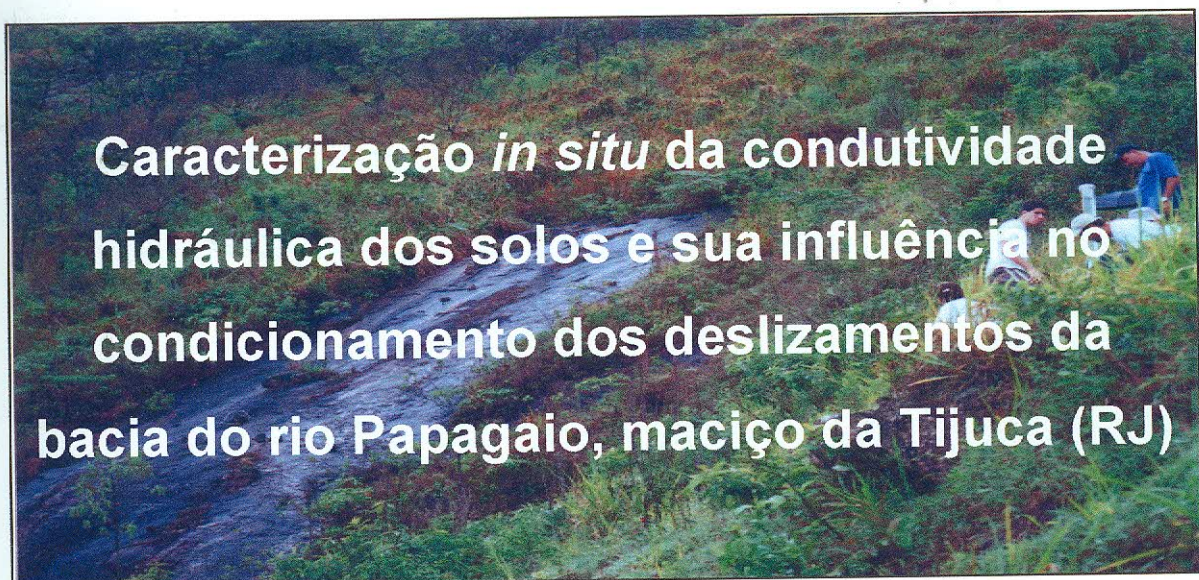


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



Bianca Carvalho Vieira

Orientação: **Prof. Nelson Ferreira Fernandes**

Janeiro de 2001

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**Caracterização *in situ* da Condutividade Hidráulica dos Solos
e sua Influência no Condicionamento dos Deslizamentos da
Bacia do Rio Papagaio, Maciço da Tijuca (RJ)**

Bianca Carvalho Vieira

Orientação: Prof. Nelson Ferreira Fernandes

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Janeiro de 2001

T
1106
V6580

Caracterização *in situ* da Condutividade Hidráulica dos
Solos e sua Influência no Condicionamento dos
Deslizamentos da Bacia do Rio Papagaio,
Maciço da Tijuca (RJ)

Bianca Carvalho Vieira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO COM REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

Aprovada por:

Professor Nelson F. Fernandes - orientador

Professor Eurípedes A. Vargas Jr.

Professor Jorge Soares Marques

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Janeiro de 2001

FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, Bianca Carvalho

Caracterização *in situ* da condutividade hidráulica dos solos e sua influência no condicionamento dos deslizamentos da bacia do rio Papagaio, maciço da Tijuca (RJ)/Bianca Carvalho Vieira, Rio de Janeiro: UFRJ, 2001.

130pp./p 29,7cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/PPGG, 2001

Bibliografia:

1. Deslizamentos
2. Permeabilidade
3. Hidrologia I. UFR/PPGG. II. Título

Agradecimentos

Ao professor Nelson Ferreira Fernandes pela confiança e apoio e por sempre me estimular a criticar, discutir, pesquisar, enfim fazer ciência;

Agradeço especialmente a Lenise, Thales e Tainá por sempre me receberem com muito carinho em sua casa e por compreenderem o “ empréstimo ” momentâneo do marido e pai durante muitos momentos. Obrigada de coração;

À Flavia e Luli por me receberem com muito carinho e fazer das minhas idas Campinas momentos felizes e inesquecíveis; obrigada também a Silvia e aos demais amigos campineiros;

Agradeço especialmente aqueles responsáveis por toda urbanização de Campinas principalmente pela construção de tantas rotatórias, também conhecidas como balões, rotundas, segundo meu amigo Beto, etc. Muito obrigado, pois somente desta forma eu fui capaz de conhecer cada rua, cada esquina, cada beco deste lugar.

Ao Dr. Sidney Vieira do Instituto Agronômico de Campinas (IAC/SP) por ter me recebido agradavelmente em Campinas, por passar todo seu conhecimento a respeito do permeâmetro de Guelph e sanar minhas dúvidas a todo o momento. Sem esta enorme contribuição certamente este trabalho não se completaria.

Ao professor Eurípedes Vargas Jr. pelo empréstimo do Permeâmetro de Guelph e pelas importantes e fundamentais contribuições teóricas durante toda a dissertação;

Ao professor Cláudio F. Mahler por acreditar neste trabalho e ter financiado através dos seus projetos a compra do permeâmetro de Guelph modificado. Agradeço também pela oportunidade do trabalho realizado em dois grandes aterros sanitários (ou melhor, dois lixões). Neste único trabalho de campo pude compreender e aplicar ainda mais a teoria do permeâmetro, mas em apenas um dia vi imagens que jamais pensei em ver na minha vida. Um simples trabalho de campo serviu para me mostrar uma vida que poucas pessoas conhecem, uma vida dura e cruel em que o Homem disputa sua comida com porcos. Em alguns momentos parecia ficção, como se tudo aquilo não existisse. Infelizmente não era. Agradeço também ao menino Oscarino, catador do lixão de São Gonçalo, por ter comprovado mais uma vez, todo o egoísmo dos Homens.

Ao Sr. Edgar Rodrigues pela perfeita confecção do Permeâmetro de Guelph Modificado, ao Srs Hermínio e Afonso da empresa APAGER pela construção das hastes dos trados e um agradecimento muito especial ao Sr. Wilsom Zanoni não somente pela confecção artesanal de perfeitos trados, mas por ter me mostrado e ensinado em poucos minutos, em uma breve prosa, toda sua belíssima estória de vida. São estes fatos, aprendidos durante este longo trabalho, que infelizmente não podem ser relatados neste aqui, mas que certamente eu e meu amigo Nestor guardaremos sempre em nossas memórias.

Aos professores Rubem Porto e Sérgio Valente pelas brilhantes aulas de Geologia dadas em nossos trabalhos de campo. Tais informações foram fundamentais para o conhecimento de toda a geologia local.

Agradeço ao professor Marcus Gervásio da UFRRJ por ter me recebido tão bem e estar sempre disposto a ajudar na restauração da mesa de tensão e ao laboratorista Anselmo desta mesma Universidade (que sabe tudo e mais um pouco sobre mesa de tensão!) pela grande contribuição durante a restauração da mesa de tensão. Muito obrigada mesmo!!

Ao professor Antônio Paulo Farias pela sua contribuição no Exame de Qualificação deste trabalho;

Aos amigos do grupo que me ajudaram em todas as etapas desta dissertação, principalmente, nas difíceis e às vezes “insuportáveis” idas a campo.

Bom lá vai...

Á minha amiga Andréa Paula, que dito pelo meu outro amigo Renato, insiste em me fazer acreditar que a amizade é o maior bem que possuímos;

Ao amigo Mario Diamante e toda sua grande família pela alegria contagiante dos nossos encontros;

Ao Amigo Nestor Corbiniano pela simpatia que nos conquistou, por sempre acreditar em mim e pelas longas e deliciosas conversas, principalmente, durante os momentos perdidos no interior de São Paulo;

Ao meu amigo Roberto Arnaldo pelos trabalhos realizados logo no início da dissertação, pela confecção dos mapas e imagens e pelas dicas e sugestões dadas;

Ao meu amigo Renato Guimarães por sempre acreditar que tudo “isso” não serviria para nada (Ah, Ah, Ah!!!);

À mala e amiga Edna Lindaura pelas suas incríveis colocações, suas surpreendentes discussões teóricas, sua extraordinária curiosidade (científica é claro!!), sua insistente mania de ver televisão mesmo sem “gostar”, entre outras manias;

À amiga de muitas mudanças positivas Ana Cristina por estar sempre disposta a ajudar e a contribuir;

Agradeço à amiga Margareth Guimarães (e Gabriel) pela grande ajuda durante e principalmente no final deste trabalho e também ao colega Fernando pela grande ajuda em trabalhos de campo;

À amiga de sempre Carla Bilheiro que mesmo distante sempre me apoiou e incentivou;

Ao estagiário e amigo Rafael Lucas pela grande ajuda nas análises de laboratório nas cansativas, mas compensadoras idas a campo. Mesmo com pouco tempo de convívio espero que este trabalho tenha contribuído e incentivado sua carreira profissional;

Aos professores e amigos Ana Valéria e Luís Carlos Bertolino por acreditarem no meu trabalho;

Ao amigo Carlos André pelo incentivo e pelas divertidas conversas;

A mais recente amiga Marcella que já entrou conquistando todos com sua simpatia e entusiasmo;

Ao amigo Márcio Cataldi pela ajuda e manutenção dos equipamentos, mas principalmente pela sua amizade;

Agradeço aos bolsistas de iniciação científica Kelly Esch pela ajuda dada no início da dissertação e durante os trabalhos campo, e Vitor Stuart pela enorme contribuição nos trabalhos de campo e nas análises de laboratório;

Agradeço também aos amigos de graduação Érika Iorio, Marcello Amorim, Rodrigo Gomes e Simone Chaves que mesmo distantes sei que torceram por mim.

Aos funcionários Elsio e Sergio Iorio do Laboratório de Mecânica dos Solos da COPPE/UFRJ pela ajuda nos ensaios de permeabilidade e na restauração do permeâmetro do Laboratório de Pedologia da UFRJ;

Ao Sr. João e seus filhos pelo apoio durante as etapas de campo, aberturas de trilhas e trincheiras, matança de alguns animais peçonhentos, mas principalmente pela construção de uma amizade simples e sincera. À Dona Marly e Sr. José Pestana pela infraestrutura concedida no campo;

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia/UFRJ, que através da CAPES, me concedeu dois anos de bolsa de mestrado;

As secretárias e colegas Niltede e Ildione pela resolução de problemas administrativos e por sempre me atenderem de forma simpática mesmo durante momentos de caos;

A todos os professores do Departamento de Geografia;

Á todos aqueles que fazem parte da minha família: as tias Terezinha e Fátima, primos Zeus, Raíza, Jorge Luís, Rafaela e Juliana, avós Lídia (*in memorium*) e Eleuzina, avôs Osvaldo e Antônio (*in memorium*), minha madrinha do coração e meu anjo Maria Fernanda (*in memorium*) e meu padrinho Jorge;

Agradeço também a todos que formam a minha família do coração: tias Sonia, Ângela, Araceles e Neli, tios Matias, Dandão e Jair e meus primos Beatriz, João Vitor, Carla e a minha melhor e sempre amiga Cláudia. Muito obrigada!

Á minha mãe Isabel Maria por me amar tanto e me ajudar a todo o momento;

A Marcello Ramos, meu eterno obrigado pelo carinho, amor e principalmente por estar ao meu lado durante as etapas mais difíceis desta dissertação;

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram durante esta etapa;

A Deus por iluminar sempre meu caminho.

RESUMO

VIEIRA, Bianca Carvalho. Caracterização *in situ* da condutividade hidráulica dos solos e sua influência no condicionamento dos deslizamentos da bacia do rio Papagaio, maciço da Tijuca (RJ). UFRJ. CAPES, 2001. Dissertação de Mestrado.

Movimentos de massa são processos naturais que englobam uma série de fatores condicionantes, entre eles: o regime pluviométrico, a morfologia do relevo e as propriedades dos solos e das rochas como, por exemplo, as descontinuidades hidráulicas e conforme a atuação destes fatores a ruptura pode ocorrer, por exemplo, devido à elevação da poro-pressão positiva dentro dos solos, que pode ser condicionada pela presença de descontinuidades hidráulicas nos mantos de alteração.

Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste na caracterização espacial *in situ* da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos e a sua relação com os processos de escorregamentos da bacia do rio Papagaio. Para tal, foram feitas estimativas da K_{sat} em diferentes profundidades (até 3,0m) em pontos localizados no entorno e no interior de quatro cicatrizes de escorregamentos deflagrados em fevereiro de 1996. Para esta estimativa da K_{sat} utilizou-se o permeâmetro de Guelph desenvolvido por Reynolds et al. (1983) que consiste em um permeâmetro de carga constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo (K_{sat}) acima do lençol freático.

Devido aos problemas obtidos por uma das principais formas de análise dos dados obtidos em campo (Análise de Richards) outros procedimentos de análise foram utilizados e seus resultados comparados. A partir da análise baseada na proposta de Elrick et al. (1989), foi feita uma análise da variação da K_{sat} com a profundidade juntamente com outras propriedades físicas dos solos (ex. textura, porosidade total, tudo). Através dessas estimativas verificou-se que grande parte dos valores da K_{sat} variou entre duas ordens de magnitude (entre 1.0×10^{-4} e 9.0×10^{-3} cm/s) e de uma forma geral, observou-se uma tendência do aumento da K_{sat} até 3,0m. No entanto, algumas significativas variações da condutividade hidráulica ao longo dos perfis foram identificadas e grande parte delas puderam ser explicadas através dos valores texturais e da distribuição dos macro e microporos dos solos.

ABSTRACT

VIEIRA, Bianca Carvalho. Caracterização *in situ* da condutividade hidráulica dos solos e sua influência no condicionamento dos deslizamentos da bacia do rio Papagaio, maciço da Tijuca (RJ). UFRJ. CAPES, 2001. Dissertação de Mestrado.

Landslides are natural processes triggered by a variety of factors, including: rainfall pattern, topography and the properties of rocks and soils, for example, the hydraulic discontinuities which can lead to the development of high positive pore-water pressures inside the weathered mantle.

Therefore, the main purpose of this study is to define the *in situ* spatial variability of the saturated hydraulic conductivity of the soils (K_{sat}) and its relationships with the landslides that took place inside the Papagaio river basin, Jacarepaguá (RJ). In order to investigate this topic, K_{sat} was estimated, from the soil surface to around 3,0 m depth, in different sites located inside and around four landslide scars from February 1996. The Guelph permeameter, developed by Reynolds et al. (1983), was used in this study. In general terms, it is a constant-head permeameter that measures the saturated hydraulic conductivity in the field, above the water table.

Because of some limitations derived from one of main methods of treatment the data obtained in the field (Richards Method), other procedures were used and their results compared. Based on Elrick's Method, the variation of saturated hydraulic conductivity with depth and its relationship with soil physical properties (e.g. texture, total porosity, macroporosity, microporosity, bulk density and grain density) were investigated. The results showed that inside the studied sites, most of the observed values for the saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) varied along two orders of magnitude (from 1.0×10^{-4} to 9.0×10^{-3} cm/s), with a general trend of increasing K_{sat} towards 3,0 m depth. However, sudden variations of K_{sat} through the soil profile were identified, most of them related to the characteristics of soil texture and pore-size distribution inside the weathered profiles.

ÍNDICE GERAL

1. Introdução	1
2. Objetivos	4
3. Embasamento Teórico	5
3.1. Fatores Condicionantes de Deslizamentos em Encostas	5
3.2. Condutividade Hidráulica dos Solos (K)	8
3.2.1. Teoria e Conceitos	8
3.2.2. Condutividade Hidráulica, Dinâmica Hidrológica dos Solos e Deslizamentos em Encostas	12
3.2.3. Formas de Mensuração	18
3.3. Permeâmetro de Guelph	24
3.3.1. Estrutura do Equipamento	24
3.3.2. Teoria e Equações	28
3.3.3. Permeâmetro de Guelph Original (PG) e Permeâmetro de Guelph Modificado (PGM)	34
3.3.4. Estudos Desenvolvidos	38
4 - Área de Estudo	41
4.1. Geologia	41
4.2. Relevo e Solos	45
4.3. Clima e Cobertura Vegetal	46
4.4. Uso e Ocupação	47
5. Materiais e Métodos	50
5.1. Ensaios da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}) dos Solos	50
5.1.1. Justificativa das Cicatrizes Estudadas	50
5.1.2. Ensaios da K_{sat} <i>in situ</i>	57
5.1.3. Ensaios da K_{sat} em Laboratório	59
5.2. Propriedades Físicas dos Solos da Bacia do Papagaio	63
5.2.1. Textura	63
5.2.2. Porosidade Total, Macro e Microporosidade	63

5.2.3. Densidade Real e Aparente	66
6. Análise e Discussão dos Resultados	71
6.1. Ensaio da K_{sat} <i>in situ</i>	71
6.2. Variação Espacial da K_{sat} e das Propriedades Físicas dos Solos	80
6.3. Ensaio da K_{sat} em Laboratório	111
6.4. Escorregamentos da Bacia do Papagaio e a Variação Espacial da K_{sat}	113
7. Considerações Finais	121
8. Referências Bibliográficas	124
9 - Anexos	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Experimento de Darcy realizado com um cilindro de área transversal (A) contendo material arenoso. A partir de uma determinada carga gravitacional ($\Delta z = z_2 - z_1$) estabelecida, um fluxo constante (Q_1) é introduzido neste material e o fluxo de saída (Q_2) assim como a variação da carga de pressão (Δh) são mensuradas durante o experimento	9
Figura 2 – Classificação aproximada da condutividade hidráulica de acordo com os diferentes faixas texturais (modificada de Klute e Dirksen, 1986 <i>apud</i> Stephens, 1996).	11
Figura 3 – Variação da condutividade hidráulica (K) com o teor de umidade em dois tipos de solos (Silveira et al., 1993).	11
Figura 4 – Variação dos valores da K_{sat} em três posições da encosta (alta, média e baixa) e em diferentes profundidades obtidos através de ensaios realizados em solos argilosos sobrejacentes a um saprolito onde predominam extensas bandas de foliação variando de alguns milímetros até 0,5m de espessura (modificada de Schoeneberger et al., 1995).	14
Figura 5 – Desenho esquemático da formação de fluxos paralelos em uma encosta constituída por materiais de diferentes permeabilidades. Tais descontinuidades hidráulicas podem levar à geração de pressões neutras aumentando a suscetibilidade a deslizamentos (Wolle e Carvalho, 1994).	16
Figura 6 – Desenho esquemático da formação de fluxos verticais em um encosta composta por um horizonte menos permeável sobre um horizonte ou camada mais permeável. Tal formação embora impeça a geração de pressões neutras nos horizontes superiores, permite que o avanço da frente de saturação reduza bruscamente a coesão aparente do solo aumentando a suscetibilidade a deslizamentos (Wolle e Carvalho, 1994).	17
Figura 7 – Permeâmetro de carga constante (a) e de carga variável (b) utilizados na estimativa da K_{sat} em laboratório (modificado de Freezy e Cherry, 1979).	19
Figura 8 – Desenho esquemático do Permeâmetro de Guelph (a) e de seus principais componentes; Permeâmetro de Guelph sendo utilizado no campo com a sua extremidade inferior dentro de um furo (b); e detalhe do marcador da carga hidráulica H aplicada no solo (c).	26
Figura 9 – Detalhe do ensaio realizado em campo com o PG. O ensaio se inicia com a aplicação de uma carga H e a distribuição tridimensional do fluxo de água dentro do furo (a). Após determinado tempo, uma área finita dentro do solo é saturada (bulbo saturado) e o fluxo (Q) torna-se constante. Na parte inferior da Figura (b) a seta vermelha indica o nível da água alcançado dentro do furo durante o ensaio.	27
Figura 10 – Desenho esquemático do funcionamento do PG durante o ensaio, considerando o fluxo tridimensional (V_{rp} , V_{zp} , V_g) da água dentro do solo não saturado. Além do fluxo Q obtido através do ensaio, o raio do furo (a), o nível de água que corresponde à carga H aplicada e a área transversal (A) do equipamento serão utilizados no cálculo final da K_{sat} (Reynolds, 1986).	29
Figura 11 – Variação do parâmetro C com a relação da carga aplicada (H) e o raio do furo (a). Devido aos baixos valores de H os valores de C utilizados se restringem a área demarcada no Gráfico (área de trabalho) (modificada de Reynolds e Elrick, 1985b).	30
Figura 12 – Permeâmetro de Guelph Modificado no campo (a), detalhe do tubo de acrílico graduado onde o nível de água é mensurado (b) e marcador da carga H aplicada no solo.	35
Figura 13 – PGM utilizado em uma encosta bastante íngreme. Pode-se observar que a estrutura do seu tripé é capaz de sustentar perfeitamente o equipamento, não permitindo que o seu peso seja transferido para o fundo do furo.	36
Figura 14 – Detalhe das conexões de borracha (círculo) que fazem ligação entre os tubos internos do PG.	37
Figura 15 – Variação da condutividade hidráulica saturada de campo (K_{fs}) com a profundidade	39

obtida através do PG por Campos et al. (1992). Neste perfil, observa-se uma redução da K_{fs} até 1,0m e a partir daí um aumento com a profundidade. (Campos et al. 1992).

- Figura 16 - Fotografias áreas na escala 1:20.000 mostrando a localização da bacia do Papagaio na vertente Sudoeste do maciço da Tijuca, no município do Rio de Janeiro. Pode-se notar, em suas vertentes, as inúmeras cicatrizes dos escorregamentos e, no seu vale principal, as corridas de massa deflagradas em fevereiro de 1996. Estas últimas atingiram as porções mais suaves do relevo onde se localiza o bairro de Jacarepaguá (porção esquerda da Figura). 42
- Figura 17 - Localização das cicatrizes estudadas (C1, C2, C3 e C4) 43
- Figura 18 - Gnaiss Archer. Unidade geológica predominante apresentando inúmeros planos de cisalhamentos. 44
- Figura 19 - Bloco do Granito Favela localizado na porção média da bacia do Papagaio 44
- Figura 20 - Porcentagem da frequência de cada classe nas bacias do Papagaio e do Quitite (em azul) e do potencial de deslizamento (em vermelho). Pode se observar que as áreas côncavas se apresentam mais susceptíveis à ocorrência de deslizamentos. 46
- Figura 21 - Diferentes tipos de cobertura vegetal da bacia do Papagaio. O primeiro plano da Figura mostra o predomínio das gramíneas e ao fundo pode se observar matas em diferentes estágios sucessionais. 47
- Figura 22 - Porção média da Bacia do Papagaio onde alguns sítios e estradas podem ser observados. 49
- Figura 23 - Visão da bacia do Papagaio com diferentes coberturas vegetais. A seta vermelha indica uma encosta desmatada por alguns moradores da área para a plantação de mandioca. 49
- Figura 24 - Limite de uma cicatriz originada dos escorregamentos deflagrados em fevereiro de 1996 na bacia do Papagaio. 51
- Figura 25 - Estrada construída pelos próprios moradores da bacia e atualmente abandonada. A seta vermelha indica a localização de uma cicatriz. Segundo alguns moradores, após a abertura desta estrada, alguns pequenos deslizamentos foram observados. 52
- Figura 26 - Resultado obtido pelo modelo SHALSTAB para uma cicatriz da bacia do Papagaio. Pode-se observar que a grande suscetibilidade da área em vermelho coincidiu com as cicatrizes de fevereiro de 1996. 52
- Figura 27 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P1, P2, P3 e P4 da cicatriz 1 (a) e visão panorâmica da cicatriz 1(b). 53
- Figura 28 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P2 e P3 da cicatriz 2 (a), visão panorâmica da cicatriz 2 (b) e visão de detalhe da cicatriz mostrando a realização dos ensaios no ponto 3 (c). 54
- Figura 29 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P1, P2 e P4 da cicatriz 3 (a) e visão panorâmica da cicatriz 3 (b). 55
- Figura 30 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P1, P2 e P4 da cicatriz 4 (a) e visão panorâmica da cicatriz 4 (b). 56
- Figura 31 - Desenho esquemático dos ensaios da K_{sat} na superfície do terreno e dentro da trincheira (a). Ensaio sendo realizado com o PGM dentro de uma trincheira (b). 58
- Figura 32 - Preparação do furo com os dois tipos de trados (caneca e limpador) anteriormente a introdução do PG no solo (modificada de *Soilmoisture Equip.*, 1986) 59
- Figura 33 - Coleta de uma amostra indeformada verticalmente orientada 60
- Figura 34 - Coleta de uma amostra indeformada horizontalmente orientada 60
- Figura 35 - Amostras indeformadas durante o processo de saturação em laboratório para posterior ensaio da K_{sat} . 62
- Figura 36 - Extrator de Uhland utilizado na coleta de amostras indeformadas e os acessórios necessários para a coleta (martelo, espátula e cilindros) (a) e Extrator sendo utilizado no campo (b). 67
- Figura 37 - Mesa de tensão do Laboratório de Pedologia da UFRJ. Fonte de água ligada a 68

- torneira (a), mangueira de descarga (b), mata-borrão (c), tubo flexível da saída de ar (d) e frasco de filtração a vácuo cheio de água (e).
- Figura 38 - Amostras indeformadas coletadas com o extrator de Uhland sob processo de saturação. 69
- Figura 39 - Amostras na mesa de tensão sobre uma carga de pressão de 60 cm de água e (b) amostras cobertas com um plástico para diminuir o efeito da evaporação. 70
- Figura 40 - Variação dos valores da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}) dos pontos da cicatriz 1 (C1P1, C1P2, C1P3 e C1P4), obtidos *in situ* através do PG e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (K_{sat-R} , K_{sat-U} e da K_{sat-U}). No canto superior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho). 76
- Figura 41 - Variação dos valores da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}) dos pontos da cicatriz 2 (C2P2 e C2P3), obtidos *in situ* através do PG e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (K_{sat-R} , K_{sat-U} e da K_{sat-U}). No canto superior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho). 77
- Figura 42- Variação dos valores da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}) dos pontos da cicatriz 3 (C3P1 e C3P2 e C3P4), obtidos *in situ* através do PG e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (K_{sat-R} , K_{sat-U} e da K_{sat-U}). No canto superior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho). 78
- Figura 43- Variação dos valores da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}) dos pontos da cicatriz 4 (C4P1 e C4P2 e C4P4), obtidos *in situ* através do PG e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (K_{sat-R} , K_{sat-U} e da K_{sat-U}). No canto superior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho). 79
- Figura 44 - Histograma mostrando o tempo gasto durante as 87 medições da K_{sat} dos solos da bacia do Papagaio. Neste cálculo não foi incluído o tempo gasto na montagem do equipamento. 80
- Figura 45- Valores obtidos *in situ* com PGM e analisados através da proposta baseada em Elrick et al. (1989) em que apenas uma carga (H) é aplicada no solo e o parâmetro α é introduzido previamente a partir das características do meio poroso. Cerca de 95% dos valores da K_{sat-U} variaram entre $1,0 \times 10^{-4}$ e $9,0 \times 10^{-3}$ cm/s. 81
- Figura 46 - Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C1P1 onde foram estimadas as propriedades do solo. 84
- Figura 47 - Trincheira aberta no ponto C1P1 onde uma grande densidade de raízes e de dutos de diferentes diâmetros pode ser observados, estes últimos, associados à intensa atividade biogênica neste ponto. O círculo na Figura mostra um duto com cerca de 1,5cm de diâmetro localizado a 1,50cm de profundidade. 85
- Figura 48 - Perfil C1P1 apresentando um forte acréscimo de grãos de quartzo e feldspato a partir da profundidade de 170cm. 86
- Figura 49 - Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C1P2 onde foram estimadas as propriedades do solo 87
- Figura 50 - Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C1P3 onde foram estimadas as propriedades do solo. 88
- Figura 51 - Parede da trincheira aberta no ponto C1P3, localizado na porção lateral inferior da cicatriz. Nota-se a forte presença de blocos e de um material extremamente 89

- grossoiro. O martelo da figura se encontra a 1,0m de profundidade.
- Figura 52 - Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C1P4 onde foram estimadas as propriedades do solo. 90
- Figura 53 - Encosta onde foram estimados os perfis da cicatriz 2. Nota-se a forte declividade do terreno e pela localização do carros ao fundo (círculo) pode-se perceber a grande altitude (cerca de 600m). 92
- Figura 54 - Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C2P2 onde foram estimadas as propriedades do solo. 93
- Figura 55- Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C2P3 onde foram estimadas as propriedades do solo. 94
- Figura 56 - Escorregamento deflagrado em fevereiro de 1996 (cicatriz 3). Localização dos pontos C3P1 (topo), C3P2 (lateral) e C3P4 (interior) onde foram realizados os ensaios da condutividade hidráulica saturada. A figura mostra também a localização de duas estradas abertas pelo próprios moradores, sendo uma já abandonada. 97
- Figura 57 - Perfil do ponto C3P1 com um horizonte A (60cm) seguido de um horizonte B bastante profundo. Nota-se nesta figura a presença de grande densidade de raízes e macroporos (setas vermelhas). Nas maiores profundidades pode-se observar um grande acréscimo de grãos de quartzo e feldspato (círculo). 98
- Figura 58- Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C3P1 onde foram estimadas as propriedades do solo. 99
- Figura 59- Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C3P2 onde foram estimadas as propriedades do solo. 100
- Figura 60 - Trincheira com aproximadamente 2,5m de profundidade onde foram realizados alguns ensaios da K_{sat} com o PGM. Este perfil não possui um horizonte A espesso como no perfil C3P1 e se apresenta bastante homogêneo em toda sua extensão. Não foram identificados materiais mais grosseiros, como grãos de quartzo, nas maiores profundidades. 101
- Figura 61 - Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C3P4 onde foram estimadas as propriedades do solo. 102
- Figura 62 - Ponto C3P4, localizado no interior da cicatriz, apresentando um material extremamente arenoso e heterogêneo com blocos em alteração e de diferentes diâmetros que já aparecem na superfície. Os círculos mostram dois blocos localizados a 40cm (a) e 20cm (b). 103
- Figura 63 - Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C4P1 onde foram estimadas as propriedades do solo. 107
- Figura 64- Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade 108

	Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C4P2 onde foram estimadas as propriedades do solo.	
Figura 65	- Perfil do ponto C4P2 apresentando um horizonte bem desenvolvido com grande porcentagem de raízes sobrejacente a um horizonte B bastante profundo.	109
Figura 66	- Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), Densidade Aparente (D_a), Densidade Real (D_r), Microporosidade (M_i), Macroporosidade (M_a) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C4P4 onde foram estimadas as propriedades do solo.	110
Figura 67	- Perfil do ponto C4P4 localizado no interior da cicatriz com feições da rocha ainda bem preservadas.	111
Figura 68	- Comparação dos resultados obtidos através de ensaios de laboratório com amostras indeformadas coletadas horizontalmente e verticalmente.	113
Figura 69	- Comparação dos valores obtidos em laboratório através de amostras coletadas verticalmente, horizontalmente e <i>in situ</i> , utilizando-se o permeâmetro de Guelph.	114
Figura 70	- Variação da condutividade hidráulica saturada com a profundidade em dois perfis. Pode-se observar o comportamento similar entre a variação da K_{sat} obtida no ponto C4P2 e aquela estimada por Campos et al. (1992).	116
Figura 71	- Desenho esquemático da encosta onde se localiza a cicatriz 4 mostrando os materiais a compõem (solo bem desenvolvido sobre saprolito bastante arenoso) (a), perfil do ponto C4P4 localizado no interior da cicatriz (b) e trincheira aberta no ponto C4P1 onde pode-se notar um horizonte A bem desenvolvido com grande quantidade de raízes, sobre o horizonte Bt (c).	117
Figura 72	- Perfil construído a partir dos valores da K_{sat} obtidos nos pontos C4P1 (topo da cicatriz) e C4P4 (interior da cicatriz)	118
Figura 73	- Desenho esquemático da encosta onde se localiza a cicatriz 1 mostrando um solo bem desenvolvido sobre um material bastante similar a um tálus (a). Perfil do ponto C1P4 localizado no interior da cicatriz (b) e trincheira aberta no ponto C1P1 onde pode-se notar um horizonte A bem desenvolvido com grande quantidade de raízes, sobre o horizonte Bt (c).	119
Figura 74	- Desenho esquemático da encosta onde se localiza a cicatriz 3 mostrando um solo bem desenvolvido sobre um material bastante similar a um tálus (a). Perfil do ponto C1P3 localizado no interior da cicatriz (b) e trincheira aberta no ponto C3P1 onde pode-se notar um perfil bem desenvolvido com grande quantidade de raízes (c).	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de alguns métodos freqüentemente utilizados na estimativa da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e não saturada (K_{insat}). Todos os métodos estimam K <i>in situ</i> , com exceção dos permeômetros de carga constante e variável.	22
Tabela 2 – Valores de α de acordo com diferentes características dos solos ensaiados (modificada de Reynolds et al., 1992).	33
Tabela 3- Valores obtidos <i>in situ</i> com o permeômetro de Guelph em quatro cicatrizes de deslizamentos (C1, C2, C3 e C4) e em quatro pontos localizados em diferentes porções destas cicatrizes (P1, P2, P3 e P4) e calculados a partir das Equações 8, 7 e 14, obtendo-se então, K_{sat-R} , K_{sat-L} e K_{sat-U} , respectivamente.	72

1. Introdução

Deslizamentos de solos e rochas representam processos importantes que controlam o desenvolvimento e a evolução das encostas, especialmente em regiões montanhosas (Meis e Xavier da Silva, 1968; Summerfield, 1991; Selby, 1993). Além de contribuir para o conhecimento da evolução das formas do relevo o estudo detalhado desses processos pode contribuir para minimizar, ou até mesmo evitar os danos causados à sociedade, dentre eles a destruição de casas e avenidas e a diminuição da produtividade dos solos causados tanto pela erosão dos seus nutrientes quanto pela deposição de sedimentos em áreas férteis, como por exemplo, depósitos sobre solos aluviais (Sidle, 1985).

Dentre os vários e complexos fatores condicionantes destes processos, destacam-se a morfologia do terreno, o regime pluviométrico, a cobertura vegetal, o uso e ocupação dos solos e as propriedades dos solos e das rochas, como espessura, textura, coesão, feições estruturais da rocha e descontinuidades hidráulicas (Dunne e Leopold, 1978; Guidicini e Nieble, 1984; Selby, 1993; entre outros).

Conforme a atuação destes fatores na paisagem dois mecanismos de ruptura podem ocorrer: aquele atribuído à elevação da poro-pressão positiva dentro dos solos, que engloba grande parte dos deslizamentos ocorridos na natureza, e aquele associado à redução da coesão aparente devido à perda de sucção. A geração desses dois mecanismos pode ser condicionada por diferentes fatores, entre eles, a presença de descontinuidades hidráulicas nos mantos de alteração. Sua presença pode ser identificada através da mensuração da condutividade hidráulica em diferentes profundidades, permitindo avaliar o comportamento dos fluxos de água durante principalmente durante os períodos de intensos índices pluviométricos.

Para a estimativa da variação da condutividade hidráulica *in situ* deve-se privilegiar a utilização de métodos simples, que utilizem pouca quantidade de água, portáteis, pois geralmente nos estudos de deslizamentos as áreas são bastante íngremes e de difícil acesso, rápidos na resposta dos valores de K e fundamentalmente precisos. Um desses métodos, o Permeâmetro de Guelph (PG) vem sendo bastante utilizado nas investigações do comportamento da água dentro dos solos (Campos, 1993; Campos et al., 1992; Salverda e Dane, 1993; Moreira, 1998; entre outros).

Além do conhecimento desses processos, modelos matemáticos vêm sendo muito utilizados nas últimas décadas em diferentes áreas, como a Geomorfologia, Hidrologia e Pedologia (Fernandes, 1996), tornando-se ferramentas fundamentais na previsão de áreas susceptíveis a deslizamentos (Montgomery e Dietrich, 1994; Wu e Sidle, 1995; Dikau e Jager, 1995; Fernandes e Amaral, 1996; Guimarães, 2000; entre outros).

Um desses modelos de previsão de áreas instáveis na paisagem, chamado SHALSTAB, foi desenvolvido por Dietrich e Montgomery (1998) e aplicado por Guimarães et al. (1999) e por Guimarães (2000) nas bacias dos rios Quitite e Papagaio, intensamente atingidas por deslizamentos durante as fortes chuvas de fevereiro de 1996 na cidade do Rio de Janeiro. Este, que combina um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade (Equação 1), utiliza parâmetros topográficos e do solo como, por exemplo, densidade, declividade e ângulo de atrito (Dietrich e Montgomery, 1998). No entanto, devido à falta de disponibilidade dos valores de densidade, coesão e ângulo de atrito, esses foram retirados da literatura. Em função da grande variabilidade espacial da espessura e da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos, a Equação 1 foi reestruturada em função do índice Q/T, onde Q representa a precipitação em um determinado tempo e T a transmissividade do solo, ou seja, a condutividade hidráulica (K) multiplicada pela espessura do solo (z).

$$\frac{Q}{T} = \frac{\text{sen } \theta}{(a/b)} \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (1)$$

sendo:

Q = Precipitação [L/T]

T = transmissividade do solo [L^2/T]

θ = declividade [%]

a/b = área de contribuição [L^2]

ϕ = ângulo de atrito [%]

ρ_w = densidade da água [M/L^3]

ρ_s = densidade do solo [M/L^3]

Desta forma, torna-se fundamental a identificação de uma faixa de valores da K_{sat} para utilização em modelos de previsão de áreas de risco, considerando a sua grande variabilidade espacial, assim como a investigação das descontinuidades hidráulicas nos mantos de alteração através da estimativa da condutividade hidráulica saturada em diferentes profundidades.

Os objetivos gerais e específicos desta dissertação serão expostos no **capítulo 2** e em seguida, no **capítulo 3**, o embasamento teórico englobará os fatores condicionantes dos movimentos de massa em encostas, com ênfase no papel da condutividade hidráulica dos solos. Neste capítulo, serão apresentados os conceitos desta propriedade física do solo, assim como sua relação com a dinâmica hidrológica e com os processos de deslizamentos nas encostas, e alguns métodos mais comuns utilizados na mensuração da K tanto *in situ* quanto em laboratório. Por último, ainda neste capítulo, será apresentado a estrutura e o funcionamento do permeâmetro de Guelph, equipamento utilizado neste trabalho.

Nos **capítulos 4 e 5** serão apresentados, respectivamente, a área de estudo (bacia do Papagaio) e suas principais características (geologia, relevo, solos, clima, cobertura vegetal, uso e ocupação) e os materiais e métodos utilizados nesta dissertação. Neste, serão mostrados, com detalhe, os ensaios da condutividade hidráulica saturada dos solos tanto *in situ* quanto em laboratório, a justificativa da escolha das cicatrizes dos escorregamentos e as análises das propriedades físicas dos solos (textura, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, densidades aparente e real).

No **capítulo 6** serão analisados e discutidos os resultados encontrados e observados através dos ensaios da K no campo e em laboratório, além da variação espacial da condutividade hidráulica e das propriedades físicas dos solos. Por último, esta variação tanto horizontalmente, em diferentes pontos do relevo, quanto verticalmente, em diferentes profundidades, será avaliada juntamente com a ocorrência dos escorregamentos da área de estudo (bacia do Papagaio).

Nos **capítulos 7 e 8** serão apresentadas as considerações finais e as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho. Finalmente, no **capítulo 9** o desenvolvimento das equações utilizadas pelo permeâmetro de Guelph.

2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste na caracterização espacial *in situ* da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos e a sua relação com os processos de escorregamentos da bacia do rio Papagaio, localizada na vertente sudoeste do maciço da Tijuca (RJ). Mais especificamente, os objetivos do trabalho consistem na:

- a) Estimativa *in situ* da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos em diferentes pontos do relevo para se avaliar a relação entre K_{sat} e a morfologia do relevo, o material parental, a cobertura vegetal e a ação antrópica, e em diferentes profundidades para se verificar a presença ou não de descontinuidades hidráulicas nos perfis de alteração;
- b) Identificação de uma faixa de valores da K_{sat} , representativa em termos de valores médios, para ser utilizada na previsão de áreas de risco através do modelo SHALSTAB;
- c) Estimativa da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) em laboratório com o intuito de comparar tais resultados com aqueles obtidos *in situ* com o Permeâmetro de Guelph e
- d) Associação dos resultados da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) com algumas propriedades físicas dos solos (textura, macro e microporosidade, densidade aparente e real) na tentativa de melhor explicar o comportamento hidrológico e o desenvolvimento de poro-pressões positivas capazes de detonarem rupturas no interior dos perfis de alteração.

3. Embasamento Teórico

Neste item serão apresentados os principais fatores condicionantes dos movimentos de massa em encostas, enfocando-se principalmente o papel da variação espacial da condutividade hidráulica (K) dos solos no comportamento hidrológico das encostas. Além disso, serão discutidos os conceitos, as teorias e o funcionamento, assim como as vantagens e desvantagens, de um método utilizado na estimativa da K *in situ*, associado ao Permeômetro de Guelph.

3.1. Fatores Condicionantes de Movimentos de Massa em Encostas

Movimentos de massa são processos detonados nas encostas a partir da atuação integrada de diversos fatores condicionantes. Dentre estes fatores podem ser citados o papel da vegetação dado, por exemplo, pelas raízes através do seu reforço mecânico, dos fatores topográficos como a declividade e a forma das encostas, das propriedades dos solos e das rochas, que abrangem as características hidráulicas, mecânicas, químicas e mineralógicas e da dinâmica da água dentro dos materiais, como por exemplo, a recarga de água, os fluxos subsuperficiais e a evapotranspiração (Guidicini e Nieble, 1984; Sidle et al., 1985; Selby, 1993; entre outros).

A vegetação pode influenciar na estabilidade das encostas através de mecanismos hidrológicos e mecânicos. Como exemplo deste último mecanismo, a retirada da cobertura vegetal pode alterar a coesão aparente dos solos reduzindo sua resistência ao cisalhamento (Greenway, 1987; Sidle et al., 1985; Prandini et al., 1997; Selby, 1993; entre outros). Com o objetivo de avaliarem o papel do desmatamento na estabilidade das encostas do Oeste da Austrália, freqüentemente afetadas por processos erosivos, Kuppurachchi e Wyrwoll (1992) selecionaram duas áreas cobertas por diferentes tipos de espécies e através de ensaios de cisalhamento e do uso de alguns parâmetros geotécnicos e geomorfológicos já obtidos por outros autores nesta mesma área, verificaram que anteriormente ao desmatamento o reforço dado aos solos pelo sistema radicular da cobertura vegetal era bastante significativo e que após a sua

retirada esta resistência original foi gradualmente declinando, juntamente com o Fator de Segurança das encostas.

No que se refere aos parâmetros topográficos, vários trabalhos de cunho geomorfológico associaram esses parâmetros à ocorrência de deslizamentos, caracterizando a potencialidade de cada um deles na distribuição destes processos na paisagem. Gao (1993), por exemplo, a partir de modelos digitais de terreno e métodos estatísticos, identificou as variáveis topográficas mais significativas na distribuição espacial de 1107 deslizamentos ocorridos na Virgínia (USA) durante as intensas chuvas que atingiram a área em agosto de 1969. Conforme apontam Reneau e Dietrich (1987), foi a partir deste evento que muitos trabalhos passaram a associar a ocorrência dos deslizamentos às porções côncavas da paisagem.

De acordo com vários autores, entre eles Dietrich e Dunne (1978), Reneau et al. (1984), Meis et al. (1985), Lacerda e Sandroni (1985) e Fernandes et al. (1994), essas porções côncavas do relevo (*hollows*) representam locais preferenciais para a geração de deslizamentos, pois se apresentam como zonas convergentes de fluxos superficiais e subsuperficiais e de materiais transportados ao longo das encostas, gerando depósitos coluviais (Dunne, 1970; Anderson e Burt, 1978; Meis et al., 1981; Reneau e Dietrich, 1990; entre outros).

Seguindo esta mesma linha de pesquisa, Montgomery et al. (1991), através de estimativas da espessura dos depósitos coluvionares existentes nos *hollows*, verificaram um aumento da umidade e uma redução da coesão efetiva do material, aumentando a suscetibilidade à ruptura nessas porções do relevo e Tsukamoto et al. (1982) estudando os deslizamentos de uma área no Japão observaram que mais de 80% dessas feições se localizavam em partes côncavas das encostas com maior concentração de água e de material mais intemperizado.

Associados a estas formas côncavas do relevo, uma vez que consistem em materiais transportados, principalmente pelo efeito da gravidade e depositados no sopé das encostas (Guerra e Guerra, 1997), os colúvios e os tálus quando se encontram sobre a rocha são capazes de gerar descontinuidades mecânicas e hidrológicas. Segundo Fernandes e Amaral (1996), a brusca diminuição da condutividade hidráulica nesse contato favorece a geração de fluxos laterais onde condições críticas de poro-pressão positiva podem ser alcançadas durante eventos pluviométricos de alta intensidade.

