantamento foi realizado no dia 22 de maio de 2016 com a assistência do doutorando da Escola Politécnica, Fernando Ribeiro.

Os dados topográficos foram obtidos através da estação total Leica TDRA6000. Trata-se de uma estação total que além de locar e dar as coordenadas dos pontos medidos, escaneia a superfície com resolução milimétrica. Por conta da sua alta definição é uma ferramenta ainda de alto custo, utilizada para monitorar movimentos sutis em construções no metrô, por exemplo, ou em barragens de rejeito e vem sendo atribuída também para monitoramento de taludes. O uso do equipamento foi autorizado pelo Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP e os dados foram processados no Laboratório de Topografia e Geodesia.

### 5.2. Localização dos pontos

A figura 13 ilustra a disposição dos pontos de amostragem do mini-infiltrômetro (I-01, I-02 e I-03) e do permeâmetro (P-01, P-02 e P-03). Os pontos do infiltrômetro foram amostrados primeiramente para o solo superficial. A fim de saber a condutividade hidráulica da camada de até 50 cm de profundidade destes mesmos pontos, utilizou-se o permeâmetro. Note que os pontos I-01 e P-01 são os mesmos, assim como os pontos I-03 e P-03. No ponto I-02 não foi possível avançar em profundidade maior que 10 cm por conta das limitações do solo, onde foi encontrada uma camada de concreto. Portanto o ponto P-02 foi deslocado.



Figura 13. Mapa de pontos amostrados.

### **5.3. Ensaios de condutividade**

#### *5.3.1. Infiltrômetro (Mini Disk Portable Infiltrometer)*

Primeiramente foi utilizado um infiltrômetro, (*Mini Disk Portable Tension Infiltrometer*), como ferramenta para registrar os valores de condutividade hidráulica de pontos, estrategicamente escolhidos, do solo superficial em questão. Como este equipamento é um infiltrômetro de tensão, ele mede a condutividade hidráulica do meio não saturado, e pode ser aplicado com tensões diferentes. O fluxo em um meio não saturado é mais complexo que o fluxo contínuo de um meio saturado, os macroporos normalmente são preenchidos por ar, deixando os outros poros para acomodar o movimento da água.

Por conta disso, o equipamento tem um ajuste de sucção (de 0,5 a 7,0 cm), assim é possível conseguir uma informação adicional sobre o solo. Esse controle é feito através da eliminação de macroporos com a entrada de ar menor do que a sucção do infiltrômetro. Para a maioria dos solos, a recomendação do fabricante é de ajustar a sucção para 2 cm. Para solos arenosos, onde a infiltração ocorre de forma mais rápida, o ajuste deve ser feito para 6 cm. Como o solo da área em questão é mais compacto, o ajuste foi feito para 0,5 cm.

O procedimento é muito simples e pode ser operado por apenas uma pessoa. Primeiramente a superfície do terreno tem que estar limpa (retirar a grama ou algumas raízes que possam atrapalhar o contato do equipamento) e plana. Depois basta encher os reservatórios do equipamento – o principal graduado e o superior – e ajustar a sucção escolhida no tubo metálico superior. Assim que o disco entra em contato com o solo, a infiltração é iniciada.



Figura 14. *Mini Disk Portable Tension Infiltrometer*.

No ensaio em campo foram obtidos cinco valores de condutividade hidráulica em três pontos de amostragem na porção mais a sul do talude. Através da planilha excel disponibilizada pela Decagon Services, fabricante do equipamento, foi calculada a condutividade hidráulica saturada do solo nos pontos amostrais. O cálculo usado na planilha “Decagon Macro” – disponível para download no site da marca - é baseado no método proposto por Zhang (1997), como descrito no item 3.4.1.

Os dados inseridos na planilha macro são apenas o volume de água presente no equipamento e seu tempo correspondente, o tipo de solo e a sucção utilizada, gerando assim o parâmetro  $C_1$  que será utilizado para calcular a condutividade. Os resultados estão apresentados no item 6.3.1.

#### 5.3.2. Permeâmetro de Guelph

O permeâmetro de Guelph utilizado neste trabalho foi desenvolvido pelo Dr. Sidney R. Vieira do Instituto Agronômico de Campinas (IAC/SP). A estrutura do equipamento é modificada em relação ao permeâmetro de Guelph original, porém o princípio, métodos e cálculos utilizados para a determinação da condutividade hidráulica saturada em campo são os mesmos (Vieira, 2001).

A princípio foram escolhidos para esse ensaio os mesmos pontos utilizados para a análise da condutividade com o infiltrômetro e podem ser observados na Figura 13. Por conta das restrições do equipamento, não é possível operá-lo em profundidades superiores a 90 cm sem a abertura de trincheiras. Portanto foram feitos furos de 30 cm e 50 cm para cada ponto. Nota-se que o ponto P-02 não foi analisado com o permeâmetro porque ao atingir 10 cm de profundidade neste local, foi encontrada uma superfície de concreto. Portanto esse ponto foi movido lateralmente a norte do terreno, porém na mesma altura do talude.

A preparação do ensaio inicia-se com a abertura do furo até a profundidade desejada. Foram utilizadas cavadeira reta e cavadeira articulada para a abertura do furo. Este furo foi feito de forma cilíndrica com diâmetro de 20 cm, fundo plano e foi limpo para evitar interferências. Com o furo preparado, coloca-se a extremidade inferior do permeâmetro em contato com o solo, mantendo-a em posição vertical e com as mangueiras conectadoras em posição natural para que o fluxo não seja impedido. Enche-se o reservatório com água e com a tampa fechado, verifica-se se o aparelho está completamente vedado e sem bolhas atrapalhando o fluxo da água.



Figura 15 (a) Permeâmetro de Guelph utilizado no ensaio (b) Zoom das mangueiras conectadoras e válvula graduada para a escolha da carga (H) utilizada. Furo de 30 cm.

Após a preparação, o ensaio pode ser iniciado. É aplicada uma carga constante ( $H$ ), que irá determinar a altura da água dentro do furo. O fluxo poderá então ser registrado ( $Q = R \times A$ ) com as medições do cimento do nível d'água através do tubo graduado e em intervalos de tempo determinados. Espera-se que a partir de certo momento, seja formado um bulbo de saturação ao redor do furo e que assim o fluxo torne-se constante. Dependendo do método utilizado para o cálculo da condutividade, outra carga ( $H_2$ ) deve ser aplicada repetindo o mesmo procedimento. Os resultados estão apresentados no item 6.3.2.

#### **5.4. Ensaios de laboratório**

Adicionalmente, foram coletadas amostras do solo dos pontos analisados com o permeímetro para realizar análise granulométrica do solo do talude estudado a fim de poder classificar o material que o compõe.

Para os pontos P-01 e P-02, o material analisado é uma mistura das amostras de solo coletadas nas profundidades de 30 cm e 50 cm. Para o ponto P-03, foram coletadas duas amostras diferentes, uma para a profundidade de 30 cm e outra para a profundidade de 50 cm. Os materiais foram levados para análise no Laboratório de Mecânica de Solos da Escola Politécnica. A granulometria foi realizada pela combinação dos ensaios por peneiramento e por sedimentação.

#### **5.5. Análise de fluxo e estabilidade**

Nessa etapa do trabalho, foram solicitados à Estação Meteorológica do IAG/USP os dados de pluviosidade dos últimos dez anos. Essa informação foi utilizada junto com os resultados de condutividade hidráulica saturada do solo superficial e sub-superficial para as análises de fluxo. Tais análises foram realizadas com o software Seep/W (2004) da Geo-studio.

Após realizada a análise de fluxo dos últimos dez anos do talude, foram escolhidas determinadas datas como referência para a análise da estabilidade do talude, processadas no Slope/W (2004) da Geo-studio.

### **6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS**

Primeiramente serão apresentados os resultados dos ensaios de condutividade realizados em campo.

#### **6.1. Topografia**

A topografia gerada pela estação total Leica TDRA6000 é uma nuvem de 2.854.747 pontos, representando a superfície escaneada do talude em questão. O arquivo foi processado inicialmente pelo software original do equipamento e depois exportado para o Autocad Civil 3D.

Nesse processo, a informação da topografia foi perdida. Porém para o objetivo deste trabalho, o essencial é referente à geometria do talude que foi utilizada na análise de fluxo e estabilidade. A nuvem de pontos foi gerada tridimensionalmente, um corte dela pode ser observada na figura 16.

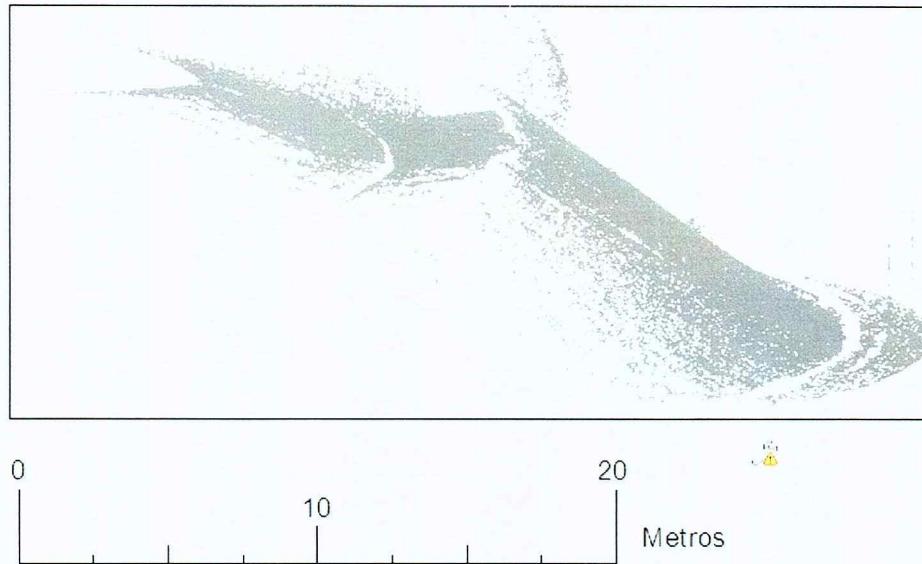


Figura 16. Corte vertical NWW-SEE da nuvem de pontos tridimensional gerada pelo levantamento topográfico do talude estudado.

## 6.2. Análise granulométrica

A fim de caracterizar o solo sub-superficial, foram coletadas amostras nos três pontos onde foram feitos os furos para a instalação do permeâmetro de Guelph (P-01, P-02 e P-03). Nos pontos P-01 e P-02, as amostras correspondem à mistura do material encontrado a 30 cm e a 50 cm. No ponto P-03 foram coletadas duas amostras diferentes, uma a 30 cm de profundidade e outra a 50 cm de profundidade. Os laudos do ensaio podem ser verificados no Anexo B e os resultados da granulometria estão apresentados nos gráficos abaixo.

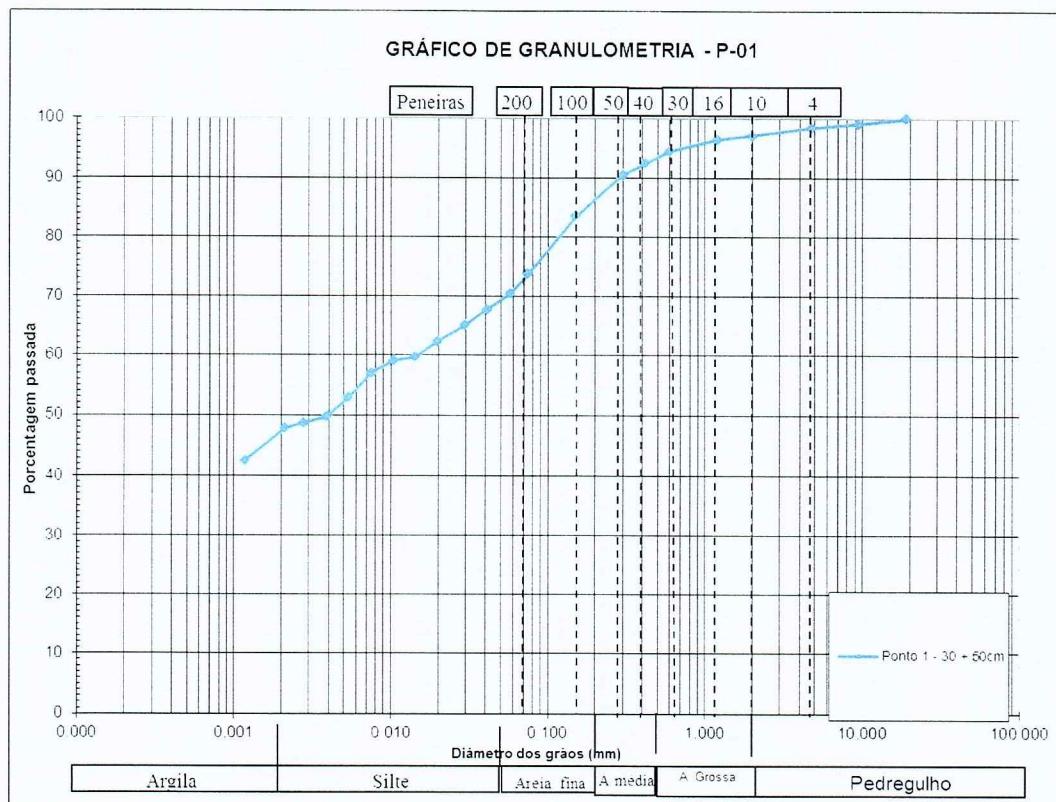


Figura 17. Granulometria da amostra do ponto P-01.

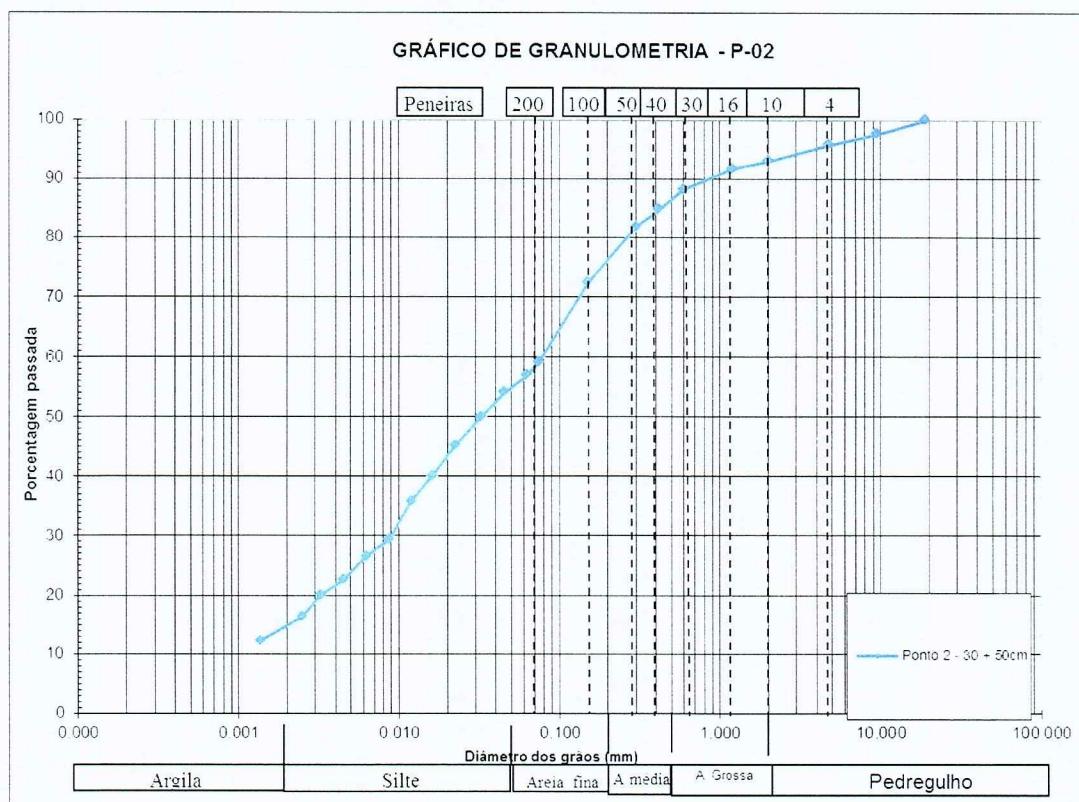


Figura 18. Granulometria da amostra do ponto P-02.