Da mesma forma que as feições geomorfológicas, as características estruturais e litológicas dos maciços exercem um papel fundamental na estabilidade das encostas. Dentre elas destacam-se os sistemas de fraturas e falhas, as características da foliação e/ou bandamento, em especial a espessura, composição e orientação das camadas, além das feições estruturais relíquias do embasamento rochoso, as quais podem representar importantes discontinuidades mecânicas e hidráulicas (Fernandes e Amaral, 1996). Com relação ao sistema de fraturas, dependendo da sua continuidade, espaçamento, preenchimento e orientação, estes podem atuar como importantes planos de rupturas nas encostas, uma vez que podem impedir a infiltração vertical e a penetração das raízes, aumentando a suscetibilidade a deslizamentos (Sidle et al., 1985). Conforme apontam tais autores, outra situação geológica bastante susceptível a movimentos de massa inclui solos poucos espessos sobre rochas extremamente impermeáveis e maciças.

No que se refere à relação entre a dinâmica da água e a estabilidade das encostas, pode-se citar, entre os principais mecanismos de ruptura, aqueles associados ao aumento da poro-pressão dentro dos solos, que engloba grande parte dos deslizamentos ocorridos na natureza, e à perda de sucção dos solos parcialmente saturados (Vargas Jr. et al.; 1986; Wolle e Carvalho, 1989; Harp et al., 1990; Selby, 1993; Brugger et al.; 1997; Collins e Znidarcic, 1997; Lacerda, 1997; entre outros). Desta forma, a deflagração de deslizamentos nas encostas a partir desses dois mecanismos dependerá diretamente do comportamento hidrológico dos materiais durante os eventos pluviométricos, sendo de fundamental importância a investigação das propriedades dos solos que influenciam esta dinâmica, como por exemplo, a condutividade hidráulica.

3.2. Condutividade Hidráulica dos Solos (K)

Neste item serão discutidos o conceito e a origem desta propriedade a partir dos experimentos de Darcy, assim como sua relação com a dinâmica hidrológica e a ocorrência de deslizamentos nas encostas e alguns métodos freqüentemente utilizados na determinação desta propriedade, em especial o método de campo baseado no permeâmetro de Guelph.

3.2.1. Teoria e Conceitos

O movimento da água no solo foi quantificado pela primeira vez a partir dos experimentos do engenheiro hidráulico Henri Darcy, na França por volta de 1856 através do cálculo do fluxo de água em uma formação arenosa (de Marsily, 1986). Em seu experimento (Figura 1), Darcy introduziu um determinado fluxo de água (Q_1) em um cilindro contendo um material arenoso homogêneo e após um certo tempo de ensaio a amostra saturou e o valor deste fluxo de saída (Q_2) não mais variou com o tempo, chegando a uma situação de equilíbrio. Com isso, como mostrado na Equação 2, Darcy concluiu que o fluxo (Q) que atravessa o cilindro é diretamente proporcional à área de sua seção transversal (A) e à diferença de carga de pressão ($h_1 - h_2 = \Delta h$), porém inversamente proporcional à distância entre os manômetros (ΔL).

$$Q \propto A \frac{h_1 - h_2}{\Delta L} \quad (2)$$

sendo,

Q - fluxo de água que atravessa a coluna [L^3/T]

A - área da seção transversal da coluna [L^2]

$h_1 - h_2$ - diferença de carga de pressão [L]

ΔL - distância entre os manômetros medindo a carga de pressão em diferentes pontos [L].

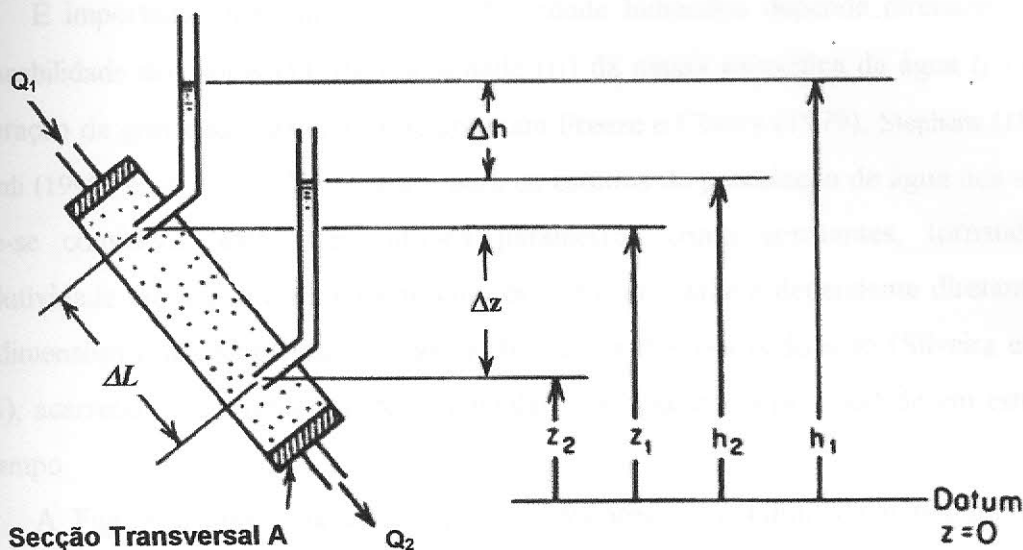


Figura 1 – Experimento de Darcy realizado com um cilindro de área transversal (A) contendo material arenoso. A partir de uma determinada carga gravitacional ($\Delta z = z_2 - z_1$) estabelecida, um fluxo constante (Q_1) é introduzido neste material e o fluxo de saída (Q_2) assim como a variação da carga de pressão (Δh) são mensuradas durante o experimento (modificada de Freeze e Cherry, 1979).

Darcy substituiu o símbolo de proporcionalidade por uma constante chamada **condutividade hidráulica (K)** dando origem a famosa Lei de Darcy (Equação 3), na qual o fluxo (Q) varia tanto em função da condutividade hidráulica (K) quanto do gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L = i$) e sendo este constante, a velocidade do fluxo dependerá somente da condutividade hidráulica (Libardi, 1995). Desta forma, K representa a habilidade com que um fluido é transportado em um meio poroso (Freeze e Cherry, 1979; Brady, 1989; Libardi, 1995; entre outros).

$$Q = KA \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (3)$$

É importante destacar que a condutividade hidráulica depende diretamente da permeabilidade dos solos (k), da viscosidade (μ) da massa específica da água (ρ) e da aceleração da gravidade (g) conforme apontam Freeze e Cherry (1979), Stephens (1996), Libardi (1995), entre outros. No entanto, para os estudos de percolação de água nos solos pode-se considerar estes três últimos parâmetros como constantes, tornando a condutividade hidráulica do solo sinônimo de permeabilidade e dependente diretamente das dimensões e da geometria e organização interna dos poros do solo (Silveira et al., 1993), acarretando em uma grande variabilidade espacial desta propriedade em estudos de campo.

A Figura 2 apresenta a variação dos valores da condutividade hidráulica de acordo com a tipologia dos materiais e uma classificação (alta, média, baixa, muito baixa e praticamente impermeável) considerando esses valores da K . Os materiais podem ser extremamente permeáveis (10^1 cm/s a 10^{-1} cm/s) como os cascalhos, passando por aqueles de baixa permeabilidade (10^{-3} cm/s a 10^{-5} cm/s), representados pelos materiais argilo-arenosos e materiais praticamente impermeáveis como as argilas homogêneas (10^{-7} cm/s a 10^{-9} cm/s).

Esta variação da K de acordo com as propriedades do meio poroso é válida tanto para um meio saturado quanto não saturado. No entanto, neste último, além de ser influenciado pelas características físicas dos solos (ex. textura e estrutura), K também irá variar com o teor de umidade volumétrica (θ) do material. Através da Figura 3 nota-se um aumento da condutividade hidráulica com o teor de umidade. No entanto, este aumento ocorre de forma diferente conforme o tipo de solo. Em um solo arenoso, embora alcance a saturação com um teor de umidade menor, sua condutividade hidráulica é maior do que em solos com textura mais fina (argilosos), pois solos com poros maiores conduzem mais água, já que a vazão é proporcional à quarta potência do diâmetro dos canálculos, ou seja, são necessários 10.000 capilares de 0,01mm de diâmetro para igualar a vazão de apenas um com diâmetro de 0,1mm (Brady, 1989; Silveira et al., 1993; entre outros).

Conductividade Hidráulica (cm/s) Água a 20°C	
Classes	10 ¹ 10 ⁰ 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹
Classes	Alta Média Baixa Muito Baixa Praticamente Impermeável
Materiais	Cascalho Areia Areia Fina Argilo-Arenoso Silte Argilas Estrutura Argilas Homogêneas
	Mistura de Areia, Silte e Argila

Figura 2 – Classificação aproximada da condutividade hidráulica de acordo com os diferentes faixas texturais (modificada de Klute e Dirksen, 1986 *apud* Stephens, 1996).

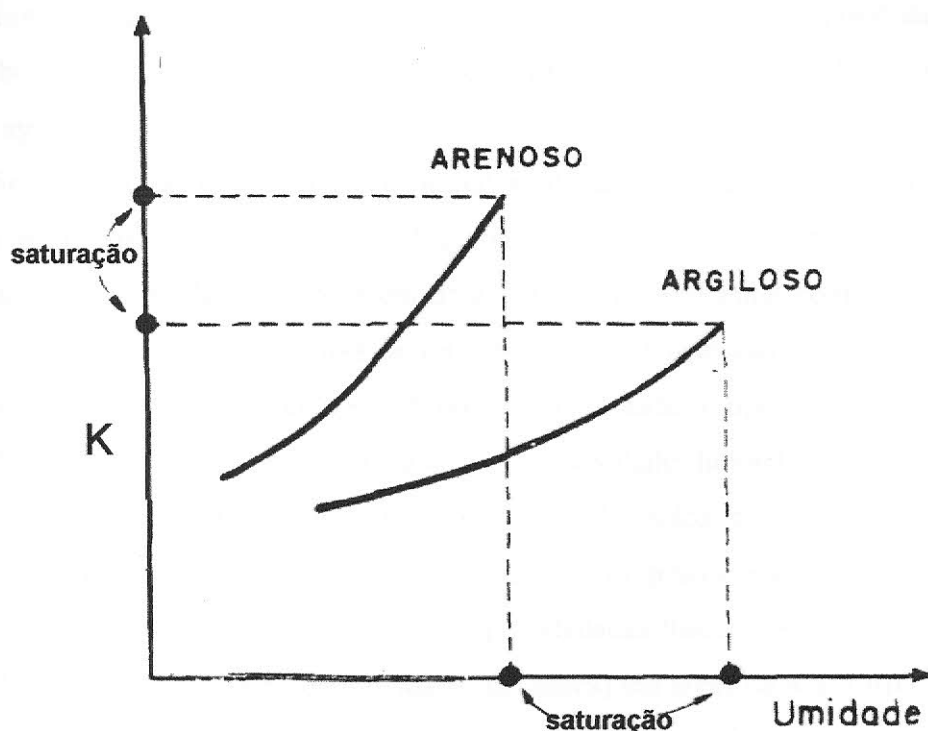


Figura 3 – Variação da condutividade hidráulica (K) com o teor de umidade em dois tipos de solos (Silveira et al., 1993).

3.2.2. *Condutividade Hidráulica, Dinâmica Hidrológica dos Solos e Deslizamentos nas Encostas*

A dinâmica hidrológica das encostas e conseqüentemente a sua estabilidade dependerão diretamente, dentre outros fatores, da variação da condutividade hidráulica dos solos (K), ou seja, da habilidade que estes possuem em transmitir água. Desta forma, sua estimativa torna-se fundamental tanto na investigação de processos erosivos nas encostas quanto no planejamento racional do uso dos solos como, por exemplo, nos estudos de transportes de poluentes.

Através de estimativas da K e das descrições da estrutura do horizonte A_p realizadas periodicamente sob diferentes tipos de cultivos e manejos no Vale de Ottawa no Canadá, Wang et al. (1985) observaram que os valores da K desses horizontes sob cultivo contínuo de milho foram menores do que aqueles estimados sob cultivos mais recentes. Segundo esses autores, os valores mais baixos da K resultam da compactação promovida pelo manejo contínuo nos horizontes superficiais dos solos, devido principalmente à fusão dos agregados e o fechamento dos vazios que eram responsáveis pela transmissão da água dentro do solo. Desta forma, a variação temporal da K pode ser um bom indicador do grau de degradação dos solos como resultado de diferentes práticas agrícolas.

Segundo esta mesma linha de pesquisa, Willatt e Pullar (1983), baseados nos recentes problemas de compactação dos solos causados pelo pisoteio do gado na Austrália, realizaram alguns ensaios em uma Estação Experimental composta de solos siltosos e mal drenados na tentativa de relacionar as mudanças nas propriedades físicas desses solos com o peso exercido por diferentes quantidades e tipos de gados. Entre as propriedades analisadas, eles estimaram a condutividade hidráulica em laboratório através de amostras indeformadas, coletadas no topo dos solos, e puderam verificar uma redução dos valores desta propriedade com o aumento do peso exercido pelos animais.

Através do levantamento de algumas propriedades físicas dos solos (porosidade, densidade aparente, textura e condutividade hidráulica) em áreas da Mata Atlântica com diferentes estágios sucessionais de desenvolvimento (10, 25, 150 e 250 anos), Jansen et al. (1997) verificaram valores mais baixos da condutividade hidráulica dos solos das matas com idades entre 10 (0,245cm/h) e 25 anos (0,317cm/h) em relação àqueles estimados nos solos das matas desenvolvidas há 150 anos (7,750cm/s) onde a estrutura

de serrapilheira é mais desenvolvida e se observa uma maior atividade biogênica no topo dos solos.

Devido aos constantes problemas erosivos dos solos do município de Cidade Gaúcha no Paraná, Martins et al. (2000) estimaram a condutividade hidráulica não saturada (K_{nsat}) de dois perfis de Latossolo Vermelho Escuro sob culturas temporárias e pastagens com o intuito de verificar suas implicações com os processos erosivos. Tais autores observaram nos primeiros 50cm, dos perfis sob pastagem e culturas temporárias, uma redução da infiltração devido ao tipo de uso e conseqüente adensamento da camada superficial do solo.

Esta relação entre a variação da condutividade hidráulica e os processos erosivos também foi analisada por Avelar e Coelho Netto (1992), em colúvios localizados sobre rochas granitóides alteradas, com o objetivo principal de discutir a origem de algumas formas côncavas, focalizando os padrões de fluxos d'água subsuperficiais e o transporte de materiais das encostas. Tais autores mostraram através dos ensaios da K , as variações desta propriedade conforme as características texturais e mineralógicas dos colúvios e das rochas. Os ensaios foram realizados através de tubos piezométricos em um colúvio superior argilo-arenoso com espessura entre 2,5 e 5,0m e outro inferior com cerca de 1,5m e com uma textura argilo-siltico-arenoso. A permeabilidade encontrada pelos autores nos colúvios variou entre 10^{-4} cm/s e 10^{-5} cm/s e na rocha alterada (saprolito) entre 10^{-5} cm/s e 10^{-7} cm/s, tendendo a uma diminuição com a proximidade da rocha sã.

Através de investigações de cronossequências em perfis de Podzóis com diferentes idades, Brooks e Richards (1993) realizaram estimativas da condutividade hidráulica e análises granulométricas em três horizontes (A, E_a , e B_{fs}) destes solos buscando estabelecer os efeitos da pedogênese na mudança de suas propriedades hidráulicas, dentro de uma escala de tempo pedológica. Tais autores observaram, através da variação dos valores da K_{sat} com o tempo de desenvolvimento dos solos, que entre 1.000 e 13.000 anos de idade ocorreu uma redução tanto dos valores da K_{sat} em todos os horizontes dos solos quanto das diferenças entre tais valores de cada horizonte confirmando, desta forma, a transformação das propriedades hidráulicas dos solos a partir da atuação dos processos pedogenéticos.

Com o objetivo de avaliarem as mudanças da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) associadas às mudanças da textura, da densidade aparente e do conteúdo de água em solos desenvolvidos sobre gnaisses fraturados, Schoeneberger et al. (1995) estimaram a K_{sat} *in situ* e através de amostras indeformadas coletadas até 3m de profundidade em diferentes porções da encosta (topo, média, e alta) conforme mostrado na Figura 4. Tais autores tinham a preocupação em compreender as potencialidades e limitações do saprolito localizado abaixo dos horizontes A e B do solo, uma vez que estes poderiam servir como depósito de rejeitos, em função do próprio esgotamento dos horizontes sobrejacentes. Pode-se observar que as três posições na encosta apresentam a mesma tendência quanto à variação da K_{sat} e em profundidade nota-se valores mais altos no horizonte Bt e uma redução no horizonte de transição B/C que, segundo os autores, esta associada à sua estrutura planar, à menor quantidade de raízes e ao preenchimento dos poros mais largos do saprolito pela argila iluviada do horizonte sobrejacente (B).

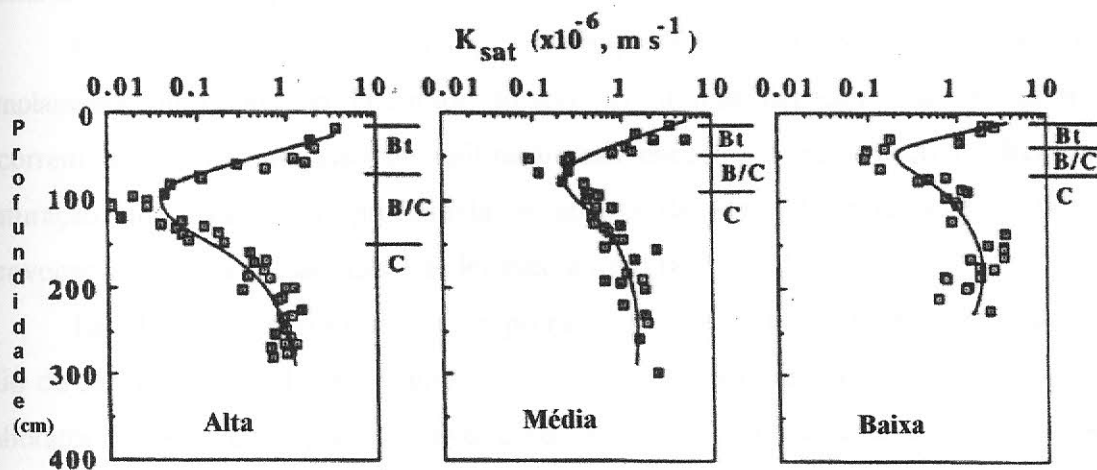


Figura 4 – Variação dos valores da K_{sat} em três posições da encosta (alta, média e baixa) e em diferentes profundidades obtidos através de ensaios realizados em solos argilosos sobrejacentes a um saprolito onde predominam extensas bandas de foliação variando de alguns milímetros até 0,5m de espessura (modificada de Schoeneberger et al., 1995).

No sentido de se compreender as relações entre o comportamento hidrológico das encostas e a geração de deslizamentos, torna-se fundamental a estimativa da variação espacial da condutividade hidráulica, uma vez que estas podem gerar descontinuidades hidráulicas dentro do material as quais contribuem diretamente para a ruptura destas encostas.

Como já citado anteriormente, dois mecanismos de rupturas são amplamente discutidos na literatura brasileira: aquele provocado pelo rápido aumento da poro-pressão positiva durante intensos eventos pluviométricos (Vargas Jr. et al.; 1986; Brugger et al.; 1997, Lacerda et al, 1997; entre outros) e aquele causado pela rápida redução da sucção nos solos não saturados (Collins e Znidarcic, 1997; Wolle e Carvalho, 1989; entre outros).

No primeiro tipo de mecanismo (Figura 5) a ruptura é provocada pelo fluxo d'água que se desenvolve aproximadamente paralelo à encosta devido à ocorrência de um horizonte menos permeável sob uma camada passível de instabilização provocando, desta forma, um aumento brusco das poro-pressões positivas. Quanto mais o nível freático se aproximar da superfície do terreno, maior será esta pressão levando a uma condição limite para ocorrência de rupturas (Wolle e Carvalho, 1994).

Os mecanismos de ruptura ocorridos a partir da perda de sucção vêm sendo amplamente discutidos na literatura durante as últimas décadas. Tais mecanismos ocorrem devido ao processo de infiltração nas encostas e ao avanço da frente de saturação que alcançando profundidades abaixo da zona de enraizamento podem provocar a perda da coesão aparente levando à ruptura (Lacerda, 1997).

Estudos sobre mecanismos de rupturas em encostas não saturadas na cidade do Rio de Janeiro, realizado por Campos et al. (1992), mostraram através de ensaios em laboratório, de investigações do nível piezométrico na camada coluvial e no contato entre solo/rocha e de estudos analíticos das condições de fluxos e do desenvolvimento de poro-pressões na encosta, que a ocorrência de muitos desses escorregamentos está associada à saturação da encosta pela infiltração da água da chuva e a geração de fluxos transientes paralelos à superfície da encosta.

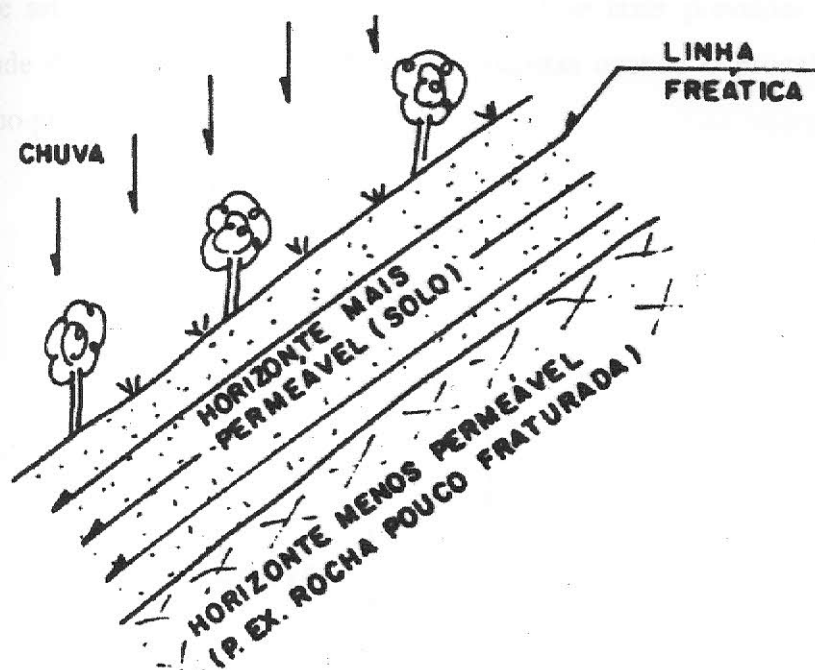


Figura 5 – Desenho esquemático da formação de fluxos paralelos em um encosta constituída por materiais de diferentes permeabilidades. Tais discontinuidades hidráulicas podem levar à geração de pressões neutras aumentando a suscetibilidade a deslizamentos (Wolle e Carvalho, 1994).

Wolle e Carvalho (1989) estudando alguns trechos das encostas da Serra do Mar no estado de São Paulo verificaram o predomínio de solos coluvionares e saprolíticos com condutividade hidráulica inferiores àquelas encontradas nos maciços intensamente fraturados subjacente (Figura 6). Sobre tais condições toda a água das chuvas que se infiltra na encosta é drenada para os horizontes inferiores inviabilizando a formação de fluxos paralelos à encosta. Neste caso, os autores puderam verificar através de ensaios em laboratório, que a ocorrência de fluxos verticais, e não paralelos, nas encostas provoca uma redução da sucção dos solos e conseqüente queda da coesão aparente.

Vargas et al. (1986), com o objetivo de determinar o efeito da intensidade das chuvas na estabilidade de uma encosta hipotética, analisaram a relação entre a estabilidade de superfícies planares, a intensidade da chuva e o avanço da frente de saturação em solos residuais parcialmente saturados. Tais autores puderam observar, o tempo gasto para que a frente de saturação alcance determinada profundidade a partir de vários graus de saturação e diferentes valores de permeabilidade de solos grosseiros e finos. A partir daí, verificaram uma redução do fator de segurança com o avanço da

frente de saturação e ressaltaram que é possível se fazer previsões da influencia da intensidade das chuvas na estabilidade das encostas quando o processo de infiltração atua como principal fator condicionante.

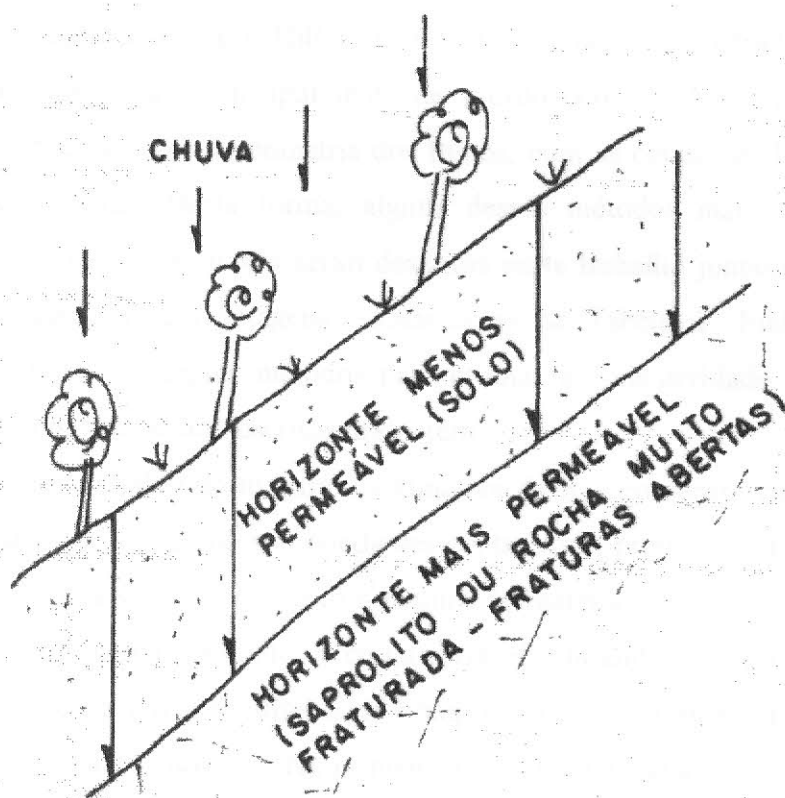


Figura 6 – Desenho esquemático da formação de fluxos verticais em um encosta composta por um horizonte menos permeável sobre um horizonte ou camada mais permeável. Tal formação embora impeça a geração de pressões neutras nos horizontes superiores, permite que o avanço da frente de saturação reduza bruscamente a coesão aparente do solo aumentando a suscetibilidade a deslizamentos (Wolle e Carvalho, 1994).

3.2.3. Formas de Mensuração

A partir do desenvolvimento da Lei de Darcy, vários métodos para medir a condutividade hidráulica foram criados e posteriormente aperfeiçoados na tentativa de minimizar os custos, o tempo de execução e os erros inerentes a esses ensaios.

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos pode ser estimada através de métodos realizados *in situ* e em laboratório. A escolha do melhor método a ser utilizado depende principalmente dos objetivos do trabalho e do tempo e verba disponíveis para sua execução. Segundo Paige e Hillel (1993), os resultados encontrados através dos diferentes métodos variam principalmente de acordo com os tipos de solo, com as condições de umidade, com a geometria dos fluxos, com as condições limites e com o tamanho das amostras. Desta forma, alguns desses métodos mais freqüentemente utilizados em laboratório e *in situ* serão descritos neste trabalho juntamente com suas principais vantagens e desvantagens, sumarizadas na Tabela 1. Embora não seja objetivo deste trabalho, alguns métodos para estimar a condutividade hidráulica não saturada (K_{nsat}) também serão descritos neste item.

Os ensaios de laboratório para a estimativa da K_{sat} começam com a coleta de uma amostra de solo no campo sob condições controladas, preferencialmente amostras indeformadas, as quais, de acordo com a textura do material, podem ser submetidas a dois tipos de testes: carga constante ou carga variável. Em ambos os testes, a amostra é inicialmente colocada em um cilindro de comprimento (L) e área transversal (A) e fechada entre duas placas porosas. No primeiro teste (Figura 7a) a amostra é submetida a uma carga constante (h) até que todos os poros desta amostra sejam preenchidos por água (saturação) e o fluxo de saída (Q) não varie mais com o tempo. A partir daí, a condutividade hidráulica é calculada através da Equação 4, proposta por Darcy.

$$K = \frac{QL}{Ah} \quad (4)$$

No permeâmetro de carga variável (Figura 7b), a carga (h) aplicada na amostra é variável e a diferença entre o seu valor inicial e final ($\Delta h = h_0 - h_f$) em um determinado tempo (t) é utilizada no cálculo da condutividade hidráulica, através da Equação 5.

$$K = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) \quad (5)$$

sendo,

a – área da seção transversal do tubo onde a variação da carga é medida [L^2]

h_0 – carga inicial [L]

h_f – carga final [L]

t – tempo decorrido entre a carga h_0 e a carga h_f [T].

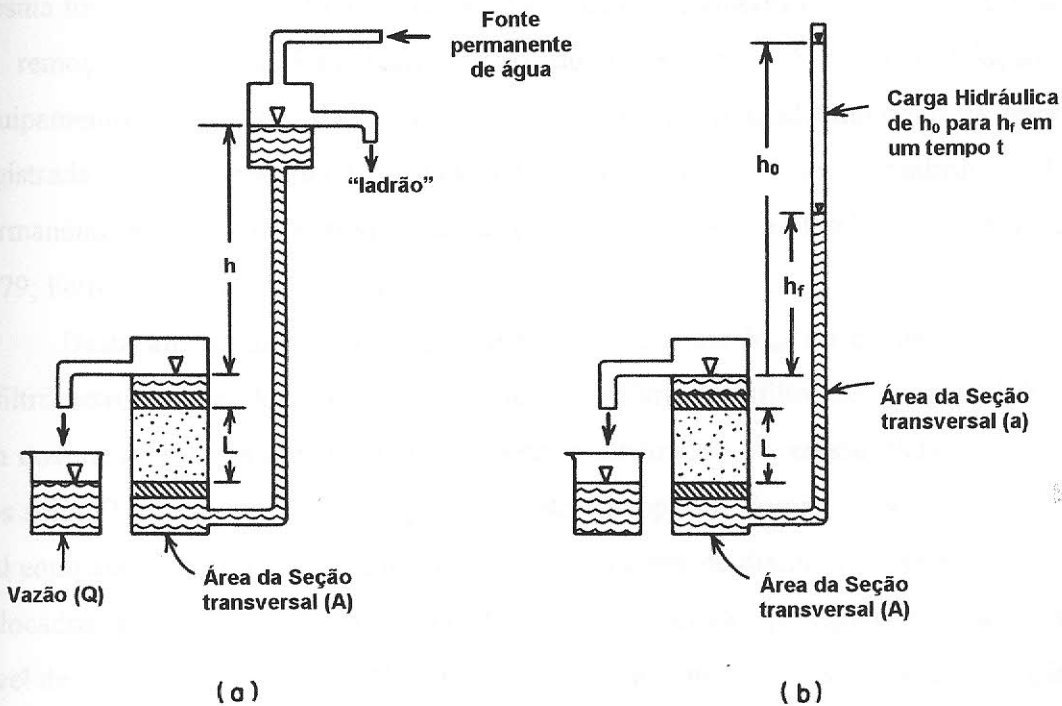


Figura 7 – Permeômetro de carga constante (a) e de carga variável (b) utilizados na estimativa da K_{sat} em laboratório (modificado de Freezy e Cherry, 1979).

Uma das principais desvantagens dos ensaios de laboratório é a sua pequena representatividade espacial devido ao tamanho da amostra, que poderá não englobar algumas estruturas do solo, como macroporos, raízes, fendas e feições relíquias, que estão diretamente relacionadas aos valores da condutividade hidráulica. Desta forma, os ensaios realizados *in situ* devem ser privilegiados nos levantamentos voltados para a determinação condutividade hidráulica.

Dentre os vários métodos para se medir K_{sat} no campo, pode-se citar os ensaios de poços, bastante utilizados pela Geologia de Engenharia. Tal método pode ser realizado através da aplicação de cargas constantes e variáveis e também através do bombeamento (descarga) de água (Oliveira e Corrêa Filho, 1996). De acordo com tais autores, no ensaio de infiltração (carga), inicialmente abre-se um poço até o horizonte de solo desejado, preenchendo-o com água e mantendo o nível de carga constante dentro do poço. A partir daí, faz-se uma leitura desta vazão durante um determinado tempo, até que esta se torne constante, sendo este valor utilizado no cálculo final da K_{sat} .

Outro ensaio bastante semelhante que determina K_{sat} *in situ*, é o método de Hvorslev, em que são utilizados piezômetros instalados até a profundidade ensaiada. Da mesma forma que o método anterior pode ser realizado através da adição (slug test) ou da remoção de água (bail test) dentro do piezômetro. Após a instalação dos equipamentos, a variação do nível de água em um determinado intervalo de tempo é registrada até que se alcance o estado de equilíbrio, ou seja, uma condição de fluxo permanente ao redor da extremidade do piezômetro (Caputo, 1981; Freezy e Cherry, 1979; Fetter, 1994; entre outros).

Destacam-se também outros métodos para estimar K_{sat} no campo, entre eles o infiltrômetro de anel duplo e os permeômetros de furo. O infiltrômetro de anel duplo é um dos métodos mais comuns para se medir a infiltração e a condutividade hidráulica dos solos (Little et al., 1995; Stepenhs, 1996; Chappell e Ternan, 1997; entre outros). Tal equipamento é formado basicamente por dois anéis de diâmetros diferentes que são colocados em contato com a superfície do solo e preenchidos por água. A variação deste nível de água em uma unidade de tempo é mensurada até que se alcance a saturação do solo, sendo o valor desta vazão utilizado para o cálculo final da K_{sat} .

Quanto aos permeâmetros de furo, ressalta-se que existem diferentes tipos e como seu funcionamento básico é comum a todos, a descrição completa será feita no item seguinte (3.3) em que um desses tipos de permeâmetros será apresentado.

A estimativa da condutividade hidráulica não saturada (K_{nsat}) também pode ser realizada tanto no campo quanto em laboratório. De acordo com Stephens (1996), os métodos de laboratório são bastante semelhantes àqueles utilizados na estimativa da condutividade hidráulica saturada, mas agora o valor da K_{nsat} estará associado ao conteúdo de água do meio e a carga de pressão estabelecida na amostra, mensurada através de tensiômetros instalados em dois pontos da coluna de solo. Desta forma, devem ser realizados testes para se obter uma seqüência de medidas da condutividade desde a saturação até conteúdos mais baixos de água na amostra (Stephens, 1996).

Os métodos utilizados para mensurar a K_{nsat} no campo podem ser realizados através de fluxos constantes ou de fluxos transientes. Nestes ensaios, um fluxo de água constante (ou variável) é aplicado no solo até que o perfil se apresente em equilíbrio. Assim, a condutividade hidráulica não saturada é calculada através da relação entre esta taxa de volume constante e o gradiente hidráulico mensurado na amostra (Stephens, 1996).

Outro método bastante comum para se estimar K_{nsat} no campo é o método do perfil instantâneo, em que são instalados instrumentos no solo para medição da carga de pressão e do conteúdo de água. Inicialmente, este solo é submetido a uma taxa de infiltração até que alcance um regime estacionário. Depois de alcançado este regime, interrompe-se a recarga sendo permitida a redistribuição da água dentro do solo. Todo esse processo de redistribuição da água é então acompanhado por medidas periódicas de umidade e esses valores são utilizados no cálculo K_{nsat} (Libardi, 1995).

De acordo com Paige e Hillel (1993), a efetividade do método depende das limitações da teoria proposta para descrever o movimento da água dentro do solo e todos os métodos são comumente comparados em termos de acurácia dos resultados, tempo e água gastos durante os ensaios e resolução espacial. Desta forma, selecionou-se para este trabalho, um permeâmetro de furo e carga constante, chamado de permeâmetro de Guelph para a estimativa da K_{sat} .

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de alguns métodos frequentemente utilizados na estimativa da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e não saturada (K_{fsat}). Todos os métodos estimam K *in situ*, com exceção dos permeâmetros de carga constante e variável.

MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS	FONTE*
Permeâmetro de carga constante/variável	<ul style="list-style-type: none"> - simples e rápido; - outras medições podem ser feitas na mesma amostra (ex. porosidade) - facilita a aplicação de análises computacionais devido à simplicidade das condições de limite. 	<ul style="list-style-type: none"> - perturbações na amostra podem alterar o valor de K; - dificuldade de se verificar estruturas no solo de grandes dimensões (ex. raízes e feições relíquias); - Os valores da K podem ser superestimados ou subestimados dependendo da escala de mensuração (ex. efeito dos macroporos); - muito lento e cuidados específicos devem ser tomados com as amostras (ex. água esterilizada para evitar bactérias); 	<p>Stephens (1996) Paige e Hillel (1993) Salverda e Dane (1993) Reynolds e Elrick (1985b)</p>
Poço	<ul style="list-style-type: none"> - rápido 	<ul style="list-style-type: none"> - dificuldade no transporte e na montagem de equipamentos e -necessidade mínima de 1000 litros de água. 	<p>Oliveira e Corrêa Filho (1996) Freezy e Cherry (1979) Caputo (1973) Fetter (1994)</p>
Hvorlesv	<ul style="list-style-type: none"> - rápido e utiliza pouca água. 	<ul style="list-style-type: none"> - necessidade da instalação de piezômetros (tubos abertos) 	
Infiltrômetro de anel duplo fechado	<ul style="list-style-type: none"> - custo moderado; - grande volume de solo é ensaiado; - medição da permeabilidade vertical e - mede permeabilidades menores que 10^{-8} cm/s 	<ul style="list-style-type: none"> - dificuldade no transporte e na montagem de equipamentos; - a frente de saturação tem que ser estimada; - requer muito tempo, podendo durar algumas semanas ou meses. 	<p>Stephens (1996) Little et al. (1995) Daniel (1989)</p>
Infiltrômetro de anel simples fechado	<ul style="list-style-type: none"> - baixo custo; - medição da permeabilidade vertical e - mede permeabilidades menores que 10^{-8} cm/s 	<ul style="list-style-type: none"> - pequeno volume de solo é ensaio; - requer muito tempo, podendo durar algumas semanas ou meses; - a frente de saturação tem que ser estimada e - dificuldade no transporte e na montagem de equipamentos. 	<p>Daniel (1989) e Stephens (1996)</p>

(continuação da Tabela 1)

MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS	FONTE*
Infiltrômetro de anel simples aberto	<ul style="list-style-type: none"> - mede a permeabilidade vertical; - de fácil manuseio e - grande volume de solo é ensaiado. 	<ul style="list-style-type: none"> - problemas com evaporação; - requer muito tempo, podendo durar algumas semanas ou meses; 	Daniel (1989) Stephens (1996) Guerra (1995)
<i>Air entry</i>	<ul style="list-style-type: none"> - custo moderado; - medição da permeabilidade vertical - mede permeabilidades menores que 10^{-8} cm/s 	<ul style="list-style-type: none"> - dificuldade no transporte e na montagem de equipamentos e - hipóteses complexas devem ser consideradas. 	Daniel (1989) Stephens (1996) Reynolds e Elrick (1985b)
Permeâmetro de Guelph	<ul style="list-style-type: none"> - mede simultaneamente outros parâmetros hidráulicos do solo (ex. sorptividade); - permite medidas em grandes profundidades; - baixo custo, portátil e utiliza pouca água; - pode ser operado por uma única pessoa; - requer pouco tempo para medição; - causa perturbações mínimas no solo e permite várias opções de análise. - mede permeabilidade entre 10^{-2} e 10^{-8} cm/s 	<ul style="list-style-type: none"> - em um meio poroso muito heterogêneo pode-se encontrar, através da análise de Richards, valores irrealis; - medidas pontuais e - pode subestimar os valores de K de acordo com a textura do solo e a umidade antecedente devido à “impermeabilização” do furo durante a tradagem. 	Reynolds e Elrick (1985a) Reynolds et al. (1985) Reynolds e Elrick (1985b) Reynolds e Zebchuk (1996) Salverda e Dane (1996) Reynolds et al. (1983)
Perfil Instantâneo.	<ul style="list-style-type: none"> - aplicado em perfis heterogêneos e - bastante efetivo para medir diretamente as propriedades hidráulicas que variam no campo. 	<ul style="list-style-type: none"> - lento e restrito a profundidades rasas e a solos bastante permeáveis e - por mensurar o fluxo em uma única direção, uma pequena e rápida subida do nível de água e uma abrupta mudança da textura d material ensaiado podem alterar os resultados. 	Stephens (1996) Libardi (1995) Paige e Hillel (1993)

* Trabalhos que utilizam os métodos e citam suas vantagens e desvantagens.

3.3. Permeâmetro de Guelph

Em função de alguns problemas práticos e teóricos dos permeâmetros de carga constante utilizados em campo (ex. a grande quantidade de água utilizada durante os ensaios), Reynolds et al. (1983) desenvolveram na Universidade de Guelph, no Canadá, um permeâmetro de furo e de carga constante chamado de Permeâmetro de Guelph (PG). Este método vem sendo utilizado em diferentes áreas e mostrando-se bastante eficiente na estimativa da condutividade hidráulica dos solos (Reynolds e Elrick, 1985b; Campos et al., 1992; Campos, 1993; Paige e Hillel, 1993; Salverda e Dane, 1993; Jabro, 1996; Reynolds e Zebchuk, 1996; Bovi et al., 1997; Moreira, 1998; entre outros).

3.3.1. Estrutura do Equipamento

O permeâmetro de Guelph (PG) é um tipo de permeâmetro de carga constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo (K_{sat}) acima do lençol freático. Basicamente, ele é composto por uma garrafa de Mariotte que controla o nível constante de água dentro do furo, um tubo de acrílico onde a água é introduzida e um tripé que pode ser adaptado para altas declividades (Figura 8). Na extremidade inferior do tubo de acrílico, a água é distribuída no solo através de uma ponta perfurada que é preenchida com areia fina para reduzir a turbulência do fluxo de saída do permeâmetro durante a recarga de água (Reynolds et al., 1983 e 1985a).

O sistema de funcionamento do PG consiste na aplicação de uma carga constante de água (H) em um furo de raio determinado (a), medindo-se, em intervalos de tempo (t) constantes, o caimento do nível de água (R), que passa em uma determinada área transversal (A) do tubo de acrílico graduado, ou seja, medindo-se o fluxo Q . Depois de determinado período, que dependerá, dentre outros fatores, da umidade antecedente do solo e da sua textura, uma pequena área em torno do furo estará saturada (bulbo saturado) e o fluxo Q ficará constante (Figura 9). Este mesmo valor é inserido no cálculo da condutividade hidráulica dos solos (Reynolds et al, 1983; Reynolds e Elrick, 1985a e 1985b), como será visto mais a frente.

Além da condutividade hidráulica saturada de campo (K_{sat}), o permeâmetro de Guelph mede simultaneamente, outras propriedades fundamentais que governam o movimento da água dentro do solo: a sorptividade (S), a condutividade hidráulica não saturada (relação entre condutividade e carga de pressão), o fluxo de potencial matricial (ϕ_m) e o parâmetro α que é uma constante que depende das propriedades do solo (Reynolds e Elrick, 1985a). Para aplicação desse método, as seguintes condições devem ser consideradas: (i) meio poroso rígido, homogêneo e isotrópico, (ii) fluxo em equilíbrio constante e (iii) domínio de fluxo em um semi-espaço infinito (Reynolds et al., 1983).

É importante destacar que durante o ensaio com o permeâmetro de Guelph, devido à entrada de ar no sistema, a completa saturação do solo, ou seja, a condição em que todos os seus poros (vazios) estão preenchidos por água, raramente é encontrada no campo. Este fato, amplamente discutido na literatura (Reynolds et al., 198; Stephens, 1996; entre outros), leva alguns autores a denominarem esta condutividade hidráulica “saturada” estimada em campo, de condutividade hidráulica saturada de campo – *field-saturated hydraulic conductivity* (K_{fs}). Desta forma, mesmo referindo-se constantemente neste trabalho à condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) o que está se medindo, na realidade, é K_{fs} .



Figura 8 – Desenho esquemático do Permeômetro de Guelph (a) e de seus principais componentes; Permeômetro de Guelph sendo utilizado no campo com a sua extremidade inferior dentro de um furo (b); e detalhe do marcador da carga hidráulica H aplicada no solo (c).

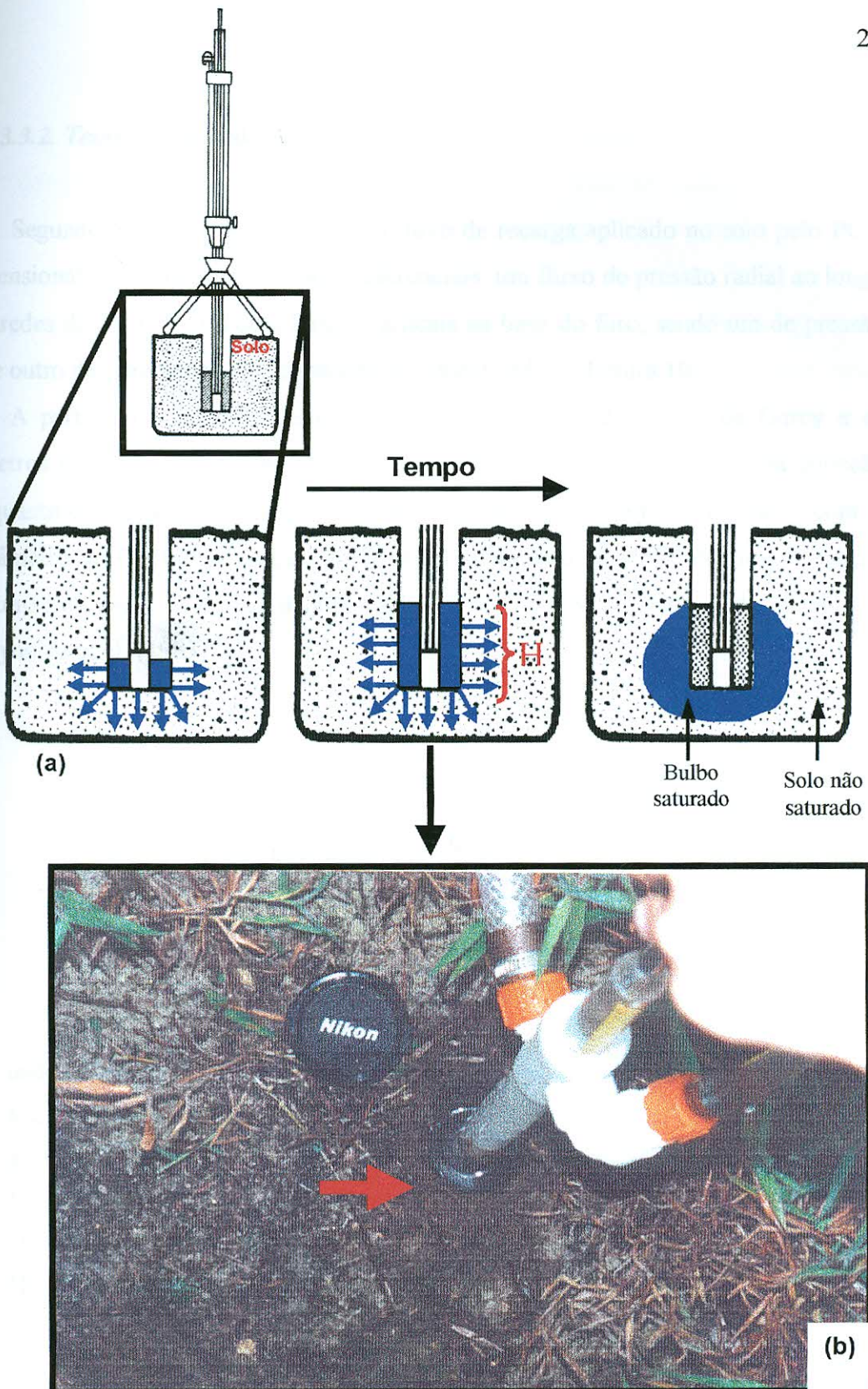


Figura 9 – Detalhe do ensaio realizado em campo com o PG. O ensaio se inicia com a aplicação de uma carga H e a distribuição tridimensional do fluxo de água dentro do furo (a). Após determinado tempo, uma área finita dentro do solo é saturada (bulbo saturado) e o fluxo (Q) torna-se constante. Na parte inferior da Figura (b) a seta vermelha indica o nível da água alcançado dentro do furo durante o ensaio.

3.3.2. Teoria e Equações de Fluxo

Segundo Reynolds et al. (1983), o fluxo de recarga aplicado no solo pelo PG é tridimensional e assume três direções preferenciais: um fluxo de pressão radial ao longo das paredes do furo (V_{rp}) e dois fluxos verticais na base do furo, sendo um de pressão (V_{zp}) e outro de gravidade (V_g), conforme esquematizado na Figura 10.

A partir do somatório destes três fluxos considerando, a Lei de Darcy e os parâmetros geométricos do furo, Reynolds et al. (1983) desenvolveram uma equação para quantificar a K_{sat} através dos valores do fluxo (Q) obtidos no campo com o permeâmetro de Guelph (Equação 6). O desenvolvimento simplificado desta equação encontra-se no Anexo 1 e mais detalhes sobre o seu desenvolvimento pode ser obtidos em Reynolds et al. (1983).

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

onde,

K_{sat} – condutividade saturada [L/T]

a – raio do furo [L]

C – constante de proporcionalidade adimensional

Q – fluxo constante medido no campo ($Q = R \times A$) [L^3/T]

H – carga constante aplicada [L]

O parâmetro C representa a distribuição do gradiente de pressão no em torno do furo, e depende diretamente do raio do furo (a) e da carga aplicada neste furo (H). Através de métodos numéricos e analíticos, Reynolds et al. (1983) discutem a melhor forma de se encontrar este valor C para o cálculo da condutividade hidráulica e

verificam que a solução numérica é a mais apropriada, uma vez que esta permite uma melhor definição das condições de contorno. O produto final da solução é a relação entre a carga aplicada (H), o raio do furo (a) e o tipo de material investigado (Figura 11).

Vale destacar que os valores de H/a devem ser suficientes para maximizar o fluxo tridimensional e minimizar o fluxo vertical no furo, pois quanto maior este valor, maior será o tempo necessário para que se alcance um equilíbrio, ou seja, para que se forme uma área saturada (bulbo saturado) onde o fluxo é considerado constante (Reynolds et al., 1983).

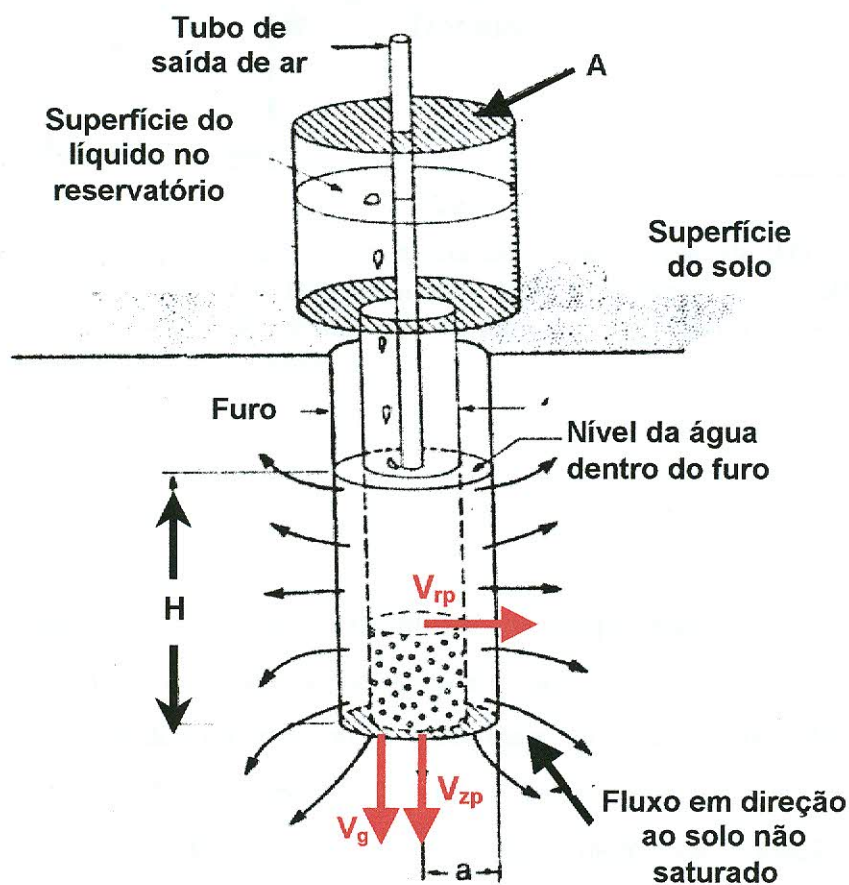


Figura 10 – Desenho esquemático do funcionamento do PG durante o ensaio, considerando o fluxo tridimensional (V_{rp} , V_{zp} , V_g) da água dentro do solo não saturado. Além do fluxo Q obtido através do ensaio, o raio do furo (a), o nível de água que corresponde à carga H aplicada e a área transversal (A) do equipamento serão utilizados no cálculo final da K_{sat} (Reynolds, 1986).

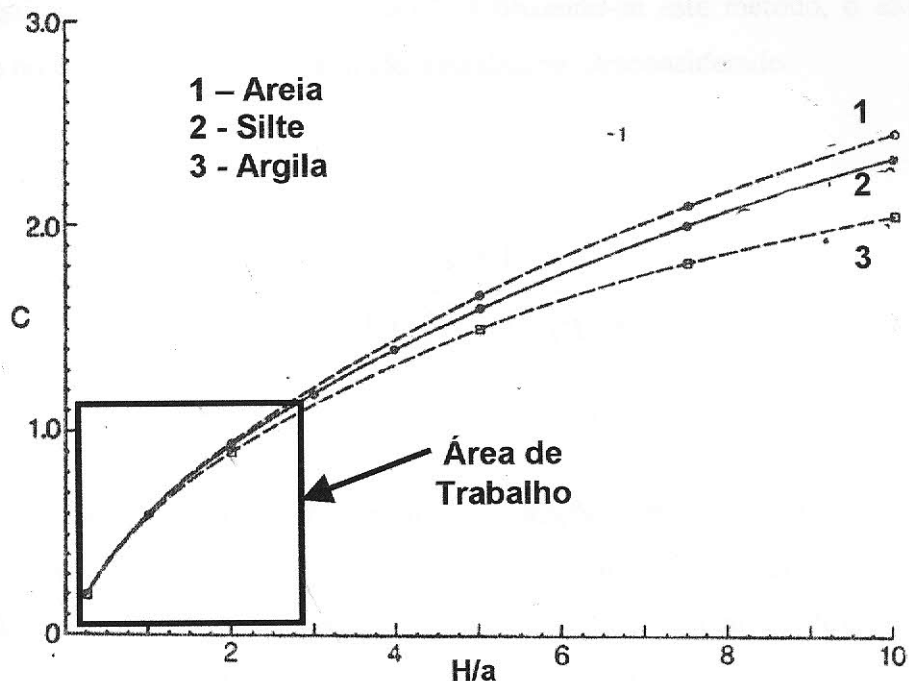


Figura 11 – Variação do parâmetro C com a relação da carga aplicada (H) e o raio do furo (a). Devido aos baixos valores de H os valores de C utilizados se restringem a área demarcada no Gráfico (área de trabalho) (modificada de Reynolds e Elrick, 1985b).

A partir dos valores de fluxo (Q) obtidos em campo, foram propostos alguns métodos interpretativos na tentativa de simular mais precisamente as condições encontradas no campo e desta forma obter valores mais confiáveis da K_{sat} (Reynolds et al., 1985; Elrick et al., (1989); Campos, 1993; entre outros).

A primeira forma de análise é derivada originalmente da Equação 6 e foi desenvolvida com base em Laplace (K_{sat-L}). No entanto, por desconsiderar a influência da área não saturada e das propriedades capilares da região do em torno do bulbo saturado (Figura 9), Reynolds et al. (1985) desenvolveram outra análise baseada na equação de Richards para fluxos tridimensionais em solos não saturados (K_{sat-R}). Devido a problemas com valores irrealistas obtidos através desta análise, que serão

discutidos mais a frente, uma terceira proposta de análise foi desenvolvida por Elrick et al. (1989) (K_{sat-U}).

A análise baseada em Laplace (K_{sat-L}) utiliza apenas uma única carga H aplicada no solo e estima K_{sat} a partir da Equação 7. Utilizando-se este método, o efeito da capilaridade no em torno do bulbo saturado é totalmente desconsiderado.

$$K_{sat} = \frac{CQ}{(2\pi H^2 + C\pi a^2)} \quad (7)$$

Na tentativa de melhor representar as condições de campo, Reynolds et al. (1985) avaliaram a teoria original e reescreveram a Equação 6, considerando as forças de capilaridade do solo, representada na Equação 8 pelo potencial de fluxo matricial (ϕ_m). Nesta última equação (K_{sat-R}), o primeiro termo refere-se ao fluxo de pressão, o segundo ao fluxo gravitacional e o terceiro ao fluxo matricial. Todo o desenvolvimento da Equação 8 pode ser consultado em Reynolds et al. (1985). O desenvolvimento simplificado desta equação encontra-se no Anexo 2 e mais detalhes sobre o seu desenvolvimento pode ser obtidos em Reynolds et al. (1983).

$$Q = \left[\left(\frac{2\pi H^2}{C} \right) + \pi a^2 \right] K_{sat} + \left(\frac{2\pi H}{C} \right) \phi_m \quad (8)$$

Como nesta existem duas incógnitas, K_{sat} e ϕ_m , não se pode calcular diretamente o valor final da condutividade hidráulica. Desta forma, utiliza-se o método das equações simultâneas proposto por Reynolds et al. (1985) em que duas cargas constantes H_1 e H_2 são aplicadas em um mesmo furo, eliminando uma dessas duas incógnitas, obtendo-se assim dois valores de fluxos, Q_1 ($Q_1 = R_1 \times A$) e Q_2 ($Q_2 = R_2 \times A$), respectivamente. Desta forma, para o cálculo da K_{sat} , o termo ϕ_m é eliminado (Equações 9 e 10).

$$Q_1 = \left[\left(\frac{2\pi H_1^2}{C_1} \right) + \pi a^2 \right] K_{\text{sat}} + \left(\frac{2\pi H_1}{C_1} \right) \phi_m \quad (9)$$

$$Q_2 = \left[\left(\frac{2\pi H_2^2}{C_2} \right) + \pi a^2 \right] K_{\text{sat}} + \left(\frac{2\pi H_2}{C_2} \right) \phi \quad (10)$$

A partir das equações simultâneas, o cálculo da K_{sat} é expresso através da Equação 11 que utiliza os parâmetros G_1 [L^2] e G_2 [L^2], calculados através das Equações 12 e 13.

$$K_{\text{sat}} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (11)$$

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (12)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (13)$$

De acordo com Reynolds e Elrick (1985a), devido à forte heterogeneidade do meio poroso e à presença de grandes macroporos, o cálculo através de equações simultâneas pode levar a valores irreais K_{sat} (por ex. negativos), o que invalida o resultado final. Para solucionar tal problema, pode-se aplicar três ou mais cargas (H_1 , H_2 , H_3 ,...), retornar ao cálculo através da Equação 7 ou calcular os valores da K_{sat} através da análise proposta por Elrick et al. (1989) ($K_{sat}-U$), em que apenas uma carga (H) é aplicada no furo e um valor do parâmetro α [L^{-1}] é introduzido na Equação 14, com base nas características do meio poroso (Tabela 2).

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

Tabela 2 – Valores de α de acordo com diferentes características dos solos ensaiados (modificada de Reynolds et al., 1992)

Características do meio poroso	Valor do parâmetro α correspondente [cm^{-1}]
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

3.3.3. *Permeâmetro de Guelph Original (PG) e o Modificado (PGM)*

O permeâmetro de Guelph modificado (PGM), também utilizado neste trabalho (Figura 12), foi desenvolvido pelo Dr. Sidney R. Vieira do Instituto Agronômico de Campinas – IAC/SP. As principais modificações do PG foram feitas em relação a sua estrutura física, pois as equações para o cálculo da condutividade hidráulica dos solos são as mesmas utilizadas pelo PG (Equações 6, 7 e 13). No entanto, devido aos poucos trabalhos realizados no Brasil utilizando-se esta adaptação do PG, principalmente em áreas de relevo bastante acidentado, torna-se fundamental importância a comparação desses dois tipos de permeâmetros. Entre as vantagens e desvantagens dos dois tipos de equipamentos, pode-se citar:

- a) o tripé utilizado no permeâmetro de Guelph (PG) foi modificado de forma que este consiga sustentar o equipamento, evitando a compactação da base do furo (Figura 13), pois no PG sendo um corpo único, todo o seu peso é transferido para este fundo do furo podendo alterar os resultados;
- b) o tripé de borracha do PG não apresenta facilidade em sua montagem, pois dificilmente em terrenos mais íngremes ele mantém o corpo principal do permeâmetro na posição correta para os ensaios, ou seja, na vertical (Figura 13);
- c) O PGM possui uma quantidade bem menor de acessórios de montagem, facilitando o seu transporte e seu uso no campo;
- d) A estrutura do PGM é muito mais simples de ser montada em campo, pois para a montagem deste último vários tubos internos e externos devem ser conectados firmemente, de forma que não se separem durante as medições;
- e) Durante as medições todos os tubos internos do PG se desconectam permitindo a entrada de ar e conseqüentemente alterando o resultado final dos valores da condutividade hidráulica (Figura 14).
- f) O PGM foi construído como sendo um corpo único não necessitando de muitas conexões o que o torna muito mais seguro, pois minimiza a possibilidade de entrada de ar no sistema;

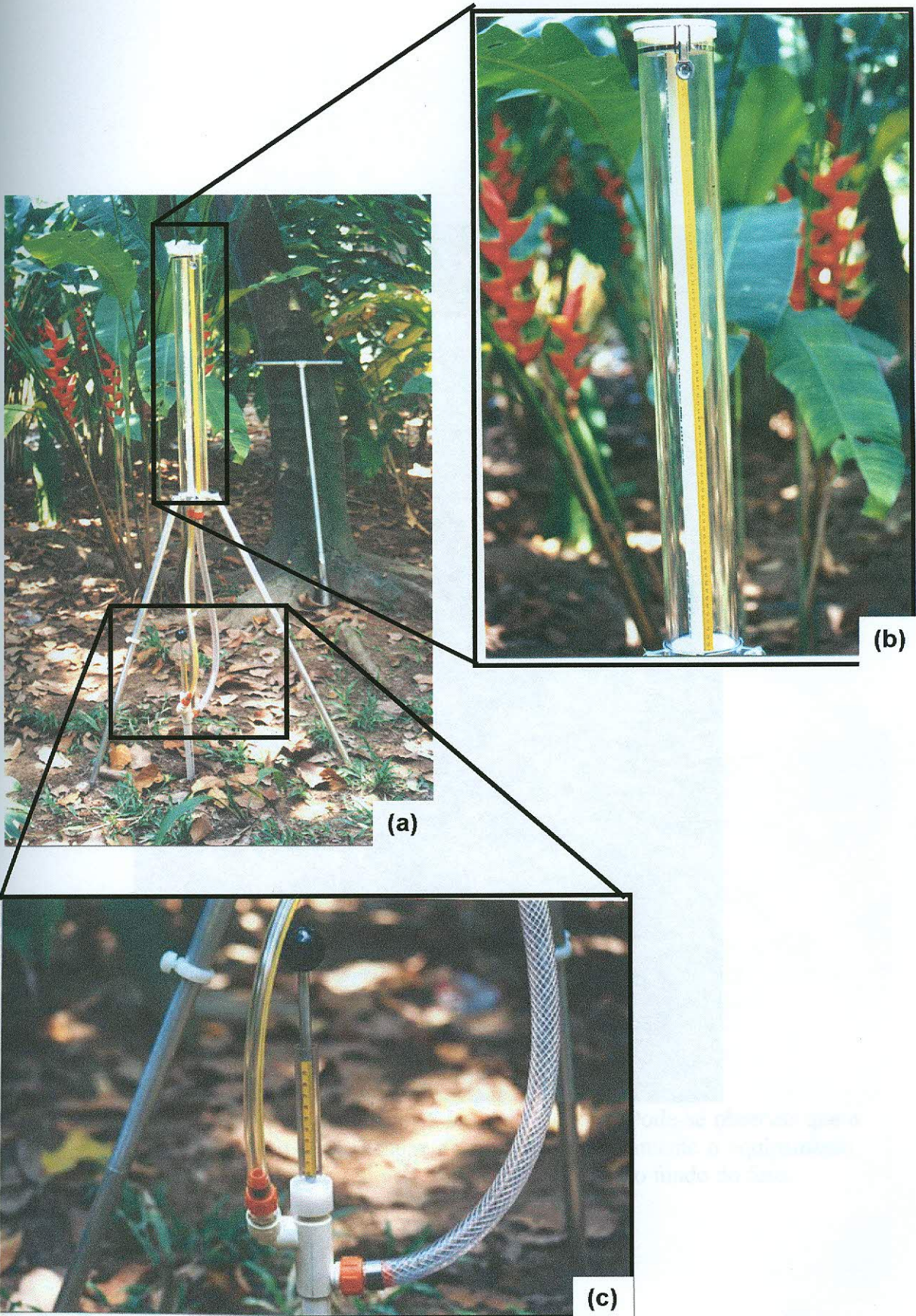


Figura 12 – Permeômetro de Guelph Modificado no campo (a), detalhe do tubo de acrílico graduado onde o nível de água é mensurado (b) e marcador da carga H aplicada no solo.



Figura 13 – PGM utilizado em uma encosta bastante íngreme. Pode-se observar que a estrutura do seu tripé é capaz de sustentar perfeitamente o equipamento, não permitindo que o seu peso seja transferido para o fundo do furo.

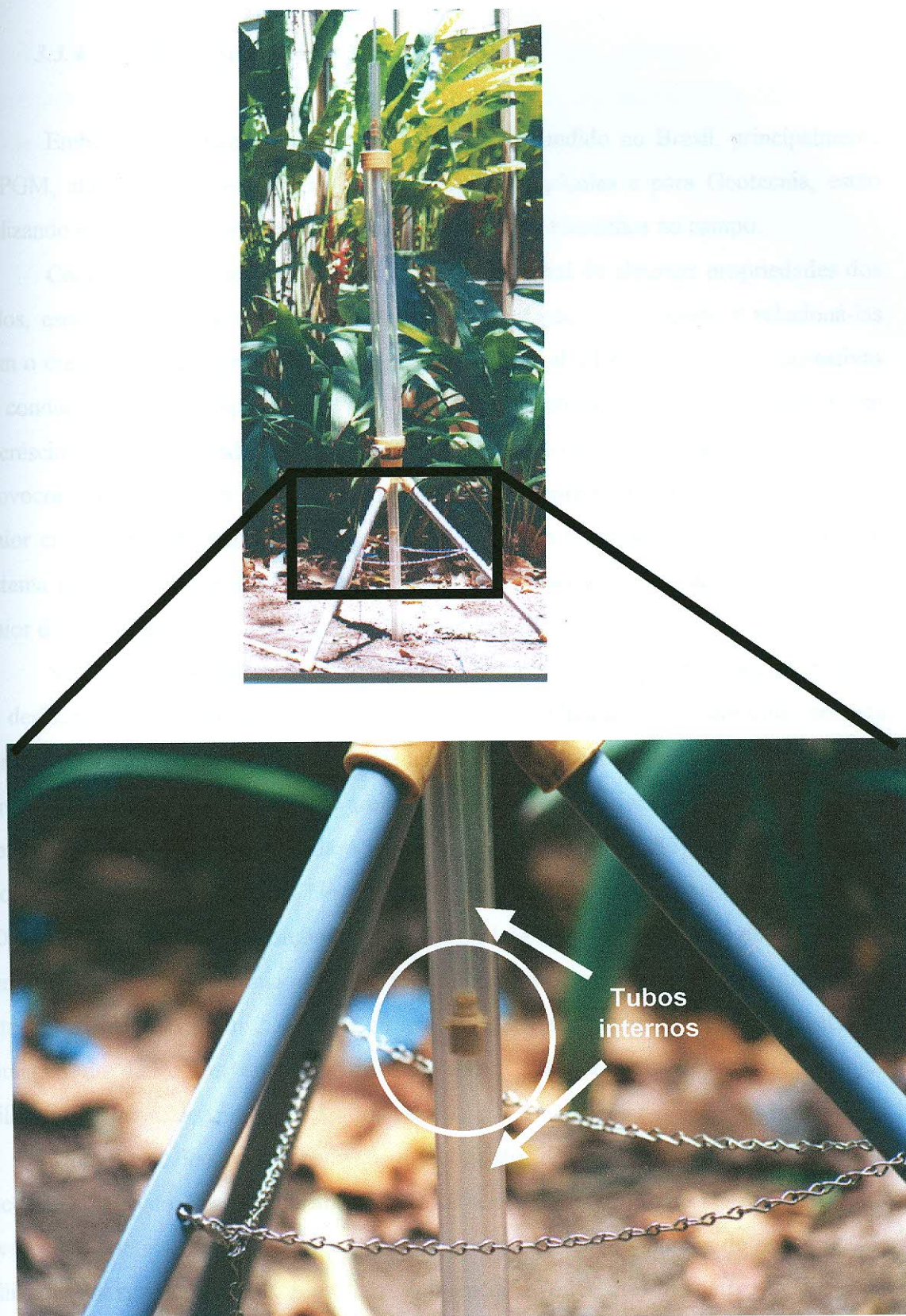


Figura 14 – Detalhe das conexões de borracha (círculo) que fazem ligação entre os tubos internos do PG.

3.3.4. Estudos Desenvolvidos

Embora este equipamento seja ainda pouco difundido no Brasil, principalmente o PGM, alguns trabalhos voltados para as práticas agrícolas e para Geotecnia, estão utilizando este método para estimativa da condutividade hidráulica no campo.

Com o objetivo de estudar a variabilidade espacial de algumas propriedades dos solos, especialmente aquelas relacionadas à compactação e drenagem, e relacioná-las com o crescimento de uma espécie de palmito, Bovi et al. (1997) através de estimativas da condutividade hidráulica com o PGM em diferentes profundidades, observaram o seu decréscimo até 40cm, indicando uma certa compactação do solo. Este comportamento provocou um acúmulo de água nas camadas imediatamente acima (10 e 20 cm), local de maior crescimento do palmito em seu estágio inicial de crescimento onde 80% do seu sistema radicular encontra-se nessas camadas e por isso a espécie apresentou-se com maior diâmetro, altura e maior taxa de sobrevivência.

Sendo a investigação da condutividade hidráulica fundamental para os estudos de deslizamentos em encostas, Campos et al. (1992) utilizaram o PG em uma encosta composta por um horizonte de solo maduro (1,0m de espessura) sobrejacente a uma camada de solo residual de matriz arenosa, no maciço da Tijuca (RJ), na tentativa de melhor avaliarem a influência da variação da K na distribuição das poro-pressões decorrentes da ação de chuvas. No referido trabalho, foi estimado um perfil de cerca de 3,0m de profundidade nas porções superior (perfil 1) e inferior (perfil 2) da encosta em que os autores puderam uma redução da K entre 0,5 e 2,0m no perfil 1 (Figura 15) e entre 0,5 e 1,0m no perfil 2. Quanto ao uso do PG, eles concluíram a sua eficiência na obtenção de dados em encostas, principalmente, pela pequena quantidade de água utilizada e pela rapidez na execução dos ensaios.

Outro trabalho relacionado à investigação da condutividade hidráulica em encostas no Rio de Janeiro utilizando o PG foi realizado por Moreira (1998). Este autor teve como principais objetivos discutir alguns métodos semi-analíticos de interpretação utilizados na estimativa da K e avaliar a influência de diferentes diâmetros do furo nos resultados finais da condutividade hidráulica. Através de estimativas da K em diferentes raios de furos (4,5cm, 10cm e 28cm) e profundidades, utilizando as análises baseadas em Richards, Laplace e na proposta de Elrick et al. (1989), o autor verificou que os

ensaios realizados em furos de diferentes dimensões não mostraram uma variação significativa da K e que as análises utilizadas forneceram, em grande parte dos ensaios, valores de aproximadamente mesma ordem de grandeza.

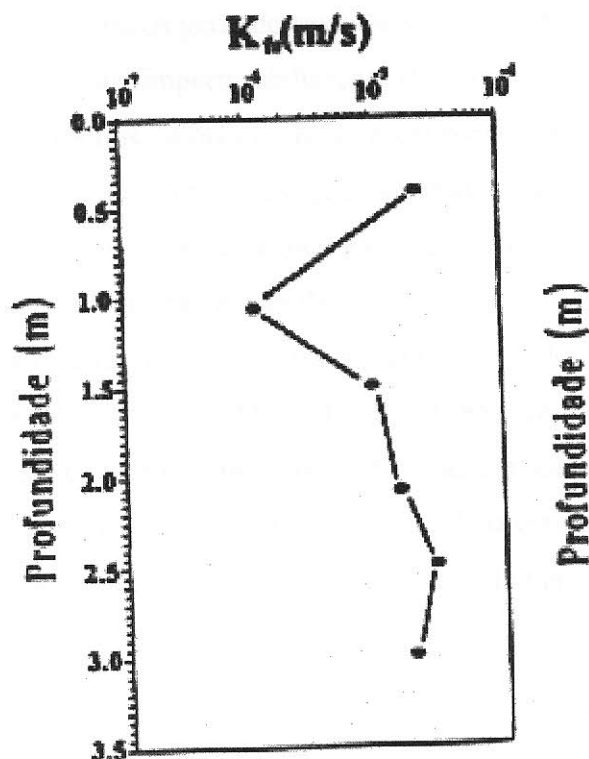


Figura 15 – Variação da condutividade hidráulica saturada de campo (K_{fs}) com a profundidade obtida através do PG por Campos et al. (1992). Neste perfil, observa-se uma redução da K_{fs} até 1,0m e a partir daí um aumento com a profundidade. (Campos et al. 1992).

Muitos trabalhos encontrados na literatura comparam os resultados encontrados pelo PG com aqueles obtidos por outros métodos bem mais comuns na literatura, como por exemplo, os ensaios realizados com amostras indeformadas em laboratório (Reynolds e Elrick, 1985; Paige e Hillel, 1993; Salverda e Dane, 1993; entre outros).

Como exemplo destas comparações entre diferentes métodos, Paige e Hillel (1993) discutiram os resultados da condutividade hidráulica de solos arenosos e argilosos, obtidos através de três métodos (PG, perfil instantâneo e laboratório). Tais autores puderam verificar que, embora o PG tenha sido mais rápido e simples seus valores foram subestimados em relação ao ensaio de laboratório devido à “impermeabilização” da parede do furo ocasionada pela tráfegem e à presença de macroporos que podem apresentar-se descontínuos *in situ*, mas em pequenas amostras de laboratório tornam-se contínuos gerando maiores valores de K.

Além do problema da impermeabilização do furo mencionado acima, Jabro (1996) identificou variações nos valores da K de acordo com as mudanças no conteúdo inicial de água dentro do solo, uma vez que tais mudanças geraram processos de ressecamento e umedecimento levando a mudança da estrutura e da macroporosidade dos solos e desta forma alterando os valores da K.

Comparando os resultados obtidos através de três métodos (PG, permeâmetro de ar (*in situ*) e de laboratório), Reynolds e Elrick (1985) verificaram que nos solos arenosos os maiores valores foram obtidos pelo PG, mas em solos argilosos e siltosos o PG subestimou os valores do permeâmetro de ar. Tal fato está associado, segundo os autores, a um maior volume de solo e conseqüentemente de macroporos, ensaiado pelo permeâmetro de ar.

4. Área de Estudo

A bacia do rio Papagaio está localizada na vertente sudoeste do maciço da Tijuca no município do Rio de Janeiro, perfazendo uma área de 2,53 Km² (Figura 16). De acordo com a classificação de Strahler, ela se apresenta como uma bacia de 4ª ordem e seu canal principal possui um comprimento de 4,3 km (Vieira, 1998).

No dias 13 e 14 de fevereiro de 1996, tanto a bacia estudada quanto aquelas mais próximas, como a bacia do rio Quitite, sofreram diversos escorregamento em suas encostas e corridas de detritos deflagradas em seus canais principais. A corridas de massa da bacia do Papagaio chegou a transportar um volume de cerca de 40.000 m³ de material até as porções mais baixas do relevo (GEORIO, 1996). A partir deste evento catastrófico que devastou áreas florestadas e destruiu vários construções civis, vários estudos foram e estão sendo realizados nas bacias do Quitite e do Papagaio (Figura 17).

4.1. Geologia

Os primeiros estudos realizados após o evento de 1996 na região do Quitite, que engloba os vales do Quitite e do Papagaio, foram levantamentos geológico-geotécnicos a partir de cartas topográficas, sondagens e investigações geofísicas em que foram identificadas seis unidades geológicas e três sistemas de descontinuidades estruturais (GEORIO, 1996).

Entre as unidades mais comuns destacam-se o Gnaisse Archer (Figura 18), tipo gnáissico semifacoidal com bandeamento metamórfico, que ocupa pouco grande parte da bacia e o Granito Utinga, material produto da refusão do Gnaisse que possui granulometria mais grosseira e é formado basicamente por quartzo e feldspato.

Embora Moreira (1999) tenha realizado mapeamento de detalhe (1:10.000) somente na bacia do Quitite, pela proximidade das bacias e pelas observações de campo verifica-se na bacia do Papagaio uma significativa presença do Granito Favela (Figura 19), unidade bastante homogênea, de cor acizentada e com granulação média, que se apresenta sempre associada a extensivos depósitos de matacões, em alguns casos *in situ*.

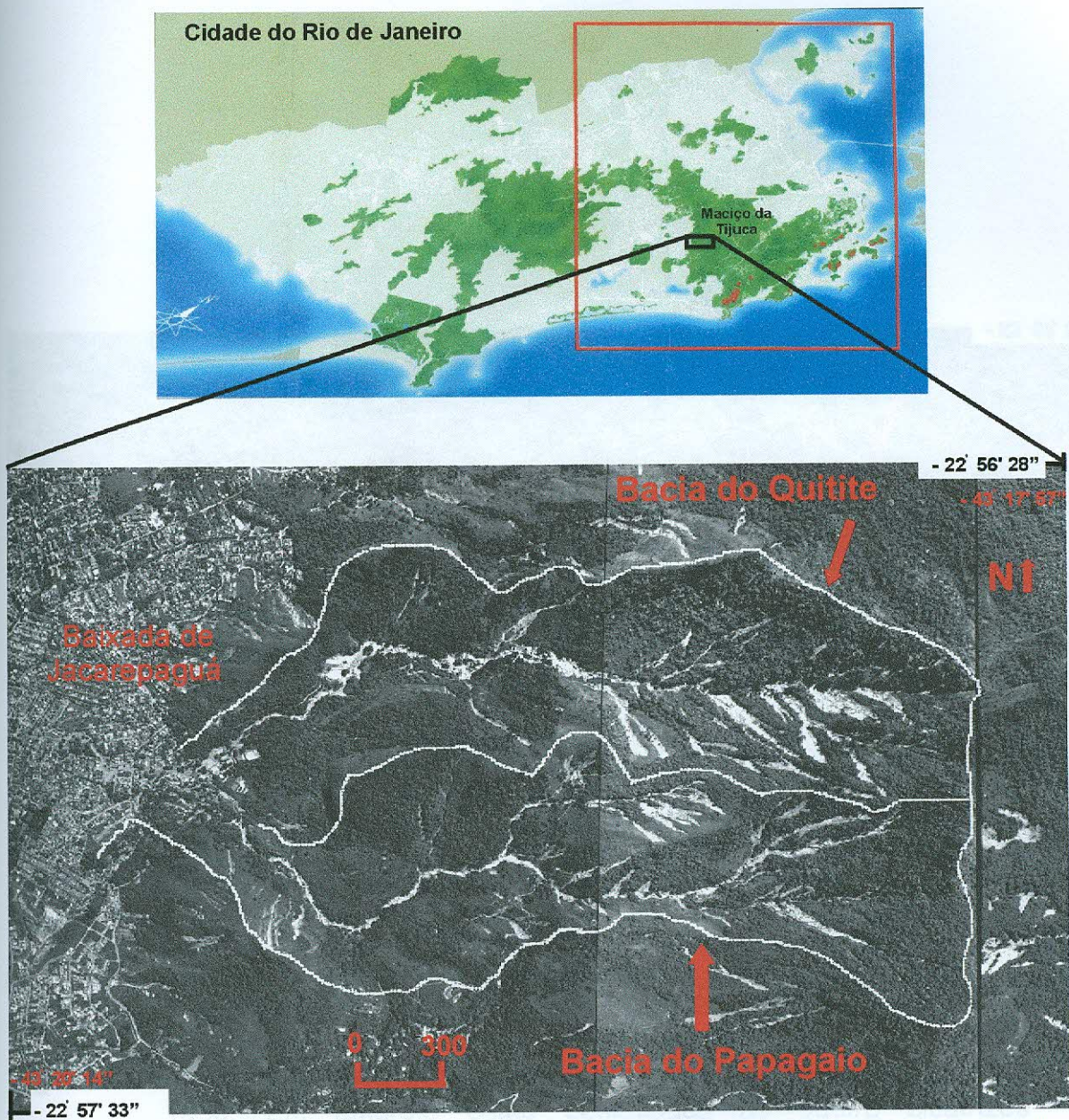


Figura 16 - Fotografias áreas na escala 1:20.000 mostrando a localização da bacia do Papagaio na vertente Sudoeste do maciço da Tijuca, no município do Rio de Janeiro. Pode-se notar, em suas vertentes, as inúmeras cicatrizes dos escorregamentos e, no seu vale principal, as corridas de massa deflagradas em fevereiro de 1996. Estas últimas atingiram as porções mais suaves do relevo onde se localiza o bairro de Jacarepaguá (porção esquerda da figura).

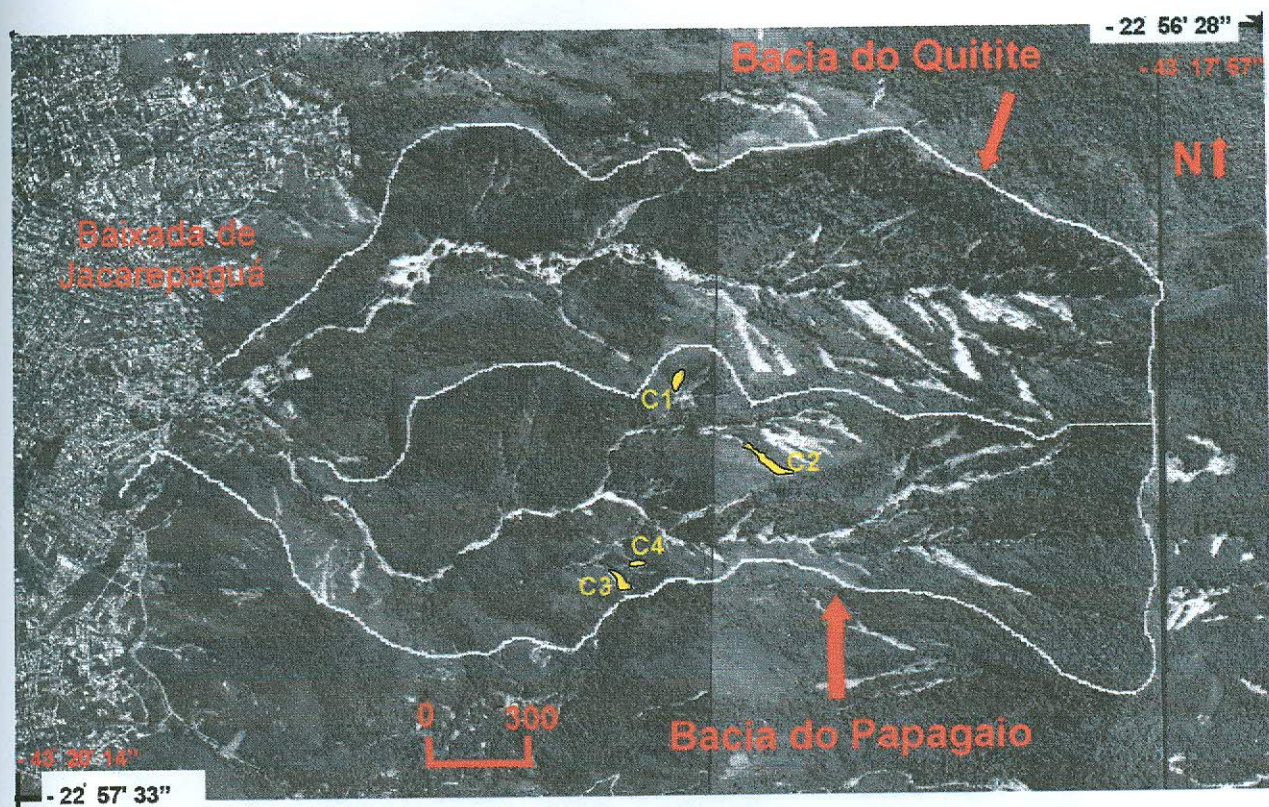


Figura 17 - Localização das cicatrizes dos escorregamentos de fevereiro de 1996. Em amarelo estão destacadas as quatro cicatrizes estudadas neste trabalho (C1, C2, C3 e C4)



Figura 18 - Gnaiss Archer.
Unidade geológica predominante
apresentando inúmeros planos de
cisalhamentos.

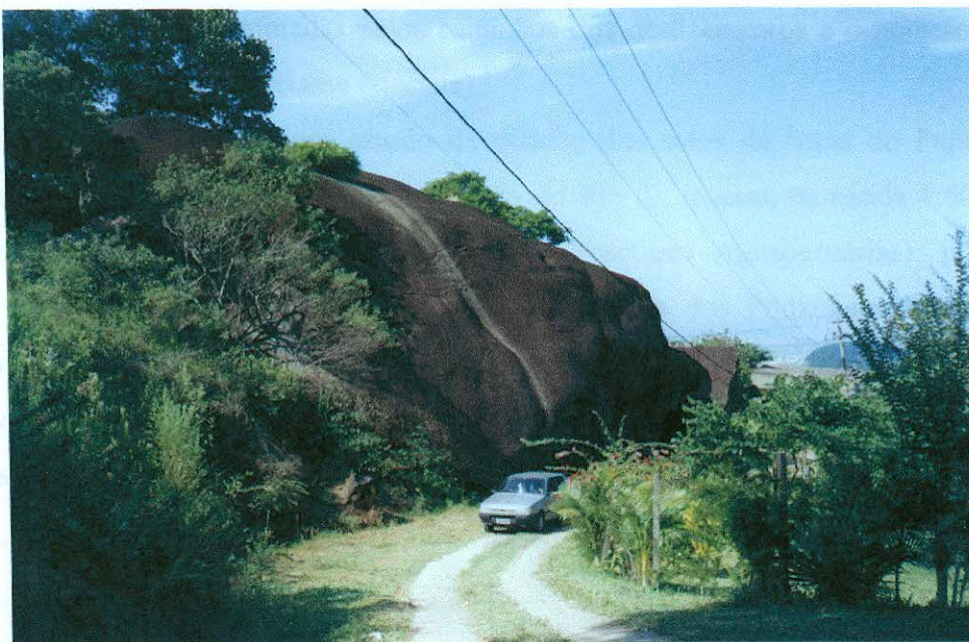


Figura 19 - Bloco do Granito Favela localizado na porção média da
bacia do Papagaio

4.2. Relevo e Solos

O relevo da bacia varia aproximadamente entre 20 e 900 metros apresentando, principalmente nas porções superiores, escarpas rochosas e o vale principal fortemente encaixado. Quanto à direção das encostas, Guimarães (2000) verificou que cerca de 70% das bacias do Quitite e do Papagaio possuem encostas voltadas para as direções Noroeste (NO), Sudoeste (SO) e Oeste (O). Baseado nos dados da GEORIO (1996), o autor afirmou que tal fato está relacionado à própria foliação do Gnaisse Archer que mergulha predominantemente para SO e NO.

Seguindo a metodologia apresentada por Gao (1993), foi verificado por Guimarães (2000) que grande parte das duas bacias (Quitite e Papagaio) possui formas de relevo convexas (46%) e côncavas (42%), sendo estas últimas mais susceptíveis a escorregamentos (Figura 21). Este autor, verificou esta susceptibilidade através do potencial de deslizamentos (PD) de diferentes parâmetros topográficos como, por exemplo, as formas do relevo (côncava, convexa e retilínea) e a declividade. Este potencial de deslizamentos (PD) foi calculado a partir da relação entre os dados dos escorregamentos e as variáveis topográficas, ou seja, da relação entre as células do modelo digital de terreno afetadas pelos caminhos dos deslizamentos e o número total de células de cada classe (ex. classe côncava).

Embora não se tenha um estudo de detalhe dos solos da bacia do Papagaio, através do mapeamento dos solos do município do Rio de Janeiro, na escala 1:50.000, realizado pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias), pode-se verificar a presença dos Latossolos Vermelho-Amarelo e dos Podzólicos Vermelho-Amarelo e algumas de suas subdivisões. Vieira et al. (1998) através de observações de campo verificaram também a presença de Cambissolos e Litossolos nas encostas mais íngremes das bacias do Quitite e do Papagaio.

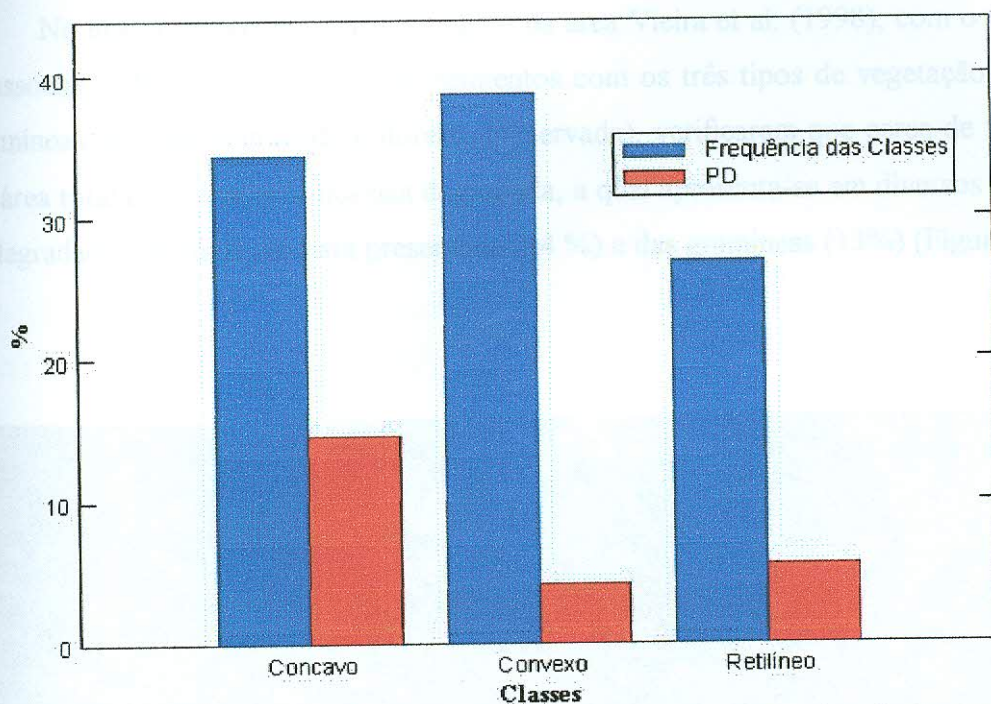


Figura 20 - Porcentagem da frequência de cada classe nas bacias do Papagaio e do Quitite (em azul) e do potencial de deslizamento (em vermelho). Pode se observar que as áreas côncavas se apresentam mais susceptíveis à ocorrência de deslizamentos.