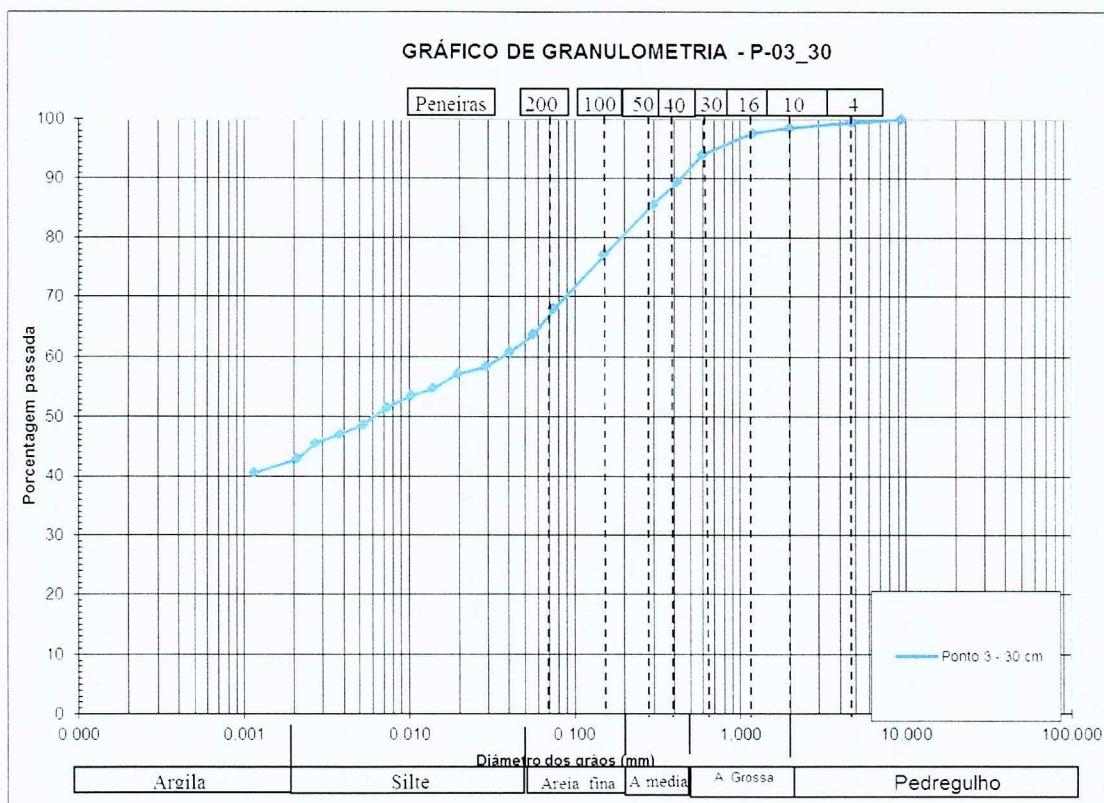


Figura 19. Granulometria da amostra do ponto P-03 na profundidade 30 cm.

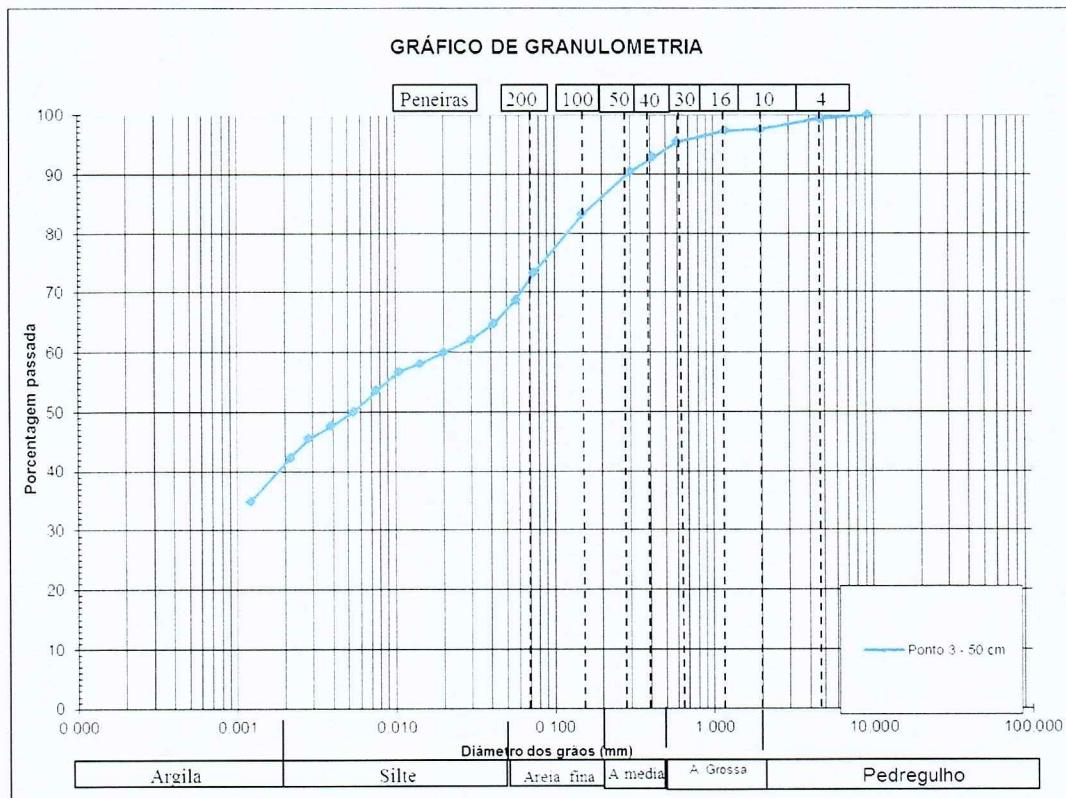


Figura 20. Granulometria da amostra do ponto P-03 na profundidade 50 cm

%	P-01	P-02	P-03_30	P-03_50	Média	Desvio Padrão
Pedregulho	3	8	2	3	4,00	2,71
Areia grossa	5	7	6	4	5,50	1,29
Areia média	7	13	11	8	9,75	2,75
Areia fina	17	27	19	20	20,75	4,35
Silte	21	29	19	22	22,75	4,35
Argila	47	16	43	43	37,25	14,29

Tabela 4. Porcentagem do material para cada fração granulométrica.

Como pode ser observado nas curvas granulométricas, o solo da área de estudo é composto essencialmente por partículas finas, com exceção do ponto P-02, mais de 40% do total de cada amostra pertence à fração argila. A amostra do P-02 pode ser considerada como bem graduada, em relação às outras amostras, por apresentar diferença inferior entre o percentual das partículas. A média nesse caso não é uma análise estatística recomendável, por conta do desvio padrão para a fração argila, principalmente, ser muito alto. Por conta disso a amostra do ponto P-02 foi desconsiderada para a classificação textural do solo.

Com o objetivo de classificar o solo de acordo com a classificação unificada de solos, utilizou-se dados da literatura (e.g. Marinho et al. 2016) para o solo da região. Desta forma, para o limite de liquidez foi adotado um valor de 48% e 19% para o índice de plasticidade. Utilizando a tabela 5 como guia, o solo pode ser classificado entre um silte de baixa plasticidade (ML) e argila de baixa plasticidade (CL).

		Processo para identificação no campo				Grupo	Designação característica			
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais de metade é maior que a abertura da peneira de malha nº 40	Processo de identificação executado sobre a fração < # nº 40 ENSAIO EXPEDITO €	PEDREGULHOS		PEDREGULHOS PUROS (pouco ou nenhum fino)		GW	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.			
		AREIAS		PDREGULHOS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)						
		Mais que metade da fração grosseira e maior que a # nº 10	AREIAS PURAS (pouco ou nenhum fino)	Finos não plásticos (ML ou MH).		GP	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino.			
		Mais que metade da fração grosseira menor que a # nº 10	AREIA COM FINOS (quantidade de finos)	Finos plásticos (CL ou CH)						
		Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		SW		GC	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.			
		Predominância de um grão ou graduação falhada		SP						
		Finos não plásticos (ML ou MH)		SF		SC	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.			
		Finos plásticos (CL ou CH ou OH)		SC						
		Processo de identificação executado sobre a fração < # nº 40				A abertura da malha # nº 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu				
		RESISTENCIA a SECO (esmagamento pelos dedos)	DILATÂNCIA (DILAÇÃO) (sacudindo na palma da mão)	RIGIDEZ (consistência na proximidade do LP)	SILTOS E ARGILAS					
		nenhuma a pequena	rápida a lenta	nenhuma						
		média a elevada	Nenhuma a muito lenta	média						
		Pequena à média	lenta	pequena						
		Pequena a média	Lenta a nenhuma	Pequena a média						
		Elevada a muito elevada	nenhuma	elevada						
		Média a elevada	Nenhuma a muito lenta	Pequena a média						
		TURFAS								
		Facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e freqüentemente pela textura fibrosa.			Pt	Solos com elevado teor de matéria orgânica				

Tabela 5. Classificação Unificada dos Solos (Vargas, 1977).

### 6.3. Resultados de Condutividade Hidráulica

#### 6.3.1. Infiltrômetro (*Mini Disk Portable Infiltrometer*)

Para o solo superficial, foram analisados três pontos diferentes do talude gerando assim cinco valores de condutividade hidráulica saturada. O método utilizado para o cálculo está descrito no item 3.4.1. Seguindo as recomendações do fabricante, a sucção foi primeiramente definida para 1 cm e posteriormente ajustada para 0,5 cm, por se tratar de um solo compacto.

I-01A		I-01B		I-02		I-03A		I-03B	
Silty Clay		Silty Clay		Silty Clay		Silty Clay		Silty Clay	
Sucção 1 cm		Sucção 0,5 cm							
Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)
0	65	0	55	0	70	0	55	0	80
69	64	135	54	65	69	16	54	6	79
153	63	189	53	121	68	32	53	14	78
263	62	341	52	200	67	47	52	24	77
389	61	462	51	408	66	69	51	31	76
637	60	480	50	385	65	90	50	39	75
-	-	-	-	-	-	116	49	48	74
-	-	-	-	-	-	130	48	58	73
-	-	-	-	-	-	153	47	68	72
-	-	-	-	-	-	176	46	76	71
-	-	-	-	-	-	-	-	85	70

Tabela 6. Dados dos pontos amostrados.

	k (m/s)
I-01A	$3,90 \times 10^{-5}$
I-01B	$1,09 \times 10^{-4}$
I-02	$5,65 \times 10^{-5}$
I-03A	$4,34 \times 10^{-4}$
I-03B	$1,04 \times 10^{-3}$

Tabela 7. Valores da condutividade hidráulica saturada do solo superficial medidas com o infiltrômetro.

A média destes valores –  $K_{sat} = 7,31 \times 10^{-4}$  cm/seg – foi utilizada para a análise de fluxo, referente à Camada Superficial.

#### 6.3.2. Permeâmetro de Guelph

O ensaio em campo com o permeâmetro de Guelph foi realizado em três pontos amostrais, com duas profundidades (30 cm e 50 cm) cada ponto, e com dois valores diferentes de carga (H) aplicados. Dessa forma foram gerados onze valores de fluxo (Q), como mostra a tabela 8.

Ponto	Profundidade (m)	Carga (cm)	R	Q
-------	------------------	------------	---	---

P-01	30	5	0,0008333	R1	0,047183	Q1
		10	0,0033333	R2	0,188733	Q2
	50	5	0,0016667	R1	0,094367	Q1
		10	0,0083333	R2	0,471833	Q2
P-02	30	5	0,0033333	R1	0,188733	Q1
		10	0,0033333	R2	0,188733	Q2
	50	5	0,0083333	R1	0,471833	Q1
		10	-	R2	-	Q2
P-03	30	5	0,0033333	R1	0,188733	Q1
		8	0,0066667	R2	0,377467	Q2
	50	5	0,0066667	R1	0,377467	Q1
		8	0,0066667	R2	0,377467	Q2

Tabela 8. Valores de R e Q para os diferentes pontos amostrais.

O termo R é a relação da queda do nível d'água medido no reservatório tubular graduado com o intervalo de tempo determinado uma vez que o fluxo se manteve estável. Sendo assim é possível o cálculo do fluxo Q ( $Q=Rx A$ ), sendo que A é a área do tubo graduado. O ponto P-02\_50\_10 não foi analisado porque o fluxo nunca atingiu um estado estável, impossibilitando o seu cálculo.

A fim de estimar a condutividade hidráulica saturada do solo sub-superficial, foram utilizados três métodos diferentes. O primeiro deles trata-se do método desenvolvido por Reynolds et al. (1985), o qual é necessário aplicar duas cargas hidráulicas diferentes para o cálculo. O segundo é o desenvolvido por Elrick et al. (1989), que usa o parâmetro  $\alpha$  para tipos de solo diferentes. E o terceiro é o apresentado por Vieira (2001) que foi baseado na equação 6 e desenvolvido baseado em Laplace. Estão representados no item 3.4.2., pelas equações 12, 13 e 14, respectivamente.

Ponto	Profundidade (m)	Carga (cm)	Ksat - Equação 12 (cm/seg)	Ksat - Equação 13 (cm/seg)	Ksat - Equação 14 (cm/seg)
P-01	30	5	$3,81 \times 10^{-4}$	$4,29 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-4}$

		10		$2,43 \times 10^{-4}$	$5,38 \times 10^{-4}$
P-02	50	5	$9,84 \times 10^{-4}$	$8,58 \times 10^{-5}$	$2,40 \times 10^{-4}$
		10		$6,08 \times 10^{-4}$	$1,34 \times 10^{-3}$
		5		$1,72 \times 10^{-4}$	$4,81 \times 10^{-4}$
P-03	30	10	$1,91 \times 10^{-4}$	$3,34 \times 10^{-4}$	$5,38 \times 10^{-4}$
		5		$4,29 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-3}$
	50	10	-	-	-
		5		$1,72 \times 10^{-4}$	$4,81 \times 10^{-4}$
	30	8	$6,35 \times 10^{-4}$	$4,86 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-3}$
		5		$3,43 \times 10^{-4}$	$9,61 \times 10^{-4}$
	50	8	$3,82 \times 10^{-4}$	$4,86 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-3}$

Tabela 9. Valores de  $K_{sat}$  calculados para três métodos diferentes.

Para este trabalho foram utilizados somente os valores obtidos pela equação 14. A média destes valores –  $K_{sat} = 3,34 \times 10^{-4}$  cm/seg – foi utilizada para a análise de fluxo, referente à Camada 1.

Estes resultados são consistentes com o esperado para o material em questão. Como mencionado no item 6.2, os resultados da análise granulométrica, revelam que mais de 40% do total das amostras consideradas é composto por argila. A argila por ser uma partícula fina, tende a apresentar baixos valores de permeabilidade, variando entre  $10^{-4}$  a  $10^{-9}$  cm/s (Tindall & Kunkel, 1999). Como o solo é composto, em sua maioria, por materiais finos, era de se esperar que o resultado da condutividade hidráulica/permeabilidade estivesse na mesma ordem de grandeza.

#### 6.4. Análise de fluxo e estabilidade

Para a análise de fluxo, primeiramente foram utilizados os dados de topografia para definir a geometria do talude estudado. Em seguida, foram definidos os limites para cada camada de solo. A primeira camada, denominada “Camada Superficial” foi delimitada até 0,5 m de profundidade. A segunda camada, “Camada 1” foi delimitada até 1,5 m de profundidade, a “Camada 2” até os 6,0 m e a “Camada 3” iniciando aos 6,0 m e sem definição para o seu limite inferior.