4.3. Clima e Cobertura Vegetal

Alguns locais da cidade do Rio de Janeiro sofrem influencia direta do relevo do município, formado basicamente, pelos maciços litorâneos da Tijuca, da Pedra Branca e do Gericinó e suas extensas baixadas, como por exemplo, a baixada de Jacarepaguá.

O maciço da Tijuca está incluído na zona climática montanhosa do Rio de Janeiro e seu posicionamento geral, no sentido Leste-Oeste, forma encostas voltadas para os quadrantes norte e sul, que apresentam algumas importantes diferenciações climáticas. As encostas voltadas para o oceano (sul) são mais frescas e úmidas e as continentais são mais quentes e secas. Segundo Oliveira et al (1992), as encostas voltadas para sul possuem maior umidade relativa do que as demais, pois estas atuam como efeito tampão, reduzindo as temperaturas extremas. Tais encostas recebem, com

freqüência, massas de ar frio que em contato com a barreira imposta pelo maciço, perdem umidade gerando precipitação ao longo de sua trajetória.

No que se refere à cobertura vegetal da área Vieira et al. (1998), com o objetivo de associar a distribuição dos escorregamentos com os três tipos de vegetação da área (gramíneas, floresta degradada e floresta preservada), verificaram que cerca de 50 % da sua área total é coberta pela floresta degradada, a qual apresenta-se em diversos estágios de degradação, seguida da mata preservada (24 %) e das gramíneas (13%) (Figura 21).



Figura 21 - Diferentes tipos de cobertura vegetal da bacia do Papagaio. O primeiro plano da figura mostra o predomínio das gramíneas e ao fundo pode se observar matas em diferentes estágios sucessoriais.

4.4. Uso e Ocupação

Na porção superior da bacia do Papagaio, nas altas declividades, observa-se a presença de uma floresta preservada intercalada com as cicatrizes de antigos e recentes escorregamentos. Na porção média, entre 500 e 200 metros, alguns sítios foram construídos, embora em pouca quantidade, alguns deles tendo sido atingidos pelos escorregamentos de 1996. A ocupação da área não somente levou ao corte das encostas para a construção destas casas, como também para a construção de estradas, geralmente, de forma irregular e desordenada (Figura 22). Além disso, é comum na área a prática das queimadas para o posterior uso da pastagem e de algumas agriculturas de subsistência, como por exemplo, a cultura da banana, bastante comum nos maciços do município (Figura 23). Essas queimadas se intensificam bastante, no período das festas juninas, entre os meses de Junho e Julho, quando balões caem devastando grandes porções da área.

Outra característica comum desta porção da bacia é a alteração do material original das encostas devido à instalação de antenas de transmissão. De acordo com relatos de antigos moradores, uma grande quantidade de material foi removida e transportada para a instalação dessas antenas e para a passagem dos tratores, alterando o relevo original.

Em direção às porções mais baixas da bacia, pela estrada do Sertão, que acompanha um dos divisores da bacia, observa-se diversas construções de casas, tanto de origem humilde quanto de classes altas. No final da bacia observa-se a presença de casas construídas junto ao leito do canal principal (rio Papagaio).



Figura 22 - Porção média da Bacia do Papagaio onde alguns sítios e estradas podem ser observados.

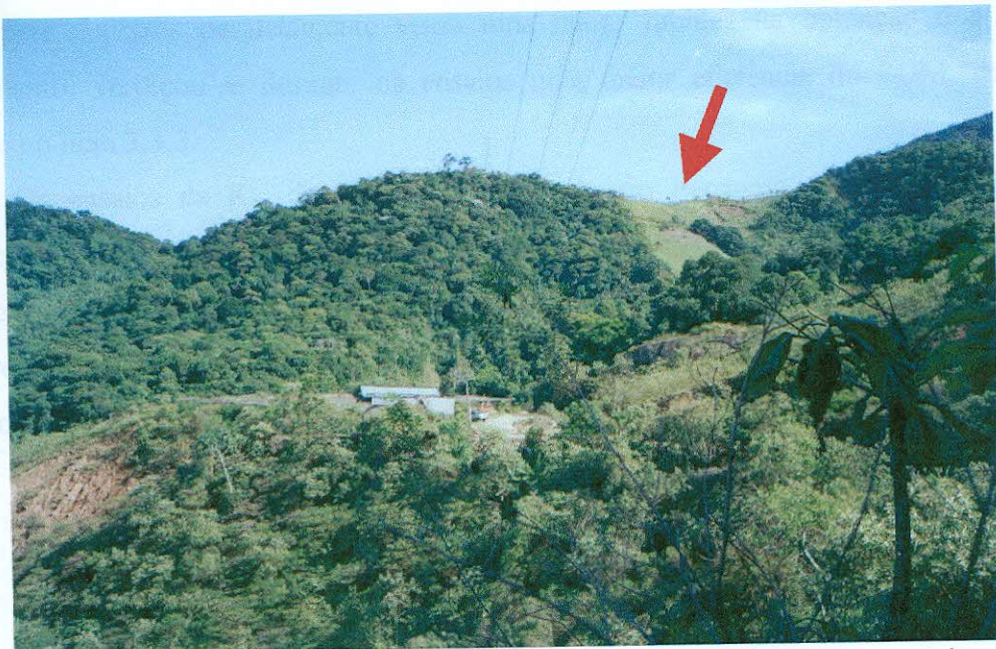


Figura 23 - Visão da bacia do Papagaio com diferentes coberturas vegetais. A seta vermelha indica uma encosta desmatada por alguns moradores da área para a plantação de mandioca.

5. Materiais e Métodos

Foram realizadas estimativas da condutividade hidráulica saturada dos solos da bacia do Papagaio em diferentes profundidades e pontos da área. Paralelamente amostras deformadas e indeformadas foram coletadas no campo para a identificação de algumas propriedades físicas que pudessem explicar alguns resultados da K_{sat} .

5.1. Ensaio da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}) dos Solos

Para a estimativa da K_{sat} dos solos foram utilizados os dois tipos de permeômetros de Guelph, sendo um fabricado pela *Soilmoisture Equip.* e cedido pelo Prof. Dr. Eurípedes Vargas Jr. do Departamento de Geotecnia da PUC-RJ (PG) e outro modificado pelo Dr. Sidney R. Vieira do Instituto Agrônomo de Campinas/SP a partir do original (PGM), conforme pode ser visto nas Figuras 12 e 14. A utilização desses dois permeômetros paralelamente visou uma maior rapidez na obtenção dos dados. Entretanto, verificou-se durante os ensaios uma maior eficiência do PGM, como já citado no item 3.3.3.

Os ensaios da K_{sat} dos solos da bacia do rio Papagaio foram realizados em diferentes pontos e profundidades na tentativa de obter uma melhor caracterização espacial da K_{sat} , e para avaliar a sua relação com os escorregamentos ocorridos em fevereiro de 1996. Desta forma, alguns critérios foram utilizados para a escolha dos pontos a serem estimados.

5.1.1. Justificativa das Cicatrizes Estudadas

As cicatrizes a serem utilizadas para os ensaios da K_{sat} foram selecionadas com base nos seguintes critérios: (a) tamanho e volume de material mobilizado significativos; (b) existência de limites bem preservados (Figura 24), uma vez que grande parte das cicatrizes dos escorregamentos de 1996 já foi recoberta pela vegetação; (c) proximidade com fontes de água, pois o equipamento requer certa quantidade de

água; (d) facilidade de acesso, uma vez que os ensaios exigem uma certa quantidade de material; (e) relação direta ou indireta com os cortes de estradas ou de casas; (f) sem qualquer relação com os cortes de estradas, ou seja, que o processo deflagrador tenha sido influenciado pela ação antrópica (Figura 25); (g) identificadas como áreas de elevada suscetibilidade pelo modelo SHALSTAB (Figura 26) e (h) não identificadas como áreas de elevada suscetibilidade pelo modelo SHALSTAB.



Figura 24 - Limite de uma cicatriz originada dos escorregamentos deflagrados em fevereiro de 1996 na bacia do Papagaio.



Figura 25 - Estrada construída pelos próprios moradores da bacia e atualmente abandonada. A seta vermelha indica a localização de uma cicatriz. Segundo alguns moradores, após a abertura desta estrada, alguns pequenos deslizamentos foram observados.

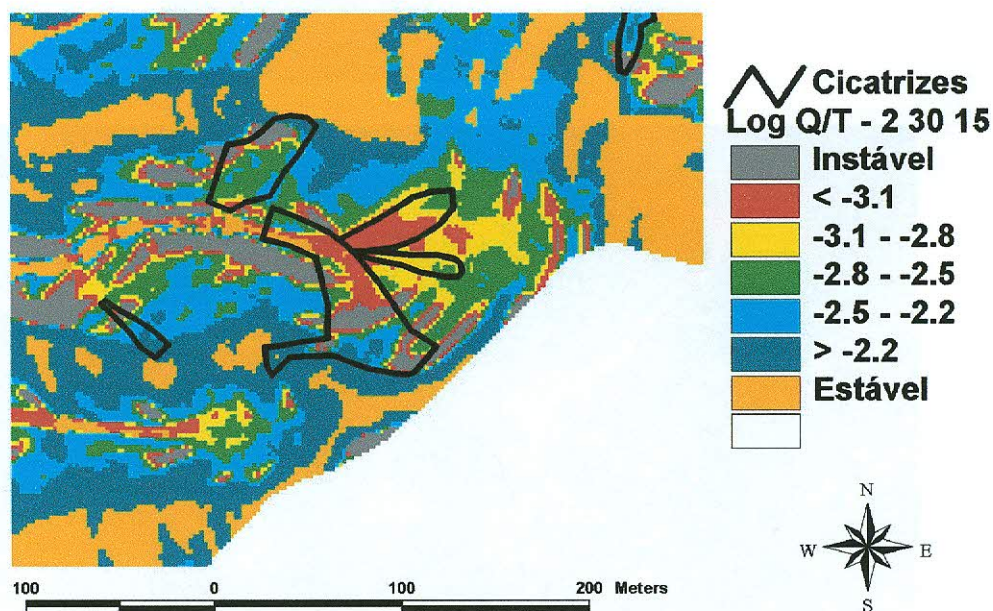


Figura 26 - Resultado obtido pelo modelo SHALSTAB para uma cicatriz da bacia do Papagaio. Pode-se observar que a grande suscetibilidade da área em vermelho coincidiu com as cicatrizes de fevereiro de 1996.

A partir desses critérios foram selecionadas quatro cicatrizes dos escorregamentos detonados em fevereiro de 1996 (C1, C2, C3 e C4). Em cada cicatriz foram demarcados quatro pontos de medições: o ponto um (P1) no topo da cicatriz, os pontos dois e três (P2 e P3) nas laterais destas cicatrizes e o ponto quatro (P4) localizado no centro da cicatriz (Figura 27, 28, 29 e 30). Em cada um desses pontos, de modo a verificar a presença ou não de descontinuidades hidráulicas nas encostas, foram realizadas medições da K_{sat} nas seguintes profundidades: 30, 60, 90, 120, 150, 200, 250 e 300 cm, na tentativa de melhor caracterizar essa propriedade ao longo de um perfil.

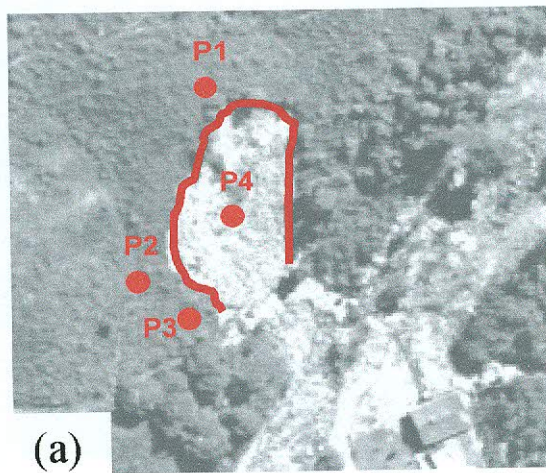


Figura 27 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P1, P2, P3 e P4 da cicatriz 1 (a) e visão panorâmica da cicatriz 1(b).

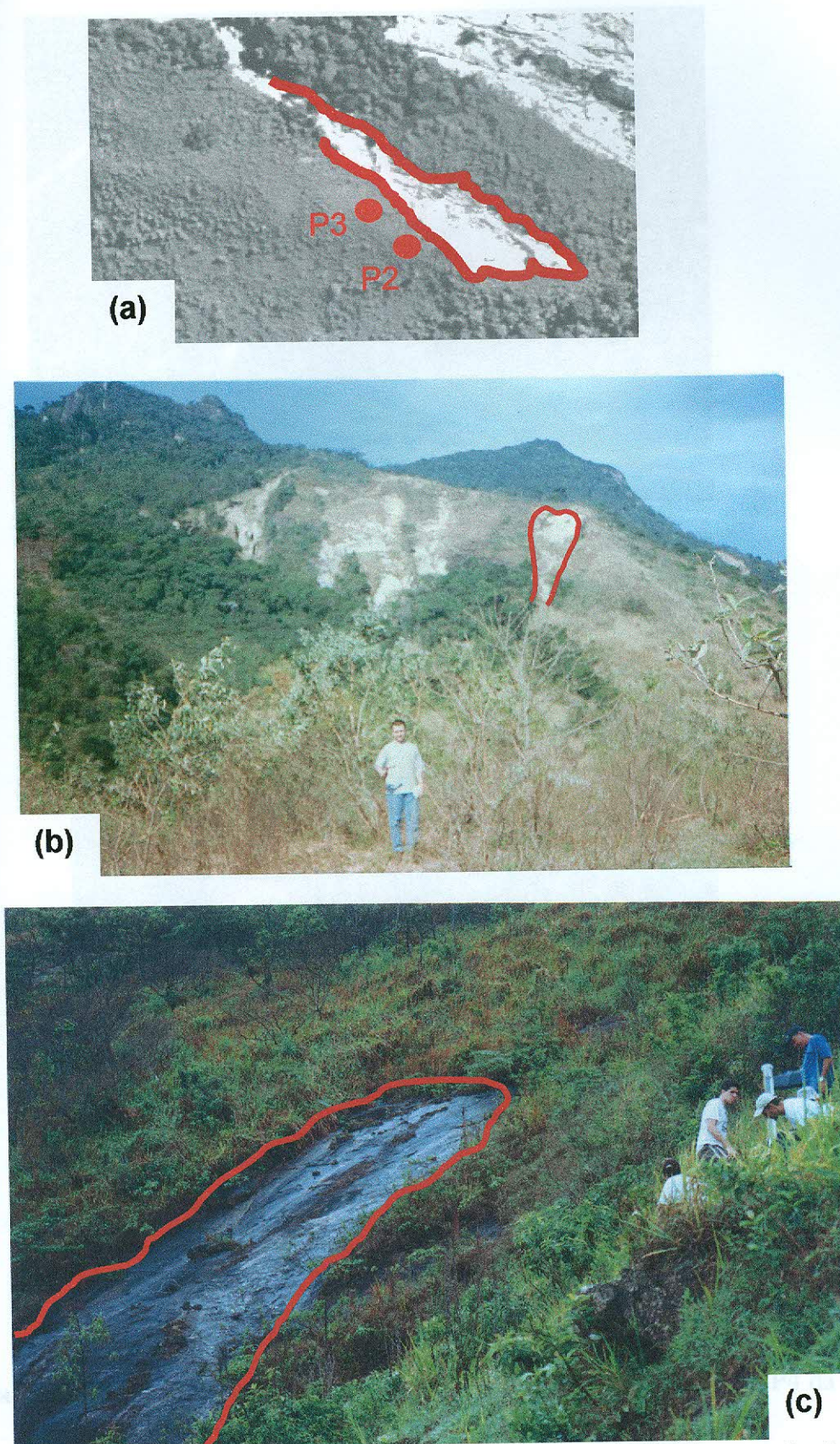


Figura 28 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P2 e P3 da cicatriz 2 (a), visão panorâmica da cicatriz 2 (b) e visão de detalhe da cicatriz mostrando a realização dos ensaios no ponto 3 (c).

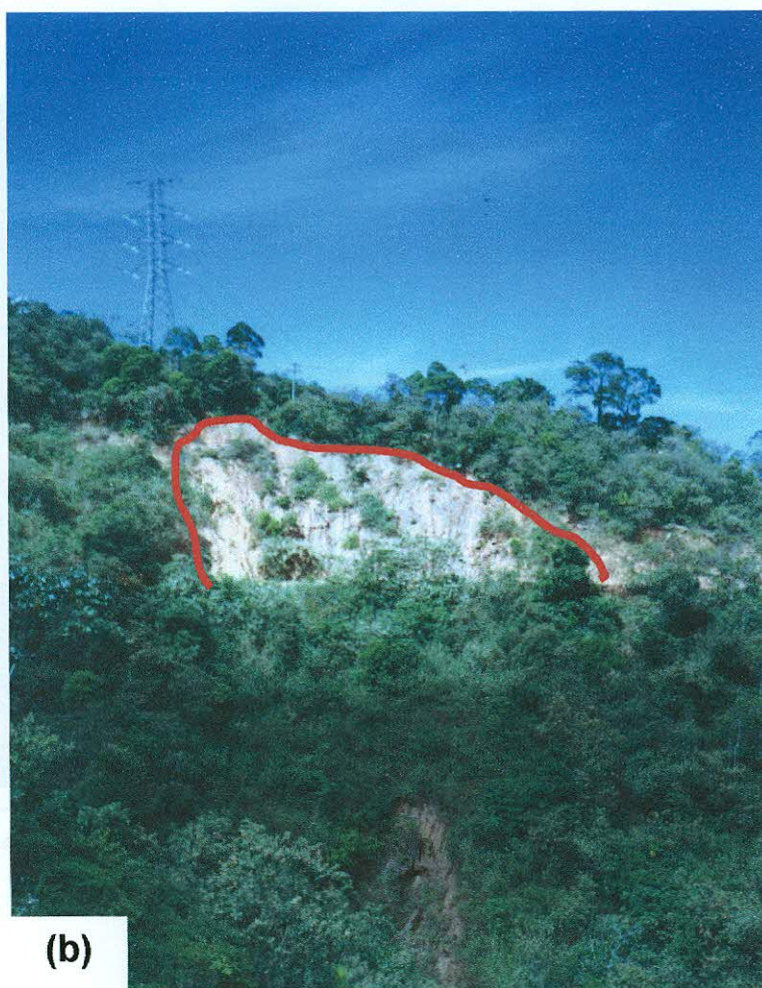
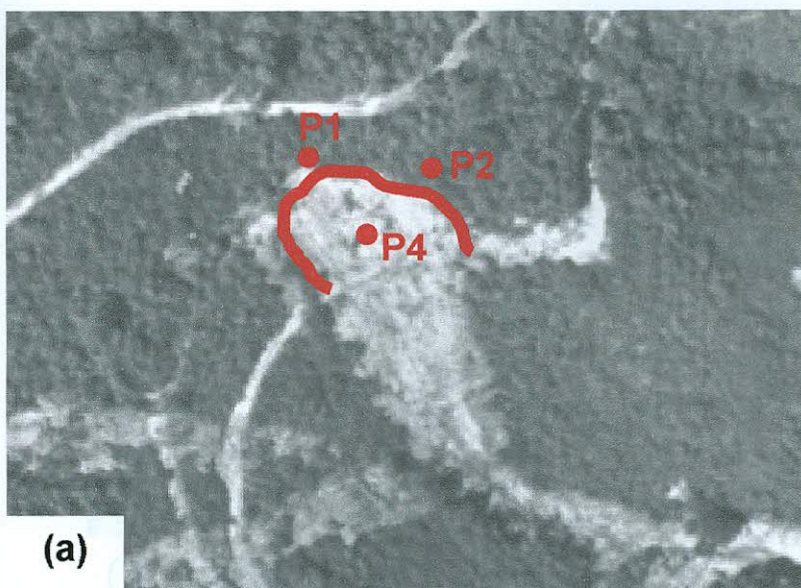
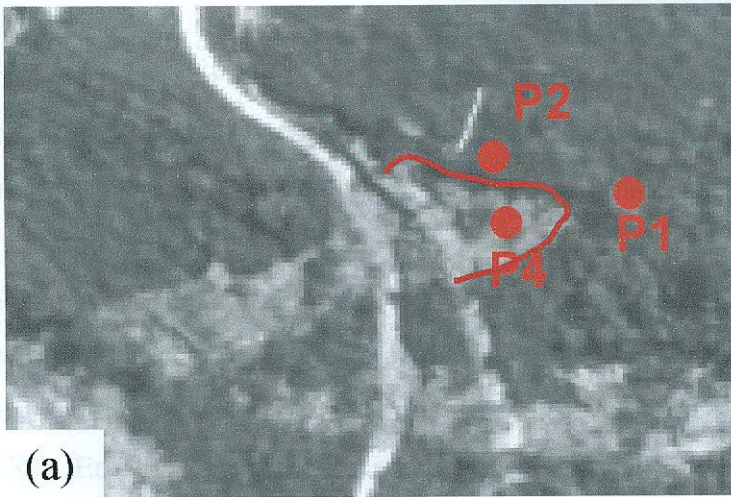
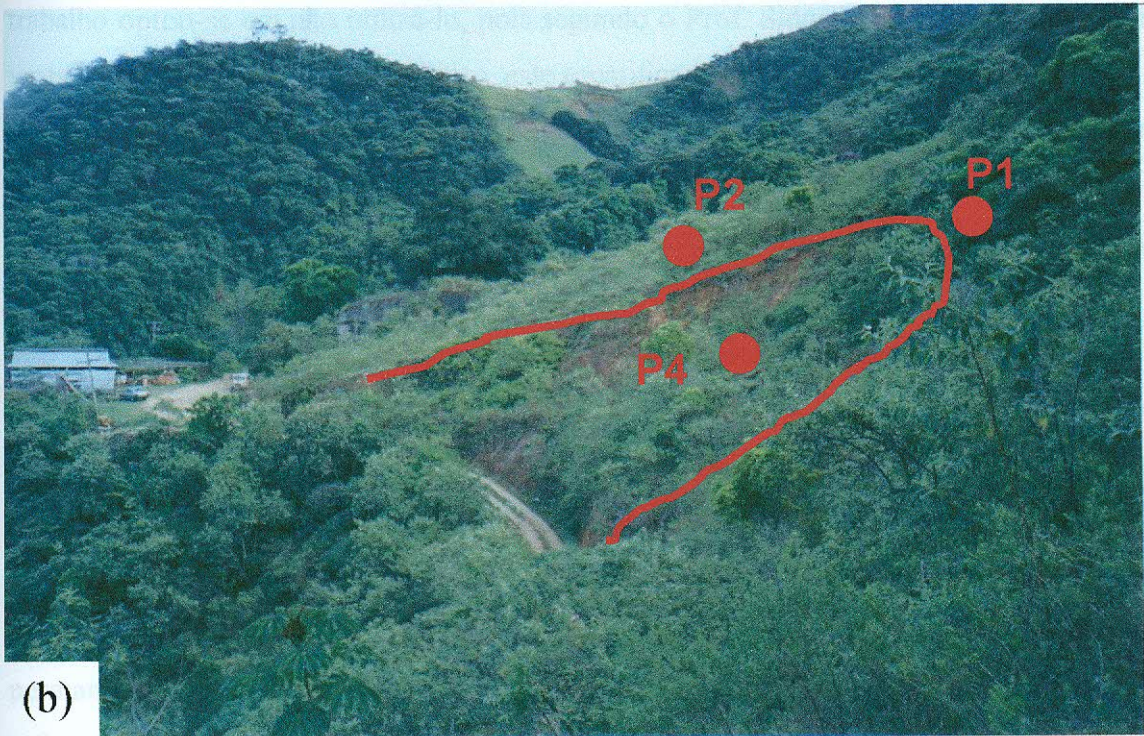


Figura 29 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P1, P2 e P4 da cicatriz 3 (a) e visão panorâmica da cicatriz 3 (b).

5.1.3. Escalas da K_{sp} in-situ



(a)



(b)

Figura 30 - Fotografia aérea mostrando a localização dos pontos P1, P2 e P4 da cicatriz 4 (a) e visão panorâmica da cicatriz 4 (b).

5.1.2. Ensaio da K_{sat} in situ

Conforme mostra a Figura 31, nas profundidades de 30, 60 e 90cm as mensurações foram realizadas a partir da superfície do terreno, mas devido à limitação física do próprio permeâmetro (máximo=90cm). para as demais (120, 150, 200, 250 e 300 cm) foram abertas trincheiras de até 2,5m de profundidade,

O ensaio se inicia com a abertura de um furo de 6cm de diâmetro com o trado de caneca até a profundidade desejada. Posteriormente, limpa-se este mesmo furo com um trado "limpador", para deixá-lo com uma forma geométrica cilíndrica, conforme a teoria exige (Figura 32). Embora seja indicado na literatura a utilização de um escarificador para minimizar o efeito da impermeabilização do furo durante a tradagem, neste trabalho optou-se em não utilizá-lo, pois segundo o Prof. Sidney Vieira, que possui uma vasta experiência com o equipamento, este escarificador raramente funciona no campo.

Após a limpeza do furo (trado limpador), coloca-se a extremidade inferior do Guelph, de modo que a mesma encoste completamente no fundo do furo. Enche-se o reservatório com água e verifica-se se o equipamento está completamente vedado, ou seja, após a tampa ser fechada, nenhum vazamento pode ser constatado.

O ensaio se inicia, efetivamente, com a aplicação de uma primeira carga H_1 (3cm) e o registro do fluxo Q_1 ($Q_1=R_1 \times A$), ou seja, do caimento do nível de água através do tubo de acrílico graduado (Figura 12) em intervalos de tempo constante, sendo tal variação precisamente anotada. Dependendo das condições de umidade antecedente do material e das suas propriedades físicas, um bulbo de saturação se formará no entorno do furo (Figura 9) e o caimento do nível da água no reservatório permanecerá constante. A partir desse momento a segunda carga H_2 (6cm) é aplicada e todo o procedimento é repetido até que se alcance outra estabilidade. Com isso, têm-se dois valores de fluxos: Q_1 obtido durante a aplicação da primeira carga H_1 e Q_2 ($Q_2=R_2 \times A$), obtido durante a segunda carga H_2 . Tais valores (Q_1 e Q_2) são substituídos na Equação 8 e então é obtido o valor de K_{sat} para aquela profundidade.

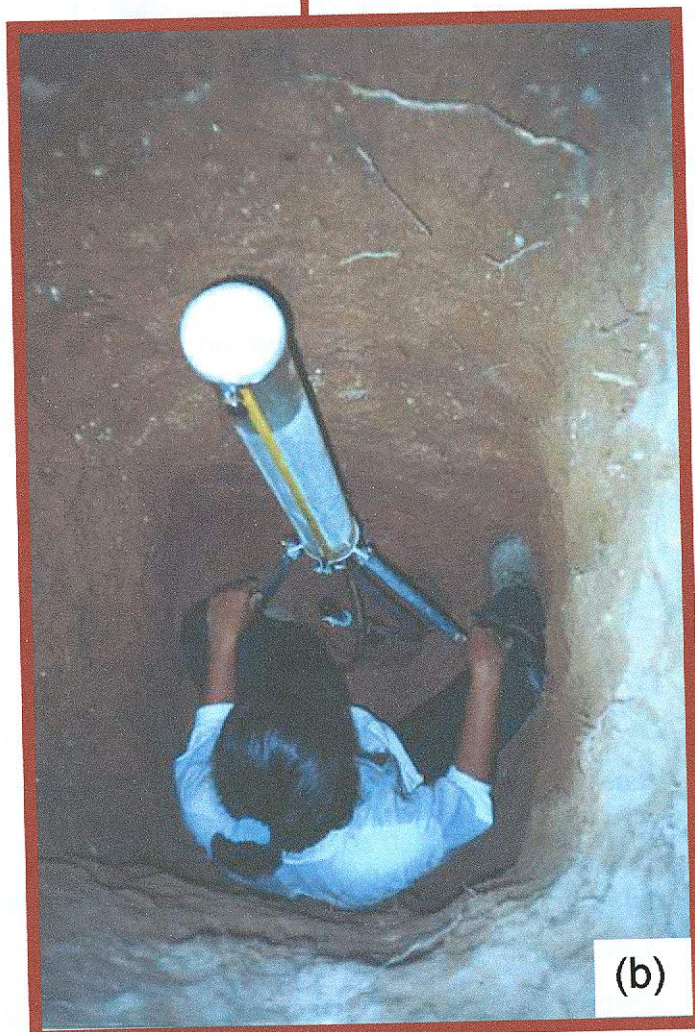
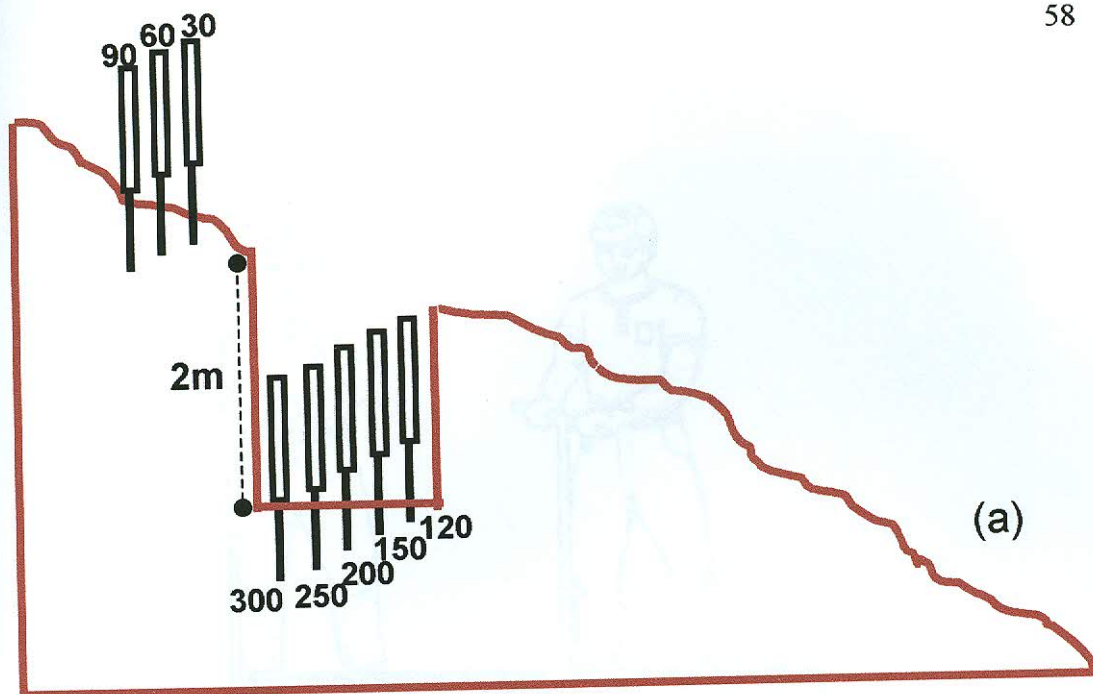


Figura 31 - Desenho esquemático dos ensaios da K_{sat} na superfície do terreno e dentro da trincheira (a). Ensaio sendo realizado com o PGM dentro de uma trincheira (b).

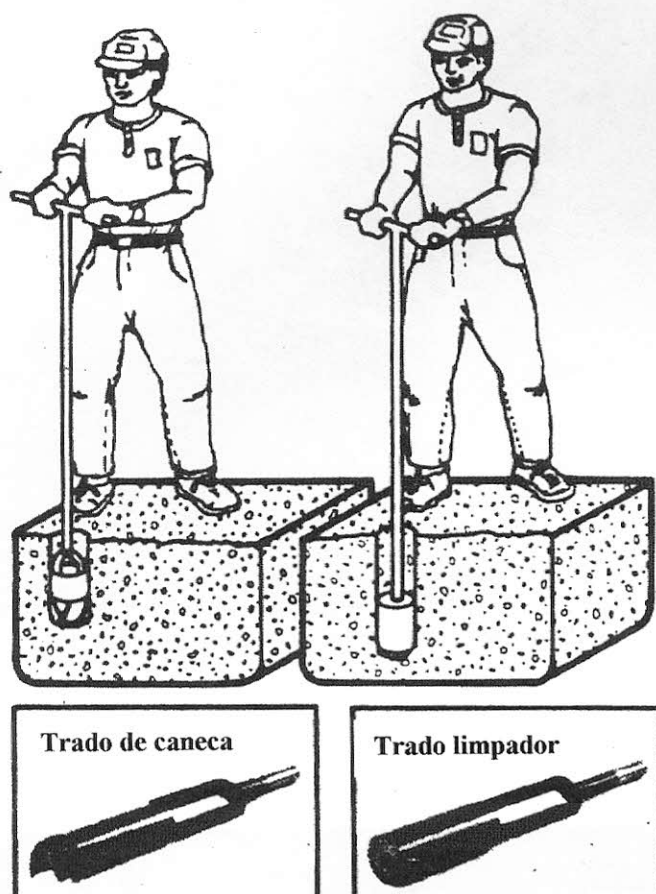


Figura 32 - Preparação do furo com os dois tipos de trados (caneca e limpador) anteriormente a introdução do PGM no solo (modificada de *Soilmoisture Equip.*, 1986)

5.1.3. Ensaios da K_{sat} em Laboratório

Com o objetivo de se comparar os valores obtidos pelo PGM e pelos ensaios de laboratório foram coletadas 12 amostras indeformadas, sendo 6 verticais (Figura 33) e 6 horizontais (Figura 34) em três pontos das cicatrizes 3 e 4 (C3P1, C3P2, C3P4, C4P1, C4P2 e C4P4). Tais pontos foram selecionados com base nas características texturais de forma que diferentes tipos de solos fossem comparados. Desta forma, coletou-se amostras de horizontes superficiais com grande quantidade de raízes (C3P1 e C4P1), subsuperficiais mais argilosos (C3P2 e C4P2) e de horizontes mais profundos com a presença de feições relíquias (C3P4 e C4P4).



Figura 33 - Coleta de uma amostra indeformada verticalmente orientada



Figura 34 - Coleta de uma amostra indeformada horizontalmente orientada

Após a coleta, ainda em campo, as amostras foram envolvidas com papel alumínio e colocadas em um isopor para melhor preservação da umidade. Tal procedimento é de fundamental importância, pois qualquer mudança de umidade pode alterar a estrutura dos solos amostrados e conseqüentemente o resultado final do ensaio.

Em laboratório as amostras foram envolvidas por um tecido de morim e colocadas em um balde de 24 a 48 horas para saturação (Figura 35). Após esta etapa, cada amostra foi colocada no permeâmetro, onde foram estimados os valores de K_{sat} . Para os solos mais arenosos realizou-se o ensaio com carga constante e para os demais tipos texturais o ensaio com carga variável.

Devido aos problemas com o permeâmetro do Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da UFRJ, os primeiros ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ sob a orientação do laboratorista Sérgio Iorio. Após sua restauração os demais ensaios foram feitos no próprio Departamento de Geografia da UFRJ. Para o cálculo da K_{sat} através do permeâmetro de carga constante utiliza-se a Equação 14 e para o cálculo através do permeâmetro de carga variável a Equação 15, conforme já demonstrado no item 3.2.3.

$$K_{sat} = \frac{Q \times L \times R_T}{h \times A \times t} \quad (14)$$

onde,

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada [L/T]

Q = volume de água percolada [L³]

L = altura do cilindro [L]

R_T = fator de correção

A = área do cilindro [L²]

t = tempo decorrido [T]

$$K_{\text{sat}} = \frac{2,3 \times a \times L \times R_T}{A \times t} \times \text{Log}_{10} \times \frac{h_0}{h_f} \quad (15)$$

onde,

h_0 = carga inicial [L]

h_f = carga final [L]



Figura 35 - Amostras indeformadas durante o processo de saturação em laboratório para posterior ensaio da K_{sat} .

5.2. *Propriedades Físicas dos Solos*

A caracterização de algumas propriedades dos solos é imprescindível para melhor se compreender o comportamento hidrológico dos solos. Desta forma, a caracterização do sistema poroso, torna-se fundamental na investigação do armazenamento e movimento da água.

Para análise das propriedades físicas dos solos foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas mesmas profundidades em que foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica dos solos. As amostras indeformadas foram coletadas *in situ* com o extrator de Uhland, utilizando-se anéis de 49 e 98 cm³ de volume (Figuras 36).

5.2.1. *Textura*

A análise granulométrica dos solos foi realizada no Laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia da UFRJ seguindo-se o método da Embrapa (1996). Foram feitas análises de textura dos solos nas mesmas profundidades em que foi analisada a condutividade hidráulica saturada dos solos.

5.2.2. *Porosidade total, Macro e Microporosidade*

Após a coleta das amostras indeformadas no campo, elas foram embaladas com papel alumínio e colocadas em um isopor para melhor conservação da umidade. Tais amostras, foram levadas para o Laboratório de Pedologia da UFRJ e utilizadas na estimativa da porosidade total, da macro e microporosidade dos solos.

Ressalta-se aqui, que anteriormente aos ensaios, a mesa de tensão deste laboratório teve que ser restaurada pois há cinco anos não era utilizada. Esta restauração e sua posterior preparação foi realizada seguindo-se o método proposto pela Embrapa (1983) com algumas modificações. De acordo com este método e as propostas indicadas por Kiehl (1979), após a montagem da mesa, colocou-se uma tela de nylon sobre o seu

sobre o seu vidro e sobre este uma folha de mata-borrão (Figura 37). Aplicando-se uma recarga de água a mesa foi então saturada, e com auxílio de um rolo removeu-se as bolhas de ar presas na mesa.

Com a mesa em funcionamento as amostras coletadas em campo foram envolvidas por um disco de tecido (mourim) presas por um elástico e posteriormente colocadas em uma badeja com água por 24 horas para saturação (Figura 38). Após a saturação, as amostras foram pesadas obtendo-se o peso saturado (P1) e colocadas sobre a mesa durante um período de 24 a 72 horas sobre uma tensão de 60 cm de água (Figura 39). A aplicação desta tensão seria suficiente para retirar o conteúdo de água dos macroporos que segundo Libardi (1995), são poros com diâmetro maior que 100µm. O conteúdo restante de água estaria retido nos microporos.

Após este período (24 a 72 horas) as amostras foram pesadas novamente, obtendo-se assim o seu segundo peso (P2) e levadas a estufa para secar a 110^o, por 24 horas, obtendo-se então o peso seco (P3). A partir destes três valores (P1, P2 e P3), juntamente com os valores de volume total da amostra (volume do anel), obteve-se a porosidade total (*n*) através da Equação 16, a macroporosidade (*M_a*) e a microporosidade (*M_i*) através das Equações 17 e 18, respectivamente.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} (\times 100) \quad (16)$$

sendo,

V_v = Volume de vazios [L³]

V_t = Volume total (volume do anel) [L³]

Em solo saturado, o volume de vazios é igual ao volume de água e sendo a densidade da água (ρ_{ag}) igual 1g/cm³, a porosidade total do solo pode ser calculada utilizando a diferença entre o peso do solo saturado (P1) e o peso do solo seco (P3).

$$n(\%) = \frac{P_{ag}}{\rho_{ag} V_t} (\times 100) \quad (17)$$

onde,

$$P_{ag} = P1 - P3 \text{ [M]}$$

$$V_t = \text{volume total (volume do anel)} \text{ [L}^3\text{]}$$

A macroporosidade (M_a) ou porosidade não capilar é definida como o volume de poros drenados com uma sucção equivalente a uma coluna de 60cm de água, sendo calculada a partir do peso do solo saturado (P1) e do peso do solo após a tensão de 60cm (P2).

$$M_a(\%) = \frac{P1 - P2}{\rho_{ag} V_t} (\times 100) \quad (18)$$

A microporosidade ou porosidade capilar (M_i) é definida como o volume de poros drenados a sucções superiores a 60cm de água, sendo calculada a partir do peso do solo após a tensão de 60cm (P2) e do peso do solo seco (P3).

$$M_i(\%) = \frac{P2 - P3}{\rho_{ag} V_t} (\times 100) \quad (19)$$

5.2.3. Densidades Real e Aparente

A densidade real ou da partícula (ρ_r), refere-se exclusivamente às partículas sólidas e independe da estrutura ou compactação do solo. Esta é definida pelo peso das partículas do solo por unidade de volume, sendo expressa em g/cm^3 (Equação 20). A densidade aparente ou global (ρ_{ap}) é variável e depende da estrutura e da compactação do solo. Quanto menos estruturado e mais compactado é o solo, maior tende a ser a densidade aparente, sendo esta também expressa em g/cm^3 (Equação 21).

$$\rho_r = \frac{P_s}{V_s} \quad (20)$$

onde,

ρ_r = densidade real [M/L^3]

P_s = peso dos sólidos [M]

V_s = volume dos sólidos [L^3]

$$\rho_{ap} = \frac{P_s}{V_t} \quad (21)$$



Figura 36 - Extrator de Umland utilizado na coleta de amostras indeformadas e os acessórios necessários para a coleta (martelo, espátula e cilindros) (a) e Extrator sendo utilizado no campo (b).

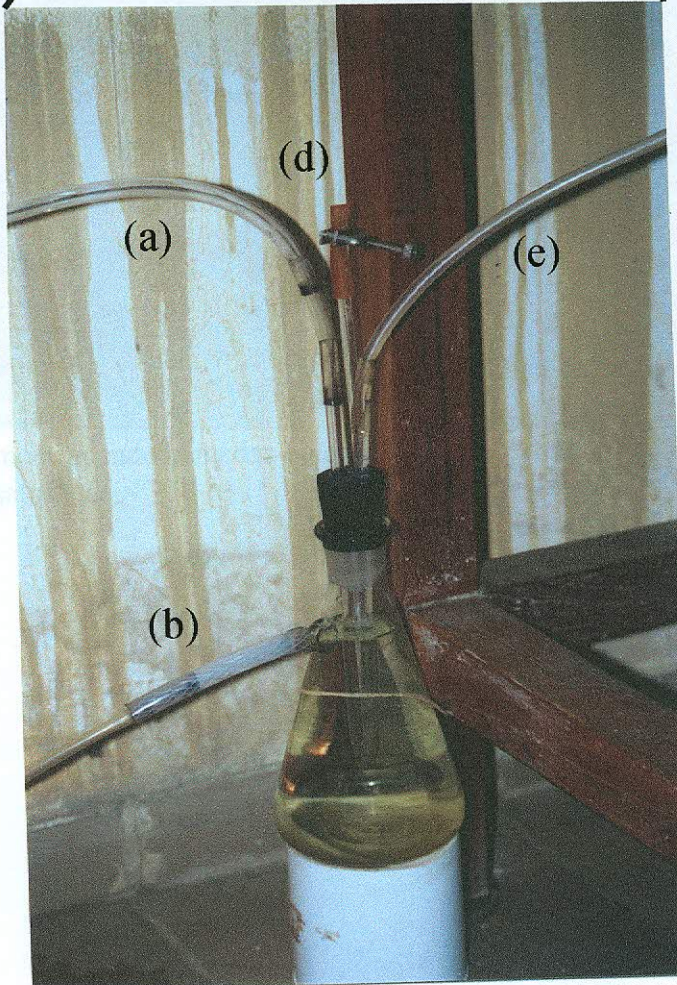
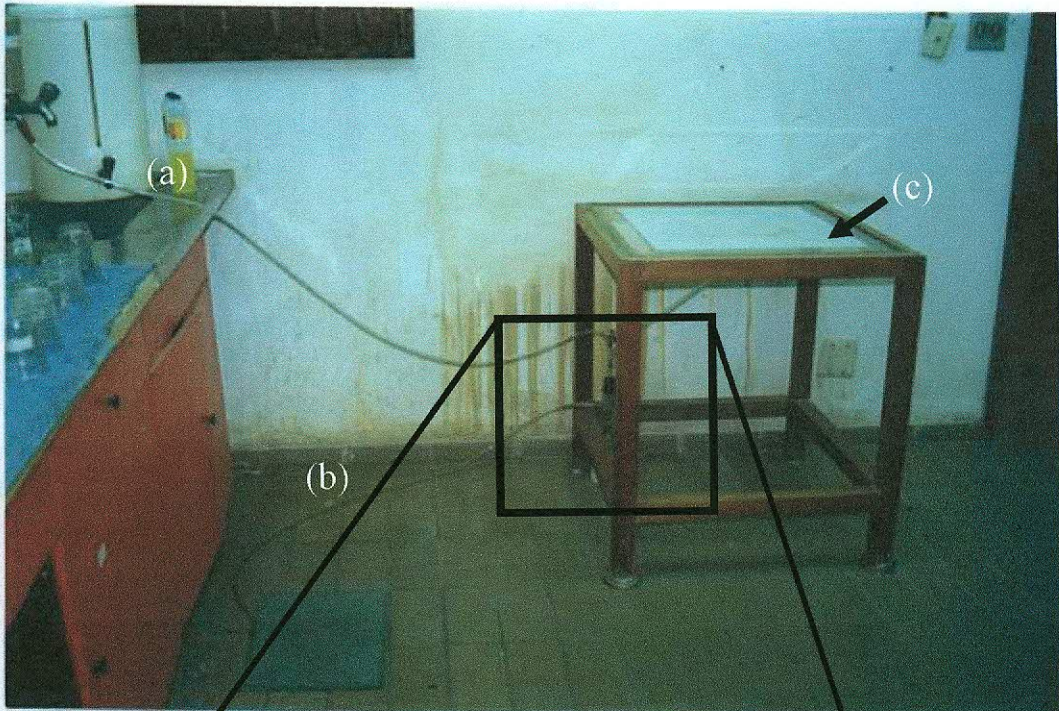


Figura 37 - Mesa de tensão do Laboratório de Pedologia da UFRJ. Fonte de água ligada a torneira (a), mangueira de descarga (b), mata-borrão (c), tubo flexível da saída de ar (d) e frasco de filtração a vácuo cheio de água (e).



Figura 38 - Amostras indeformadas coletadas com o extrator de Uhland sob processo de saturação.

(a)



(b)



Figura 39 - Amostras indeformadas sobre a mesa de tensão onde uma carga de pressão de 60 cm de água está sendo aplicada para retirada da água dos macroporos (a) e amostras cobertas com um plástico para diminuir o efeito da evaporação (b)

6. *Análise e Discussão dos Resultados*

Primeiramente serão apresentados e discutidos os resultados da K_{sat} obtidos com o permeâmetro de Guelph em diferentes pontos da bacia do Papagaio, através de três tipos de análises (K_{sat-R} ; K_{sat-L} ; K_{sat-U}). Em seguida, será analisado o comportamento da K_{sat} em diferentes pontos e profundidades na bacia do Papagaio juntamente com a variação de algumas propriedades físicas dos solos como, por exemplo, a textura e a porosidade total. Posteriormente, os valores da K_{sat} obtidos em laboratório, através de amostras indeformadas, serão comparados com aqueles obtidos em campo. No último item, a variação da K_{sat} em diferentes pontos da bacia e profundidades, será associada à ocorrência dos escorregamentos ocorridos em fevereiro de 1996 na tentativa de melhor explicar alguns dos possíveis fatores condicionantes desses processos erosivos.

6.1. *Ensaio da K_{sat} na Bacia do Papagaio*

Embora tenha sido apresentado no item 5 deste trabalho que os dois tipos de permeâmetros seriam utilizados com o intuito de agilizar os ensaios no campo, o PGM mostrou-se muito mais eficaz nos ensaios da K_{sat} na bacia do Papagaio. Tal fato pode ser atribuído aos raros problemas de vazamentos durante as leituras, à sua fácil utilização em encostas bastante íngremes e principalmente às mínimas perturbações provocadas no material ensaiado. Desta forma, grande parte dos ensaios foi realizada com o PGM.

Um total de 87 valores da K_{sat} foi obtido em campo através da análise de Richards que utiliza duas cargas (H) aplicadas e considera o efeito da capilaridade do solo, conforme já mencionado. No entanto, cerca de 43% desses valores foram irreais (ex. valores negativos). Tal problema já era esperado, e levando em consideração a grande heterogeneidade dos materiais da bacia, esperava-se uma maior quantidade de valores irreais. Outros trabalhos na literatura mostraram que esta porcentagem de valores negativos, obtidos através da aplicação de duas cargas (Richards), é bastante comum e esperado e para obterem resultados mais confiáveis desconsideram esses valores irreais aplicam outras formas de análises (Reynolds e Elrick, 1992; Reynolds et al., 1985; entre outros).

Como exemplo deste problema encontrado com a interpretação de Richards, Salverda e Dane (1993) testando o PG em três tipos de solos com texturas diferentes (areno-siltoso, siltoso e silto-arenoso), obtiveram 40% de valores negativos. De acordo com tais autores, este problema pode estar associado à formação incompleta do fluxo constante, aos efeitos da impermeabilização da parede do furo, à grande heterogeneidade causada pelos buracos de raízes e à mudança da textura em profundidade.

Como um dos principais objetivos deste trabalho era estimar valores da K_{sat} em diferentes profundidades para se verificar a presença ou não de descontinuidades hidráulicas nos perfis de alteração, outros tipos de análises foram utilizados para se obter valores da K_{sat} em todas as profundidades.

Dentre as análises desenvolvidas na literatura, optou pela análise derivada de Laplace (K_{sat-L}) e pela interpretação proposta por Elrick et al. (1989) (K_{sat-U}). Nestas duas análises, como já discutido anteriormente, utiliza-se apenas um único valor de fluxo (Q) para a estimativa da K_{sat} e os valores negativos são evitados. Os valores da condutividade hidráulica saturada obtidos através dos três tipos de análises (K_{sat-R} , K_{sat-L} , K_{sat-U}), nas quatro cicatrizes (C1, C2, C3 e C4) e seus respectivos pontos (P1, P2, P3 e P4), são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores obtidos *in situ* com o permeâmetro de Guelph em quatro cicatrizes de deslizamentos (C1, C2, C3 e C4) e em quatro pontos localizados em diferentes porções destas cicatrizes (P1, P2, P3 e P4) e calculados a partir das Equações 8, 7 e 14, obtendo-se então, K_{sat-R} , K_{sat-L} e K_{sat-U} , respectivamente.

C1P1				C1P2			
Prof. (cm)	K_{sat-R} (cm/s)	K_{sat-L} (cm/s)	K_{sat-U} (cm/s)	Prof. (cm)	K_{sat-R} (cm/s)	K_{sat-L} (cm/s)	K_{sat-U} (cm/s)
30	1.80×10^{-3}	5.34×10^{-4}	2.17×10^{-4}	30	2.20×10^{-4}	1.02×10^{-3}	3.26×10^{-4}
60	1.48×10^{-3}	8.10×10^{-4}	3.29×10^{-4}	60	4.24×10^{-4}	3.84×10^{-4}	1.22×10^{-4}
90	4.98×10^{-3}	8.10×10^{-3}	3.29×10^{-3}	90	negativo	3.84×10^{-3}	1.22×10^{-3}
130	5.30×10^{-4}	2.70×10^{-4}	1.10×10^{-4}	120	2.89×10^{-3}	3.84×10^{-3}	1.22×10^{-3}
150	1.83×10^{-3}	4.61×10^{-3}	1.47×10^{-3}	150	8.03×10^{-4}	5.35×10^{-3}	1.70×10^{-3}
170	1.58×10^{-3}	2.70×10^{-4}	1.10×10^{-4}	200	8.25×10^{-4}	1.92×10^{-3}	6.11×10^{-4}
220	8.79×10^{-4}	3.56×10^{-3}	1.45×10^{-3}	250	8.97×10^{-3}	5.35×10^{-3}	1.70×10^{-3}
270	1.57×10^{-3}	7.29×10^{-3}	2.96×10^{-3}	275	4.14×10^{-4}	3.08×10^{-3}	9.80×10^{-4}
320	1.03×10^{-3}	4.05×10^{-3}	1.65×10^{-3}				

(Continuação da Tabela 3 na página 73)

C1P3				C1P4			
Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)	Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)
30	3.56 x10 ⁻³	3.84 x10 ⁻⁴	1.22 x10 ⁻⁴	30	5.60 x10 ⁻³	9.59 x10 ⁻⁴	3.06 x10 ⁻⁴
60	1.63 x10 ⁻⁴	7.70 x10 ⁻⁴	2.45 x10 ⁻⁴	60	8.03 x10 ⁻³	3.08 x10 ⁻³	9.80 x10 ⁻⁴
90	negativo	6.13 x10 ⁻³	1.95 x10 ⁻³	90	2.21 x10 ⁻⁴	9.58 x10 ⁻⁴	3.05 x10 ⁻⁴
120	4.95 x10 ⁻⁴	2.31 x10 ⁻³	7.35 x10 ⁻⁴	120	1.89 x10 ⁻⁴	1.92 x10 ⁻³	6.13 x10 ⁻⁴
150	6.57 x10 ⁻⁴	3.08 x10 ⁻³	9.80 x10 ⁻⁴	150	3.51 x10 ⁻³	1.94 x10 ⁻³	6.17 x10 ⁻⁴
200	2.43 x10 ⁻³	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³	200	negativo	3.37 x10 ⁻³	1.07 x10 ⁻³
250	negativo	1.52 x10 ⁻²	4.85 x10 ⁻³	250	8.60 x10 ⁻⁵	4.85 x10 ⁻³	1.55 x10 ⁻³
				300	3.19 x10 ⁻³	2.90 x10 ⁻³	9.25 x10 ⁻⁴
C2P2				C2P3			
Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)	Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)
30	1.98 x10 ⁻⁴	5.77 x10 ⁻⁴	1.84 x10 ⁻⁴	20	negativo	1.72 x10 ⁻⁴	7.63 x10 ⁻⁵
60	negativo	6.41 x10 ⁻⁴	2.04 x10 ⁻⁴	40	1.30 x10 ⁻⁴	1.29 x10 ⁻⁴	5.72 x10 ⁻⁵
90	negativo	5.77 x10 ⁻⁴	1.84 x10 ⁻⁴	60	negativo	5.87 x10 ⁻⁵	3.27 x10 ⁻⁵
				80	negativo	1.03 x10 ⁻³	4.58 x10 ⁻⁴
				90	negativo	4.29 x10 ⁻³	1.90 x10 ⁻³
				120	negativo	3.52 x10 ⁻⁵	3.05 x10 ⁻⁵
C3P1				C3P2			
Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)	Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)
30	4.28 x10 ⁻³	1.52 x10 ⁻³	4.85 x10 ⁻⁴	30	negativo	2.58 x10 ⁻⁴	1.14 x10 ⁻⁴
60	5.47 x10 ⁻³	1.73 x10 ⁻³	5.51 x10 ⁻⁴	60	negativo	2.58 x10 ⁻³	1.14 x10 ⁻³
90	3.28 x10 ⁻³	3.84 x10 ⁻³	1.22 x10 ⁻³	90	negativo	6.87 x10 ⁻⁴	3.05 x10 ⁻⁴
120	1.98 x10 ⁻³	2.69 x10 ⁻³	8.57 x10 ⁻⁴	120	3.32 x10 ⁻⁴	1.03 x10 ⁻³	4.58 x10 ⁻⁴
150	negativo	9.22 x10 ⁻³	2.94 x10 ⁻³	150	negativo	3.44 x10 ⁻⁴	1.53 x10 ⁻⁴
200	7.02 x10 ⁻⁴	3.04 x10 ⁻³	9.70 x10 ⁻⁴	200	negativo	1.03 x10 ⁻³	4.58 x10 ⁻⁴
250	negativo	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³	250	negativo	2.75 x10 ⁻³	1.22 x10 ⁻³
300	negativo	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³	300	negativo	2.94 x10 ⁻⁵	1.63 x10 ⁻⁵
C3P4				C4P1			
Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)	Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)
30	8.15 x10 ⁻⁵	2.31 x10 ⁻³	7.35 x10 ⁻⁴	30	negativo	6.92 x10 ⁻³	2.20 x10 ⁻³
60	negativo	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³	60	negativo	2.64 x10 ⁻⁴	1.47 x10 ⁻⁴
90	negativo	8.86 x10 ⁻³	2.82 x10 ⁻³	90	negativo	1.83 x10 ⁻³	8.13 x10 ⁻⁴
120	1.41 x10 ⁻⁵	1.15 x10 ⁻²	3.67 x10 ⁻³	120	2.25 x10 ⁻¹	3.08 x10 ⁻³	9.80 x10 ⁻⁴
150	negativo	6.92 x10 ⁻³	2.20 x10 ⁻³	150	2.43 x10 ⁻³	6.13 x10 ⁻⁴	1.95 x10 ⁻⁴
180	1.32 x10 ⁻³	2.31 x10 ⁻³	7.35 x10 ⁻⁴	200	negativo	3.08 x10 ⁻³	9.80 x10 ⁻⁴
				250	3.74 x10 ⁻³	2.31 x10 ⁻³	7.35 x10 ⁻⁴
				300	negativo	1.54 x10 ⁻²	4.90 x10 ⁻³
C4P2				C4P4			
Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)	Prof. (cm)	K _{sat} -R (cm/s)	K _{sat} -L (cm/s)	K _{sat} -U (cm/s)
30	negativo	2.31 x10 ⁻²	7.35 x10 ⁻³	30	1.2 x10 ⁻⁴	9.96 x10 ⁻³	3.17 x10 ⁻³
60	negativo	3.42 x10 ⁻⁴	1.52 x10 ⁻⁴	60	5.67 x10 ⁻³	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³
90	negativo	5.77 x10 ⁻⁴	1.84 x10 ⁻⁴	90	negativo	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³
120	3.65 x10 ⁻³	2.69 x10 ⁻³	8.57 x10 ⁻⁴	120	8.26 x10 ⁻⁴	3.84 x10 ⁻³	1.22 x10 ⁻³
150	2.33 x10 ⁻⁴	2.50 x10 ⁻³	7.95 x10 ⁻⁴	150	negativo	5.38 x10 ⁻³	1.71 x10 ⁻³
200	negativo	4.98 x10 ⁻³	1.59 x10 ⁻³	200	3.61 x10 ⁻⁴	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³
250	1.98 x10 ⁻³	2.69 x10 ⁻³	8.57 x10 ⁻⁴	250	negativo	5.35 x10 ⁻³	1.70 x10 ⁻³
300	negativo	8.72 x10 ⁻³	2.78 x10 ⁻³	300	4.49 x10 ⁻⁴	1.15 x10 ⁻³	3.67 x10 ⁻⁴

Embora grande parte, cerca de 77%, dos valores da $K_{\text{sat-L}}$ obtidos através da Equação 6 tenham sido superiores àqueles estimados pela Equação 7, era esperado que tal porcentagem fosse ainda maior, uma vez que a análise baseada em Laplace elimina o terceiro termo da Equação 8 por desconsiderar o efeito da capilaridade dos solos. Fato este comprovado na literatura por Reynolds et al. (1985); Salverda e Dane (1993); Reynolds e Elrick (1985a); entre outros.

As médias dos valores da $K_{\text{sat-R}}$, $K_{\text{sat-L}}$ e $K_{\text{sat-U}}$ foram $6,64 \times 10^{-3}$ cm/s, $1,20 \times 10^{-3}$ cm/s e $3,6 \times 10^{-3}$ cm/s, respectivamente e os valores da K_{sat} variaram, na sua grande maioria, entre 10^{-4} e 10^{-3} cm/s mostrando grande similaridade entre os resultados.

Devido à ausência de valores da $K_{\text{sat-R}}$ em muitos pontos, a comparação entre as diferentes análises não pôde ser realizada. Somente para a cicatriz 1, grande parte desses valores foram obtidos (Figura 40) podendo-se notar que na maioria dos pontos os valores da $K_{\text{sat-R}}$ variaram na mesma ordem de magnitude das demais interpretações. Embora na cicatriz 2 apenas dois pontos da $K_{\text{sat-R}}$ tenham sido positivos (Figura 41), ambos coincidiram com os valores da $K_{\text{sat-U}}$ (C2P2) e da $K_{\text{sat-L}}$ (C2P3). Embora as demais cicatrizes (3 e 4) apresentassem muitos valores negativos da $K_{\text{sat-R}}$ e grande parte dos valores positivos tenha variado na mesma ordem de magnitude, em algumas profundidades os valores da $K_{\text{sat-R}}$ superaram os valores das demais análises em até duas ordens de magnitude. Os valores da $K_{\text{sat-R}}$ nas profundidades de 30 e 120cm do ponto C3P4 (Figura 42) foram, respectivamente, $8,15 \times 10^{-5}$ cm/s e $1,41 \times 10^{-5}$ cm/s e os valores da $K_{\text{sat-U}}$, por exemplo, para as mesmas profundidades foram $7,35 \times 10^{-4}$ cm/s e $3,67 \times 10^{-3}$ cm/s. Esta mesma diferença entre os valores obtidos através da análise de Richards ($K_{\text{sat-R}}$) e as demais ($K_{\text{sat-L}}$ e $K_{\text{sat-U}}$) foram observados na cicatriz 4 (Figura 43), onde o valor da $K_{\text{sat-R}}$ na profundidade de 120cm do ponto C4P1, por exemplo, foi igual a $2,25 \times 10^{-1}$ cm/s e os valores da $K_{\text{sat-L}}$ e da $K_{\text{sat-U}}$, nesta mesma profundidade, foram $3,08 \times 10^{-3}$ cm/s e $9,80 \times 10^{-4}$ cm/s.

Essa diferença entre os valores da $K_{\text{sat-L}}$, $K_{\text{sat-U}}$ e $K_{\text{sat-R}}$ foi encontrado por Moreira (1998) em um furo de diâmetro próximo ao utilizado neste trabalho. O referido autor, com o objetivo de comparar as diferentes formas de interpretação dos resultados obtidos com o PG, estimou a K_{sat} em uma encosta formada por solos coluvionares, a partir dos mesmos métodos de análise deste trabalho, porém utilizando três diferentes diâmetros de furo (4,5cm, 10cm e 28cm) para verificar um possível efeito escala. Em

uma das áreas ensaiadas ele observou diferenças de duas ordens de grandeza entre os valores da K_{sat} -R e aqueles obtidos através de Laplace e da proposta de Elrick et al. (1989).

Além da acurácia, a qualidade dos resultados depende também da facilidade em sua obtenção no campo e do tempo gasto durante as medições. Durante os ensaios na bacia do Papagaio, grande parte dos ensaios, desconsiderando a montagem e a instalação do equipamento, duraram aproximadamente de 20 a 40 minutos (Figura 44). Desta foram, com o tempo menor gasto durante os ensaios com o PGM pode-se realizar maiores quantidades de pontos aumentando a amostragem dos valores da K_{sat} no campo.

Alguns ensaios que necessitaram de mais de 40 minutos para sua execução podem ter sofrido a influência dos altos teores de argila e a proximidade do estado de saturação dos solos, uma vez que alguns ensaios foram realizados durante ou logo após a ocorrência de eventos pluviométricos. O tempo gasto para a estimativa dos valores da K_{sat} nas profundidades de 90cm do ponto C1P1, com 44% de argila e de 30cm do ponto C3P1 com 43% de argila foi de 40 e 60 minutos, respectivamente. Já nas profundidades de 90 e 120cm do ponto C2P3, embora possuam baixos teores de argila (19 e 16%, respectivamente), foram gastos em torno de 50 minutos para execução dos ensaios, uma vez que os solos se aproximavam do seu ponto de saturação.

A estimativa do tempo gasto durante as medições demonstrando a eficiência do PG no campo, realizada neste trabalho, foi também realizada por Reynolds e Elrick (1985b) que compararam o tempo gasto durante os ensaios de laboratório, e *in situ* com PG e o permeâmetro de entrada de ar. Tais autores mostraram que em um tipo de solo bastante argiloso, com cerca de 63% de argila, o tempo gasto para a obtenção dos valores da K_{sat} com o PG foi muito menor (de 90 a 100 minutos) do que o gasto através do permeâmetro de ar (de 160 a 170 minutos) e do ensaio de laboratório (de 2000 a 3000 minutos). Em solos mais arenosos (86% de areia) o tempo gasto com o PG continuou sendo menor (de 10 a 15 minutos) do que nos demais equipamentos 20 e 125 minutos com os permeâmetros de entrada de ar e de laboratório, respectivamente.

Cicatriz 1
Ksat (cm)

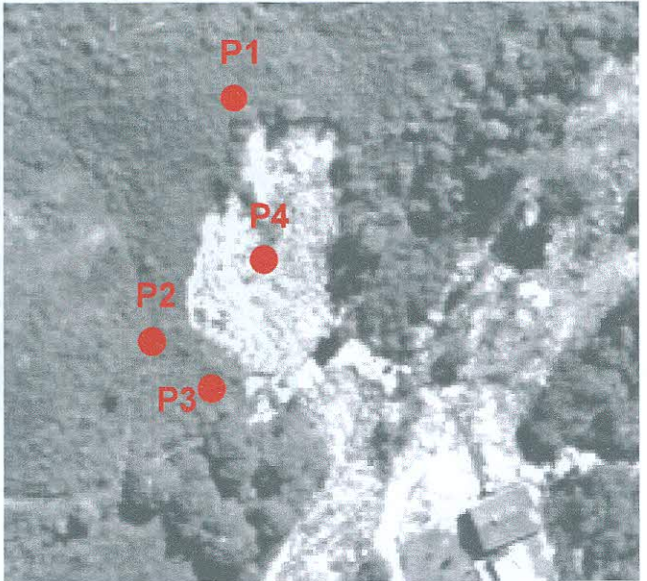
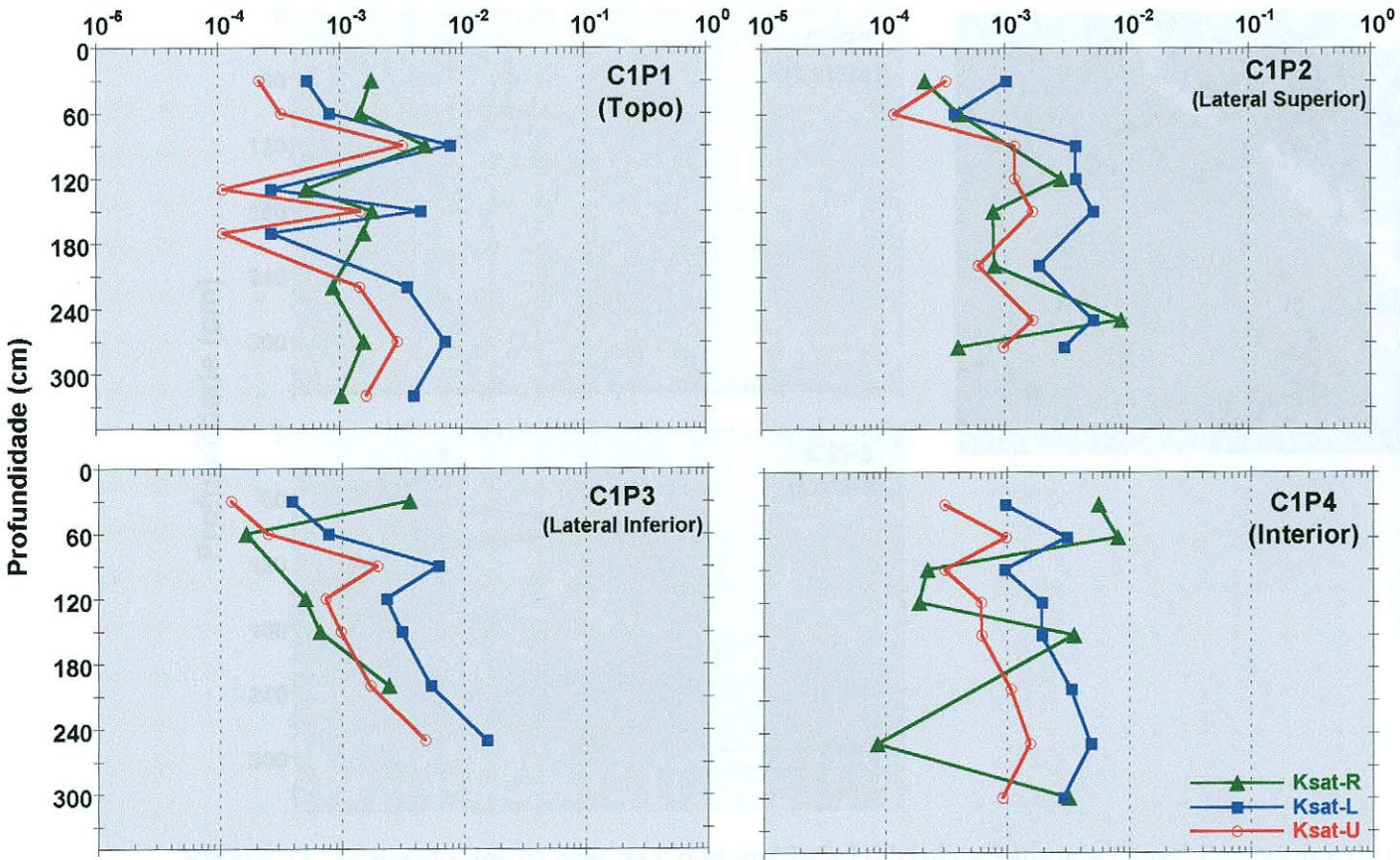


Figura 40 - Variação dos valores da Condutividade Hidráulica Saturada (Ksat) dos pontos da cicatriz 1 (C1P1, C1P2, C1P3 e C1P4), obtidos in situ através do PG e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (Ksat-R, Ksat-L e da Ksat-U). No canto superior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho).

Cicatriz 2 (C2)

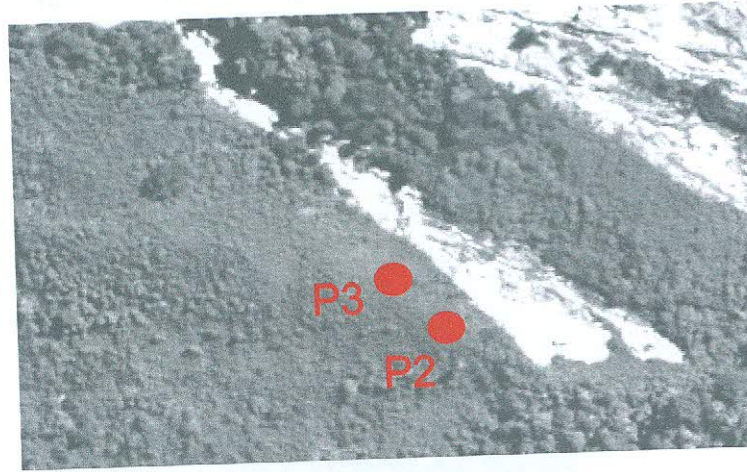
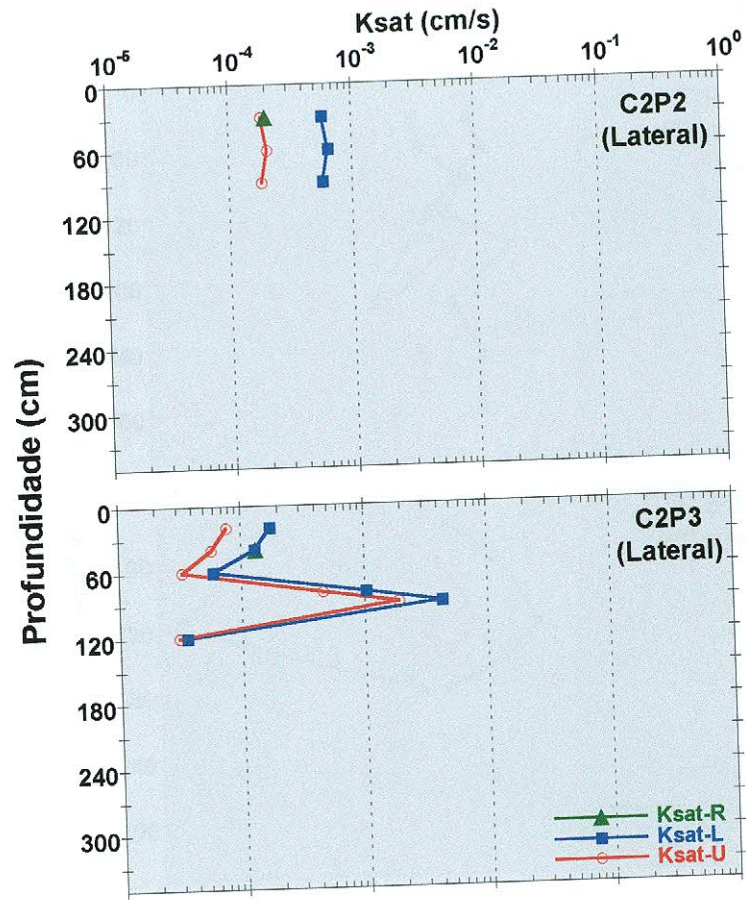


Figura 41 - Variação dos valores da Condutividade Hidráulica Saturada (Ksat) dos pontos da cicatriz 2 (C2P2 e C2P3), obtidos in situ através do PG e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (Ksat-R, Ksat-L e da Ksat-U). No canto superior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho).

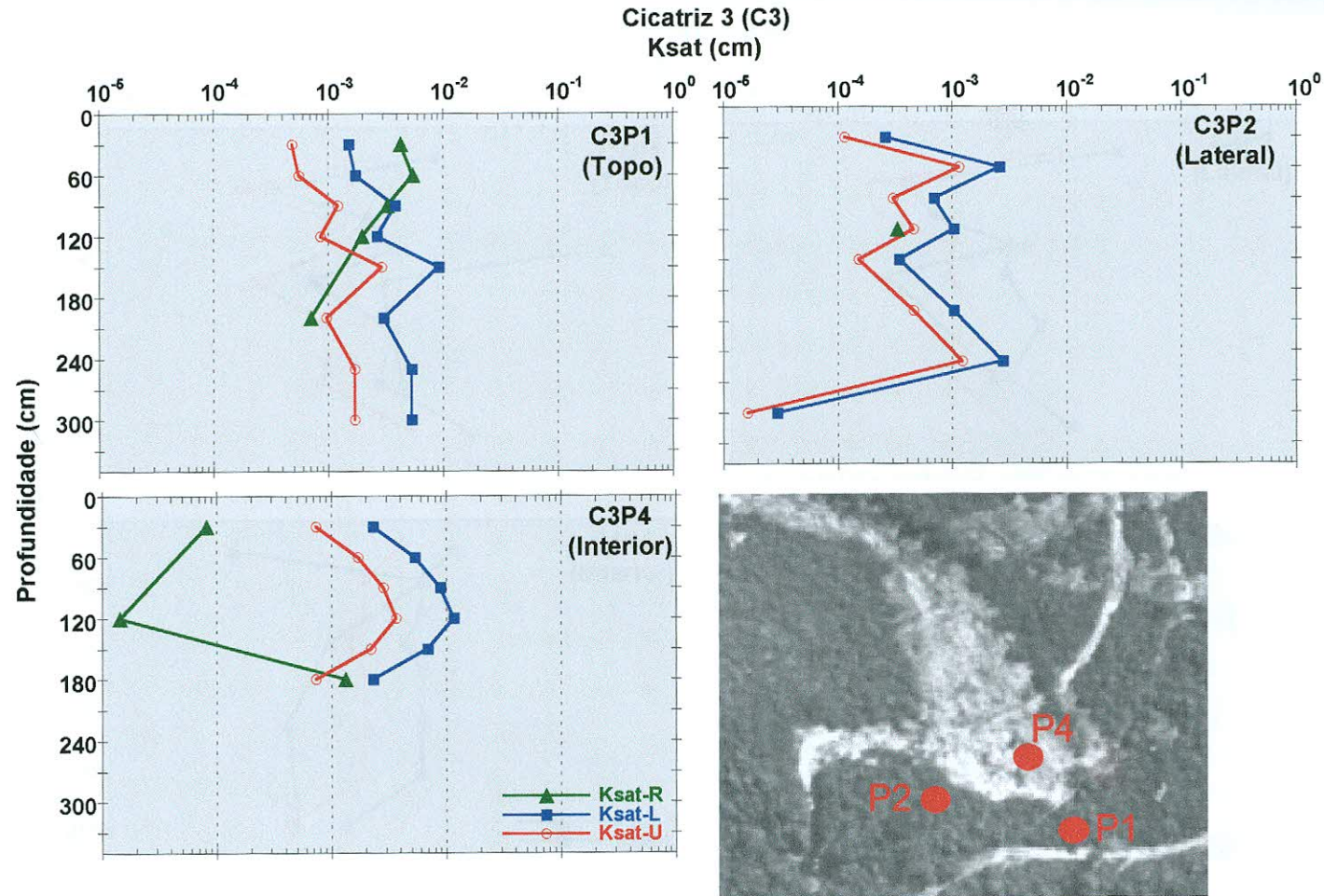


Figura 42 - Variação dos valores da condutividade hidráulica saturada (Ksat) dos pontos da cicatriz 3 (C3P1, C3P2 e C3P4), obtidos in situ através do PG e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (Ksat-R, Ksat-L e Ksat-U). No canto inferior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho).

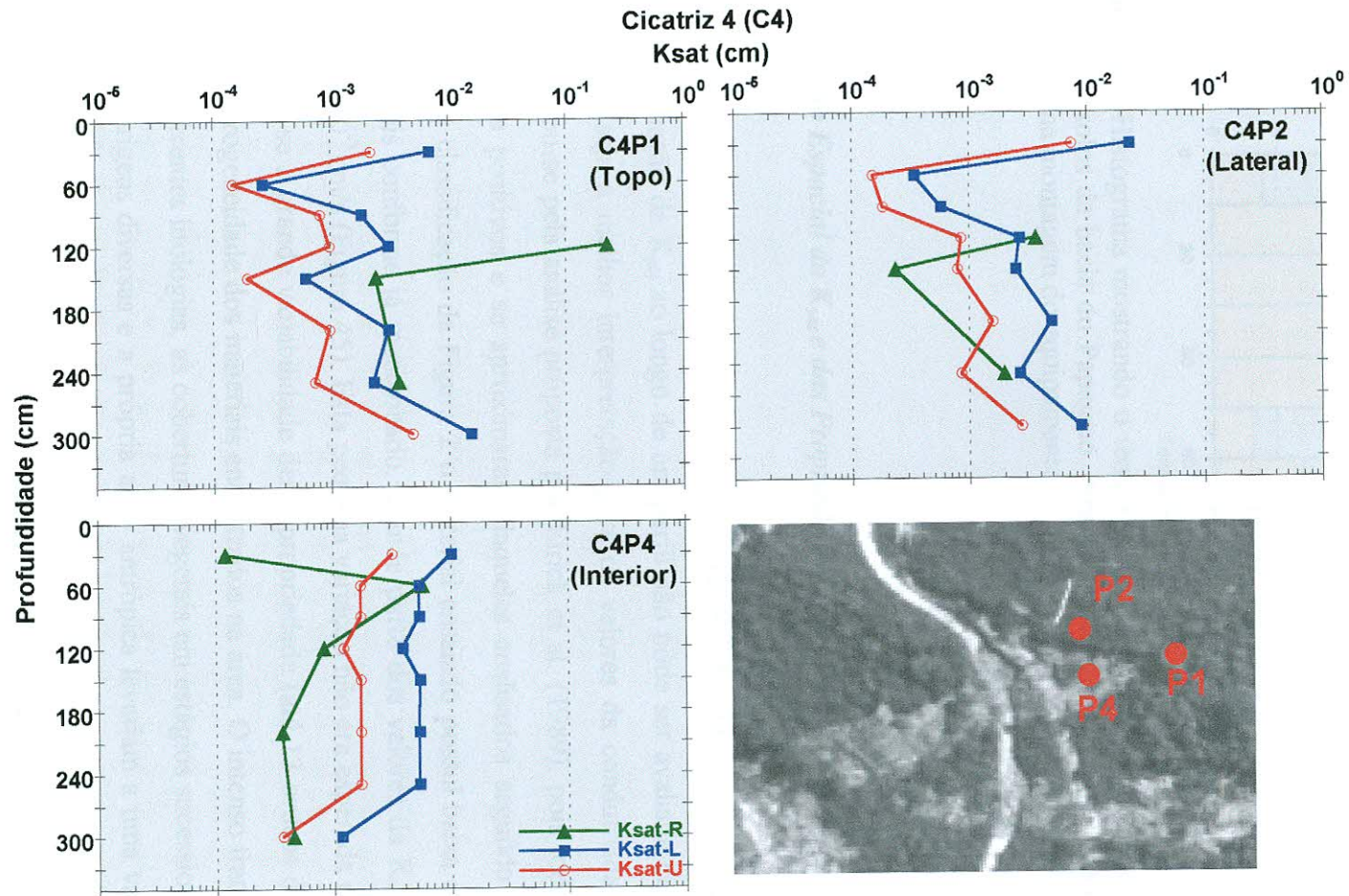


Figura 43 - Variação dos valores da condutividade hidráulica saturada (Ksat) dos pontos da cicatriz 4 (C4P1, C4P2 e C4P4), obtidos in situ, através do PGM e analisados conforme as interpretações de Richards, Laplace e Elrick et al. (1989) (Ksat-R, Ksat-L e Ksat-U). No canto inferior encontra-se a localização dos pontos mensurados (em vermelho).

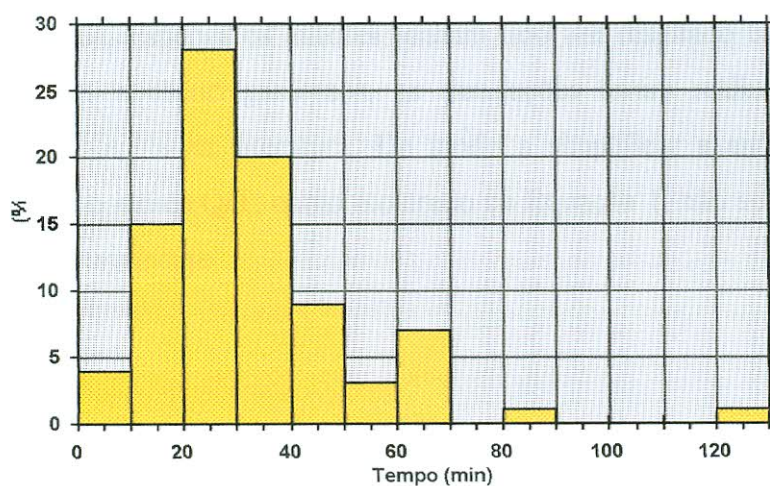


Figura 44 – Histograma mostrando o tempo gasto durante as 87 medições da K_{sat} dos solos da bacia do Papagaio. Neste cálculo não foi incluído o tempo gasto na montagem do equipamento.

6.2. Variação Espacial da K_{sat} e das Propriedades Físicas dos Solos

Devido aos inúmeros valores negativos da K_{sat-R} obtidos em quase todos os pontos, a variação da K_{sat} ao longo de um perfil não pôde ser avaliada continuamente. Embora não seja a melhor interpretação para os valores da condutividade hidráulica saturada, optou-se pela análise proposta por Elrick et al. (1989), pois todos os valores obtidos foram positivos e se aproximaram daqueles analisados segundo Laplace. De acordo com a classificação da Figura 2 o material ensaiado possui baixa condutividade hidráulica, pois conforme já mencionado, grande parte dos valores da K_{sat-U} variaram entre 10^{-4} e 10^{-3} cm/s (Figura 45). Esta pequena variação não era esperada neste trabalho considerando-se a grande variabilidade desta propriedade (até 13 ordens de magnitude) e a forte heterogeneidade dos materiais encontrados na área. O intenso fraturamento das rochas, as diferentes litologias, as coberturas vegetais em estágios sucessionais distintos, os solos de origens diversas e a própria ação antrópica levariam a uma variação maior dos valores da K_{sat} . Este intervalo de valores obtido *in situ* poderá ser utilizado em modelos matemáticos de previsão de escorregamentos aumentando a eficácia das previsões. Dentre os modelos que necessitam dos valores da K_{sat} , pode-se citar o

modelo SHALSTAB aplicado por Guimarães et al. (1998) e Guimarães et al. (1998) na área aqui estudada. Embora os autores tenham tido um resultado bastante satisfatório das áreas críticas a escorregamentos, as simulações foram realizadas incorporando valores da K_{sat} obtidos na literatura. De modo a simplificar a análise, estes autores trabalharam com o índice Q/T , como mostrado na Equação 1, não sendo necessário Ter o valor da K_{sar} previamente.

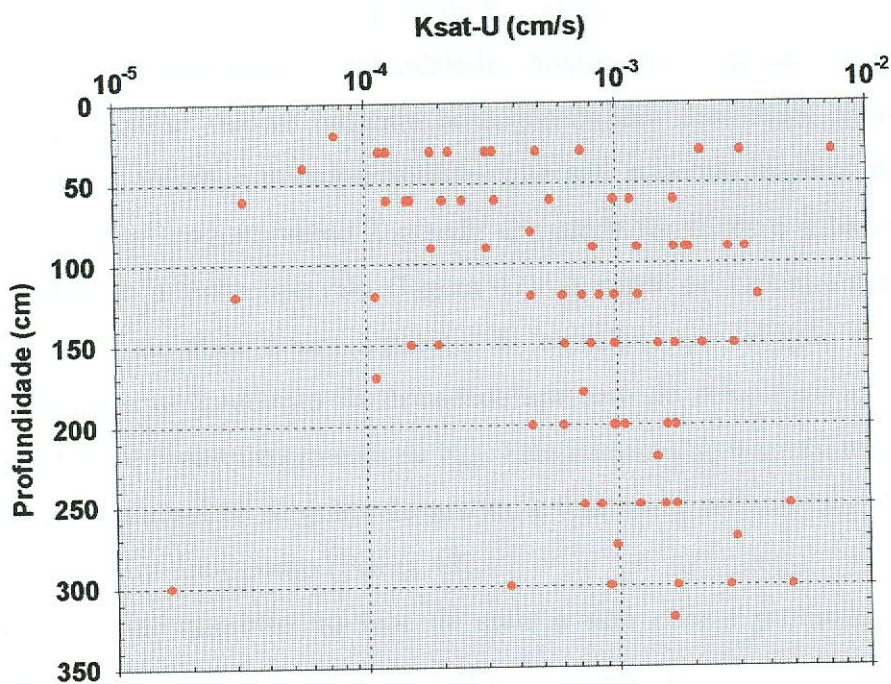


Figura 45– Valores obtidos *in situ* com PGM e analisados através da proposta baseada em Elrick et al. (1989) em que apenas uma carga (H) é aplicada no solo e o parâmetro α é introduzido previamente a partir das características do meio poroso. Cerca de 95% dos valores da K_{sat-U} variaram entre $1,0 \times 10^{-4}$ e $9,0 \times 10^{-3}$ cm/s.

Através da investigação de algumas propriedades dos solos e das observações de campo, pôde-se avaliar diferentes comportamentos da K_{sat} em cada ponto das quatro cicatrizes estudadas. Os valores K_{sat} variaram entre 10^{-4} e 10^{-3} cm/s na cicatriz 1, entre 10^{-5} e 10^{-3} cm/s nas cicatrizes 2 e 3 e entre 10^{-4} cm/s e 10^{-2} cm/s na cicatriz 4. Através das análises de Laplace e Elrick et al. (1989), valores similares (entre 10^{-4} cm/s e 10^{-3} cm/s) foram encontrados por Moreira (1998) em uma encosta no Rio de Janeiro formada por solos coluvionares maduros com textura argilo-arenosa, estrutura granular, aspecto homogêneo e com a presença de alguns seixos de quartzo.

No primeiro ponto da cicatriz 1 (Figura 46), localizado a 5 metros do seu topo superior (C1P1), observou-se oscilações da K_{sat} entre 10^{-4} e 10^{-3} cm/s até 170cm e um aumento desses valores com a profundidade. Analisando as demais propriedades até 170cm pôde-se notar valores bastante homogêneos das densidades aparente e real, porosidade total, macro e microporosidades que não puderam explicar as oscilações, atribuindo-se este comportamento à grande densidade de raízes e à intensa atividade biogênica observada neste intervalo (Figura 47). A partir de 170cm um acréscimo de 10% de silte e de areia e um aumento de cascalho, que chegou a quase 21%, contribuíram para uma redução da densidade aparente do solo, para um aumento da porosidade total e conseqüentemente da K_{sat} . Este aumento de material mais grosseiro e um significativo acréscimo de grãos de quartzo e feldspato puderam ser observados na parede da trincheira deste ponto (Figura 48).

Este mesmo aumento no teor de areia e silte com a profundidade pode ter provocado o aumento da K_{sat} no ponto C1P2, localizado a 5 metros da borda lateral da cicatriz 1 (Figura 49). Embora a partir de 90cm de profundidade tenha ocorrido este aumento dos valores da K_{sat} , observou-se uma redução de uma ordem de magnitude entre 60 e 90cm, ou seja, em apenas 30cm de solo o valor da K_{sat} foi reduzido de 10 vezes (de $1,22 \times 10^{-3}$ para $1,22 \times 10^{-4}$). Foi também identificada uma redução da K_{sat} entre 150cm e 200cm (de $1,70 \times 10^{-3}$ cm/s para $6,11 \times 10^{-4}$ cm/s) que foi acompanhada inesperadamente por um significativo aumento da macroporosidade (de 5,68 para 15,64%) e da porosidade total (de 41,24 para 54,70%).

Diferente desses dois primeiros perfis localizados no topo (C1P1) e na lateral da cicatriz (C1P2) e formados por material mais homogêneo com variações da textura bem próximas aquelas encontradas em solos formados *in situ*, os dois perfis localizados na

porção inferior da cicatriz e no seu interior são formados por depósitos bastante heterogêneos constituídos por blocos de diferentes diâmetros e uma matriz de textura bastante grosseira.