Os valores de condutividade hidráulica das Camadas 2 e 3, foram definidos de acordo com o documento realizado pela Associação Brasileira de Engenharia de Fundações e Serviços Geotécnicos (ABEF), publicado em 1989, em parceria com a Escola Politécnica da USP.

Amostra	Coeficiente de Permeabilidade (cm/seg)	Profundidade da amostra (m)	Camada de Referência
I.1	$4,8 \times 10^{-5}$	1,2	Camada 2
I.2	$1,0 \times 10^{-5}$	2,8	Camada 2

I.4	$1,1 \times 10^{-5}$	5,8	Camada 2
I.5	$2,0 \times 10^{-6}$	7,3	Camada 3
I.6	$2,0 \times 10^{-6}$	9,8	Camada 3
II.2	$2,7 \times 10^{-4}$	2,8	Camada 2
	$2,0 \times 10^{-5}$		
II.4	$2,0 \times 10^{-5}$	5,8	Camada 2
	$1,9 \times 10^{-5}$		
II.6	$2,5 \times 10^{-6}$	8,9	Camada 3
	$6,3 \times 10^{-6}$		

Tabela 10. Tabela modificada de ABEF (1989).

Tendo os resultados da condutividade hidráulica medida em campo, das camadas Superficial e 1, assim como os valores obtidos pelo documento realizado pela ABEF, foram calculadas as médias desses parâmetros para serem inseridas como propriedade dos materiais. Além das 4 camadas descritas, foi definida também a camada de pavimento, com condições muito próximas a impermeabilidade.

Solo	k (cm/seg)
Superficial	$7,14 \times 10^{-4}$
Camada 1	$3,34 \times 10^{-4}$
Camada 2	$5,69 \times 10^{-5}$
Camada 3	$3,20 \times 10^{-6}$

Tabela 11. Valores de condutividade hidráulica para cada camada definida.

Adicionalmente aos valores de condutividade hidráulica, foram inseridos outros dados hidráulicos a fim de definir as curvas características de condutividade (Condutividade x Sucção) e a Curva de Retenção da Água (Conteúdo Volumétrico da Água x Sucção) para cada material inserido no modelo.

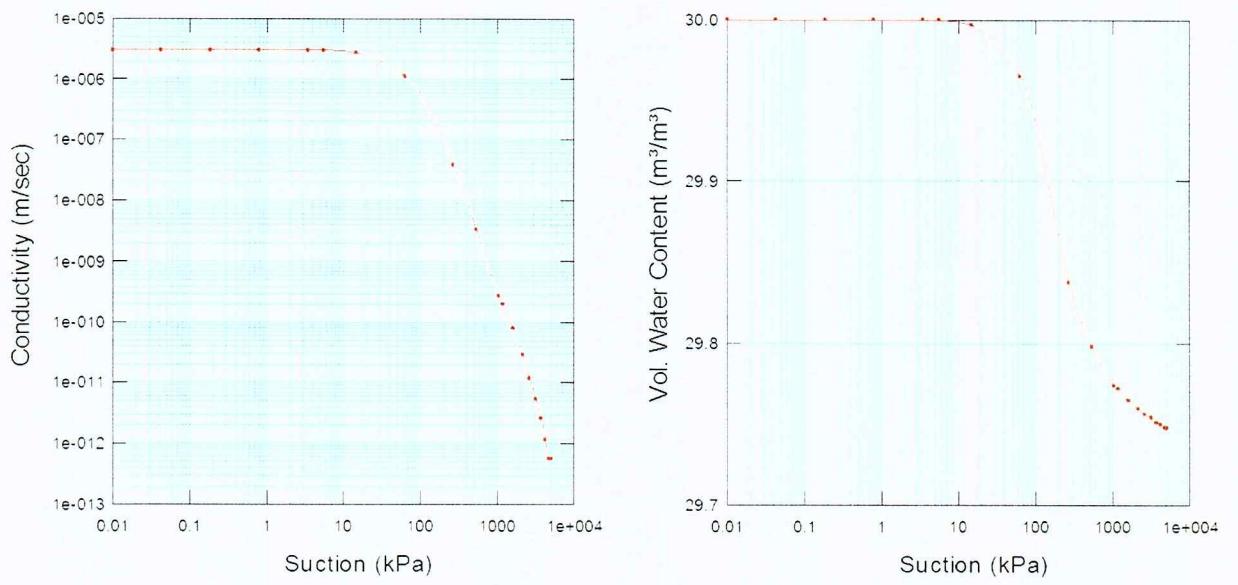


Figura 22. Curvas características do Solo Superficial.

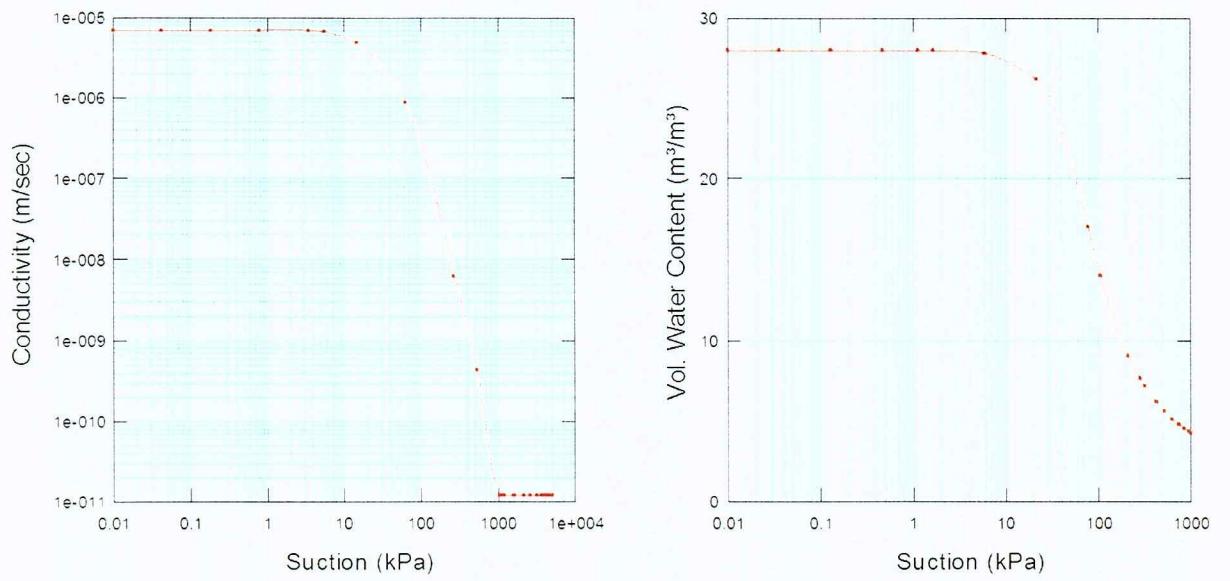


Figura 23. Curvas características da Camada 1.

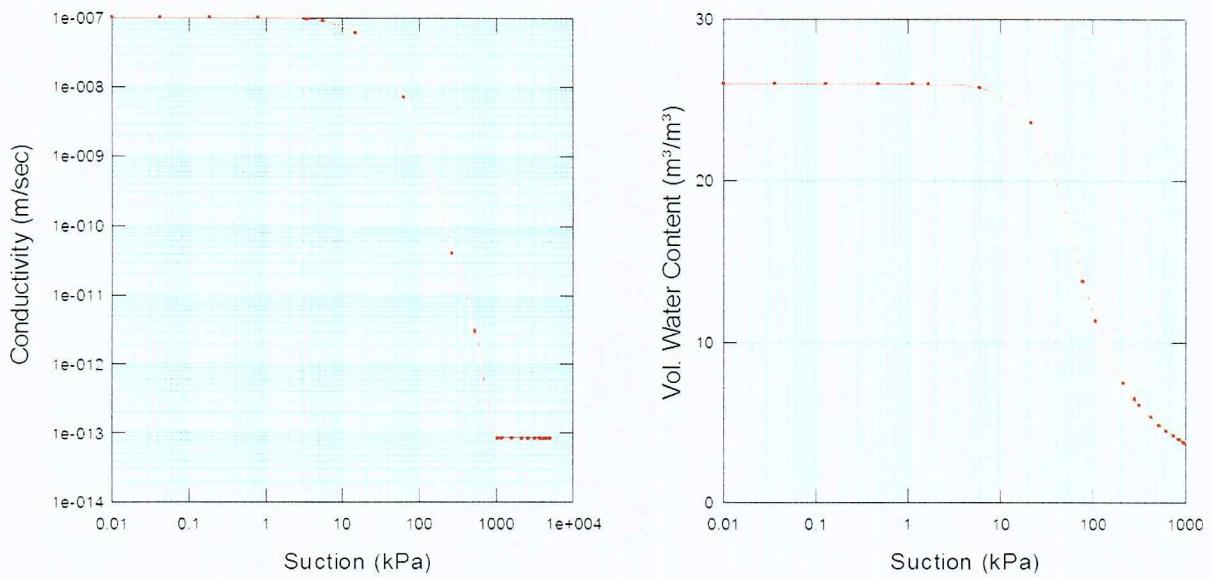


Figura 24. Curvas características da Camada 2.

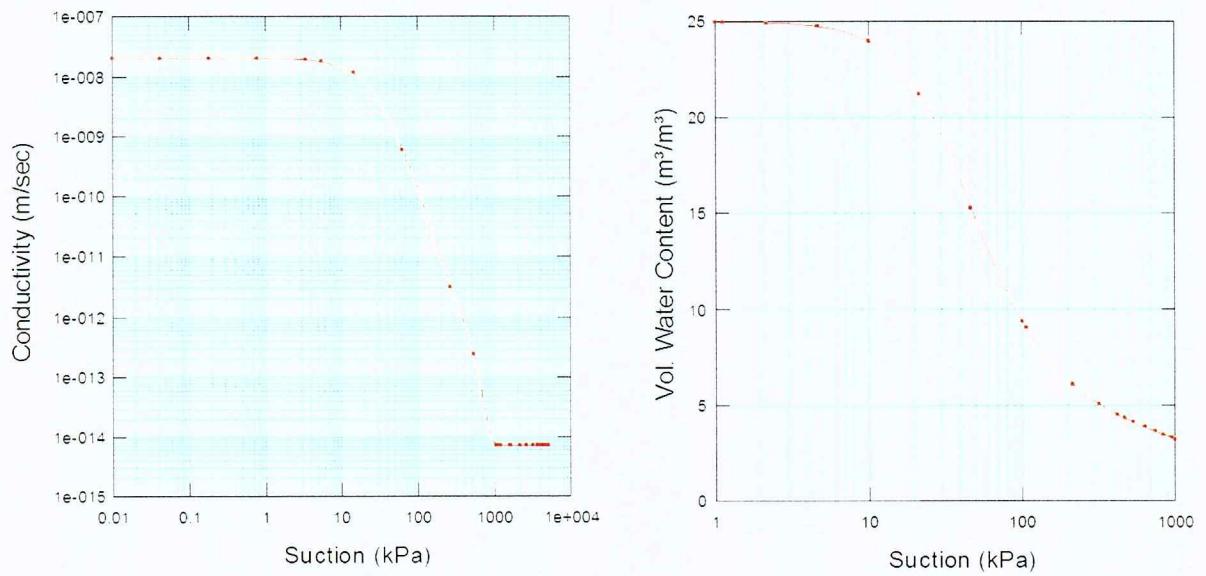


Figura 25. Curvas características da Camada 3.

Tendo definida a geometria do talude e as características dos materiais, foram estabelecidas as condições de limite para o modelo inicial. Freeze & Cherry (1979) recomendam que para locais onde o nível d'água é desconhecido ou pouco estudado, seja feita uma análise conservadora, ou seja, recomendam que coloque o nível d'água na posição mais alta possível.

Como o nível d'água da área de estudo não foi medido, foi escolhido um valor de 11,5 m, acima do que é normalmente esperado para este local. Outras condições também foram definidas, como as bordas laterais e inferior como Fluxo 0, ou seja, não há troca de água além desses limites. Essa condição, acoplada com a condição de que as bordas laterais são infinitas, restringe a análise do modelo para dentro dos limites desenhados. Vale ressaltar que o solo superficial está restrito à parte vegetada do talude. No contato a sudeste, tem-se o pavimento, com condições praticamente impermeáveis.

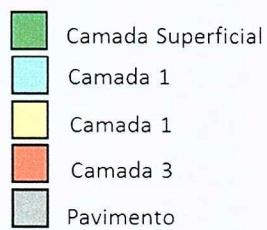


Figura 26. Índice de cores dos materiais.

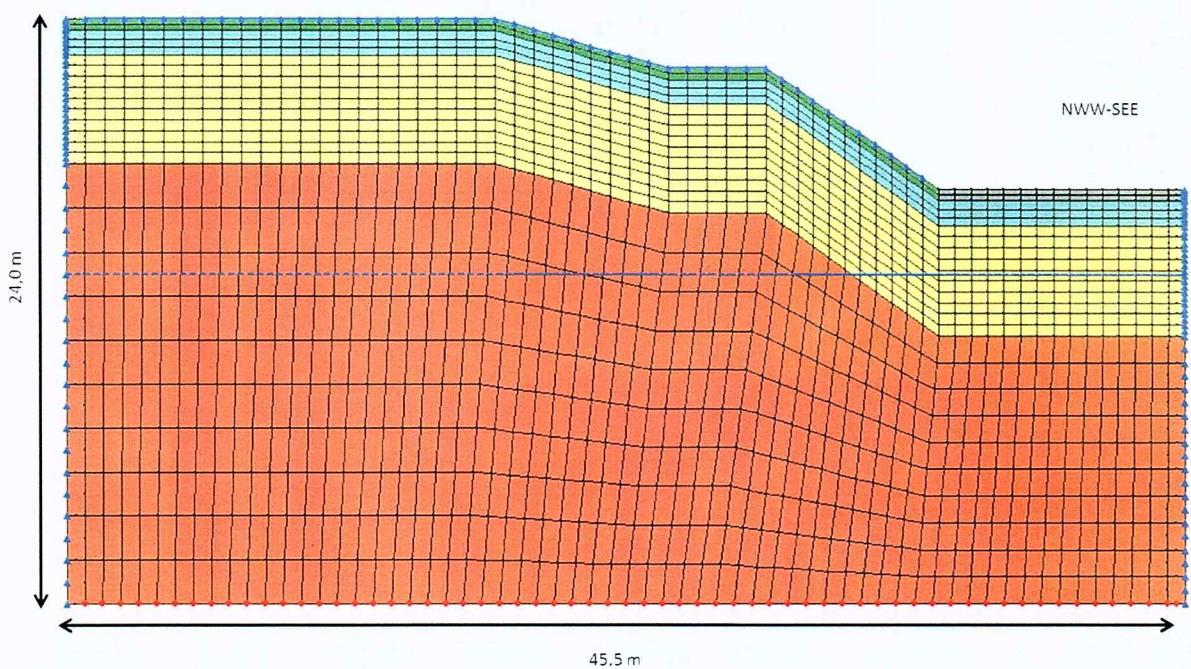


Figura 27. Modelo inicial do talude.

Para a análise de fluxo transiente, é necessário inserir os dados de pluviosidade. Para isso foi estabelecido o valor da pluviosidade acumulada de cada mês desde janeiro de 2006 até agosto de 2016. Sendo assim, serão 128 valores de pluviosidade para 128 meses. Outra condição de contorno foi estabelecida, em toda superfície do solo superficial, onde entrará a função da pluviosidade. Adicionalmente, se o fluxo de água da chuva foi maior do que a permeabilidade do solo permite infiltrar, esse volume de água extra será escoado pela superfície, portanto, não influenciará no fluxo subterrâneo.