O aumento da K_{sat} (de $1,22 \times 10^{-4}$ cm/s para $4,85 \times 10^{-3}$ cm/s) no ponto C1P3 (Figura 50) é explicado principalmente pelos elevados teores de areia (média de 50%), silte e cascalho, tendo este último alcançado quase 25% na profundidade de 200cm. As demais propriedades explicaram este aumento somente em dois intervalos do perfil, entre 30 e 60cm e entre 150 e 250cm, em que o aumento da K_{sat} foi acompanhado por um aumento da porosidade total, da macro e microporosidades. Mesmo com este acréscimo do meio poroso, principalmente de macroporos, o aumento da condutividade hidráulica pode estar mais associado à presença de blocos rochosos de diferentes tamanhos (Figura 51) que podem gerar caminhos preferenciais da água entre sua parede e a matriz mais fina do depósito.

O ensaio da K_{sat} do último ponto desta cicatriz (C1P4), localizado no seu interior, mesmo sendo realizado sobre um depósito bastante heterogêneo, conforme já mencionado, apresentou um aumento bastante homogêneo da condutividade hidráulica (Figura 52), que foi perfeitamente acompanhado pela redução das densidades aparente e real e um considerável aumento da macroporosidade de 2,78 para 18,40% entre 120cm e 300cm de profundidade. Tal comportamento também esteve diretamente associado à queda brusca do teor de argila (de 27% para 3,0%) e ao aumento bastante significativo dos teores de areia (de 39% para 62,9%). É importante destacar que somente os valores da porosidade total, que se apresentou bastante homogênea ao longo do perfil, não conseguiria explicar este aumento da K_{sat} em profundidade, tornando-se necessário a identificação dos valores de macro e microporosidades.

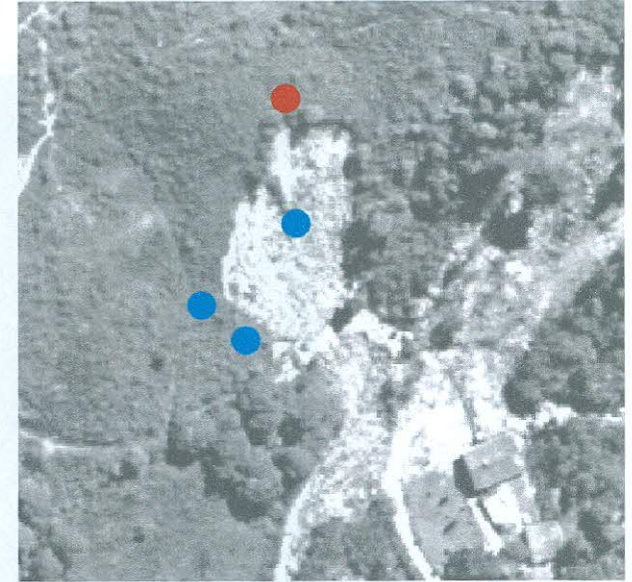
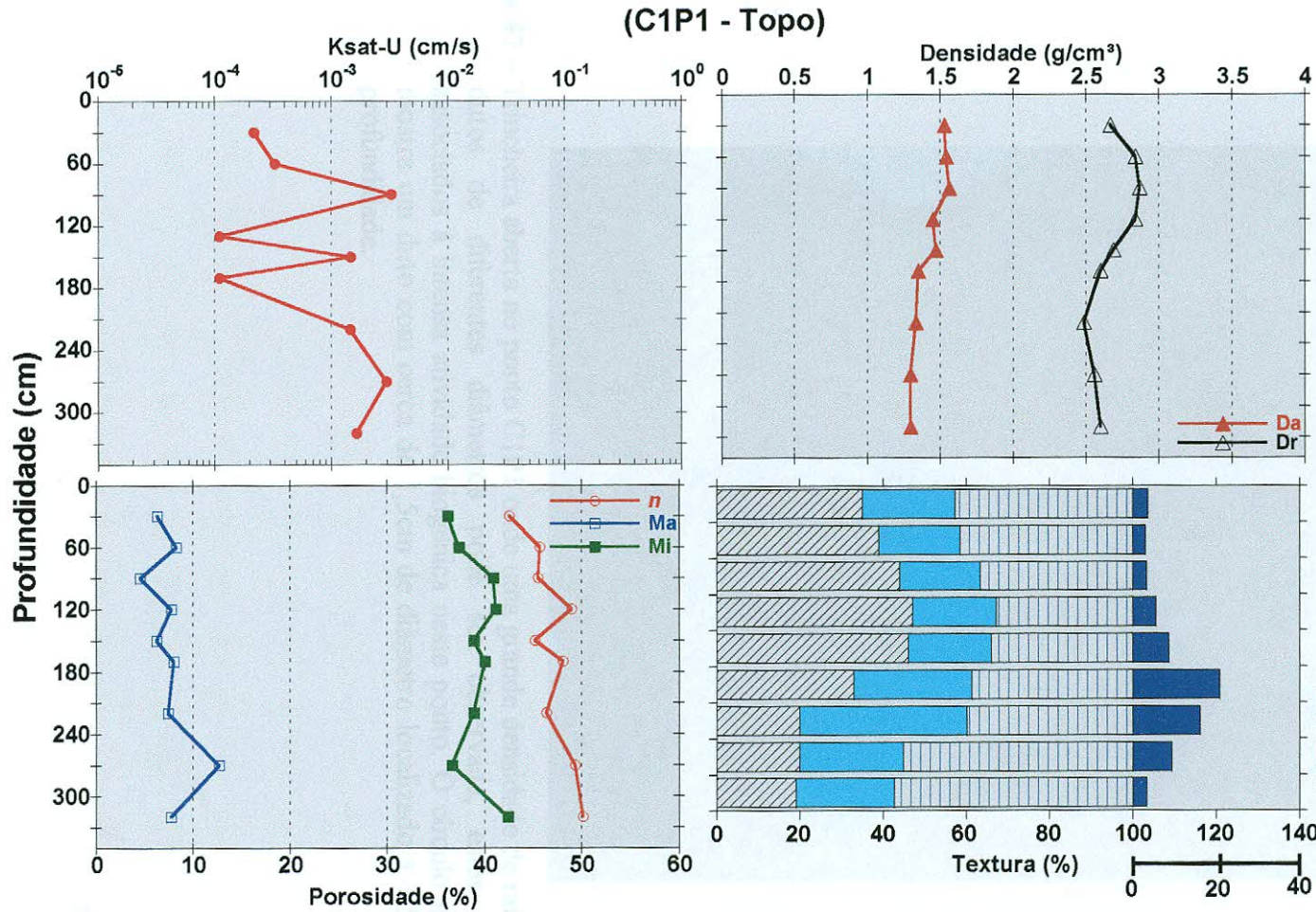


Figura 46 - C1p1- Variação da Condutividade Hidráulica Saturada (Ksat), Densidade Aparente (Da), Densidade Real (Dr), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma) e Pososidade Total (n) com a profundidade. O ponto em vermelho mostra a localização do ponto C1P1 onde foram estimadas as propriedades do solo.



Figura 47 – Trincheira aberta no ponto C1P1 onde uma grande densidade de raízes e de dutos de diferentes diâmetros pode ser observada, estes últimos, associados à intensa atividade biogênica neste ponto. O círculo na figura mostra um duto com cerca de 1,5cm de diâmetro localizado a 1,50cm de profundidade.

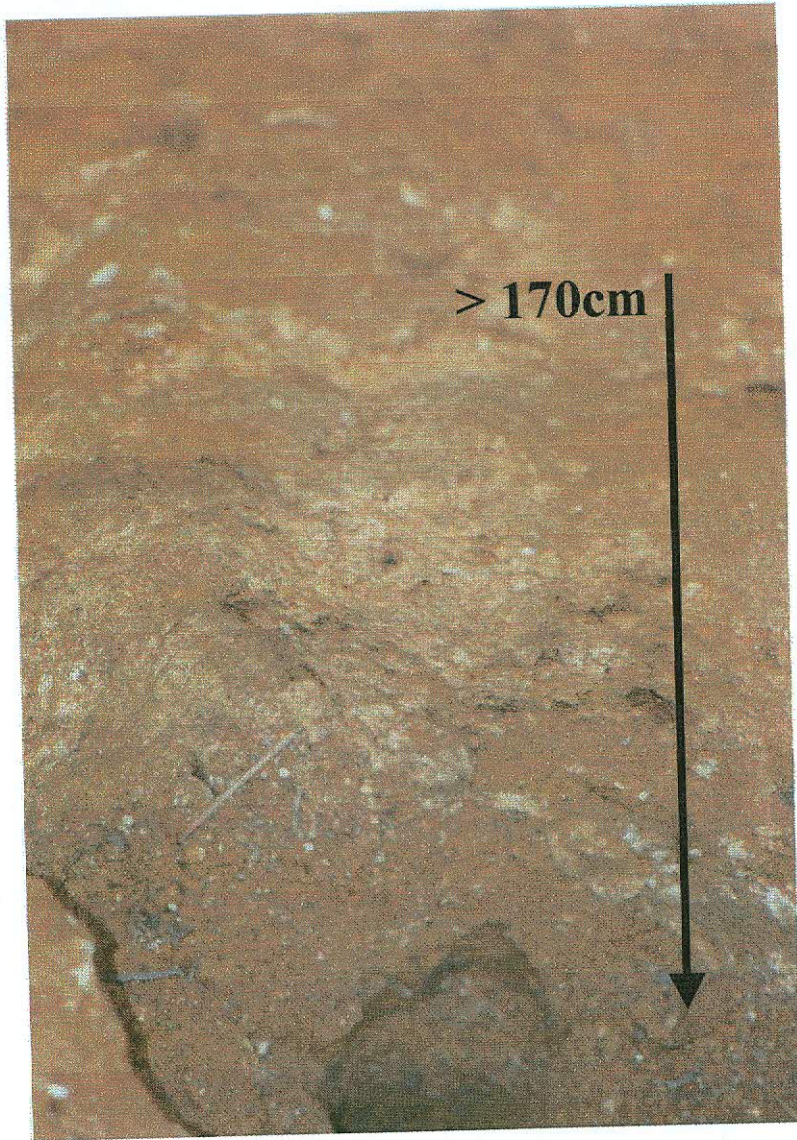


Figura 48 – Perfil C1P1 apresentando um forte acréscimo de grãos de quartzo e feldspato a partir da profundidade de 170cm.

C1P2 (Lateral Superior)

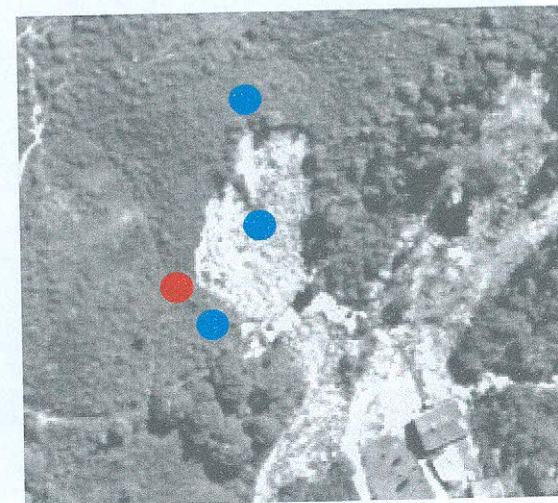
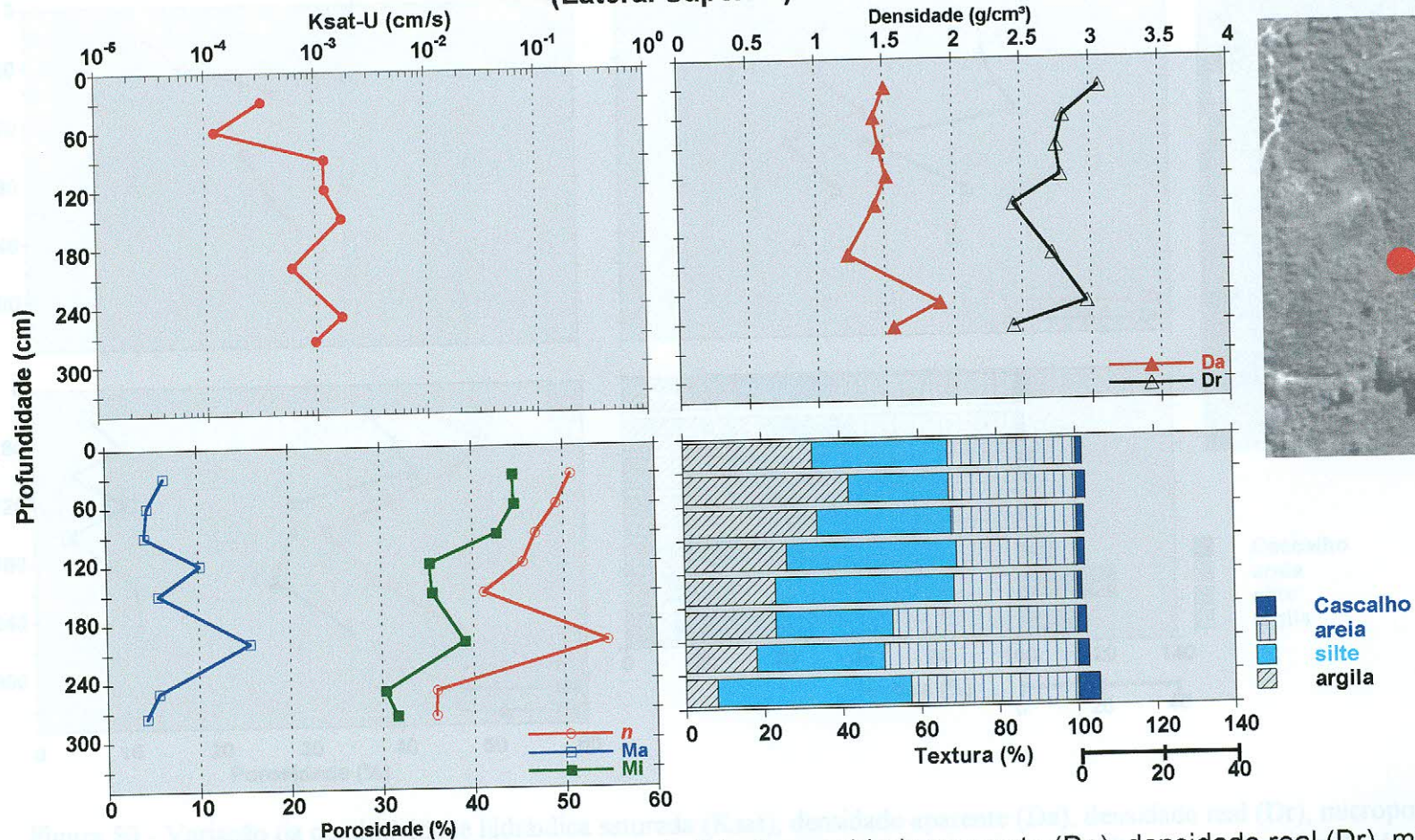


Figura 49 - Variação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), densidade aparente (D_a), densidade real (D_r), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C1P2 onde foram estimadas as propriedades do solo.

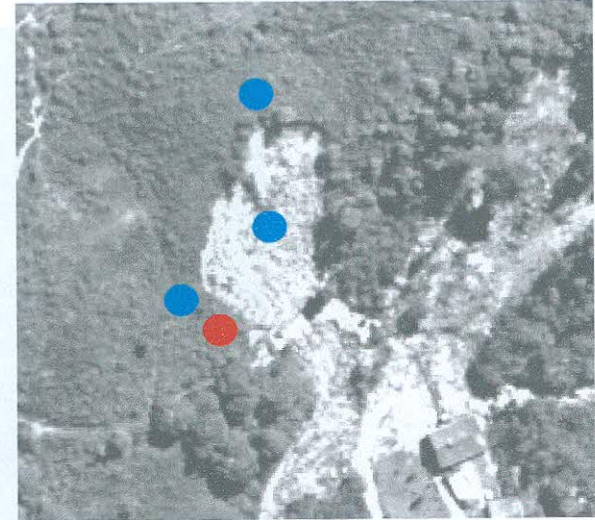
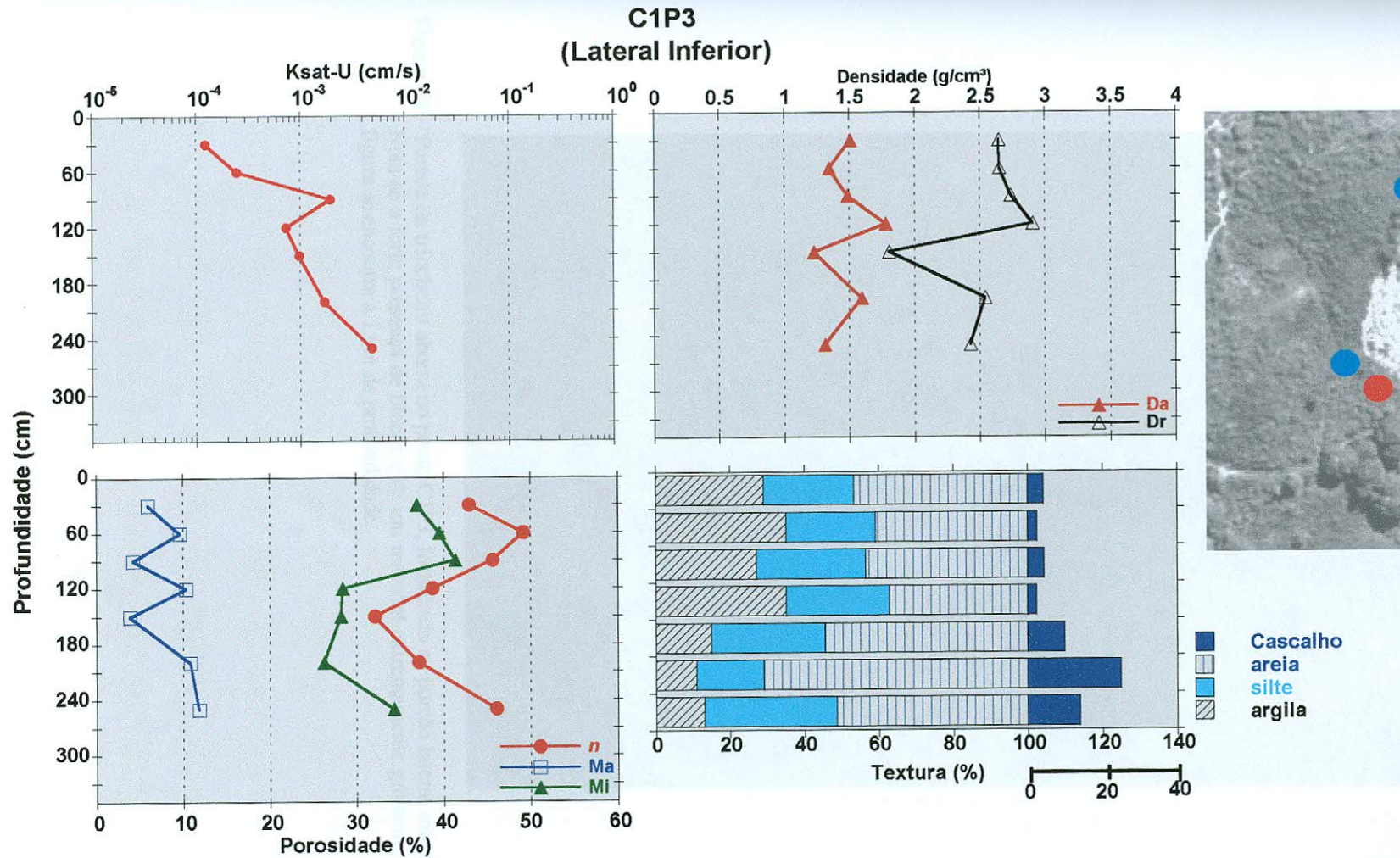


Figura 50 - Variação da condutividade hidráulica saturada (Ksat), densidade aparente (Da), densidade real (Dr), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C1P3 onde foram estimadas as propriedades do solo.



Figura 51 – Parede da trincheira aberta no ponto C1P3, localizado na porção lateral inferior da cicatriz. Nota-se a forte presença de blocos e de um material extremamente grosseiro. O martelo da figura se encontra a 1,0m de profundidade.

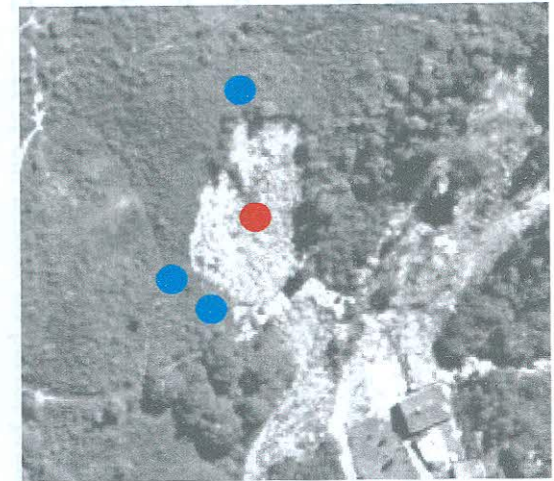
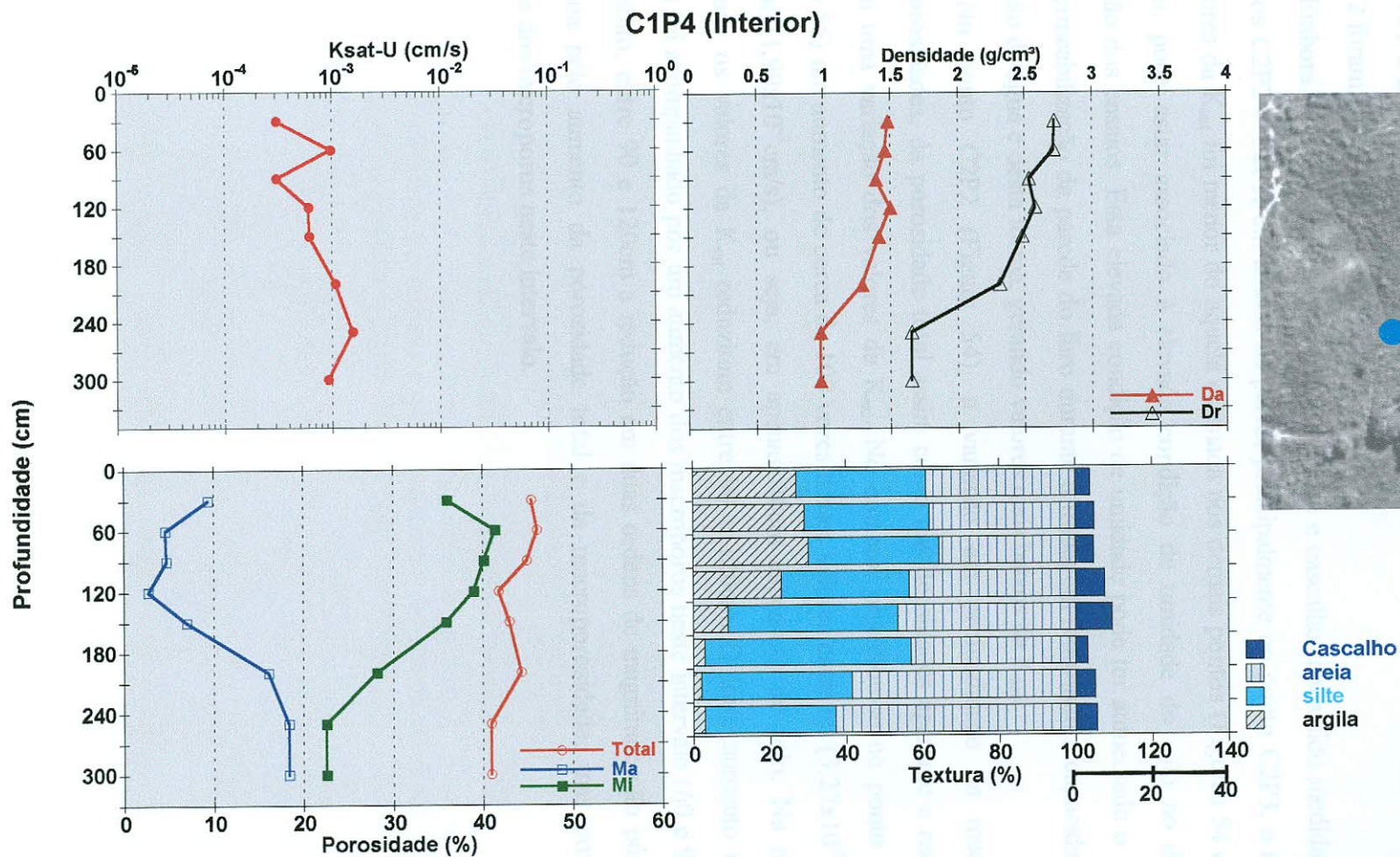


Figura 52 - Variação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), densidade aparente (D_a), densidade real (D_r), microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C1P4 onde foram estimadas as propriedades do solo.

Alguns problemas de ordem prática impediram que fossem realizados muitos ensaios com o permeâmetro de Guelph na cicatriz 2. A dificuldade de acesso, devido à altitude (600m) e à forte declividade desta área, além da ausência de uma fonte de água necessária ao equipamento dificultaram as estimativas da K_{sat} em grandes profundidades (Figura 53). Desta forma, apenas dois pontos (C2P2 e C2P3), localizados nas laterais da cicatriz 2 foram ensaiados.

Embora uma alta porcentagem de areia, silte e cascalho tenha sido medida para os pontos C2P2 e C2P3, em ambos os perfis, principalmente no ponto C2P3, a média dos valores da K_{sat} foi menor do aquela estimada nos demais pontos (Figuras 54 e 55). Tal fato, pode estar associado à elevada condição de umidade do solo no dia da realização dos ensaios. Esta elevada condição de umidade pode ter aumentado o efeito da impermeabilização da parede do furo durante a tradagem reduzindo a capacidade de infiltração da água e desta forma, gerando valores mais baixos da K_{sat} .

No ponto C2P2 (Figura 54), a variação em profundidade da macro e microporosidades, da porosidade total assim como das densidades aparente e real não geraram uma variação dos valores da K_{sat} . No entanto, observou-se no ponto C2P3 (Figura 55) um aumento de cerca de 100 vezes desses valores entre 60 ($3,27 \times 10^{-5}$ cm/s) e 90cm ($1,90 \times 10^{-3}$ cm/s), ou seja, em apenas 30cm espessura de solo. Na mesma magnitude os valores da K_{sat} reduziram entre 90 e 120cm. O forte aumento desses valores foi acompanhado por um aumento dos macroporos neste intervalo (60 e 90cm). No entanto, entre 90 e 120cm a redução em duas ordens de magnitude não pôde ser explicada pelo aumento da porosidade total e da macroporosidade, mas por uma redução dos microporos neste intervalo.

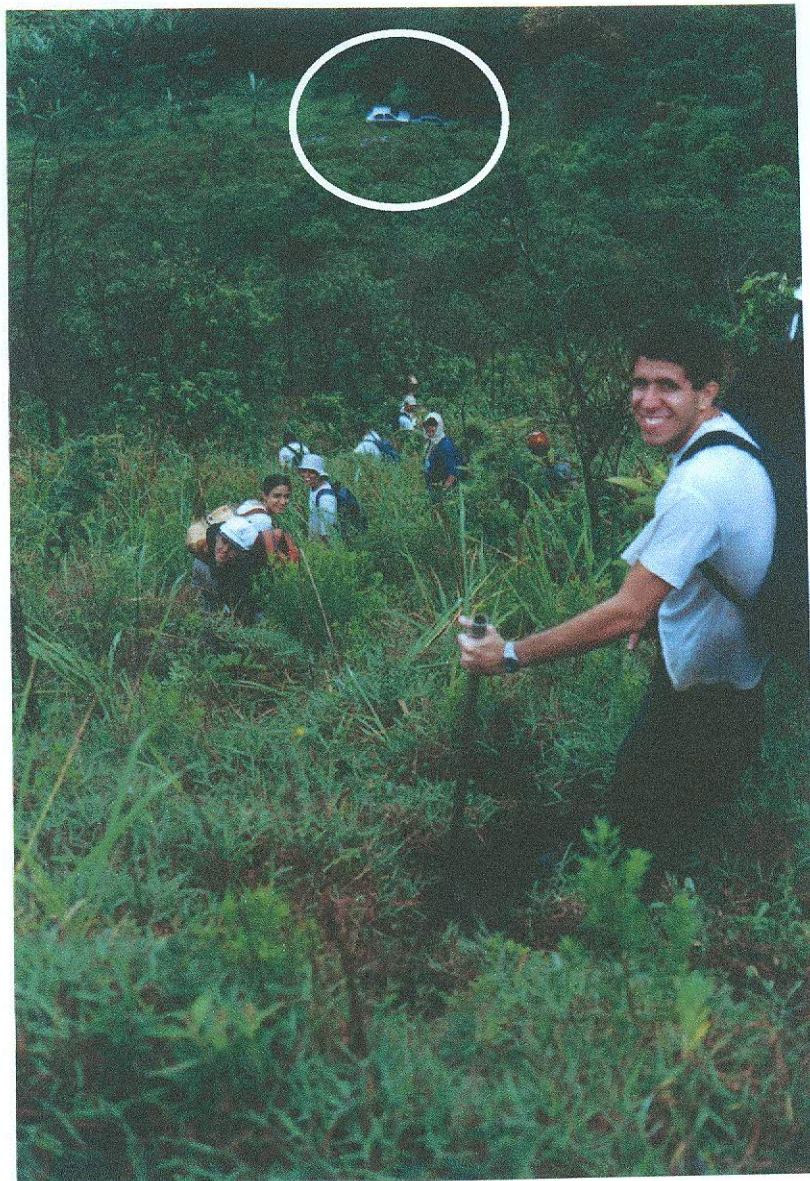


Figura 53 – Encosta onde foram estimados os perfis da cicatriz 2. Nota-se a forte declividade do terreno e pela localização do carros ao fundo (círculo) pode-se perceber a grande altitude (cerca de 600m).

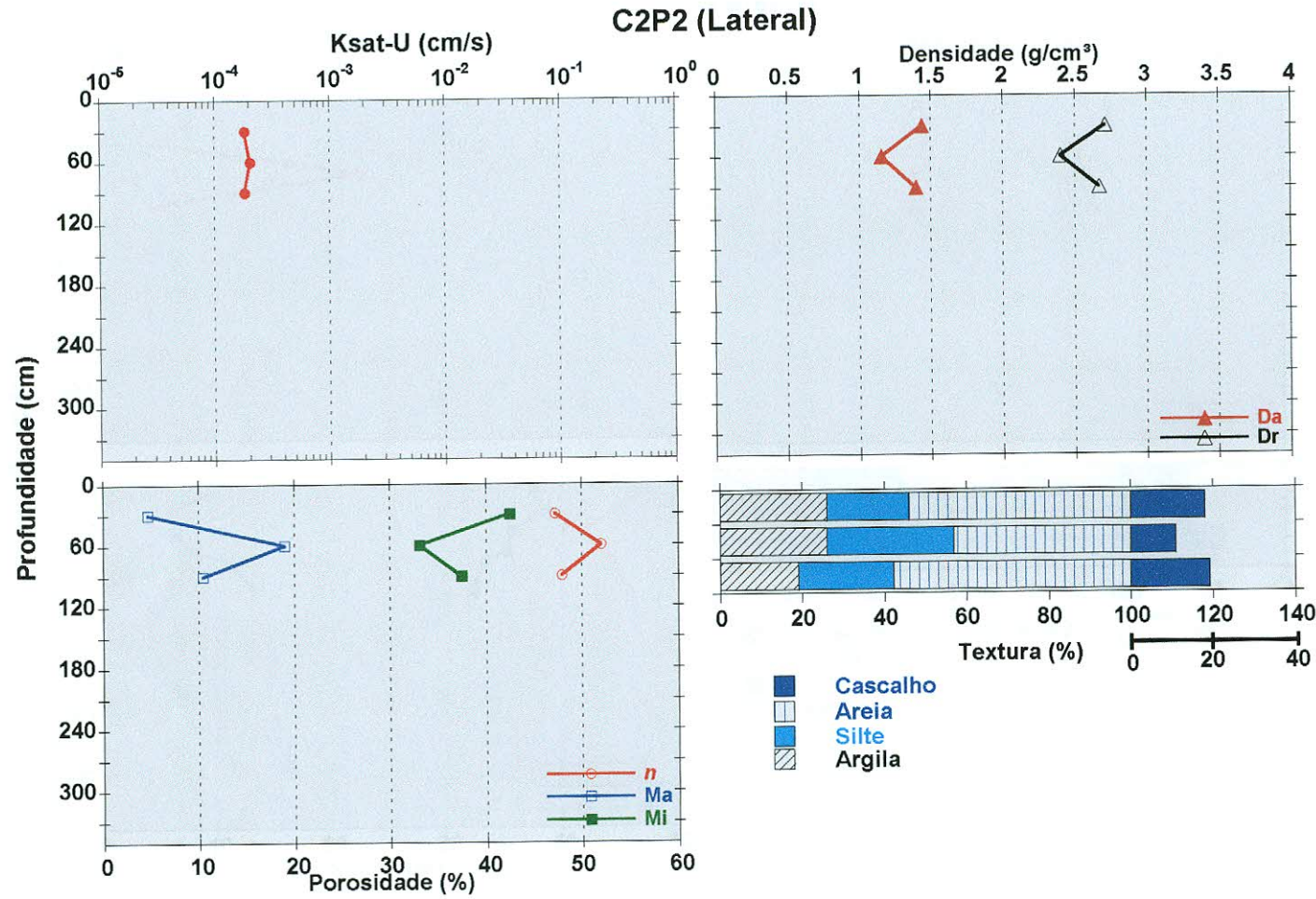


Figura 54 - Variação da condutividade hidráulica saturada (Ksat), densidade aparente (Da), densidade real (Dr), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C2P2 onde foram estimadas as propriedades do solo.

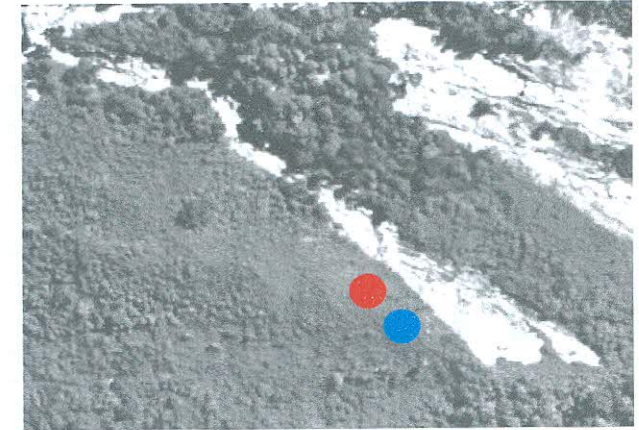
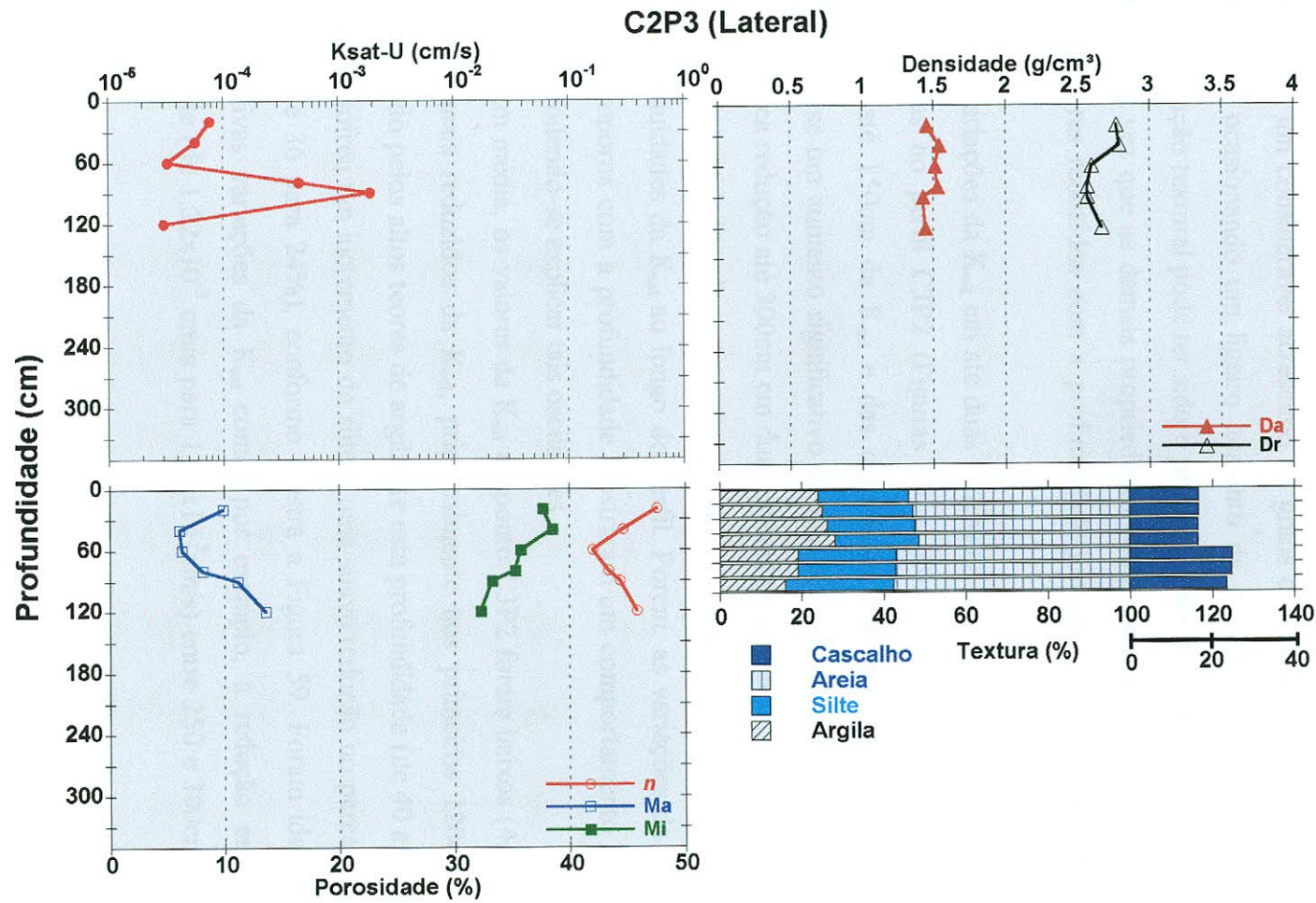


Figura 55 - Variação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), densidade aparente (D_a), densidade real (D_r), microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C2P3 onde foram estimadas as propriedades do solo.

Na terceira cicatriz estudada (Figura 56) foram observados distintos comportamentos da K_{sat} entre os pontos C3P1, C3P2 e C3P4, localizados no topo e acima de uma estrada abandonada, na lateral direita e no interior da cicatriz 3, respectivamente.

O ponto C3P1 apresentou um perfil com características bem próximas daquelas encontradas em perfis de solos formados *in situ*, ou seja, um horizonte A bem desenvolvido com 60cm de espessura (Figura 57), seguido de um horizonte B (1m de espessura) com teores de argila variando de 40 a 57% (Figura 58) e nas maiores profundidades (após 150cm) um acréscimo bastante significativo dos teores de areia e silte, este último chegando a quase 50% em 300cm. Também foi observado neste intervalo, um considerável acréscimo de grãos de quartzo e feldspato de até 1,5cm de diâmetro ocasionando um ligeiro aumento da densidade real neste mesmo intervalo. Esta variação textural pode ter sido o principal fator influenciador do comportamento da K_{sat} , uma vez que as demais propriedades como, por exemplo, a porosidade total teve seus valores reduzidos com a profundidade juntamente com o aumento da densidade aparente.

Variações da K_{sat} em até duas ordens de grandeza (10^{-5} cm/s a 10^{-3} cm/s) foram observadas no perfil C3P2 (Figuras 59 e 60). A partir dos 60cm verificou-se uma redução até 150cm da K_{sat} e das densidades aparente e real. Entre 150 e 250cm verificou-se um aumento significativo da K_{sat} em uma ordem de grandeza e a partir daí uma brusca redução até 300cm em duas ordens de grandeza. No que se refere à variação da macroporosidade e da textura neste ponto, elas não conseguem explicar estas grandes discontinuidades da K_{sat} ao longo do perfil. Porém, as variações da porosidade total e dos microporos com a profundidade mostraram um comportamento bastante similar ao da K_{sat} , podendo-se explicar tais oscilações.

Em média, os valores da K_{sat} no ponto C3P2 foram baixos ($4,8 \times 10^{-4}$ cm/s). Estes valores mais reduzidos da K_{sat} , principalmente nos primeiros 120cm, pode ter sido ocasionado pelos altos teores de argila até esta profundidade (de 40 a 47%). A partir daí o perfil sofreu um incremento de silte e uma suave redução no percentual de areia e de argila (de 36 para 24%), conforme mostra a Figura 59. Foram identificadas algumas significativas variações da K_{sat} como, por exemplo, a redução em duas ordens de magnitude (de $1,22 \times 10^{-3}$ cm/s para $1,63 \times 10^{-5}$ cm/s) entre 250 e 300cm de profundidade,

ou seja, em apenas 50cm de espessura de solo houve uma redução de cerca de 100 vezes dos valores da K_{sat} . Esta redução pode ter sido causada por um decréscimo de 10% dos poros do solo, principalmente dos microporos.

Contrariamente ao perfil anterior, o ponto C3P4 (Figura 61), localizado no interior da cicatriz, por ser formado por um material extremamente arenoso, chegando a 74% de areia e 35% de cascalho na profundidade de 150cm, apresentou valores mais altos da K_{sat} (média de $1,9 \times 10^{-3}$ cm/s). Além disso, a grande heterogeneidade do material formado por inúmeros blocos (Figura 62) pode ter aumentado estes valores da K_{sat} da mesma forma com foi visto no ponto C1P3 que apresentou as mesmas características do material ensaiado.

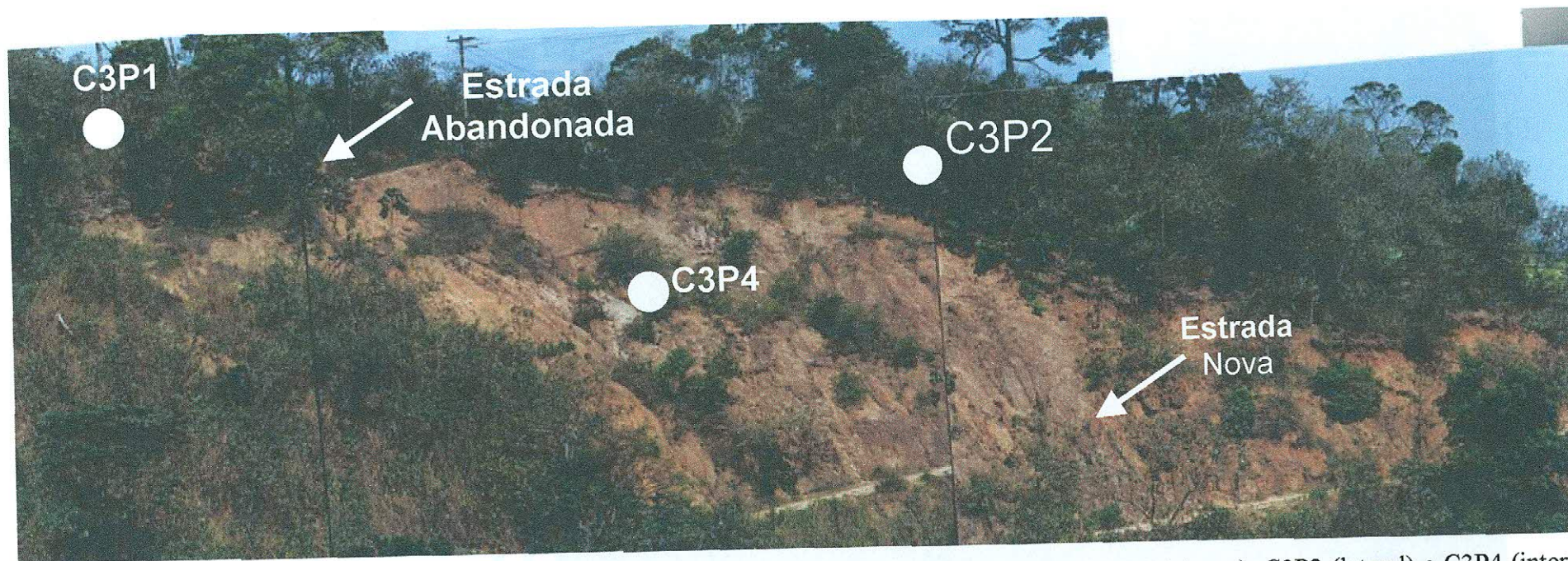


Figura 56 – Escorregamento deflagrado em fevereiro de 1996 (cicatriz 3). Localização dos pontos C3P1 (topo), C3P2 (lateral) e C3P4 (interior) onde foram realizados os ensaios da condutividade hidráulica saturada. A figura mostra também a localização de duas estradas abertas pelo próprios moradores, sendo uma já abandonada.