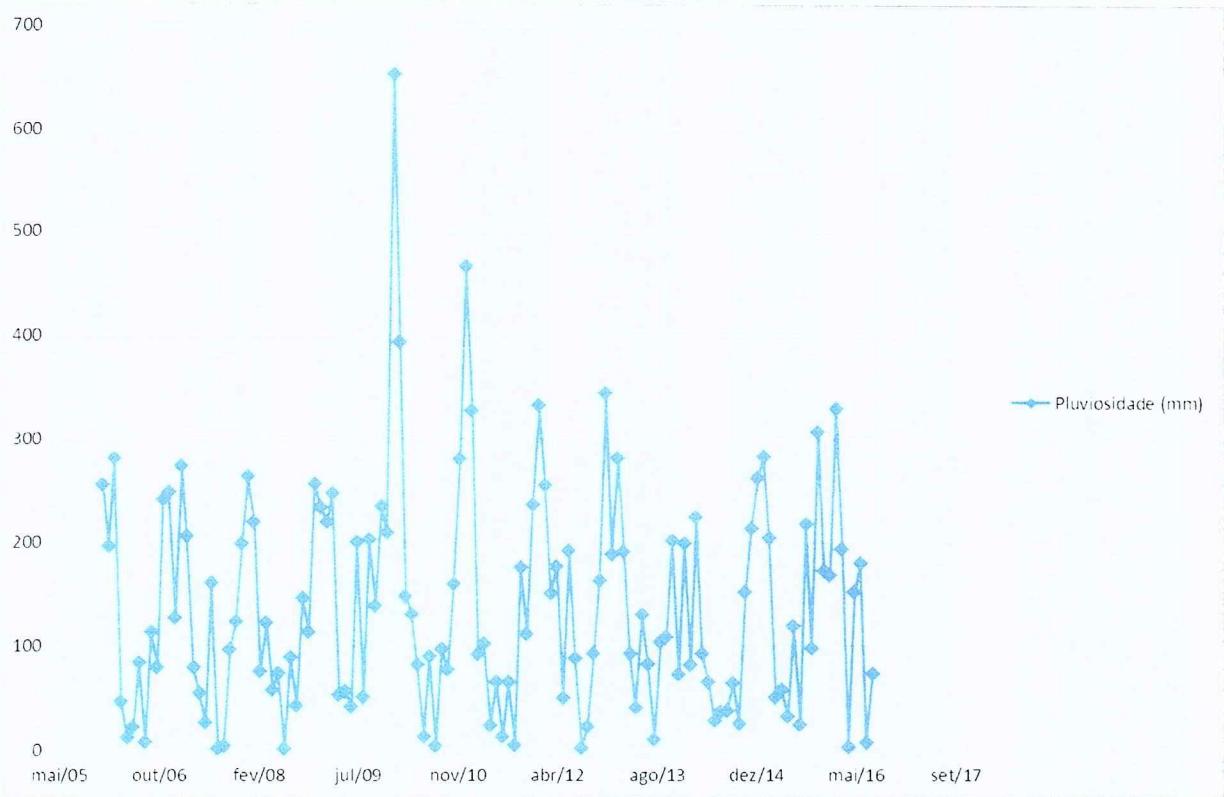


Figura 28. Pluviosidade ao longo dos anos. Dados retirados da Estação Meteorológica do IAG/USP.

Os dados obtidos pela Estação Meteorológica do IAG/USP indicam que os meses mais chuvosos dos últimos dez anos, apresentam pluviosidade acima de 200 mm, enquanto que os meses mais secos apresentam pluviosidade abaixo dos 100 mm, como pode ser observado na figura 30.

A figura 30 representa a pluviosidade no local de setembro de 2015 a agosto de 2016. Há uma queda abrupta e atípica em abril de 2016, indicando que quase não houve precipitação neste mês.



Figura 29. Pluviosidade de setembro de 2015 a agosto de 2016. Estação Meteorológica do IAG/USP.

Tendo esses dados foi possível realizar a análise de fluxo durante os 128 meses em questão.

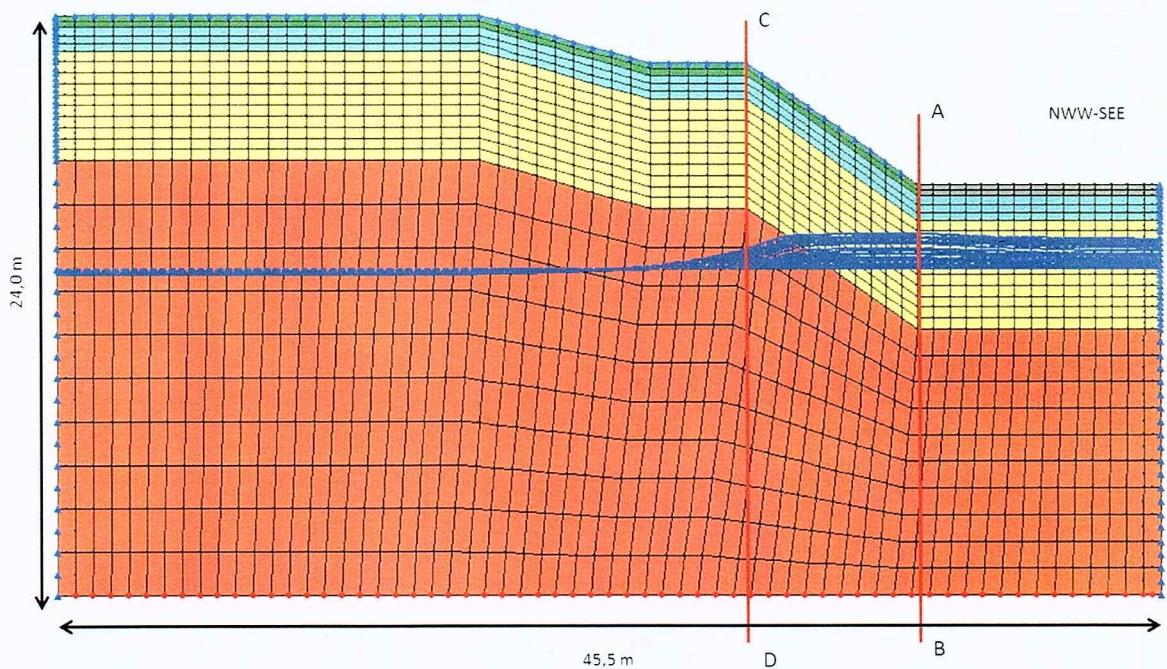


Figura 30. Modelo gerado após 128 meses de chuva.

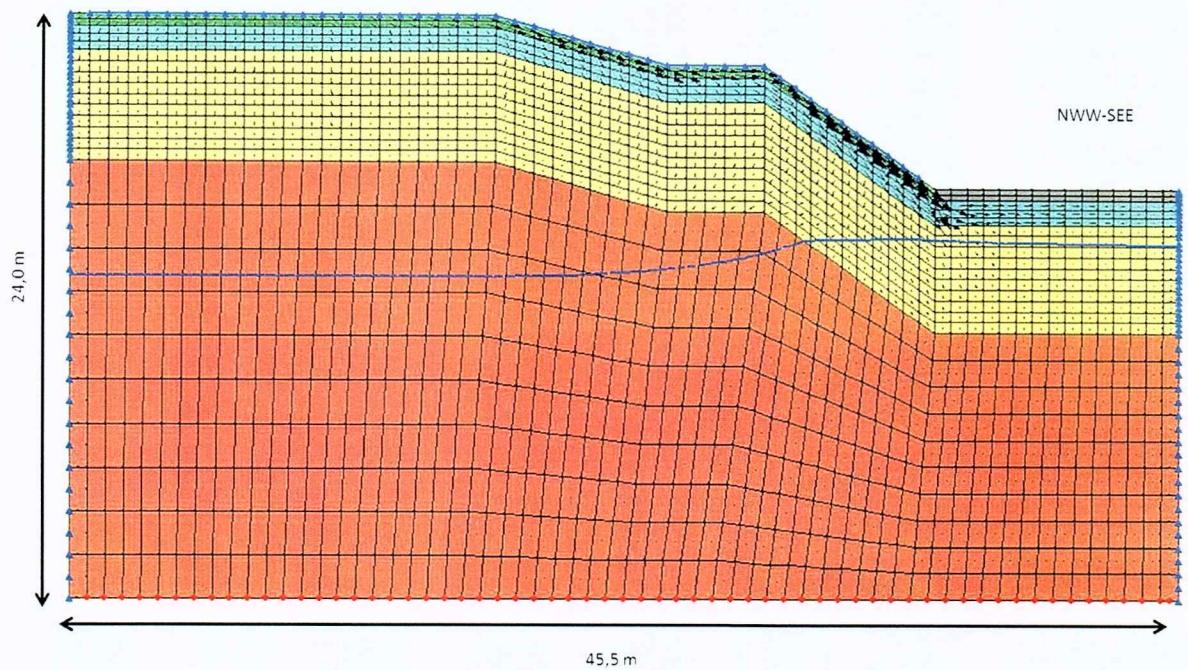


Figura 31. Modelo do fluxo em agosto de 2016. As setas em preto indicam a direção do fluxo da água infiltrada.

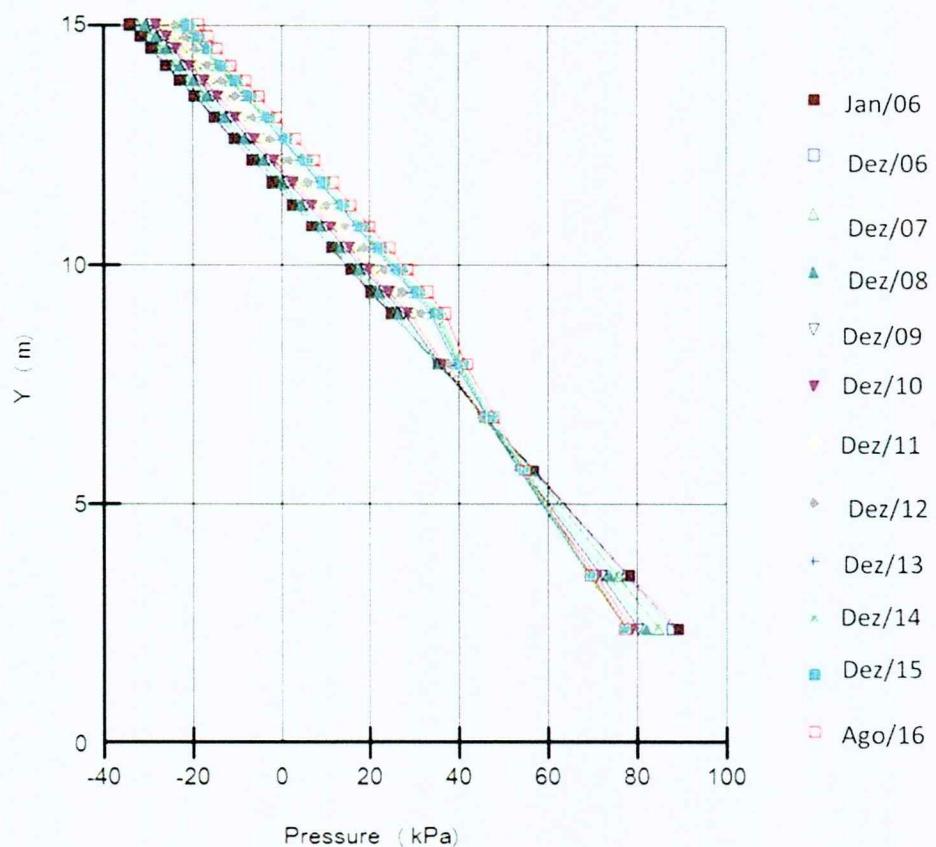


Figura 32. Pressão dos poros ao longo dos anos – seção AB

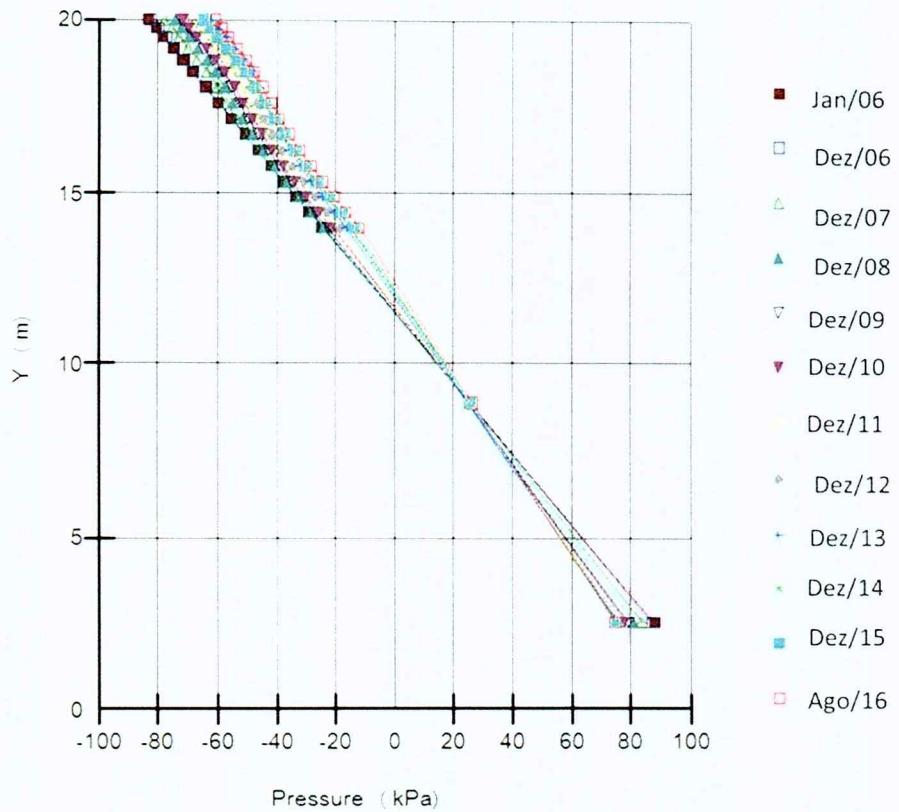


Figura 33. Pressão dos poros ao longo dos anos – seção CD

Após o período determinado de chuvas, é possível notar uma subida no nível d'água local. Os gráficos das pressões dos poros variando com a profundidade do talude, indica esse aumento no nível d'água. Na região onde está o solo não saturado, as pressões tendem a ser menos negativas, ou seja, tendem a aumentar. Já abaixo do nível d'água, as pressões positivas tendem a diminuir. Nota-se que, o último mês é o que apresenta a maior diferença da pressão de poros em relação ao estado inicial.

Na próxima etapa, é analisada a estabilidade do talude nos dois extremos do gráfico de pressão de poros. Ou seja, neste caso, por coincidência, no estado inicial e no estado final.

Os dados de entrada para cada material foram definidos. A camada de pavimento, para essa análise, foi colocada com as mesmas propriedades da Camada 1.

Solo	Superficial	Camada 1	Camada 2	Camada 3
Modelo	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Peso unitário	16 kN/m <sup>3</sup>	18 kN/m <sup>3</sup>	18 kN/m <sup>3</sup>	18 kN/m <sup>3</sup>
Coesão	5	10	10	10
Phi	20	25	25	28
Peso unitário acima no NA	16 kN/m <sup>3</sup>	18 kN/m <sup>3</sup>	18 kN/m <sup>3</sup>	18 kN/m <sup>3</sup>
Phi B	10 °	15 °	15 °	15 °

Tabela 12. Propriedades dos materiais analisados.

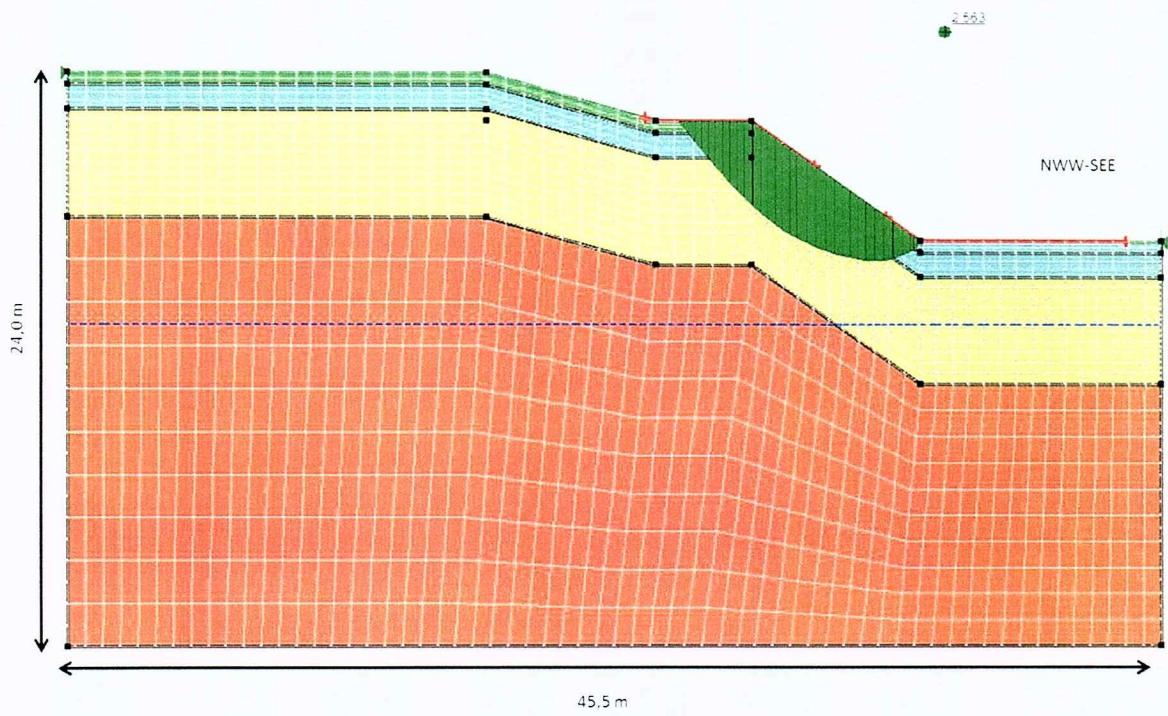


Figura 34. Modelo de estabilidade em janeiro de 2006 (estado inicial).

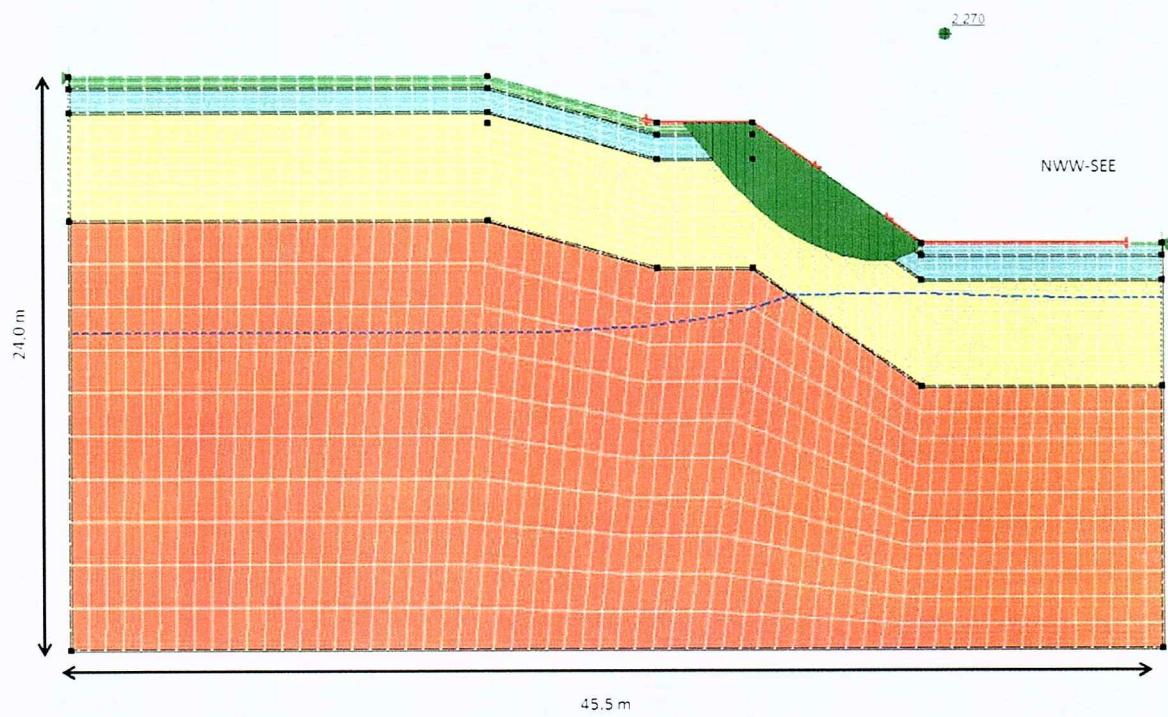


Figura 35. Modelo de estabilidade em agosto de 2016 (estado final).

Nota-se uma queda no fator de segurança gerado em janeiro de 2006 para agosto de 2016, de 2,563 para 2,270. Ainda assim, o fator de segurança pode ser considerado alto.

A fim de analisar a influência da permeabilidade da camada superficial do solo, outro modelo foi realizado, desta vez com a permeabilidade desta camada aumentada para  $1,0 \times 10^{-1}$  cm/seg (cerca de 140 vezes mais permeável que o modelo original).

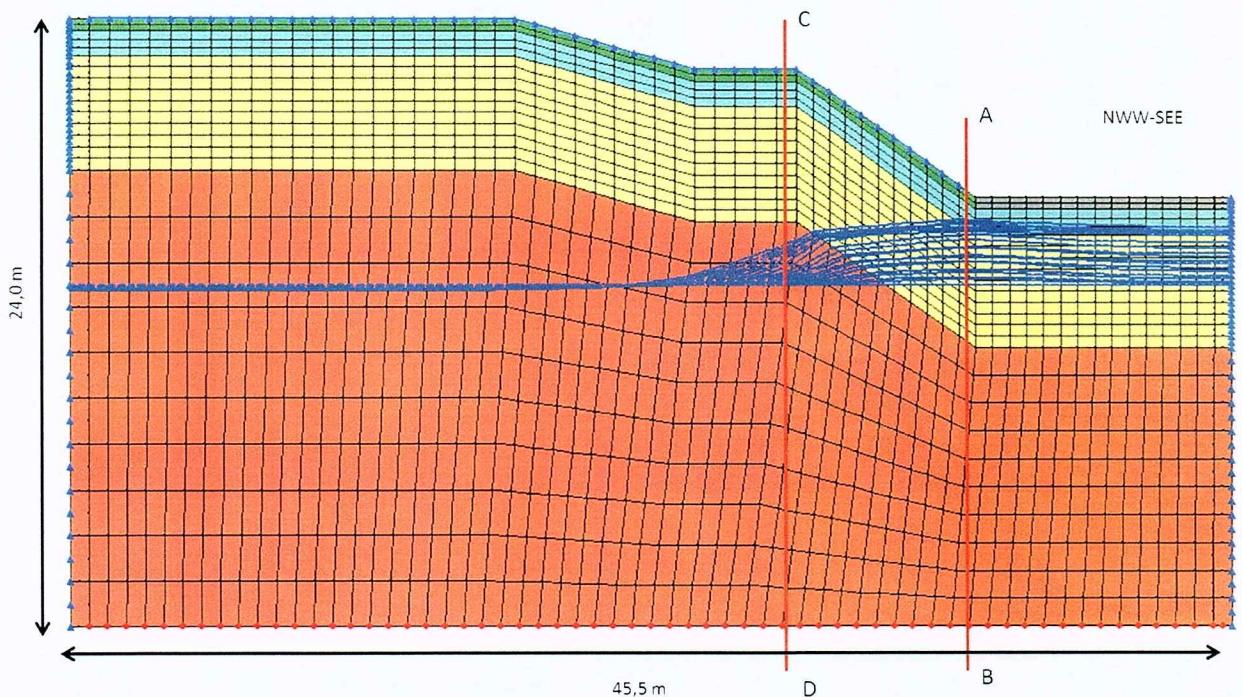


Figura 36. Modelo de fluxo gerado após 128 meses de chuva e com permeabilidade do solo superficial aumentada.

Ao comparar tanto os modelos de fluxo quanto os gráficos de pressão dos poros, há uma notável diferença no aumento do nível d'água. Nessa segunda análise, o nível d'água chega a atingir a Camada 1. Se olharmos com atenção a linha azul escuro referente a dezembro de 2013, presente nas figuras 38 e 39, podemos ver que ela está com valores maiores do que meses posteriores como dezembro de 2015. Isso indica que a água infiltrada nesta data, causou um distúrbio maior do que os meses posteriores.

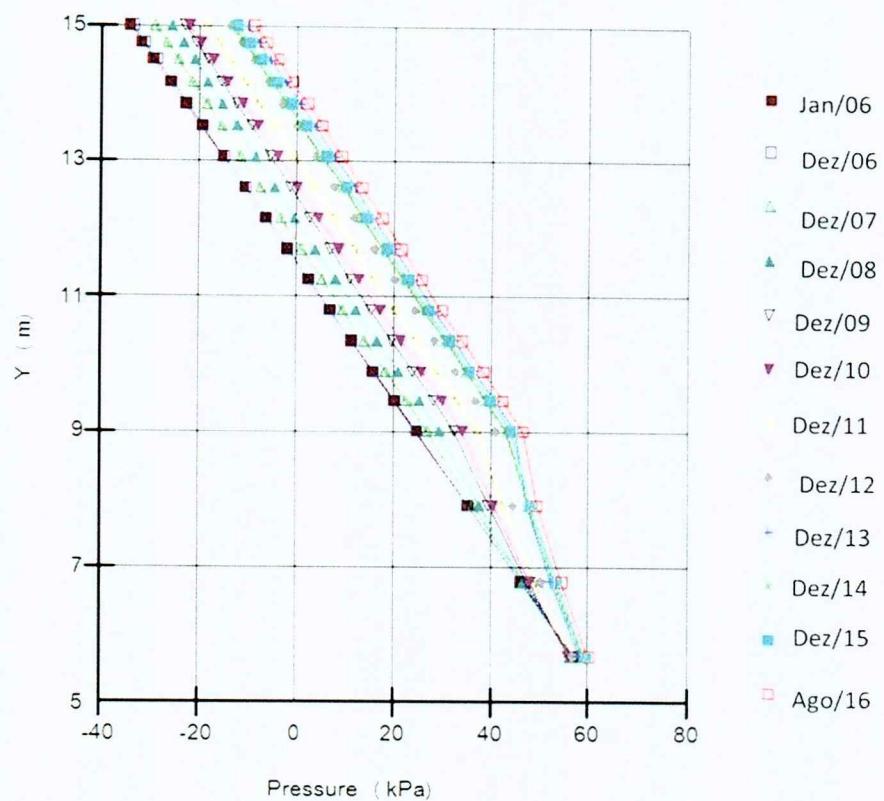


Figura 37. Pressão dos poros ao longo dos anos – seção AB. Permeabilidade do solo superficial aumentada.

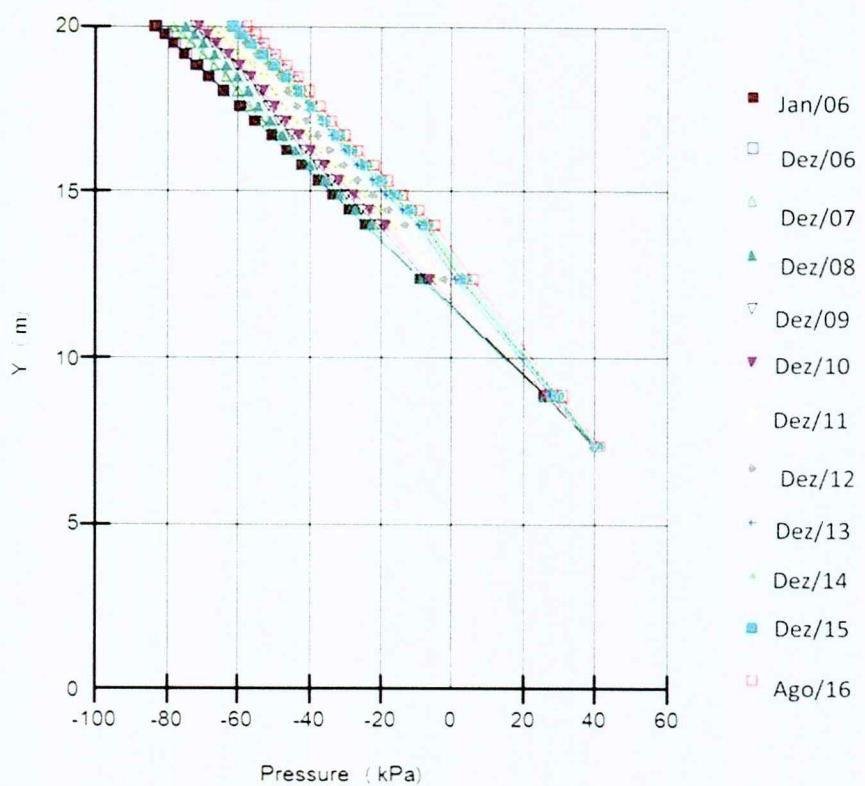


Figura 38. Pressão dos poros ao longo dos anos – seção CD. Permeabilidade do solo superficial aumentada.

Foi feita também a análise de estabilidade para essas novas condições do solo superficial.

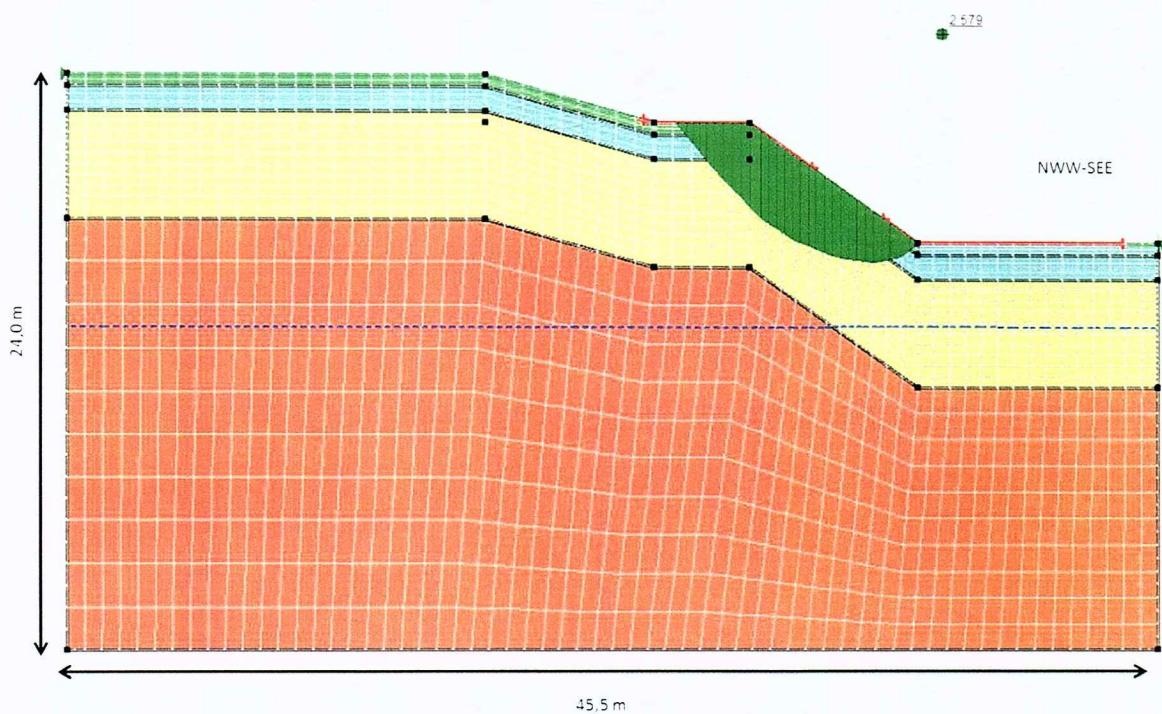


Figura 38. Modelo de estabilidade em janeiro de 2006 (estado inicial) – permeabilidade do solo superficial aumentada.