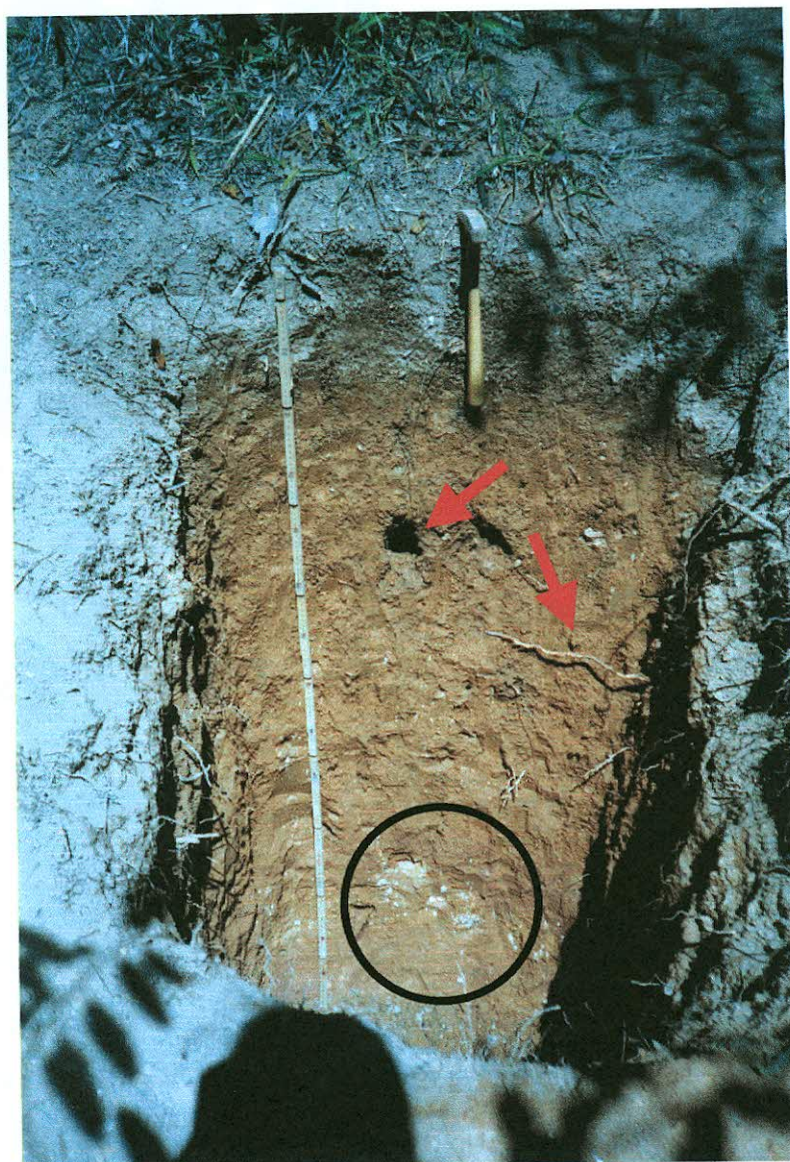


Figura 57 – Perfil do ponto C3P1 com um horizonte A (60cm) seguido de um horizonte B bastante profundo. Nota-se nesta figura a presença de grande densidade de raízes e macroporos (setas vermelhas). Nas maiores profundidades pode-se observar um grande acréscimo de grãos de quartzo e feldspato (círculo).

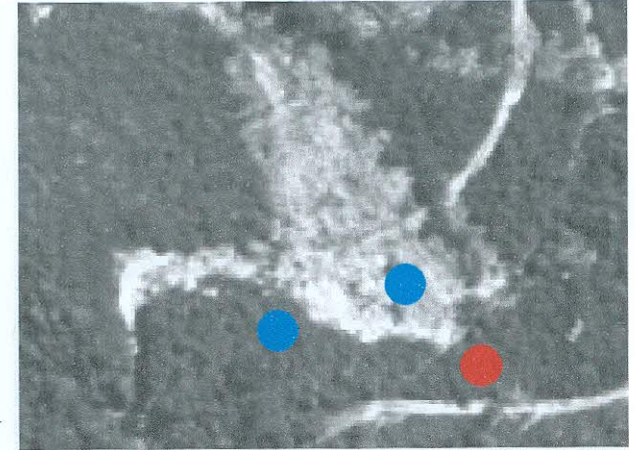
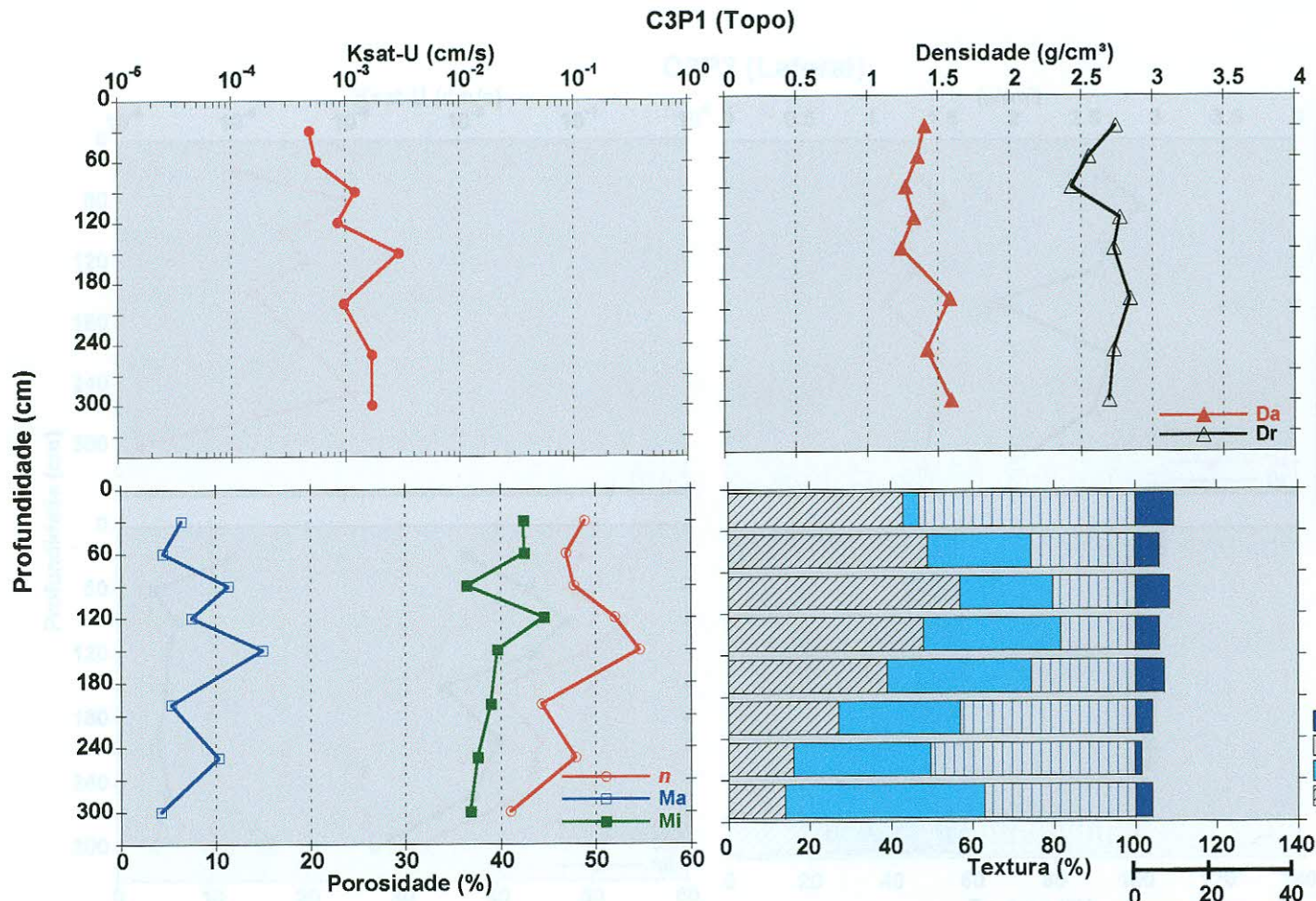


Figura 58 - Variação da condutividade hidráulica saturada (Ksat), densidade aparente (Da), densidade real (Dr), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C3P1 onde foram estimadas as propriedades do solo.

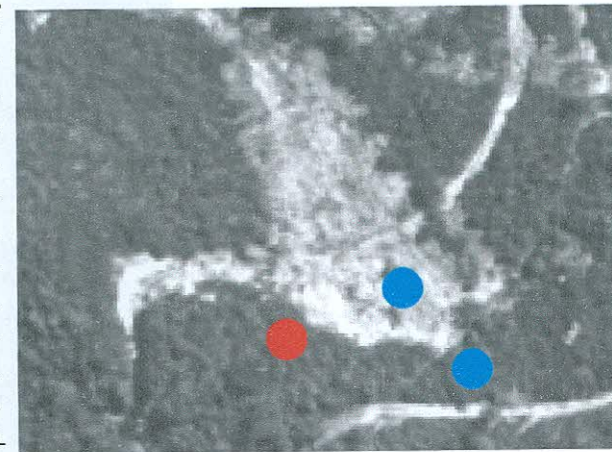
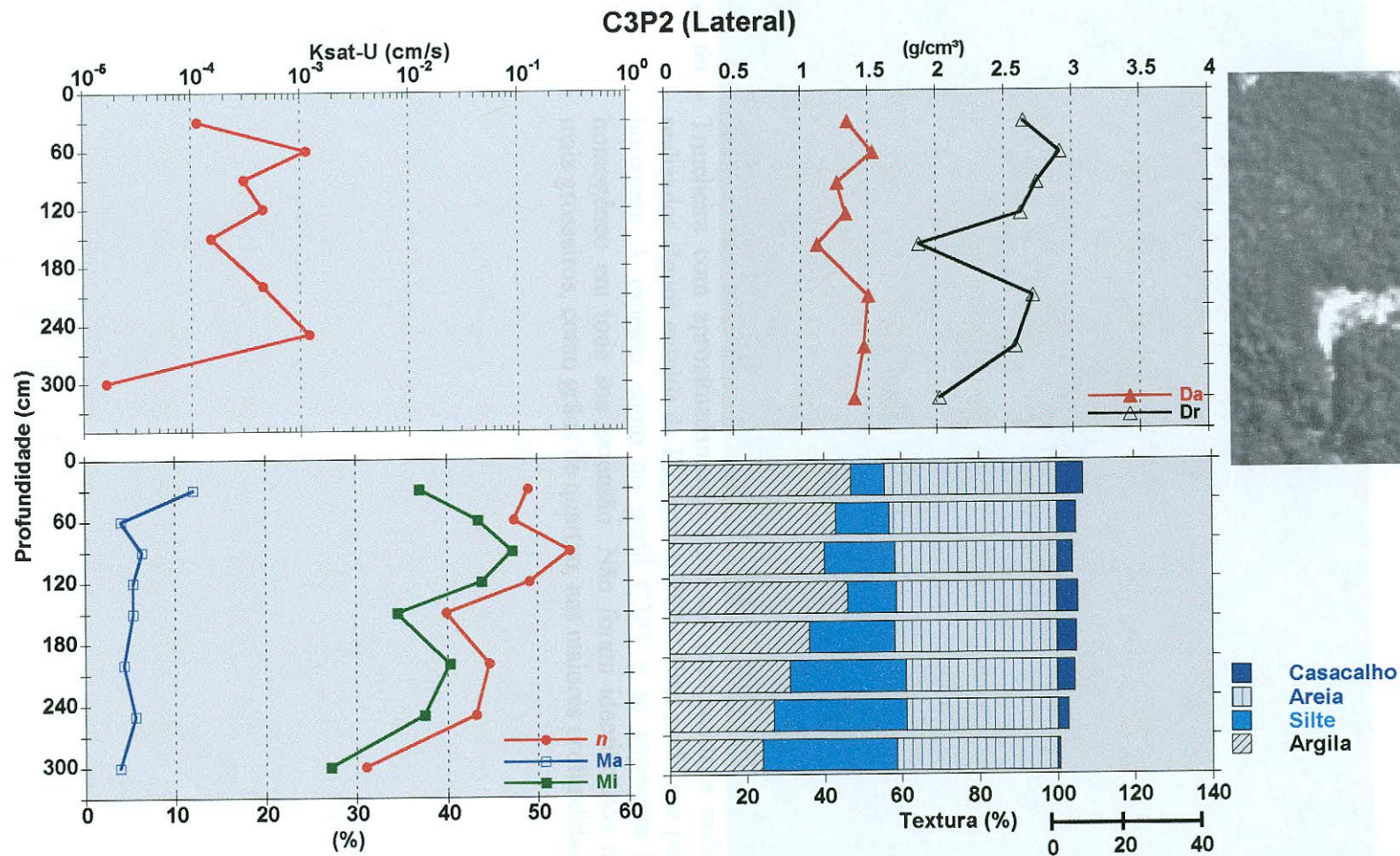


Figura 59 - Variação da condutividade hidráulica saturada (Ksat), densidade aparente (Da), densidade real (Dr), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C3P2 onde foram estimadas as propriedades do solo.



Figura 60 – Trincheira com aproximadamente 2,5m de profundidade onde foram realizados alguns ensaios da K_{sat} com o PGM. Este perfil não possui um horizonte A espesso como no perfil C3P1 e se apresenta bastante homogêneo em toda sua extensão. Não foram identificados materiais mais grosseiros, como grãos de quartzo, nas maiores profundidades.

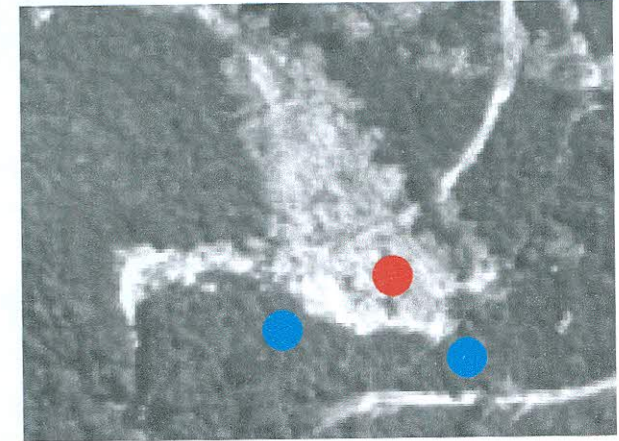
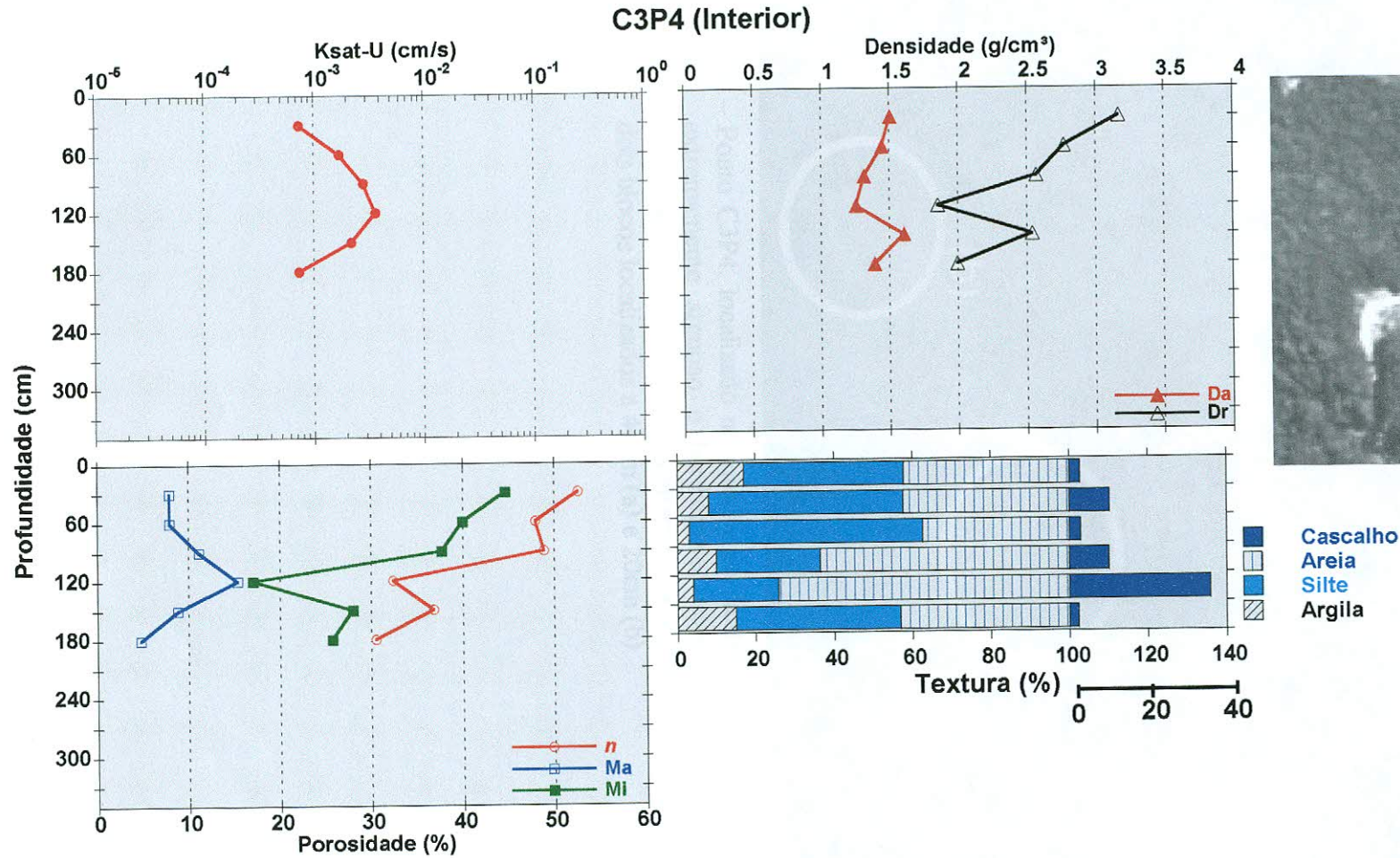


Figura 61 - Variação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), densidade aparente (D_a), densidade real (D_r), microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C3P4 onde foram estimadas as propriedades do solo.

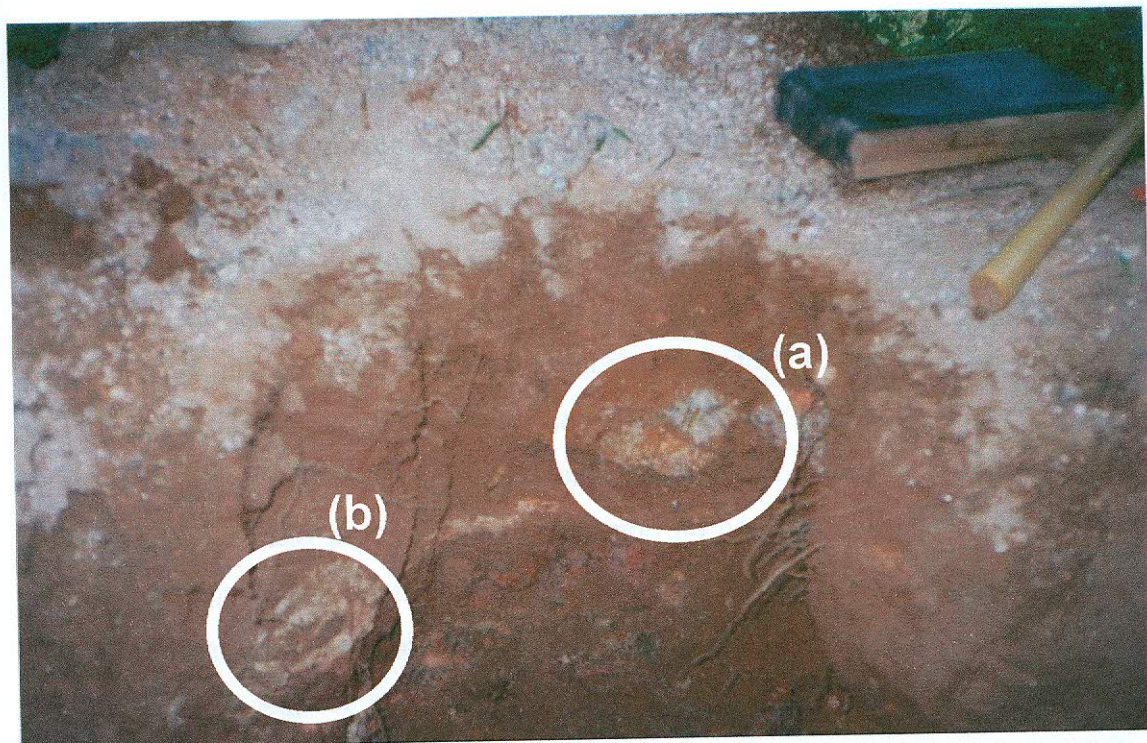


Figura 62 – Ponto C3P4, localizado no interior da cicatriz, apresentando um material extremamente arenoso e heterogêneo com blocos em alteração e de diferentes diâmetros que já aparecem na superfície. Os círculos mostram dois blocos localizados a 40cm (a) e 20cm (b).

Os dois primeiros pontos da cicatriz 4 (C4P1 e C4P2), localizados no topo e na lateral esquerda, respectivamente, apresentaram uma variação bastante similar da K_{sat} com a profundidade (Figuras 63 e 64). Valores mais altos nos primeiros 30cm do solo, uma redução de uma ordem de magnitude entre 60 e 150cm, seguido de suave aumento até 300cm na mesma magnitude. Em ambos os pontos a variação da textura pode ter explicado este comportamento, uma vez que foram identificados elevados valores de areia nos primeiros 30 cm, 45% (C4P1) e 48,4% (C4P2), levando a um aumento da K_{sat} nesta profundidade, $2,20 \times 10^{-3}$ cm/s (C4P1) e $7,35 \times 10^{-3}$ cm/s (C4P2). A posterior redução da condutividade hidráulica nos dois pontos foi acompanhada, em diferentes proporções, por um aumento do teor de argila. No ponto C4P1 (Figura 65) a camada mais espessa de 140cm (entre 60 e 200cm) do horizonte B com mais de 50% de argila (média de 52%) pode ter provocado uma média de valores mais baixos neste mesmo intervalo ($6,23 \times 10^{-4}$ cm/s). De forma similar no ponto C4P2, porém entre 60 e 120cm de profundidade, um acréscimo de 10% no teor de argila do horizonte A para o B foi capaz de reduzir K_{sat} em uma ordem de magnitude (10^{-3} cm/s para 10^{-4} cm/s).

Da mesma forma que a textura conseguiu explicar algumas variações da K_{sat} em profundidade, o meio poroso muito influenciou no comportamento desses dois perfis. Em C4P1, entre 60 e 120cm de profundidade, observou-se um aumento dos vazios do solo (porosidade total, microporosidade e macroporosidade) juntamente com a subida dos valores da K_{sat} . A posterior redução desses valores, entre 120 e 150cm, foi acompanhada pela redução do meio poroso e da microporosidade, e o aumento da macroporosidade pode ter levado a subida dos valores da K_{sat} entre 150 e 200cm de profundidade. Embora tenha ocorrido uma redução da macroporosidade e da porosidade total nas duas últimas profundidades (250 e 300cm), mais uma vez a microporosidade foi responsável pelo aumento dos valores da K_{sat} , como ocorreu entre 120 e 150cm.

Portanto, a investigação do diâmetro dos poros dos solos (macro e micro) torna-se uma ferramenta fundamental na análise da variação espacial da K_{sat} , como já citado anteriormente. Tal fato pode ser novamente percebido no ponto C4P2, em que um significativo aumento da macroporosidade de 7,73% para 26%, entre 90 e 300cm, foi também acompanhado por um aumento da K_{sat} em profundidade neste mesmo intervalo (de $1,84 \times 10^{-4}$ cm/s para $2,78 \times 10^{-3}$ cm/s).

Assim como os pontos C1P4 e C3P4, o terceiro perfil da cicatriz 4 foi realizado em seu interior (C4P4). Neste perfil (Figura 66), as estimativas da K_{sat} foram realizadas em um material sem a presença de blocos de diferentes diâmetros, como observado em C1P4 e C3P4, com estruturas ainda preservadas da rocha sobrejacente (Gnaiss Archer), desestruturado e extremamente arenoso (média de 47% de areia). Tais características parecem explicar a grande homogeneidade e os elevados valores da K_{sat} identificados em grande parte deste perfil (Figura 67). Esta homogeneidade ao longo do perfil também aparece nas demais propriedades físicas estudadas. Devido à própria localização no interior da cicatriz e à grande profundidade das estimativas realizadas no perfil C4P4, pôde-se verificar uma certa redução da K_{sat} e das demais propriedades entre 250 e 300cm, com exceção da densidade aparente, provavelmente em função da proximidade com a rocha sã.

Após todas essas análises percebeu-se, em grande parte dos perfis estimados, uma tendência do aumento da K_{sat} com a profundidade. Esta variação nos pontos localizados no entorno da cicatriz pode ser explicada preferencialmente pela própria variação textural dos solos, pois a redução do conteúdo de argila em todos esses perfis e o acréscimo nos teores de silte, areia e cascalho levaram ao aumento da K_{sat} com a profundidade.

Em média os maiores de valores K_{sat} (em torno de 10^{-3} cm/s) foram estimados nos perfis localizados sobre um material bastante heterogêneo similar a um depósito de tálus. Tal fato pode ser explicado pela textura bastante grosseira desses perfis (Figuras 50, 52, 61 e 66) associado à formação de caminhos preferenciais da água entre a parede do bloco rochoso e a matriz mais fina do depósito. Nestes pontos localizados no interior das cicatrizes (C1P4, C3P1 e C4P4), embora altos valores tenham sido identificados com a profundidade, observou-se uma diminuição dos valores da K_{sat} entre 250 e 300cm, podendo indicar as características menos permeáveis do material sobrejacente.

Não se observou um padrão da variação da K_{sat} que possa estar associado à cobertura vegetal, principalmente nos primeiros centímetros do solo, onde esta influência costuma ser maior. No entanto, devido às constantes queimadas ocorridas na área e através das observações nas paredes das trincheiras, notou-se uma forte presença de raízes apodrecidas. Tais feições podem ter contribuído para o aumento dos valores da

K_{sat} em locais onde as demais propriedades não conseguiram explicar este comportamento.

Os valores mais baixos da K_{sat} nos primeiros 30 centímetros em relação ao perfil como um todo, podem estar associados ao freqüente pisoteio do gado na bacia, no caso dos perfis localizados em torno da cicatriz, e aos constantes impactos das águas pluviais sobre o material desprotegido, no caso dos perfis localizados no interior. Ambos os processos podem levar à redução do espaço poroso e conseqüentemente da K_{sat} .

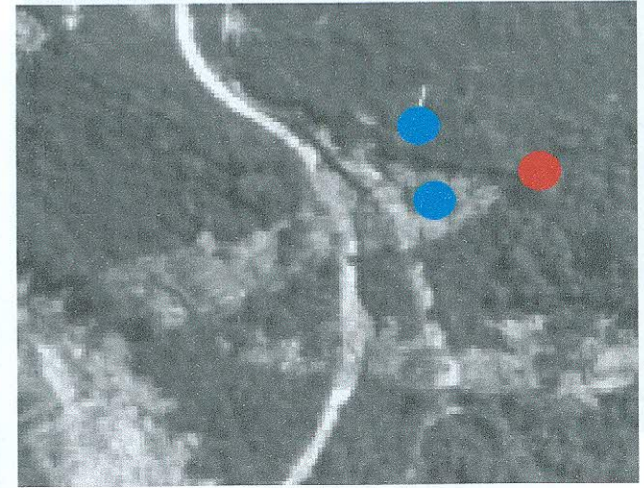
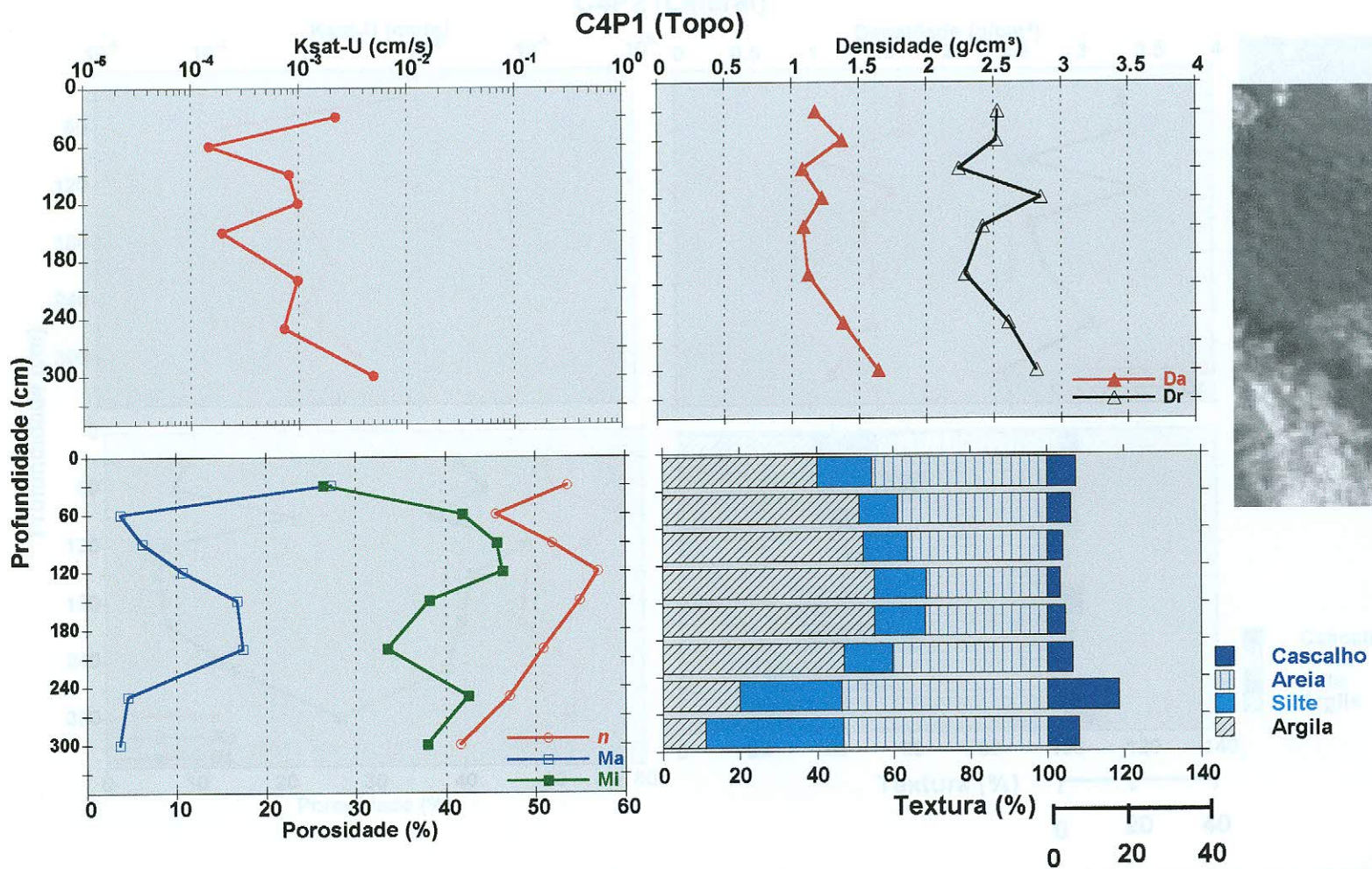


Figura 63 - Variação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), densidade aparente (D_a), densidade real (D_r), microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C4P1 onde foram estimadas as propriedades do solo.

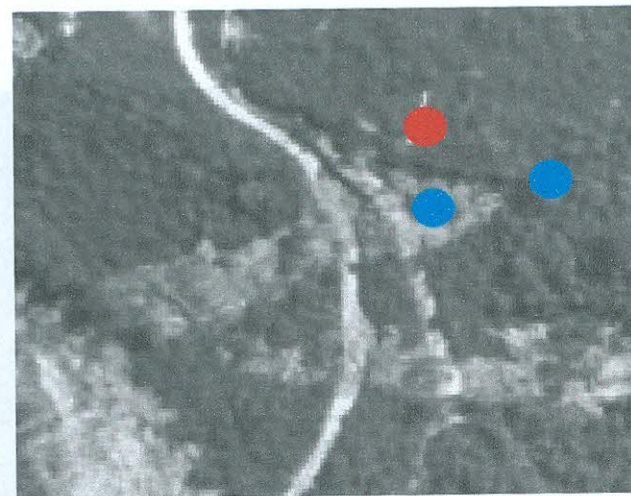
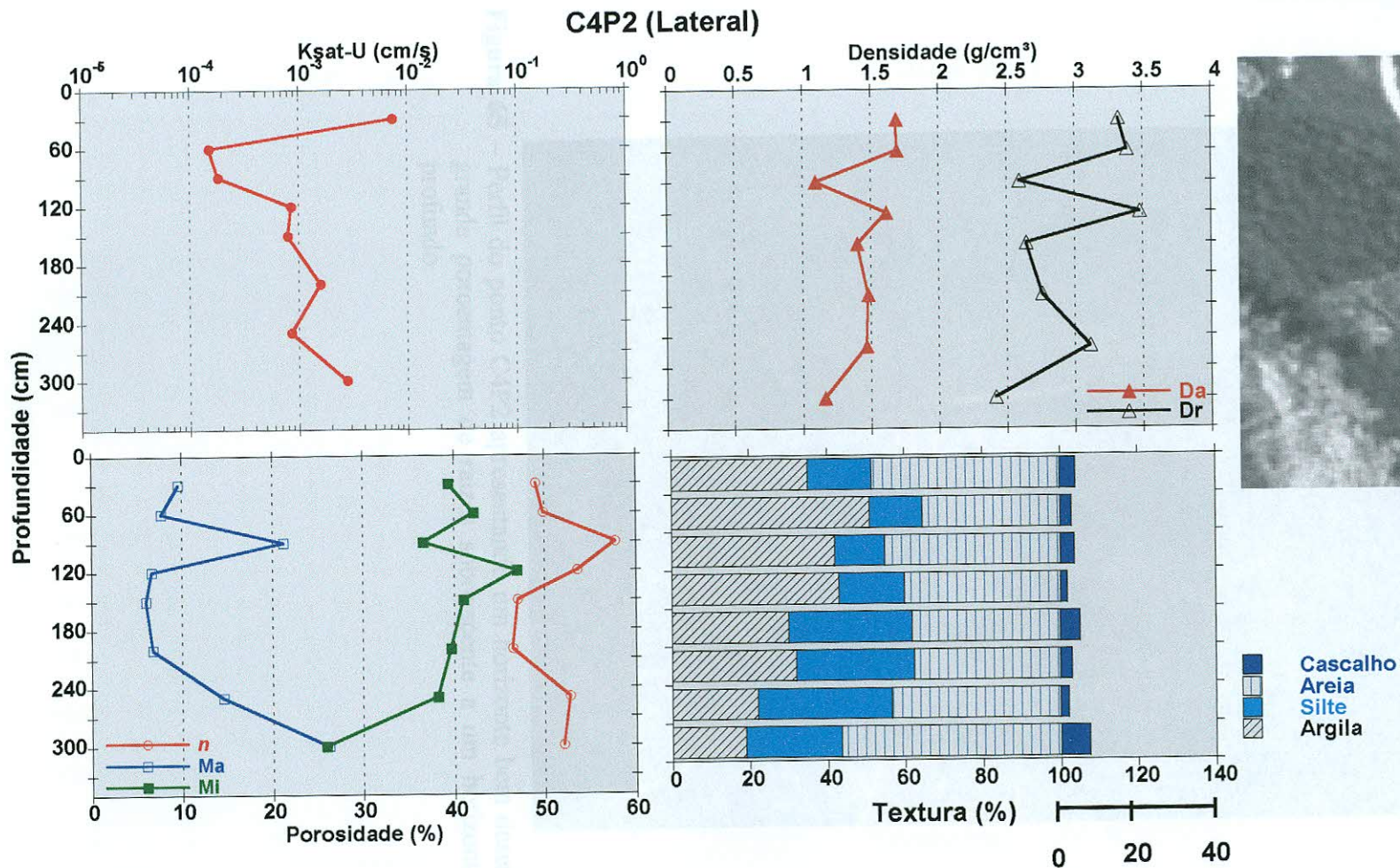


Figura 64 - Variação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), densidade aparente (D_a), densidade real (D_r), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C4P2 onde foram estimadas as propriedades do solo.



Figura 65 – Perfil do ponto C4P2 apresentando um horizonte bem desenvolvido com grande porcentagem de raízes sobrejacente a um horizonte B bastante profundo.

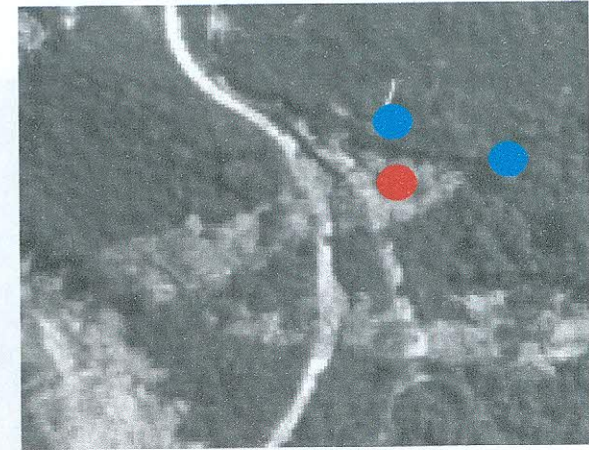
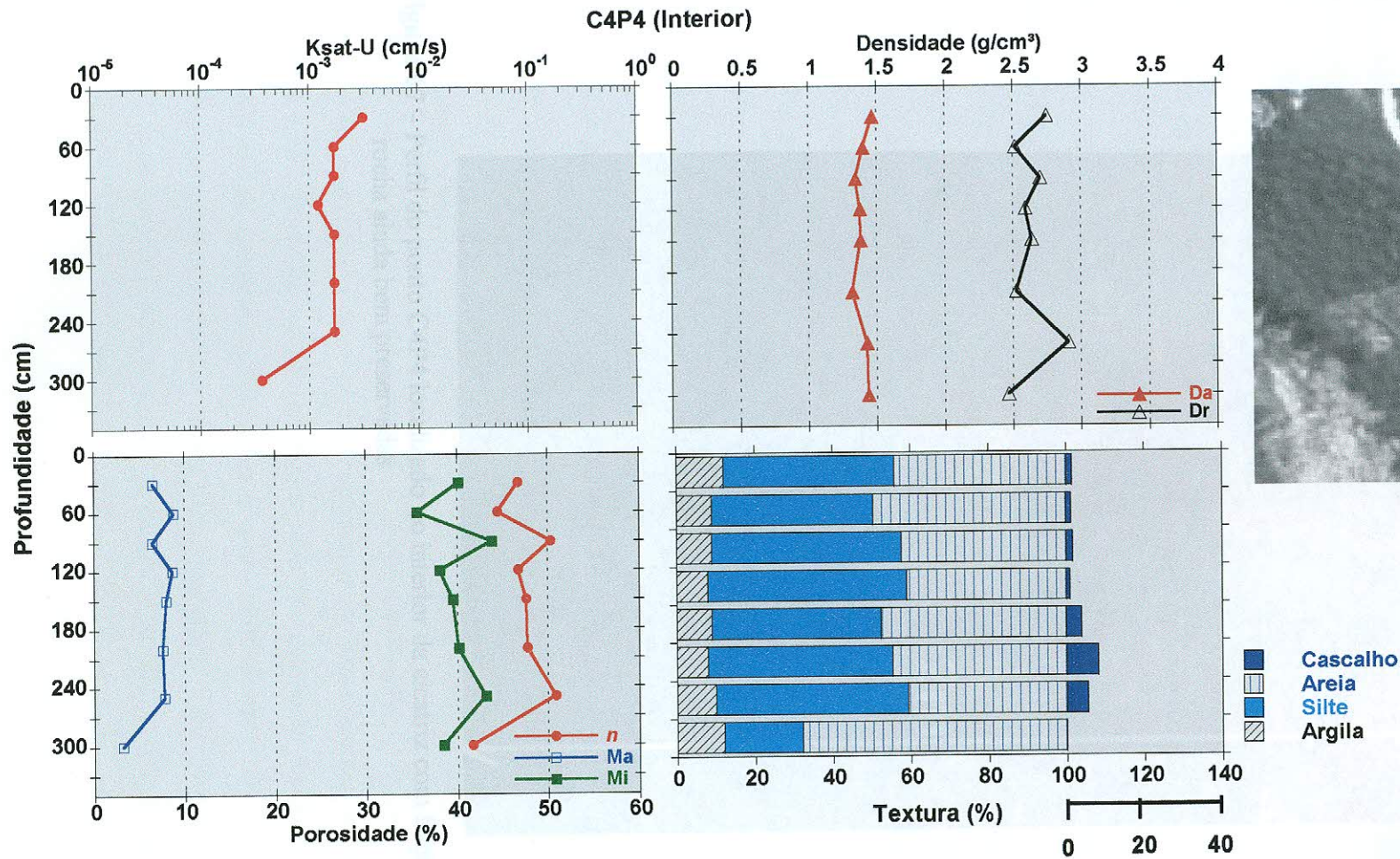


Figura 66 - Variação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), densidade aparente (D_a), densidade real (D_r), microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a), porosidade total (n) e textura com a profundidade. O ponto em vermelho mostra localização do ponto C4P4 onde foram estimadas as propriedades do solo.

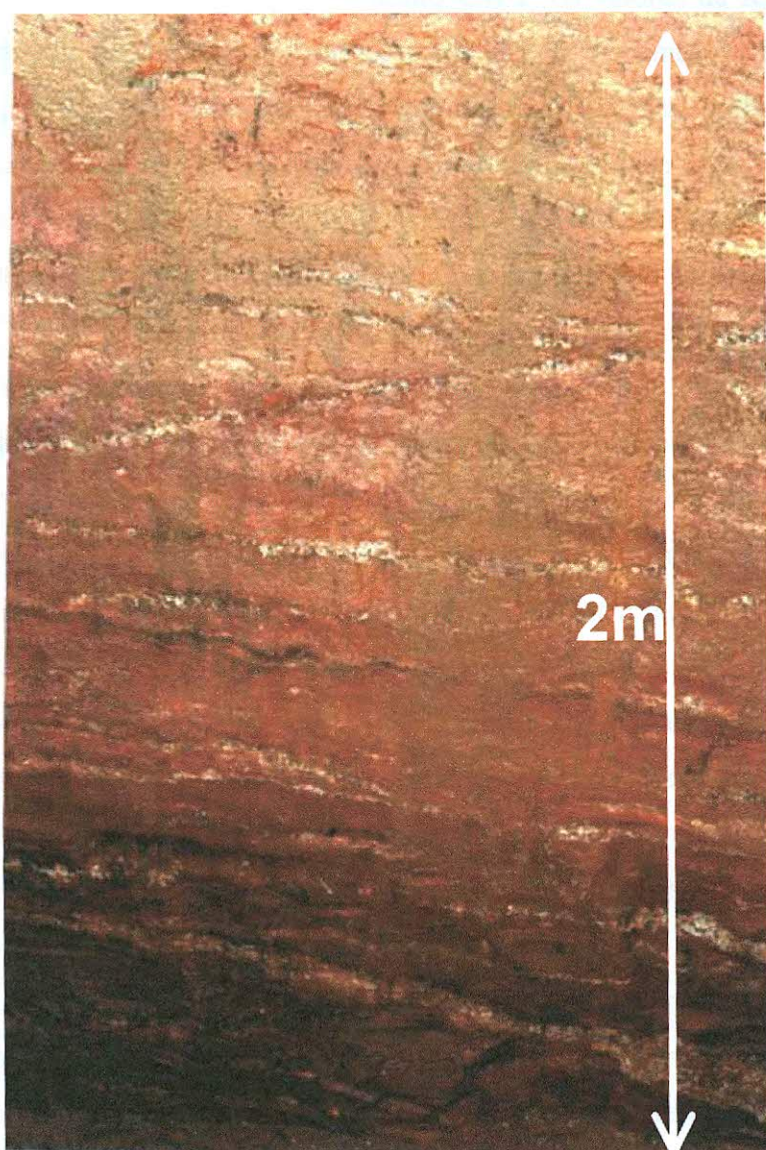


Figura 67 – Perfil do ponto C4P4 localizado no interior da cicatriz com feições da rocha ainda bem preservadas.

3. Ensaio da K_{sat} em Laboratório

Embora os valores da K_{sat} estimados através das amostras coletadas em duas direções diferentes (vertical e horizontal) tenham variado na mesma ordem de magnitude (Figura 68), com exceção do ponto C4P2, os valores da K_{sat} das amostras coletadas na direção vertical foram superiores aos valores das amostras horizontalmente orientadas. Embora outras investigações devam ser feitas na área, pode-se sugerir uma possível orientação preferencial dos fluxos nestes pontos estudados.

Resultado similar foi obtido Reynolds e Elrick (1985) com amostras indeformadas também coletadas vertical e horizontalmente. Tais autores mostraram que os valores da K_{sat} das amostras orientadas verticalmente foram maiores do que aqueles obtidos através das amostras horizontais, uma vez que nos perfis onde foram feitas estas estimativas, os autores observaram que o sistema de macroporos tinha uma orientação preferencialmente na direção vertical.