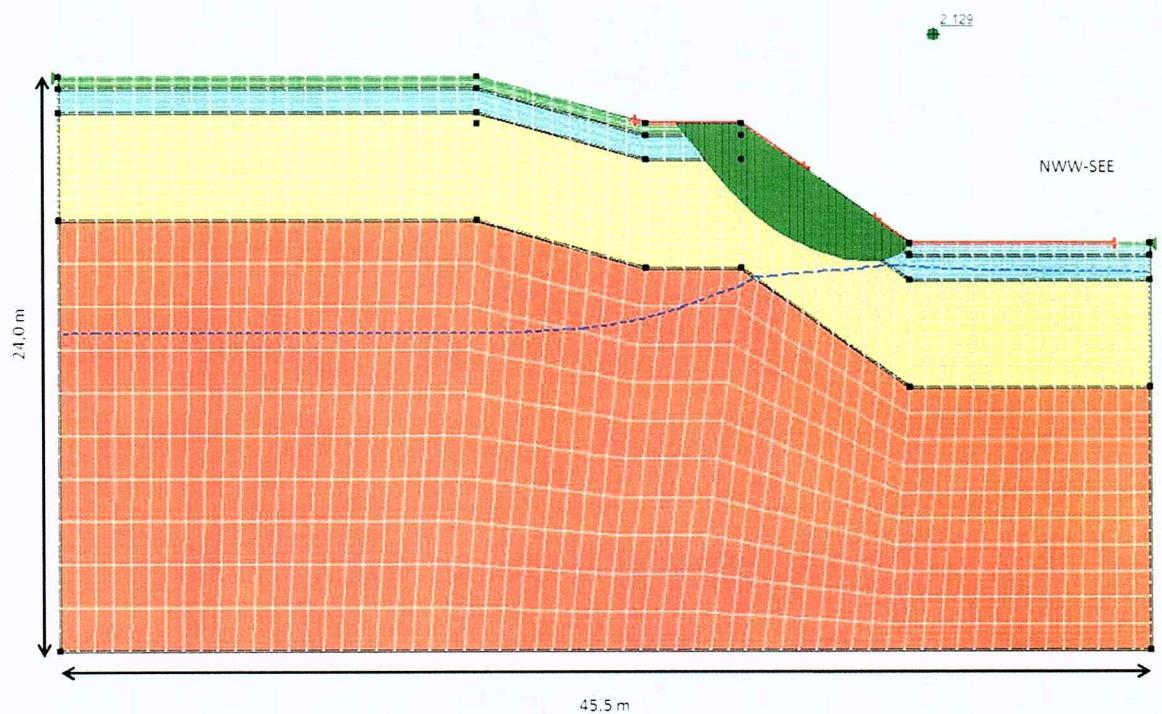


Figura 39. Modelo de estabilidade em agosto de 2006 (estado final) – permeabilidade do solo superficial aumentada.

Para essa análise de estabilidade, as mesmas condições que o modelo original foram aplicadas. O fator de segurança caiu novamente, de 2,579 em janeiro de 2006 para 2,129 em agosto de 2016, valores muito próximos ao modelo original.

Com a finalidade de visualizar melhor a queda do fator de segurança ao longo do tempo, foram feitas análises anuais, de 2006 a 2016, da estabilidade do talude com o valor real de  $K_{sat}$  do solo superficial, e seu valor multiplicado.

A Figura 40 ilustra esse comportamento. As curvas sugerem que a tendência do fator de segurança é a mesma, decrescendo ao longo do tempo, com ressalva do ano de 2013. Interpreta-se que essa queda acentuada seguida por um aumento, seja devido à intensidade da chuva naquela data. A água subterrânea teve tempo suficiente para ser distribuída no subsolo sem sofrer grandes influências por outros períodos com chuva intensa. Pode-se observar também que a queda do FS é mais intensa com o  $K_{sat}$  do solo superficial multiplicado do que com o  $K_{sat}$  real.

Contudo, essa tendência da curva de só decair ao longo do tempo, não é muito comum nesse caso. Esperava-se que a curva oscilasse em um determinado intervalo de valores do Fs. Esse comportamento anormal pode ser devido às condições de contorno aplicadas.

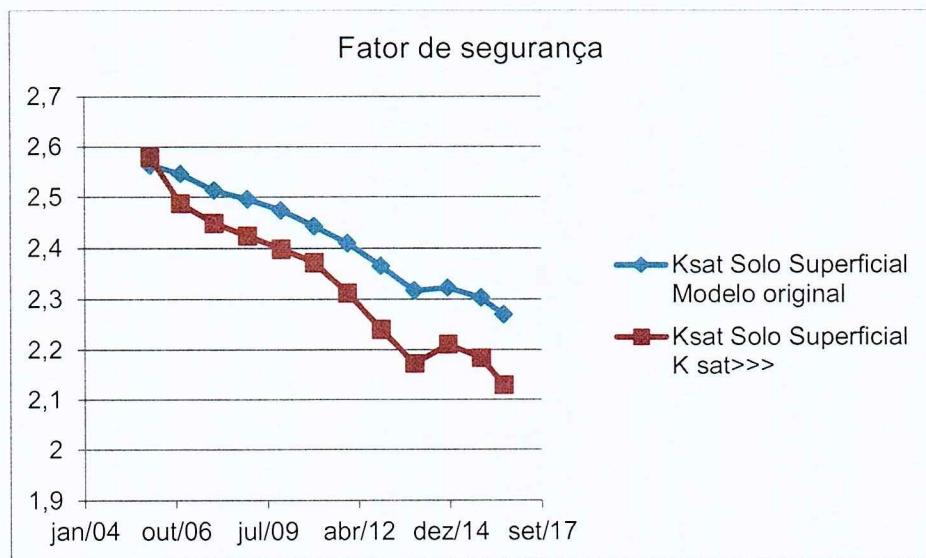


Figura 40. Fator de segurança ao longo do tempo.

Vale ressaltar que, as análises de fluxo e estabilidade foram desenvolvidas com os parâmetros hidráulicos e geotécnicos do solo vinculados com os valores de pluviosidade da área de estudo, porém não são incluídas aí, os valores de evaporação da água. Isso pode ter influenciado no resultado, porque dessa forma, considera-se que toda a água infiltrada não voltará à superfície, o que não é real. Porém esse fator foi levado em consideração e análise

foi feita de forma conservadora e ainda assim, os valores de  $F_s$  podem ser considerados altos. O cálculo é feito para que valores inferiores à unidade (1,0) seja esperada a ruptura do talude analisado, e neste caso, os valores são superiores a 2,0.

## 7. CONCLUSÃO

Os estudos realizados permitiram se obter algumas conclusões relativas aos seguintes aspectos: levantamento topográfico do talude, características granulométricas do solo estudado, determinação da condutividade hidráulica do solo em campo, análise de fluxo transiente e análise de equilíbrio limite acoplada ao estudo de fluxo.

### Levantamento topográfico

O levantamento topográfico feito com o sistema da estação total TDRA6000 gerou como produto um modelo de nuvem de pontos tridimensional, reproduzindo a superfície do talude com resolução milimétrica. Os dados reais topográficos foram perdidos no processo, porém a geometria, fator essencial para o trabalho, foi utilizada para o modelo de fluxo e estabilidade. Para o presente trabalho, o uso do equipamento foi de grande importância.

### Características granulométricas do solo estudado.

A análise granulométrica revelou que o material que compõe o solo da área de estudo, é composto, principalmente, por partículas finas, sendo silte e argila as principais. Seguindo os dados da literatura consultada (Marinho et al. 2016) e os resultados obtidos da análise, o solo pode ser classificado entre um silte de baixa plasticidade e argila de baixa plasticidade, de acordo com a classificação unificada para solos. O resultado é compatível com os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica, pois para solos mais finos compactos, a permeabilidade esperada é baixa.

### Determinação da condutividade hidráulica em campo

Foram utilizados dois equipamentos de campo para a determinação da condutividade hidráulica, o mini-infiltrômetro e o permeâmetro de Guelph.

Os equipamentos utilizam pouca água e a operação é bastante simples, podendo ser conduzida por apenas uma pessoa no caso do infiltrômetro ou por duas pessoas no caso do permeâmetro. Produzindo resultados consistentes e satisfatórios.

O uso dos dois equipamentos permitiu a determinação das condutividades hidráulicas nas camadas superficiais. Os valores obtidos indicam que na superfície a condutividade hidráulica foi na ordem de  $7,14 \times 10^{-4}$  cm/s. E a uma profundidade de até 50 cm a condutividade hidráulica foi na ordem de  $3,34 \times 10^{-4}$  cm/s.

### Análise de fluxo

A análise de fluxo utilizando o regime de chuvas local permitiu obter a variação da sucção ao longo do ano. Embora não se tenha utilizado dados de evaporação considera-se que o resultado obtido exibe uma variação de pressão da água que pode ser utilizada em análises de estabilidade.

As variações de sucção no pé do talude se mostraram maior do que no topo. A análise de fluxo revelou um aumento pontual do nível d'água, resultante do acúmulo da água infiltrada da chuva no pé do talude. A condutividade hidráulica do solo superficial tem uma grande influência na infiltração de água.

### Análise de estabilidade por equilíbrio limite

A variação do fator de segurança foi influenciada pela variação da pressão dos poros ao longo do tempo devido à quantidade de água da chuva infiltrada no solo. A quantidade de água infiltrada também pode variar de acordo com a permeabilidade da camada superficial do solo. As análises de estabilidade por equilíbrio limite indicaram que o talude analisado é estável.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Associação Brasileira De Engenharia de Fundações e Serviços Geotécnicos (1989). *USP Experimental Site. XII ICSMF*.

Antonino, A. C. D., Jaramillo, R. A., Souza, E. S., Netto, A. M., Carneiro C. J. G., Montenegro, A. A. A. (2000). *Determinação da Condutividade Hidráulica e da Sorvidade de um solo com infiltrômetro a disco*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.2(5), 247-253.

Decagon Macro. Disponível em <<https://www.decagon.com/en/hydrology/hydraulic-conductivity/mini-disk-portable-tension-infiltrometer/>>.

Decagon Services Inc. (2014). *Mini Disk Infiltrometer*.

Elrick, D. E., Reynolds, W. D., Tan, K. A. (1989). *Hydraulic Conductivity Measurements in the Unsaturated Zone Using Improved Well Analyses*. The Groundwater Association. V. 9(3). 184-193.

Fernandes, A.J., (1991). *O Complexo Embu no Leste do Estado de São Paulo: Contribuição ao Conhecimento da Litoestratigrafia e da Evolução Estrutural e Metamórfica*. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons Inc.

- Fredlund, D.G., Vanapalli, S.K. (2002). Shear Strength for Unsaturated Soils. *Agronomy Soil Testing Manual*, Agronomy Society of America, 329-361.
- Fredlund, D.G., Xing, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 31(3), 521-532.
- Freeze, A. R., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice Hall.
- Hasui, T., Sadowski, G.R., Carneiro, C.D.R., (1976). *Considerações sobre a Estratigrafia do Pré-Cambriano na Região de São Paulo*. Boletim IG, Instituto de Geociências, USP, V. 7, 107.
- Lopes, E.S.S., Riedel, P.S., Bentz, C.M., Ferreira, M.V., Naleto, J.L.C. (2007). *Inventário de escorregamentos naturais em banco de dados geográfico – análise dos fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão – SP*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 2785-2796, Florianópolis, INPE.
- Marinho, F.A.M. (2013). *Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento para Estudos de Encostas e Taludes: Ensaios de Laboratório*. VI Conferência Brasileira de Encostas, 119-134, Angra dos Reis.
- Marinho, F. A. M.; G. G. Carnero; Orlando, P. DG. (2016). *Constant Water Content Compression Tests on Unsaturated Compacted Soil with Suction Measurement Using a HCT*. In International Journal of Geomechanics. , v.16,
- Pereira Filho, A. J., Santos, P. M., Camargo, Festa, M., Funari, F. L., Salum, S.T., Oliveira, C. R., Santos, E. M., Lourenço, P. R., Silva, E. G., Garcia, W., Fialho, M. A. (2007) *Impactos Antrópicos no Clima da Região Metropolitana de São Paulo*. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia. v. 30. 48-56.
- Pisani, M.A.J. (2003). Características naturais e antrópicas agravantes nos processos de escorregamentos em encostas urbanas. *Sinergia*, 4(2), 99-103.
- Pretto, J.H.F., Sestrem, L.P., Kormann, A.C.M., Marinho, F.A.M. (2013). *Caracterização das Camadas Não Saturadas de Uma Encosta Litorânea: Determinação da Curva de Retenção de Água*. IV Conferência Brasileira de Encostas, 242-248, Angra dos Reis.
- Riccomini, C., (1989). *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Reynolds, W. D., Elrick, D. E. (1985). *In Situ Measurements of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity, and the Alpha Parameter Using the Guelph Permeameter*. Soil Science. v. 140(4). 237-315.

- Rodrigues, S.K., (1998). *Geologia Urbana da Região Metropolitana de São Paulo*. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Santos, M. M. (2005). *Avaliação Hidrogeológica para Determinação da Vulnerabilidade Natural do Aquífero Freático em Área Selecionada na Cidade de Londrina (PR)*. Tese de Mestrado do Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP Rio Claro.
- Sestrem, L.P., Kormann, A.C.M., Marinho, F.A.M. (2015). *Precipitation Influence on the Distribution of Pore Pressure and Suction on a Coastal Hillside*. Soils and Rocks, 38(1), 81-92.
- Soto, M. A., Chang, K. H., Vilar, O. M. (2009). *Análise do Método do Permeâmetro Guelph na Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada*. Águas Subterrâneas, v. 23(1), 137-152.
- Tatizana, C., Ogura, A.T., Cerri, L.E.S., Rocha, M.C.M. (1987). *Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar no município de Cubatão*. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, v. 2, 225-236. São Paulo: ABGE.
- Tindall, J. A., Kunkel, J. R. (1999). *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Colorado: Pearson.
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Science Society of America Journal. v. 44(5). 892-898.
- Vieira, A.M., Marinho, F.A.M. (2001). Variação Sazonal de Sucção em um Talude de Solo Residual em São Paulo. III Conferência Brasileira de Encostas, 287-295, Rio de Janeiro.
- Vieira, B. C. (2001). *Caracterização in situ da condutividade hidráulica dos solos e sua influência no condicionamento dos deslizamentos da Bacia do Rio Papagaio, maciço da Tijuca (RJ)*. Dissertação de Mestrado. UFRJ.
- Zhang, R. (1997). Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity From the Disk Infiltrometer. Soil Science Society of America Journal. v. 61(4). 1024-1060.
- Zhand, R., Van Genuchten, M. T. (1994). New Models for Unsaturated Soil Hydraulic Properties.

## **ANEXO A**

## **FIGURAS**

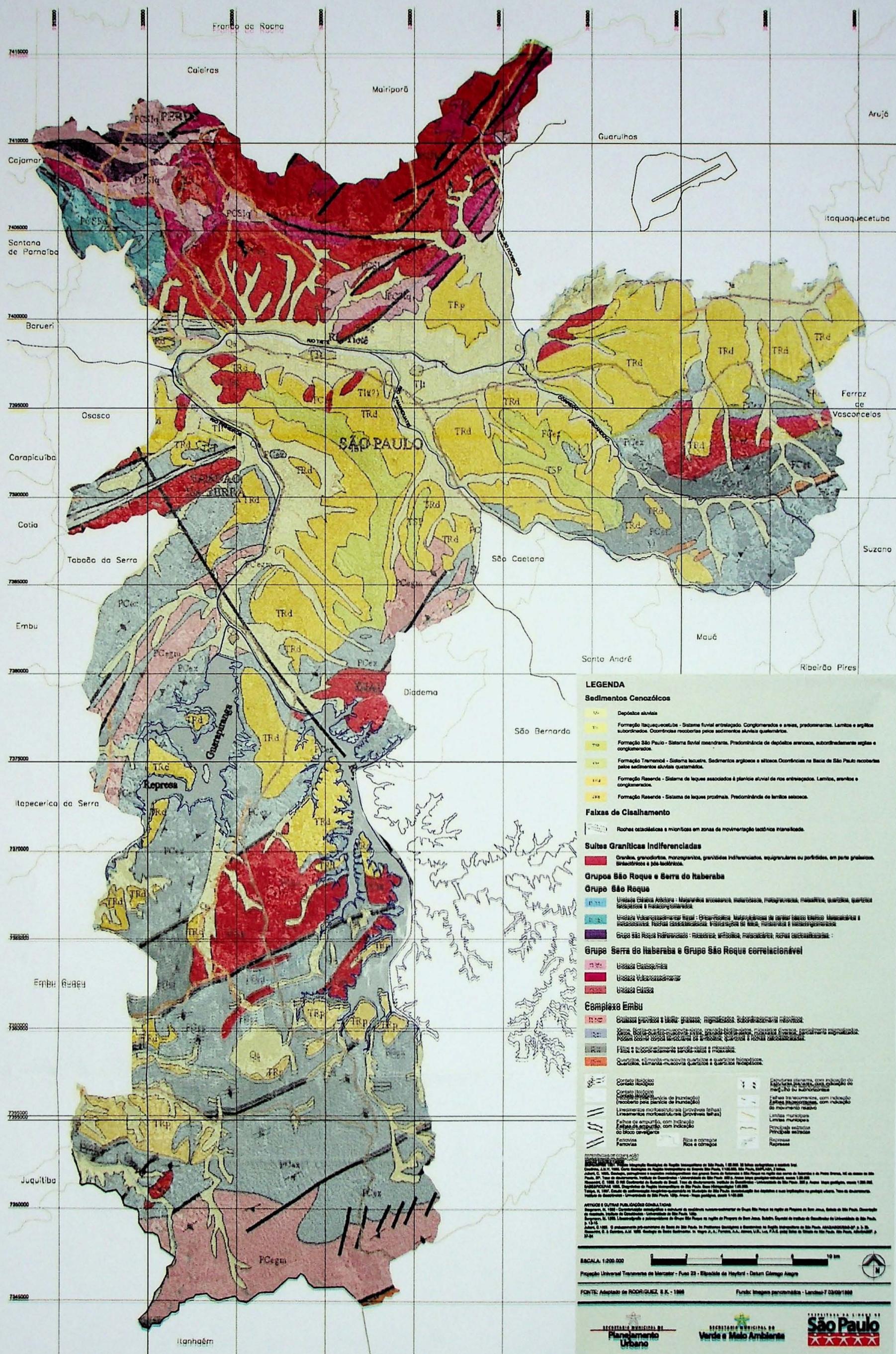


Figura 1. Mapa geológico do município de São Paulo (Retirado do site da Prefeitura de São Paulo. Adaptado de Rodriguez, 1998)

## **ANEXO B**

### **RESULTADOS OBTIDOS**

GRANULOMETRIA									
INTERESSADO:				LOCAL: Ponto 1 - 30 + 50cm					
ORDEN N°	Amostra,	PROFUNDIDADE (m)	DATA:	PENEIRAMENTO GROSSO (peso em gramas)					
(DETERMINAÇÃO DE UMIDADE)									
CAPSULA	Nº	93	6	(A) AMOSTRA TOTAL ÚMIDA:	549,94				
Ph + T	g	58,33	68,72	(B) SOLO SECO RETIDO # 10:	15,06				
Ps + T	g	57,25	67,24	(C) SOLO ÚMIDO PASSADO # 10 (a-b):	534,88				
AGUA	g	1,08	1,48	(D) SOLO SECO. PEN. # 10 (A-B) (1-h):	516,39				
TARA	g	27,29	25,63	(E) AMOSTRA TOTAL SECA (b-d):	531,45				
P. SECO	g	29,96	41,61	PESO DA SEDIMENTAÇÃO (peso em gramas)					
UMIDADE %	3,60	3,56		PESO DA AMOSTRA ÚMIDA: cps	85	59,48			
h MÉDIA %	3,58			PESO DA AMOSTRA SECA:	57,42				
DENSIDADE DOS GRÃOS									
PICNÔMETRO	13	TEMP. °C:	25,0	PICNÔMETRO	13	TEMP. °C:	25,0		
SOLO ÚMIDO cps	196	g	44,66	SOLO ÚMIDO cps	75	g	57,78		
(A) SOLO SECO		g	43,12	(A) SOLO SECO		g	55,78		
(B) PICNÔMETRO + ÁGUA		g	1190,54	(B) PICNÔMETRO + ÁGUA		g	1190,54		
(A) + (B)		g	1233,66	(A) + (B)		g	1246,32		
(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO		g	1217,64	(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO		g	1225,63		
(A) + (B) + (C)		g	16,02	(A) + (B) + (C)		g	20,69		
DENSIDADE DOS GRÃOS (g cm³)	2,692			DENSIDADE DOS GRÃOS (g cm³)	2,696				
PENEIRAMENTO GROSSO 125									
PENEIRAMENTO FINO 213									
PENEIRA N°	DIÂMETROS φ (mm)	PESO DA AMOSTRA SECA		%	D φ (mm)	PESO DA AMOSTRA SECA		%	%
		RETIDO	PASSADO			RETIDO	PASSADO		
50	0,00	531,45	100	1,20	0,38	57,04	99,34	96,52	
38	0,00	531,45	100	0,60	1,54	55,88	97,32	94,56	
25	0,00	531,45	100	0,42	2,74	54,68	95,23	92,53	
19	0,00	531,45	100	0,30	3,92	53,50	93,17	90,53	
9,5	4,72	526,72	99,11						
4	4,8	523,30	98,47	0,15	8,01	49,41	86,05	83,61	
10	2	516,39	97,17	0,075	13,81	43,61	75,95	73,80	
SEDIMENTAÇÃO									
TEMP. °C	INTERVALO DE TEMPO	HORA	LEITURA	ALTURA DE QUEDA	CORREÇÃO (Lc)	CORREGIDA (Lc)	γ_a	DIÂMETRO DO GRÃO s (mm)	Q % < φ
22,0	30 seg.	10:00	21,00	9,50	4,80	26,20	0,9978	0,0574	70,41
22,0	1 min.	10:01	20,00	9,70	4,80	25,20	0,9978	0,0410	67,73
22,0	2	10:02	29,00	10,00	4,80	24,20	0,9978	0,0294	65,04
22,0	4	10:04	28,00	9,20	4,80	23,20	0,9978	0,0200	62,35
22,0	8	10:08	27,00	9,40	4,80	22,20	0,9978	0,0143	59,66
22,0	15	10:15	26,80	9,46	4,80	22,00	0,9978	0,0105	59,13
22,0	30	10:30	26,00	9,70	4,80	21,20	0,9978	0,0075	56,98
22,0	1 hora	11:00	24,50	10,05	4,80	19,70	0,9978	0,0054	52,94
21,0	2	12:00	23,80	10,35	5,00	18,50	0,9980	0,0039	49,73
20,5	4	14:00	23,20	10,44	5,10	18,10	0,9981	0,0028	48,65
20,0	7	18:00	23,00	10,50	5,20	17,80	0,9982	0,0021	47,85
20,0	24	10:00	21,00	11,00	5,20	15,80	0,9982	0,0012	42,47
DENSÍMETRO N°	COR. DO MENISCO	DENSIDADE DOS GRÃOS: % DE MAT. PASSADO	Q = $\frac{\delta_a - \delta_c}{(\delta_a - \delta_c) \cdot \rho_s}$						
78479		(δ) = 2,694	# 10 (a) = 97,17						
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA VISUAL :									

GRANULOMETRIA									
INTERESSADO:					LOCAL: Ponto 2 - 30 + 50cm				
ORDEN N.	1	Amostra.	1	PROFOUNDIDADE (m):	0				DATA: 13/08/2014
<u>(DETERMINAÇÃO DE UMIDADE)</u>									
CÁPSULA N°	104	40		A) AMOSTRA TOTAL ÚMIDA:	614,12				
Ph - T g	64,92	66,72		B) SOLO SECO RETIDO # 10:	42,22				
Ps - T g	63,78	65,50		C) SOLO ÚMIDO PASSADO # 10 (a-b):	571,90				
AGUA g	1,14	1,22		D) SOLO SECO, PEN, # 10 (A-B) (1-h):	554,93				
TARA g	26,35	25,75		E) AMOSTRA TOTAL SECA (b-d):	597,15				
P. SECO g	37,43	39,75		<u>(PEN, FINO) SEDIMENTAÇÃO (peso em gramas)</u>					
UMIDADE %	3,05	3,07		PESO DA AMOSTRA ÚMIDA: cps	89	55,06			
h MÉDIA %	3,06			PESO DA AMOSTRA SECA:		53,43			
<u>(DENSADE DOS GRÃOS)</u>									
PICNÔMETRO	14	TEMP. °C:	25,0	PICNÔMETRO	14	TEMP. °C:	25,0		
SOLO ÚMIDO cps	141	g	45,14	SOLO ÚMIDO cps	80	g	45,15		
(A) SOLO SECO g			43,80	(A) SOLO SECO g			43,81		
(B) PICNÔMETRO + ÁGUA g			1235,36	(B) PICNÔMETRO + ÁGUA g			1235,36		
(A) + (B) g			1279,16	(A) + (B) g			1279,17		
(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO g			1262,33	(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO g			1262,46		
(A) - (B) - (C) g			16,83	(A) - (B) - (C) g			16,71		
DENSIDADE DOS GRÃOS (g cm³)	2,602			DENSIDADE DOS GRÃOS (g cm³)			2,622		
<u>PENETRAMENTO GROSSO</u> 125					<u>PENETRAMENTO FINO</u> 213				
PENEIRA N°	DIÂMETROS φ (mm)	PESO DA AMOSTRA SECA		D φ (mm)	PESO DA AMOSTRA SECA				
		RETIDO PASSADO %φ < φ			RETIDO PASSADO %φ < φ				
50	0,00	597,15	100						
38	0,00	597,15	100	1,20	0,69	52,74	98,71	91,73	
25	0,00	597,15	100	0,60	2,71	50,72	94,93	88,22	
19	0,00	597,15	100	0,42	4,69	48,74	91,22	84,77	
9,5	14,23	582,92	97,62	0,30	6,45	46,98	87,93	81,71	
4	4,8	25,32	571,83	0,15	11,84	41,59	77,84	72,34	
10	2	42,22	554,93	0,075	19,44	33,99	63,61	59,12	
<u>SEDIMENTAÇÃO</u>									
TEMP. °C	INTERVALO DE TEMPO	HORA	LEITURA	ALTURA DE QUEDA	CORREÇÃO (Lc)	CORREGIDA (Lc)	γ_a	DIÂMETRO DO GRÃO (mm)	Q %φ < φ
22,0	30 seg.	10,05	25,00	11,00	4,80	20,20	0,9978	0,0633	56,85
22,0	1 min.	10,06	24,00	11,30	4,80	19,20	0,9978	0,0454	54,04
22,0	2	10,07	22,50	11,70	4,80	17,70	0,9978	0,0326	49,82
22,0	4	10,09	20,80	11,06	4,80	16,00	0,9978	0,0224	45,03
22,0	8	10,13	19,00	11,50	4,80	14,20	0,9978	0,0162	39,97
22,0	15	10,20	17,50	11,90	4,80	12,70	0,9978	0,0120	35,74
22,0	30	10,35	15,20	12,54	4,80	10,40	0,9978	0,0087	29,27
22,0	1 hora	11,05	14,20	12,76	4,80	9,40	0,9978	0,0062	26,46
21,0	2	12,65	13,00	13,10	5,00	8,00	0,9980	0,0045	22,52
20,5	4	14,05	12,20	13,34	5,10	7,10	0,9981	0,0032	19,99
20,0	7	18,05	11,00	13,60	5,20	5,80	0,9982	0,0025	16,33
20,0	24	10,05	9,50	14,00	5,20	4,30	0,9982	0,0014	12,11
DENSÍMETRO N°	COR. DO MENISCO	DENSIDADE DOS GRÃOS % DE MAT. PASSADO (δ) = 2,612	# 10 (a) = 92,93	Q = $\frac{\delta - \delta_a}{(\delta - \gamma_a)} \cdot Lc$					
CARACTERIZAÇÃO TACTIL VISUAL:									

GRANULOMETRIA										
INTERESSADO:					LOCAL: Ponto 3 - 30 cm					
ORDEM N°	1	Amostra	1	PROFOUNDIDADE (m)	0	DATA: 13/08/2014				
DETERMINAÇÃO DE UMIDADE										
CÁPSULA	Nº	166	4	A) AMOSTRA TOTAL ÚMIDA:	694,14					
Ph + T	g	66,79	68,94	B) SOLO SECO RETIDO # 10:	10,00					
Ps - T	g	65,90	68,04	C) SOLO ÚMIDO PASSADO # 10 (a+b):	684,14					
AGUA	g	0,89	0,90	D) SOLO SECO, PEN. # 10 (A-B)/(1+h):	668,79					
TARA	g	26,73	29,20	E) AMOSTRA TOTAL SECA (b+d):	678,79					
P. SECO	g	39,17	38,84	PEN. ENSO / SEDIMENTAÇÃO (peso em gramas)						
UMIDADE %	%	2,27	2,32	PESO DA AMOSTRA ÚMIDA: eps	82	65,58				
h MÍDIA %	%	2,29		PESO DA AMOSTRA SECA:	64,11					
DENSIDADE DOS GRÃOS										
PICNÔMETRO	4	TEMP. °C:	25,0	PICNÔMETRO	5	TEMP. °C:	25,0			
SOLO ÚMIDO	eps	123	g	58,93	SOLO ÚMIDO	eps	68	g	58,18	
(A) SOLO SECO			g	57,61	(A) SOLO SECO			g	56,87	
(B) PICNÔMETRO + ÁGUA			g	1210,42	(B) PICNÔMETRO + ÁGUA			g	1230,50	
(A) + (B)			g	1268,03	(A) + (B)			g	1287,37	
(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO			g	1246,93	(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO			g	1266,83	
(A) + (B) + (C)			g	21,10	(A) + (B) + (C)			g	20,54	
DENSIDADE DOS GRÃOS (g/cm³)		2,730		DENSIDADE DOS GRÃOS (g/cm³)					2,768	
PENEIRAMENTO GROSSO					PENEIRAMENTO FINO					
PENEIRA	DIÂMETROS	PESO DA AMOSTRA SECA			D	PESO DA				
Nº	φ (mm)	RETIDO	PASSADO	% $\phi$ < φ	φ (mm)	AMOSTRA SECA	% $\phi$ < φ		% $\phi$ < φ	
	50	0,00	678,79	100						
	38	0,00	678,79	100	1,20	0,56	63,55	99,13	97,67	
	25	0,00	678,79	100	0,60	2,92	61,19	95,45	94,04	
	19	0,00	678,79	100	0,42	5,92	58,19	90,77	89,43	
	9,5	0,00	678,79	100	0,30	8,36	55,75	86,96	85,68	
	4	4,8	3,43	675,36	99,49	0,15	14,00	50,11	78,16	77,01
	10	2	0,00	668,79	98,53	0,075	19,92	44,19	68,93	67,91
SEDIMENTAÇÃO										
TEMP.	INTERVALO DE TEMPO	HORA	LEITURA	ALTURA DE Queda	CORREÇÃO (Lc)	CORREGIDA (Lc)	$\gamma_a$	DIÂMETRO DO GRÃO $\delta$ (mm)	$Q = \frac{\delta}{\gamma_a} \cdot a \cdot Lc$	
22,0	30 seg.	10:10	31,20	9,44	4,80	26,40	0,9978	0,0563	63,69	
22,0	1 min.	10:11	30,00	9,70	4,80	25,20	0,9978	0,0403	60,79	
22,0	2	10:12	29,00	10,00	4,80	24,20	0,9978	0,0290	58,38	
22,0	4	10:14	28,50	9,05	4,80	23,70	0,9978	0,0195	57,17	
22,0	8	10:18	27,50	9,30	4,80	22,70	0,9978	0,0140	54,76	
22,0	15	10:25	27,00	9,40	4,80	22,20	0,9978	0,0103	53,55	
22,0	30	10:40	26,20	9,64	4,80	21,40	0,9978	0,0073	51,62	
22,0	1 hora	11:10	25,00	9,90	4,80	20,20	0,9978	0,0053	48,73	
21,0	2	12:10	24,80	10,05	5,00	19,50	0,9980	0,0038	47,05	
20,5	4	14:10	24,00	10,20	5,10	18,90	0,9981	0,0027	45,60	
20,0	7	18:10	23,00	10,50	5,20	17,80	0,9982	0,0021	42,95	
20,0	24	10:10	22,00	10,70	5,20	16,80	0,9982	0,0011	40,54	
DENSÍMETRO	COR. DO MENISCO			DENSIDADE DOS GRÃOS % DE MAT. PASSADO	$Q = \frac{\delta}{\gamma_a} \cdot a \cdot Lc$					
Nº	78479			(δ) = 2,749	$(\delta - \gamma_a) / Ps$	# 10 (a)	98,53			
CARACTERIZAÇÃO TACTIL VISUAL:										

GRANULOMETRIA									
INTERESSADO:			LOCAL: Ponto 3 - 50 cm						
ORDEN N°	1	Amostra:	1	PROFOUNDIDADE (m):		0	DATA: 13/08/2014		
<b>DETERMINAÇÃO DE UMIDADE</b>									
CAPSULA N°	98	2		(A) AMOSTRA TOTAL ÚMIDA:		731,10			
Ph + T g	66,66	72,74		B) SOLO SECO RETIDO # 10:		17,05			
Ps + T g	68,60	71,60		C) SOLO ÚMIDO PASSADO # 10 (a-b):		714,05			
AGUA g	1,06	1,14		D) SOLO SECO, PEN. # 10 (A-B) (1-h):		694,48			
TARA g	27,77	31,37		E) AMOSTRA TOTAL SECA (b-d):		711,53			
P. SECO g	37,83	40,23		PEN. FINO SEDIMENTAÇÃO (peso em gramas)					
UMIDADE %	2,80	2,83		PESO DA AMOSTRA ÚMIDA: cps	213	59,44			
MÉDIA %	2,82			PESO DA AMOSTRA SECA:		57,81			
<b>DENSIDADE DOS GRÃOS</b>									
PICNÔMETRO	16	TEMP. °C:	25,0	PICNÔMETRO	16	TEMP. °C:	25,0		
SOLO ÚMIDO cps	180		g	48,71	SOLO ÚMIDO cps	131	g	51,47	
(A) SOLO SECO g				47,38	(A) SOLO SECO g			50,06	
(B) PICNÔMETRO + ÁGUA g				1223,48	(B) PICNÔMETRO + ÁGUA g			1223,54	
(A) + (B) g				1270,86	(A) + (B) g			1273,54	
(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO g				1253,43	(C) PICNÔMETRO + ÁGUA + SOLO g			1254,89	
(A) + (B) - (C) g				17,43	(A) + (B) - (C) g			18,65	
DENSIDADE DOS GRÃOS (g/cm³)	2,719				DENSIDADE DOS GRÃOS (g/cm³)	2,684			
<b>PENEIRAMENTO GROSSO</b> 136									
PENEIRA	DIÂMETROS	PESO DA AMOSTRA SECA			PESO DA AMOSTRA SECA				
N°	φ (mm)	RETIDO	PASSADO	% < φ	φ (mm)	RETIDO	PASSADO	% < φ	% < φ
	50	0,00	711,53	100					
	38	0,00	711,53	100	1,20	0,18	57,66	99,74	97,35
	25	0,00	711,53	100	0,60	1,20	56,61	97,92	95,58
	19	0,00	711,53	100	0,42	1,79	55,02	95,17	92,89
	9,5	0,00	711,53	100	0,30	4,24	53,57	92,67	90,45
	4	4,8	707,23	99,40	0,15	8,55	49,26	85,21	83,17
	10	2	17,05	694,48	97,60	0,075	14,38	43,46	75,18
<b>PENEIRAMENTO FINO</b> 213									
PENEIRA	DIÂMETROS	PESO DA AMOSTRA SECA			PESO DA AMOSTRA SECA				
N°	φ (mm)	RETIDO	PASSADO	% < φ	φ (mm)	RETIDO	PASSADO	% < φ	% < φ
	50	0,00	711,53	100					
	38	0,00	711,53	100	1,20	0,18	57,66	99,74	97,35
	25	0,00	711,53	100	0,60	1,20	56,61	97,92	95,58
	19	0,00	711,53	100	0,42	1,79	55,02	95,17	92,89
	9,5	0,00	711,53	100	0,30	4,24	53,57	92,67	90,45
	4	4,8	707,23	99,40	0,15	8,55	49,26	85,21	83,17
	10	2	17,05	694,48	97,60	0,075	14,38	43,46	75,18
<b>SEDIMENTAÇÃO</b>									
TEMP. °C	INTERVALO DE TEMPO	HORA	LEITURA	ALTURA DE QUEDA	CORREÇÃO (Lc)	CORREGIDA (Lc)	$\gamma_a$	DIÂMETRO DO GRÃO (mm)	$Q = \frac{\phi}{\gamma_a}$
22,0	30 seg.	10:15	30,50	9,60	4,80	25,70	0,9978	0,0576	68,80
22,0	1 min.	10:16	29,00	10,00	4,80	24,20	0,9978	0,0415	64,79
22,0	2	10:17	28,00	10,30	4,80	23,20	0,9978	0,0298	62,11
22,0	4	10:19	27,20	9,36	4,80	22,40	0,9978	0,0201	59,97
22,0	8	10:23	26,50	9,55	4,80	21,70	0,9978	0,0144	58,09
22,0	15	10:30	26,00	9,70	4,80	21,20	0,9978	0,0106	56,75
22,0	30	10:45	24,80	9,96	4,80	20,00	0,9978	0,0076	53,54
22,0	1 hora	11:15	23,50	10,35	4,80	18,70	0,9978	0,0055	50,06
21,0	2	12:18	22,80	10,54	5,00	17,80	0,9980	0,0039	47,66
20,5	4	14:15	22,10	10,68	5,10	17,00	0,9981	0,0028	45,52
20,0	7	18:15	21,00	11,00	5,20	15,80	0,9982	0,0022	42,31
20,0	24	10:15	18,20	11,74	5,20	13,00	0,9982	0,0012	34,81
DENSÍMETRO N°	78479	COR. DO MENISCO	DENSIDADE DOS GRÃOS % DE MAT. PASSADO	$Q = \frac{\phi}{\gamma_a} = \frac{2,702}{(2,702 - 1,0)} = 97,60$	$Q = \frac{\phi}{\gamma_a} = \frac{2,702}{(2,702 - 1,0)} = 97,60$				
CARACTERIZAÇÃO TACTIL VISUAL:									

# PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

**LOCAL:** TALUDE ~ PTO 01

**USO:**

**PROFOUNDIDADE:** 30cm

**DATA DO ENSAIO:** 07/10/16

**PONTO:**

**DIÂMETRO DO BURACO:**

**CARGA: ~~3~~<sup>5</sup> cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	17,0	
2	2'23"	18,0	
3		19,0	
4		20,0	
5		21,0	
6			
7			
8			
9			
10	0	18,5	
11	1'60	18,6	
12	2'120	18,65	0,05
13	3'180	18,70	0,05
14	4'240	18,75	0,05
15	5'300	18,80	0,05
16	6'360	18,85	0,05
17	7'420	18,90	0,05
18	8'	18,95	0,05
19			
20			
21			
22			
23			

**CARGA: ~~8~~<sup>10</sup> cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	38,0	
2	1'	38,1	0,1
3	2'	38,15	0,05
4	3'	38,2	0,05
5	4'	38,3	0,1
6	5'	38,4	0,1
7	6'	38,6	0
8	7'	38,7	
9	8'	39,2	0,1
10	8'30	39,3	0,1
11	9-	39,4	0,1
12	9'30	39,5	0,1
13	10'0"	40,0	
14	10'30"	40,0	
15	11'0"	40,1	
16	11'30"	40,2	
17	12'		
18	12'30"	40,3	
19	13-	40,6	
20	13'30'	40,7	
21	14-	40,8	
22	14'30		
23			

$$R_1 = \frac{0,5}{60} = 0,00833 \dots \text{cm/s}$$

$$R_2 = \frac{0,1}{30} = 0,00333 \text{ cm/s}$$

# PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

**LOCAL:** P-01

**USO:**

**PROFOUNDIDADE:** 50 cm

**DATA DO ENSAIO:**

**PONTO:**

**DIÂMETRO DO BURACO:**

**CARGA: 3 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	34,3	
2	1'	34,4	0,1
3	2'	34,5	0,1
4	3'	34,6	0,1
5	4'	34,7	0,1
6	5'	34,8	0,1
7	6'	34,9	0,1
8	7'	35,0	0,1
9	8'	35,0	0
10	9'	35,0	0
11	10'		
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			

**CARGA: 6 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	46,5	
2	1	46,6	
3	2	46,6	
4			
5	0	42,3	
6	1	42,3	
7	2	43,1	0,8
8	3	43,4	0,3
9			
10	0	45,0	
11	30"	45,0	0
12	1'30"	45,5	
13	2'00"	45,8	
14	2'30"	45,8	
15			→ Segunda tent.
16	0	49,0	
17	1	49,4	0,4
18	2	49,8	0,4
19	3	50,5	0,7
20	41	51,0	0,5
21	5'	51,5	0,5
22	6'	51,9	0,4
23	7'	51,9	0

$$R_1 = \frac{0,1}{60} = 0,00166667$$

$$g_1 \approx R \approx \frac{0,5}{60} = 0,00833$$

# PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

LOCAL: P-02

USO:

PROFOUNDIDADE: 30 cm

DATA DO ENSAIO:

PONTO:

DIÂMETRO DO BURACO:

*5*  
CARGA: 3 cm

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	18,3	
2	1	18,35	
3	2	18,6	
4	3	18,7	0,1
5	4	18,9	0,2
6	5	18,1	0,2
7	6	19,3	0,2
8	7	19,5	0,2
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			

*10*  
CARGA: 6 cm

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	31,2	
2	1	31,2	
3	2	31,4	
4	3	31,6	0,2
5	4	31,8	0,2
6	5	32,0	0,2
7	6	32,2	0,2
8	7	32,4	0,2
9	8		
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			

$$R_1 = \frac{0,2}{60} = 0,003333$$

$$R_2 = \frac{0,2}{60} =$$

# PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

**LOCAL:** PTO 03

**USO:**

**PROFOUNDIDADE:** 50 cm

**DATA DO ENSAIO:**

**PONTO:**

**DIÂMETRO DO BURACO:**

*diminuir  
muito*

**CARGA: 5 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	9,3	11,30
2	30	9,3	12
3	100	9,3	12,30
4	130	10,0	13
5	2	10,3	13,30
6	230	10,3	14
7	3	10,5	14,30
8	530	10,6	15
9	4	10,7	15,30
10	430	10,9	16
11	5	11,0	16,30
12	530	11,3	17
13	6	11,4	17,30
14	630	11,6	18
15	7	11,7	
16	730	11,9	
17	8	11,9	
18	830	12,1	
19	9	12,1	
20	930	12,1	
21	10	12,1	
22	1030	12,2	
23	11	12,4	

**CARGA: 6 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	20,3	
2	030	20,4	
3	1	20,4	
4	130	20,6	
5	2	20,8	
6	230	21,2	
7	3	21,6	
8	330	21,8	
9	4	22,1	
10	430	22,4	
11	5	22,7	
12	530	22,9	
13	6	23,0	
14	630	23,1	
15	7	23,2	
16	730	23,4	
17	8	23,6	
18	830	23,8	
19	9	24,0	
20	930	24,1	
21	10		
22	1030		
23	11		

# PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

**LOCAL:** PTO 02

**USO:**

**PROFOUNDIDADE:** 30 cm

**DATA DO ENSAIO:**

**PONTO:**

**DIÂMETRO DO BURACO:**

**CARGA: 3 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	15,6	11 30
2	30	20,3	12
3	1	21,0	12 30
4	1 30	21,6	13
5	2	21,8	13 30
6	2 30	22,0	14
7	3	22,1	14 30
8	3 30	22,2	15
9	4	22,3	15 30
10	4 30	22,4	16
11	5	22,5	16 30
12	5 30	22,6	17
13	6	22,6	17 30
14	6 30	22,7	18
15	7	22,8	18 30
16	7 30	22,8	19
17	8	22,9	19 30
18	8 30	23,0	20
19	9	23,0	20 30
20	9 30	23,1	21
21	10	23,2	21 30
22	10 30	23,3	22
23	11	23,4	22 30

**CARGA: 6 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	30	11 30
2	30	31,7	12
3	1	33	12 30
4	1 30	34,1	13
5	2	35,0	13 30
6	2 30	35,8	14
7	3	36,6	14 30
8	3 30	37,2	15
9	4	37,7	15 30
10	4 30	38,2	16
11	5	38,6	16 30
12	5 30	38,9	17
13	6	39,3	17 30
14	6 30	39,7	18
15	7 0	40,1	18 30
16	7 30	40,5	19
17	8	40,9	19 30
18	8 30	41,1	20
19	9	41,5	20 30
20	9 30	41,8	21
21	10	42,0	21 30
22	10 30	42,4	22
23	11	42,8	22 30

# PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

**LOCAL:** P-02

5m do coqueiro

**USO:**

2,5m do "piso" do talude

**PROFOUNDIDADE:** 50cm

**DATA DO ENSAIO:**

**PONTO:**

**DIÂMETRO DO BURACO:**

**CARGA: 3 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	52,5	
2	1'	53,1	0,6
3	2'	54,0	0,9
4	3'	54,6	0,6
5	4'	55,0	0,4
6	5'	55,5	0,5
7	6'	56,0	0,5
8	7'	56,5	0,5
9	8'	57,0	0,5
10	9'	56,5	0,5
11	10'	57,5	1,0
12	11'	59,0	
13	12'	59,1	
14	13'	59,5	
15	14'	60	
16	15'		
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			

**CARGA: 6 cm**

Nº da leitura	Tempo	Nível de água (mm)	Mudança do nível d'água (mm)
1	0	61,8	
2		61,8	
3			
4	0		
5	1		
6	2		
7	3		
8	4		
9	5		
10	6		
11	7		
12	8		
13	9		
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			

$$R_1 = \frac{0,5}{60} = 0,008333$$

$$R_2 =$$

não consegue m.