Comparando-se os valores da K_{sat} estimados em laboratório (vertical e horizontal) com aqueles estimados *in situ* com o permeâmetro de Guelph (K_{sat-U}) pôde-se observar (Figura 69) que estes últimos foram menores na maioria das amostras, exceto nos pontos C3P4 e C4P2 em que os valores *in situ* foram superiores aos valores da K_{sat} das amostras estimadas em laboratório. No entanto, os valores da K_{sat-U} se aproximaram das amostras verticais no ponto C3P4 e dos valores das amostras horizontais no ponto C4P2. Esta última observação pode contribuir para a hipótese de uma direção horizontal preferencial dos fluxos neste ponto.

Este tipo de comparação entre valores da K_{sat} obtidos *in situ* e aqueles estimados com amostras indeformadas também foi realizado por Paige e Hillel (1993), em solos com diferentes texturas (arenosos e argilosos). Os referidos autores puderam perceber que os valores obtidos *in situ* com o PG foram menores do que aqueles obtidos no ensaio de laboratório, fato este associado à “impermeabilização” da parede do furo e à presença de macroporos que podem apresentar-se descontínuos *in situ*, mas em pequenas amostras de laboratório tornam-se contínuos gerando maiores valores de K . Tais justificativas também foram citadas por Shoeneberger et al. (1995), após compararem os resultados obtidos *in situ* e em laboratório. Tais autores, como já citado no item 3 deste trabalho, estimaram a K_{sat} em perfis de solos argilosos formados sobre

uma rocha gnáissica bastante fraturada e perceberam que as diferenças entre os valores da condutividade hidráulica variavam de acordo com o tipo de material ensaiado. No horizonte C, por exemplo, composto por um material saprolítico bastante arenoso, desestruturado, com pouquíssimas raízes e um baixo teor de argila, os valores da K_{sat} de laboratório foram similares àqueles estimados *in situ*, pois o baixo conteúdo de argila diminuiu o efeito da impermeabilização do furo feito *in situ* e a ausência de raízes e de uma estrutura do solo impediram a formação de macroporos. No entanto, a forte presença dos macroporos no horizonte B_t desses solos superestimaram os valores da K_{sat} em laboratório.

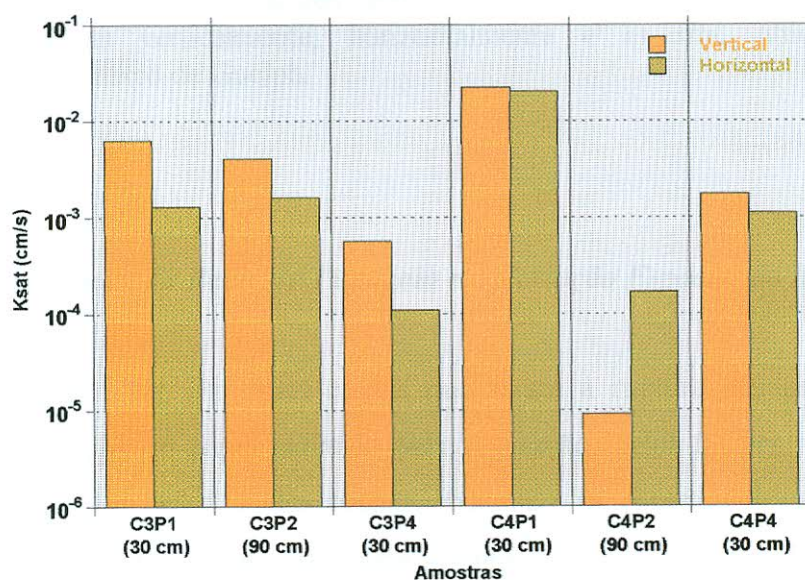


Figura 68 - Comparação dos resultados obtidos através de ensaios de laboratório com amostras indeformadas coletadas horizontalmente e verticalmente.

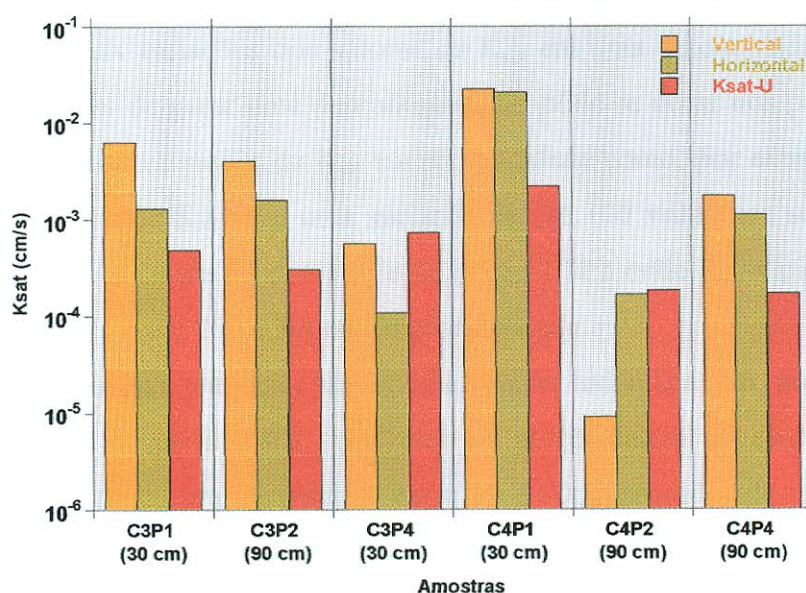


Figura 69 - Comparação dos valores obtidos em laboratório através de amostras coletadas verticalmente, horizontalmente e *in situ*, utilizando-se o permeômetro de Guelph.

6.4. Escorregamentos da Bacia do Papagaio e a Variação Espacial da K_{sat}

A investigação das principais causas que levam à ruptura nas encostas deve considerar a integração do papel exercido pela vegetação, pelos fatores topográficos, pelas propriedades dos solos e das rochas, incluindo as características hidráulicas, mecânicas, químicas e mineralógicas e pela dinâmica da água dentro dos materiais. Desta forma, somente alguns dos inúmeros fatores condicionantes dos escorregamentos da bacia do Papagaio foram investigados neste trabalho.

Através das observações feitas em campo pôde-se observar que a ruptura ocorreu na cicatriz 4 aproximadamente a 150cm de profundidade, no contato entre o solo e o material saprolítico, e a cerca de 200cm nas cicatrizes 1 e 3, no contato entre o solo e um material de depósito. Tais materiais puderam ser identificados a partir da própria localização e das profundidades dos perfis (até 300cm) onde foram realizadas as estimativas da K_{sat} e das demais propriedades.

Embora seja necessário definir um padrão de descontinuidade hidráulica, ou seja, identificar quais variações dos valores da K_{sat} em uma determinada espessura do material são capazes de gerar uma descontinuidade, pôde-se notar nos perfis estudados algumas significativas variações da K_{sat} em profundidade como, por exemplo, no ponto C2P3 (Figura 55) onde K_{sat} teve uma variação de até 100 vezes nos seus valores em apenas 30cm de solo (entre 60 e 90cm) e no ponto C3P2 onde K_{sat} variou esta mesma ordem de magnitude entre 250 e 300cm de profundidade.

Esta significativa variação da condutividade hidráulica em profundidade foi também observada no perfil C4P2, localizado na porção lateral da cicatriz 4, onde os valores da K_{sat} sofreram um decréscimo entre 30 e 90cm seguidos de um aumento até 300cm. Este mesmo comportamento foi identificado por Campos (1993) em ensaios realizados com o PG em perfis de uma encosta no maço da Tijuca, formados por uma camada superficial de solo residual maduro de aproximadamente 1,0m de espessura sobrejacente a uma camada espessa de solo residual gnáissico de matriz arenosa, conforme mostra a Figura 70. Embora os perfis tenham sido estudados em outra área e através de interpretações diferentes daquelas usadas neste trabalho, pôde-se perceber um mesmo padrão de variação da K_{sat} com a profundidade que tende a se repetir em diferentes áreas nas encostas do Rio de Janeiro.

Devido à ausência de estudos anteriores na área, muitas outras investigações devem ser realizadas na tentativa de se identificar a origem dos materiais que compõem as encostas, principalmente, nas encostas onde um material de mais heterogêneo (presença de blocos de diferentes diâmetros envolvidos por uma matriz mais fina) foi identificado.

Neste trabalho tentou-se, através da estimativa da variação da condutividade hidráulica e das propriedades físicas, identificar a composição dos materiais de algumas encostas como, por exemplo, àquela onde se localiza a cicatriz 4. Nesta encosta (Figura 71) pode-se notar a presença de um solo bastante desenvolvido (horizontes A e B, sendo este último bastante espesso com cerca de 140cm de profundidade) sobre uma camada mais arenosa com estruturas da rocha sã (Gnaiss Archer) ainda bem preservadas. Quando os perfis C4P1 e C4P4, localizados no topo e no interior da cicatriz, respectivamente, são analisados em conjunto (Figura 72) nota-se uma seqüência dos valores da K_{sat} e da textura, mostrando nitidamente a sua formação original

anteriormente ao escorregamento. Além disso, a altura de 1,50m da parede da cicatriz pode indicar que esta ruptura ocorreu no contato entre o solo bastante desenvolvido e o saprolito onde valores da K_{sat} , em média, foram altos.

Embora seja necessário outras investigações sobre a composição e origem dos materiais da bacia, pôde-se também construir dois perfis das encostas onde se localizam as cicatrizes 1 e 3. Nestas, um material bastante heterogêneo, como já citado, está subjacente à um solo bastante desenvolvido (Figuras 73 e 74).

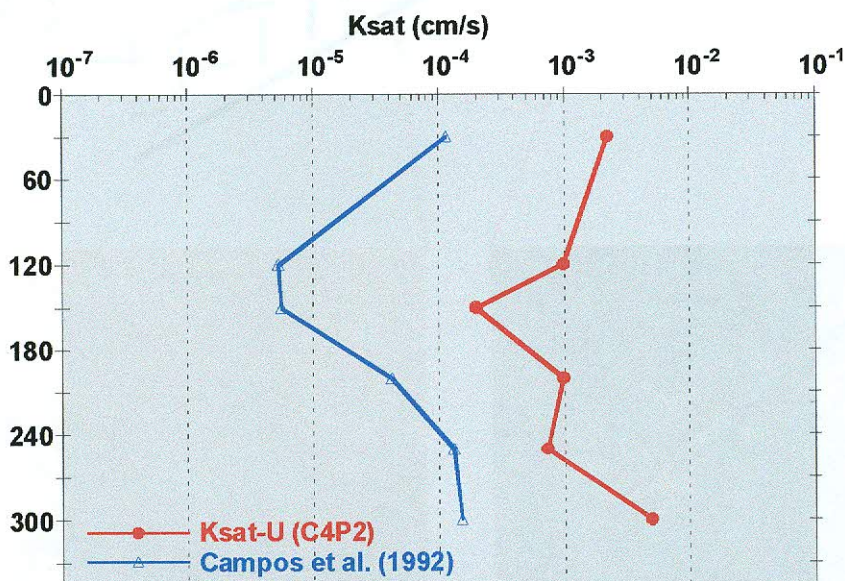


Figura 70 – Variação da condutividade hidráulica saturada com a profundidade em dois perfis. Pode-se observar o comportamento similar entre a variação da K_{sat} obtida no ponto C4P2 e aquela estimada por Campos et al. (1992).

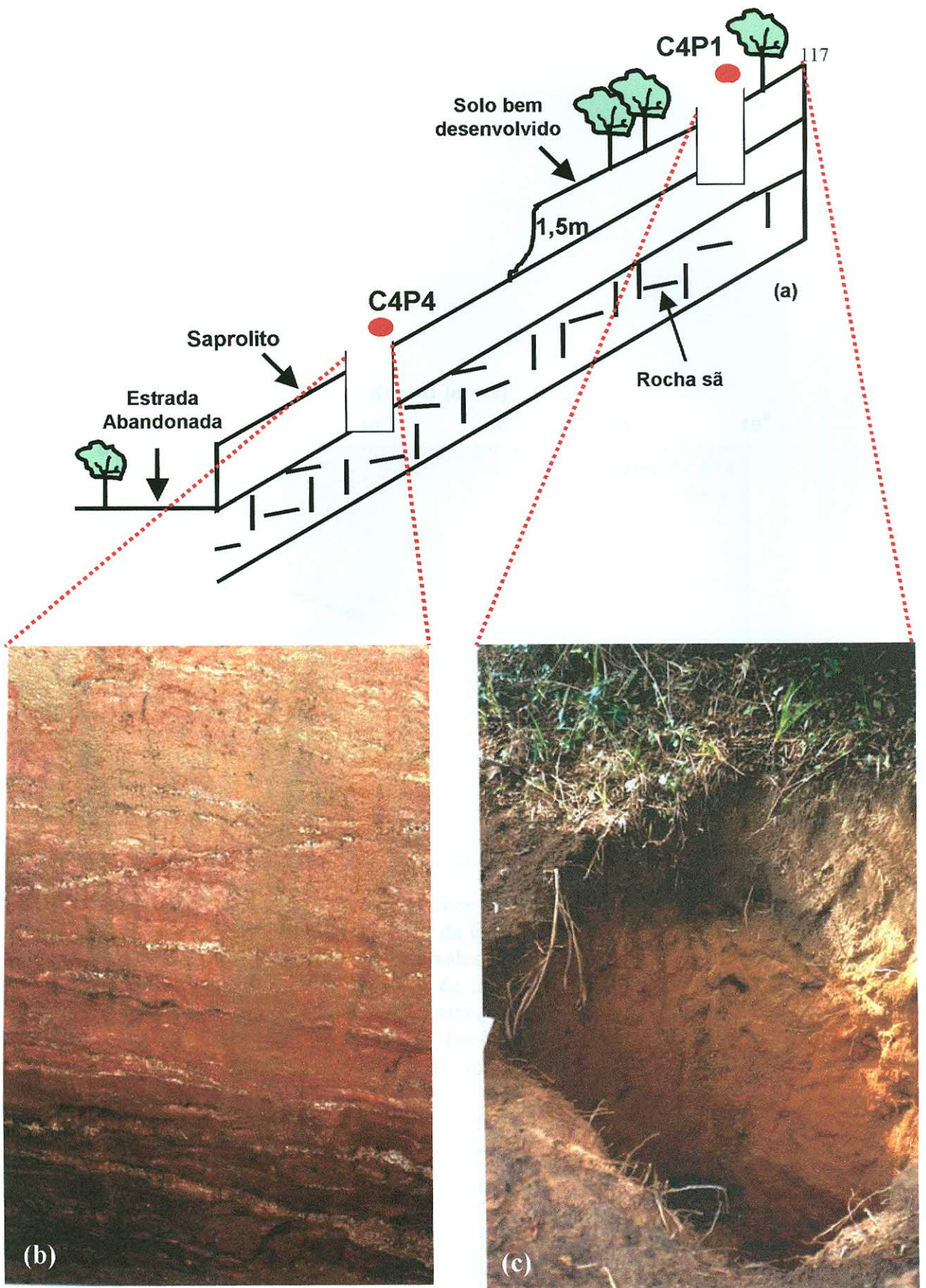


Figura 71 – Desenho esquemático da encosta onde se localiza a cicatriz 4 mostrando os materiais a compõem (solo bem desenvolvido sobre saprolito bastante arenoso) (a). Perfil do ponto C4P4 localizado no interior da cicatriz onde pode-se observar um material bastante preservado (b) e a trincheira aberta no ponto C4P1 onde pode-se notar um horizonte A bem desenvolvido com grande quantidade de raízes, sobre o horizonte Bt (c).

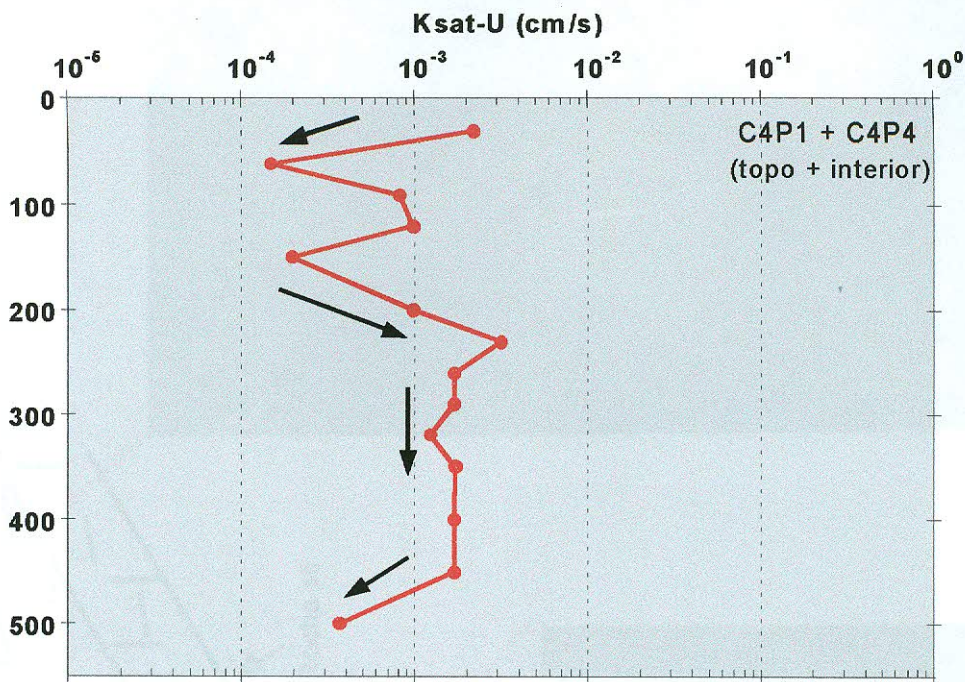


Figura 72 - Perfil construído a partir dos valores da K_{sat} obtidos nos pontos C4P1 (topo da cicatriz) e C4P4 (interior da cicatriz). Pode-se notar através das setas a seguinte variação da K_{sat} : valores médios mais baixos entre 60 e 120 cm (horizonte B), seguidos de um aumento entre 120 e 220 cm, quando a partir daí, já no material saprolítico bastante homogêneo, torna-se constante até cerca de 460 cm. Provavelmente devido à aproximação da rocha sã, os valores da K_{sat} sofrem redução entre 450 e 500 cm de profundidade.

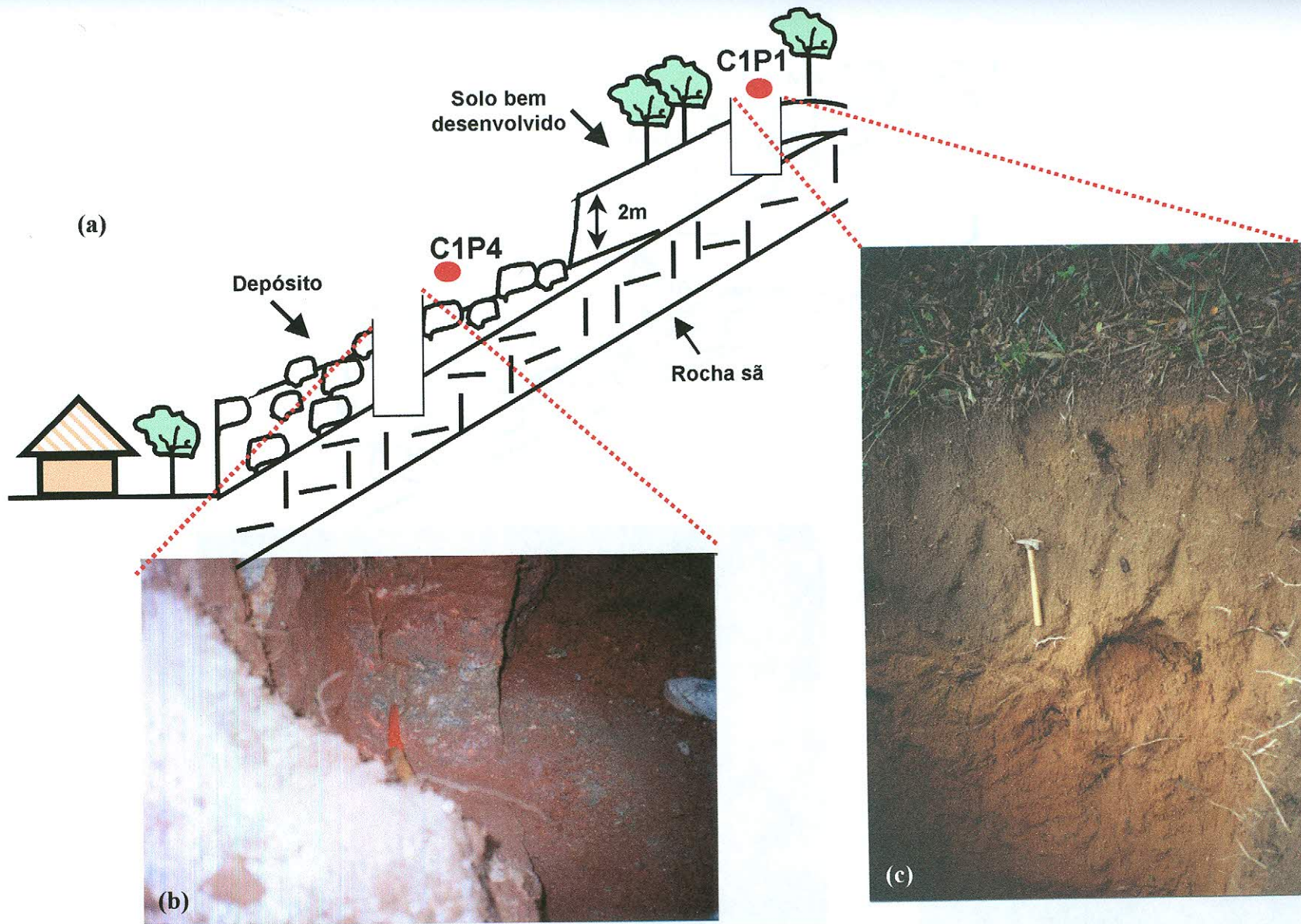


Figura 73 – Desenho esquemático da encosta onde se localiza a cicatriz 1 mostrando um solo bem desenvolvido sobre um material bastante similar a um tálus (a). Perfil do ponto C1P4 localizado no interior da cicatriz (b) e trincheira aberta no ponto C1P1 onde pode-se notar um horizonte A bem desenvolvido com grande quantidade de raízes, sobre o horizonte Bt (c).

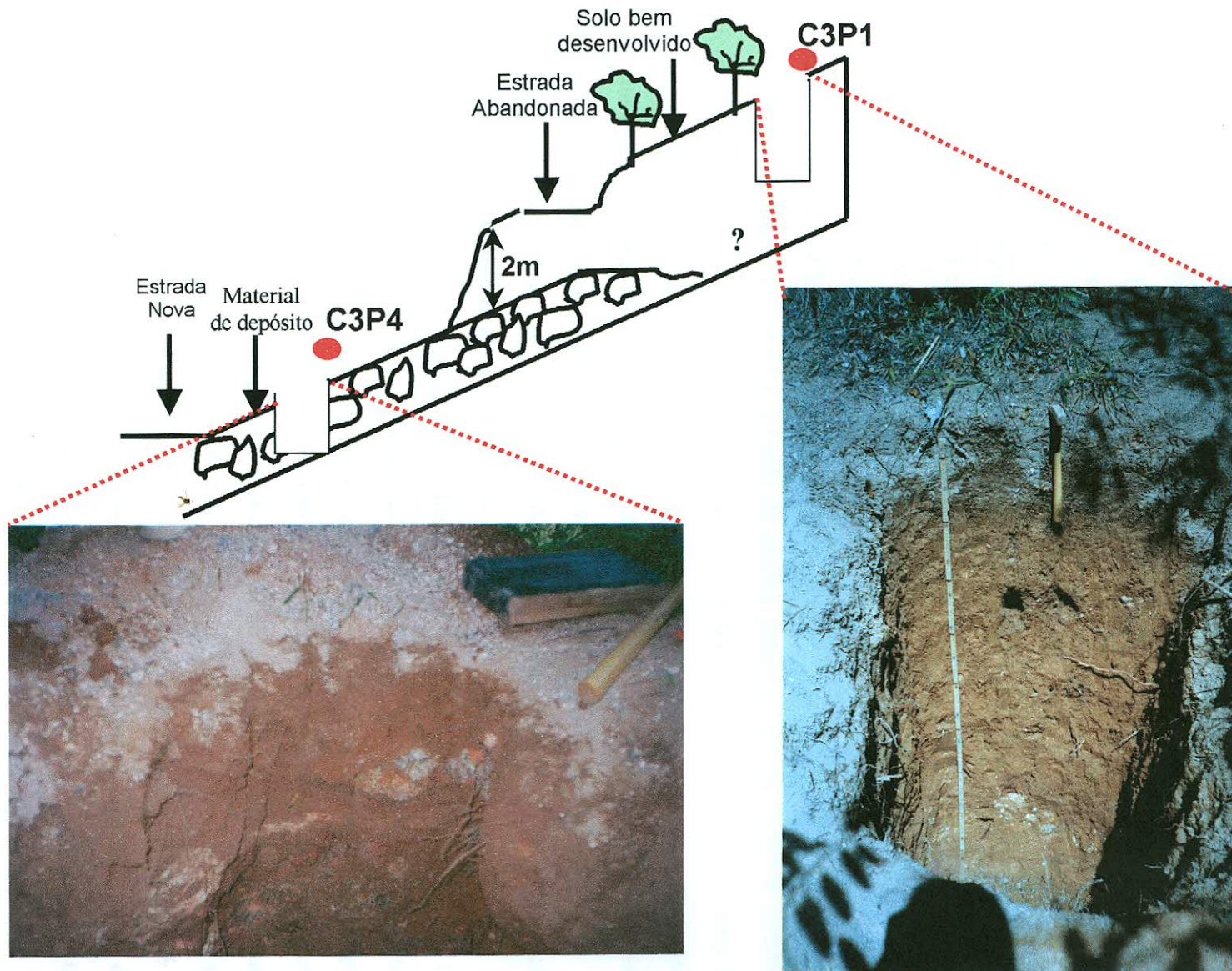


Figura 74 – Desenho esquemático da encosta onde se localiza a cicatriz 3 mostrando um solo bem desenvolvido sobre um material bastante similar a um tálus (a), perfil do ponto C1P3 localizado no interior da cicatriz (b) e trincheira aberta no ponto C1P3 onde pode-se notar um perfil bem desenvolvido com grande quantidade de raízes, (c).

7. Considerações Finais

Em termos práticos o PGM mostrou-se bastante eficiente durante os ensaios realizados em campo, principalmente, por ser rápido na obtenção dos dados, utilizar pouca quantidade de água e pela facilidade na sua montagem e utilização em encostas íngremes. Além disso, por ser montado com equipamentos baratos e de fácil reposição, a manutenção torna-se simples e de baixo custo.

A variação dos resultados obtidos através das três análises (K_{sat-R} ; K_{sat-L} ; K_{sat-U}) foram similares àquelas encontradas na literatura (Reynolds et al., 1985; Salverda e Dane, 1993; Reynolds e Zebchuk, 1996; Moreira, 1998; entre outros), em que os valores da K_{sat} analisados através de Laplace (K_{sat-L}) tendem a superestimar os valores obtidos através de Richards (K_{sat-R}), uma vez que o efeito da capilaridade do solo representado pelo terceiro termo da Equação 7 é desprezado.

Os valores da K_{sat} obtidos através da análise proposta por Elrick et al. (1989) foram satisfatórios, pois através destes, pôde-se avaliar a variação da K_{sat} com a profundidade identificando-se a presença ou não de discontinuidades dentro de perfis de alteração. Tal análise foi selecionada devido à grande porcentagem de valores negativos da K_{sat-R} que impediram uma análise contínua desta propriedade com a profundidade. No ponto C3P2, por exemplo, dos oito ensaios realizados apenas um valor positivo foi obtido através de Richards.

Considerando-se a grande variabilidade da condutividade hidráulica (até 13 ordens de magnitude) e a forte heterogeneidade dos materiais encontrados na área (tanto em termos de rochas quanto em termos de solos) não era esperado neste trabalho que grande parte dos valores da K_{sat} variassem em apenas duas ordens de magnitude ($1,0 \times 10^{-4}$ e $9,0 \times 10^{-3}$ cm/s). Porém, este intervalo de valores da K_{sat} poderá ser utilizado em simulações com o modelo SHALSTAB e, desta forma, aumentar sua precisão na identificação de áreas mais susceptíveis a escorregamentos rasos, uma vez que, até o momento as simulações foram feitas somente de forma simplificada onde os valores da K_{sat} introduzidos no modelo foram considerados constantes ao longo das bacias, ou mesmo descartados (Guimarães et al., 1998; Guimarães, 2000).

A estimativa dos valores da K_{sat} e das demais propriedades físicas dos solos em diferentes porções do relevo, e principalmente no interior das cicatrizes, foi de suma importância na investigação da variabilidade espacial destas propriedades e na

identificação dos materiais que compõem estas encostas, uma vez que não existem trabalhos anteriores que tenham discutido as características desses mantos de alteração da bacia do Papagaio.

A análise das principais propriedades físicas dos solos, que estão diretamente relacionadas com a condutividade hidráulica, foi fundamental durante as interpretações da variação desta propriedade em diferentes profundidades. A variação da textura, por exemplo, pôde explicar muitos dos valores da K_{sat} , como foi visto no ponto C3P1, onde o aumento da condutividade hidráulica (de $4,85 \times 10^{-4}$ para $1,70 \times 10^{-3}$ cm/s) foi acompanhado por uma significativa redução da argila (de 43 para 14%). O teor de cascalho presente no solo também mostrou ter influência direta no valor final da K_{sat} .

É de suma importância ressaltar que somente o levantamento da porosidade total não poderia explicar as variações da K_{sat} em alguns perfis estudados como, por exemplo, no ponto C1P4 onde a porosidade total não apresentou variações ao longo do perfil que justificassem o aumento da condutividade hidráulica com a profundidade. No entanto, quando é identificada a distribuição dos macroporos e microporos dos solos, o comportamento da K_{sat} pode ser melhor avaliado como, por exemplo, no ponto C4P2 em que um aumento da macroporosidade com a profundidade, chegando a 26,18% em 300cm, pôde explicar o aumento dos valores da K_{sat} neste ponto, uma vez que a porosidade permaneceu constante ao longo do perfil.

Além da determinação de outras propriedades físicas, torna-se necessário a caracterização da composição mineralógica dos solos, uma vez que estas poderão influenciar na maior ou menor estabilidade da estrutura dos solos. Esta estabilidade é fundamental, pois qualquer mudança no conteúdo de água dos solos poderá provocar a abertura de fendas alterando os valores da condutividade hidráulica, conforme observado por Reynolds e Zebchuk (1996). Desta forma, a identificação do conteúdo inicial de água dos solos monitorados, embora não realizada neste estudo, torna-se importante, podendo explicar algumas variações dos valores da K_{sat} aqui observados.

Embora uma grande quantidade de valores da K_{sat} tenha sido estimada *in situ*, há a necessidade de se realizar tratamentos estatísticos com esses valores juntamente com a variação das propriedades físicas dos solos.

No que se refere à comparação entre os valores da K_{sat} obtidos em laboratório, percebe-se um claro predomínio da K_{sat} vertical sobre a horizontal, mesmo tendo

variado na mesma ordem de magnitude. Quanto à comparação entre os valores estimados *in situ* e em laboratório, a maioria dos valores *in situ* foram menores do que aqueles obtidos em laboratório, conforme já identificado por outros autores na literatura (Paige e Hillel, 1993; Salverda e dane, 1993; Reynolds e Elrick, 1985; entre outros). Tal resultado, pode estar relacionado à “impermeabilização” da parede do furo, e/ou à presença de macroporos e de raízes nos solos. Estas últimas, por exemplo, podem ter superestimados os valores da K_{sat} estimados nos primeiros 30cm no ponto C4P1.

A ruptura dos escorregamentos deflagrados em fevereiro de 1996 ocorreu, nas cicatrizes estudadas, no contato entre o solo bem desenvolvido pedologicamente (residual maduro) e o material saprolítico (residual jovem) abaixo, como por exemplo na cicatriz 4. Em outros locais tal ruptura se deu entre este solo bem desenvolvido pedologicamente e um material mais heterogêneo abaixo, mostrando a presença de blocos de diferentes diâmetros envolvidos por uma matriz mais fina, tal como pode ser encontrado nas cicatrizes 1 e 3. No entanto, na cicatriz 2 torna-se necessário um aprofundamento dos estudos ali realizados, visando a obtenção de mais estimativas sobre o comportamento da K_{sat} em profundidade.

Embora algumas significativas variações dos valores tenham sido observadas em alguns perfis estudados como, por exemplo, no ponto C2P3 onde K_{sat} teve uma variação de até 100 vezes nos seus valores em apenas 30cm de solo (entre 60 e 90cm), nos estudos sobre mecanismos de rupturas nas encostas é fundamental a definição de padrões de descontinuidades hidráulica para melhor identificar pontos nos perfis que possam levar ao desenvolvimento de poro-pressões positivas e conseqüentemente a ruptura nas encostas.

Estudos futuros deverão aprofundar as investigações aqui realizadas, envolvendo mapeamentos estruturais de campo de detalhe, um aumento no número de pontos ensaiados e o monitoramento da sucções (potencial matricial) nos solos.

8. Referências Bibliográficas

- Anderson, M. G. e Burt, T. P. (1978). *The role of topography in controlling throughflow generation*. Earth Surface Processes and Landforms, 3: pp 331- 344.
- Avelar, A. d. S. e Coelho Netto, A. L. (1992). *Fluxos d'água subsuperficiais associados a origem das formas côncavas do relevo*. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - 1º COBRAE, Rio de Janeiro, 2: pp 709-719.
- Bovi, M. L. A.; Vieira, S. R.; Spiering, S. H.; Monteiro, S. M. G. e Gallo, P. B. (1997). *Relações entre crescimento de pupunheira e alguns parâmetros físicos do solo*. XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Rio de Janeiro. CD Room.
- Brady, N. C. (1989). *Natureza e propriedades dos solos*. Freitas Bastos. Rio de Janeiro. 878p.
- Brooks, S. M. e Richards, K. S. (1993). *Establishing the role of pedogenesis in changing soil hydraulic properties*. Earth Surface Processes and Landforms, 18: pp573-578.
- Brugger, P. J.; Ehrlich, M. e Lacerda, W. A. (1997). *Movements, piezometric level and rainfall at two natural soil slopes*. 2ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas/2nd Pan-American Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, 2: pp 13-19.
- Campos, J. L. E.; Vargas Jr., E. A. e Campos, T. M. P. (1992). *Avaliação de campo da permeabilidade não-saturada de solos em encostas*. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - 1ª COBRAE, Rio de Janeiro, 1: pp 371-381.
- Campos, J. L. E. (1993). *Um estudo numérico e experimental da permeabilidade saturada e não saturada de solos de encostas do Rio de Janeiro*. Depto. Eng. Civil. PUC-Rio. Rio de Janeiro, 71p.
- Caputo, H. P. (1981). *Mecânica dos solos e suas aplicações - mecânica das rochas, fundações, obras de terra*. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 234p.
- Chappell, N. A. e Ternan, J. L. (1997). *Ring permeametry: design, operation and error*. Earth Surface Processes and Landforms, 22: pp 1197-1205.
- Collins, B. e Znidarcic, D. (1997). *Triggering mechanisms of rainfall induced debris flows*. 2ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas/2nd Pan-American Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, 2: pp 277-286.
- Daniel, D. E. (1989). *In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay*. Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, 115(9): pp 1205-1226.

- Dietrich, W. E. e Montgomery, D. R. (1998). *SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. National Council for Air and Stream Improvement. 26p.
- Dietrich, W. E. e Dunne, T. (1978). *Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain*. Zeitschrift für Geomorphologie Supplement, 29: pp 191-206.
- Dunne, T. (1970). *Runoff production in a humid area*. United States Department of Agriculture Report ARS 41, 160p.
- Elrick, D. E.; Reynolds, W. D. e Tan, K. A. (1989). *Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses*. Ground Water Monit. Rev., 9: pp 184-193.
- EMBRAPA (1996). *Manual de métodos de análise de solo*. SNLSC. Rio de Janeiro. 212p.
- Fernandes, N. F. e AMARAL, C. P. (1996). *Movimentos de massa: Uma abordagem geológico-geomorfológica*. In: Geomorfologia e meio ambiente. Guerra, A. J. T. e Cunha, S. B. (Org). Bertrand Brasil, Rio de Janeiro. pp 123-194.
- Fernandes, N. F.; Coelho Netto, A. L. e Lacerda, W. A. (1994). *Subsurface hydrology of layered colluvium mantles in unchannelled valleys - Southeastern Brazil*. Earth Surface Processes and Landforms, 19: pp 609-626.
- Fetter, C. W. (1994). *Applied hydrogeology*. Macmillan College Publ. Co., New York. 691p.
- Freeze, R. A. e Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, Prentice Hall. 604p.
- Gao, J. (1993). *Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, U.S.A.* Earth Surface Processes and Landforms, 18: pp 579-591.
- GEORIO, F. (1996). *Estudos geológicos-geotécnicos a montante dos condomínios capim melado e vilarejo, Jacarepaguá*. Relatório Técnico. Rio de Janeiro. 96p.
- Greenway, D. R. (1987). *Vegetation and slope stability*. In: Slope stability: Geotechnical engineering and geomorphology. Anderson, M. G. e Richards, K. S. (Org). Chichester, Wiley. pp 187-230.
- Guerra, A. J. T. (1995). *Processos erosivos nas encostas*. In: Geomorfologia - Uma atualização de bases e conceitos. Guerra, A. J. T. e Cunha, S. B. (Org). Bertrand Brasil, Rio de Janeiro. pp 149-209.

- Guerra, A. T. e Guerra, A. J. T. (1997). *Novo dicionário geológico-geomorfológico*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. 648p.
- Guidicini, G. e Nieble, C. M. (1984). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. Edgard Blücher Ltda., São Paulo. 194p.
- Guimarães, R. F. (2000). *A modelagem matemática na avaliação de áreas de risco a deslizamentos: o exemplo das bacias dos rios Quitite e Papagaio (RJ)*. Tese de Doutorado. Depto de Geologia. UFRJ. Rio de Janeiro. 143p.
- Guimarães, R. F.; Montgomery, D. R.; Greenberg, H. M.; Gomes, R. A. T.; Vieira, B. C. e Fernandes, N. F. (1999). *Aplicação do Modelo SHALSTAB para Determinação de Áreas de Risco a Escorregamentos Rasos em Regiões Tropicais*. XIX Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Águas de São Pedro (SP), ABGE. CD Room.
- Guimarães, R. F.; Vieira, B. C.; Gomes, R. A. T. e Fernandes, N. F. (1998). *Avaliação estatística de parâmetros fito-morfológicos nas cicatrizes dos movimentos de massa da bacia do Rio Quitite, Jacarepaguá (RJ)*. XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte (MG). p 417.
- Harp, E. L.; Wells II, W. G. e Sarmiento, J. G. (1990). *Pore pressure response during failure in soils*. Geol. Soc. Am. Bull., 102: pp 428-438.
- Jabro, J. D. (1996). *Variability of field-saturated hydraulic conductivity in a Hagerstown soil as affected by initial water content*. Soil Science, 161(11): pp 735-738.
- Kiehl, E. J. (1979). *Manual de edafologia*. Editora Agronômica "Ceres". São Paulo. 262p.
- Kurupparachchi, T. e Wyrwoll, K. H. (1992). *The role of vegetation clearing in the mass failure of hillslopes: Moresby Ranges, Western Australia*. *Catena*, 19: pp 193-208.
- Lacerda, W. A. (1997). *Stability of natural slopes along the tropical coast of Brazil*. Proceeding of the Internacional Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Almeida, M., Brookfield. pp 17-39.
- Lacerda, W. A.; Santos Jr., O. F. e Ehrlich, M. (1997). *Efeitos das variações de poro-pressão sobre a estabilidade de encostas em solos residuais*. 2ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas/2nd Pan-American Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, 2: pp 381-388.
- Lacerda, W. A. e Sandroni, S. (1985). *Movimentos de massas coluviais*. Mesa Redonda sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas, Clube de Engenharia, Rio de Janeiro.

- Libardi, P. L. (1995). *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba, Edição do Autor. 497p.
- Little, J. A.; Silver, R. K. e Joseph, J. B. (1995). *In situ permeability testing of partially saturated soils using a sealed double ring infiltrometer*. Unsaturated Soils/ Soils Non Saturés. A. Delage: pp 525-533.
- Martins, V. M.; Cunha, J. E. e Castro, S. S. (2000). *Determinação in situ da condutividade hidráulica em áreas de fraca declividade sob pastagem e culturas temporárias*. III Simpósio Nacional de Geomorfologia, Campinas - São Paulo. p 170.
- Meis, M. R. M.; Coelho Netto, A. L. e Moura, J. R. S. (1985). *As descontinuidades nas formações colúviais como condicionantes dos processos hidrológicos e de erosão acelerada*. Simpósio Nacional de Controle à Erosão, Maringá-PR, ABGE.
- Meis, M. R. M.; Moura, J. R. S. e Silva, T. J. O. (1981). *Os "complexos de rampa" e a evolução das encostas no Planalto Sudeste do Brasil*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 53(3): pp 605-615.
- Montgomery, D. R.; Wright, R. H. e Booth, T. (1991). *Debris flow hazard mitigation for colluvium-filled swales*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 28: pp 303-323.
- Moreira, B. D. M. (1998). *Estudo experimental da permeabilidade saturada - não saturada de um solo de uma encosta do Rio Janeiro*. Depto. de Engenharia Civil. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 79p.
- Moreira, I. C. (1999). *Avaliação das áreas de risco ambientais urbanos do vale do Quitite - Jacarepguá- RJ*. Depto. de Geociências. UFRRJ: Rio de Janeiro. 49p.
- Oliveira, A. M. S. e Filho, D. C. (1996). *Ensaio de permeabilidade em solos. Orientações para execução no campo*. ABGE. São Paulo. 33p.
- Oliveira, R. R.; Zaú, A. S.; Lima, D. F.; Pedrosa, D. S.; Silva, M. B. R. e Vianna, M. C. (1992). *As Duas Florestas*. In: A Floresta da Tijuca e a cidade do Rio de Janeiro. Cezar, A. O. e Oliveira, R. R. (Org). Nova Fronteira. Rio de Janeiro, 162p.
- Paige, G. B. e Hillel, D. (1993). *Comparison of three methods for assessing hydraulic properties*. Soil Sci, 156: pp 175-189.
- Prandini, F. L.; Guidicini, G.; Bottura, J. A.; Ponçano, W. L. e Santos, A. E. (1976). *Resenha crítica da atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas*. Proc. 2nd Brazilian Conference on Tropical Forest, Mossoró, Rio Grande do Norte. pp 46-58.

- Reneau, S. L. e Dietrich, W. E. (1987). *The importance of hollows in debris flow studies; examples from Marin County, California*. In: Debris flows/avalanches: Process, recognition and mitigation. Costa, J. E. e Wieczorek, G. F. (Org). Boulder, Colorado, Geological Society of America, VII: pp 165- 179.
- Reneau, S. L. e Dietrich, W. E. (1990). *Depositional history of hollows on steep hillslopes, coastal Oregon and Washington*. National Geographic Research, 6: pp 220-230.
- Reneau, S. L.; Dietrich, W. E.; Wilson, C. J. e Roger, J. D. (1984). *Colluvial deposits and associated landslide in the northern San Francisco Bay area, California, USA*. IV Internatinal Symposium on Landslides, Toronto, Canada. pp 425-430.
- Reynolds, W. D. (1986). *The Guelph permeameter method for in situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity and matric flux potencial*. Guelph, PhD Thesis. University of Guelph, Canadá. 345p.
- Reynolds, W. D. e Elrick, D. E. (1985). *In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the alpha-parameter using the Guelph Permeameter*. Soil Sci., 140(4): pp 292-302.
- Reynolds, W. D. e Elrick, D. E. (1985). *Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and conductivity-pressure head relationship using the Guelph Permeameter*. Proceedings, National Water Association Conference on Characterisation and Monitoring of Vadose (Unsaturated) Zone, Denver, Colorado-EUA.
- Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. e Clothier, B. E. (1985). *The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow*. Soil Sci., 139: pp 172-180.
- Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. e Topp, G. C. (1983). *A reexamination of the constant-head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table*. Soil Sci, 136(4): pp 250-268.
- Reynolds, W. D.; Vieira, S. R. e Topp G.C. (1992). *An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter*. Canadian Journal Soil Science, Ottawa, 72: pp 489-501.
- Reynolds, W. D. e Zebchuk, W. D. (1996). *Hydraulic conductivity in a clay soil: two measurement techniques and spatial characterization*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 60: pp 1679-1685.
- Salverda, A. P. e Dane, J. H. (1993). *An examination of Guelph permeameter for measuaring the soil's hydraulic properties*. Geoderma, 57: pp 405-421.

- Schoeneberger, P. J., A. Amoozergar, et al. (1995). *Physical property variation of soil and continuum at three geomorphic positions*. *Geoderma* 46: pp 31-49.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope materials & processes*. Oxford University Press. New York. 446p.
- Sidle, R. C.; Pearce, A. J. e O'Loughlin, C. L. (1985). *Hillslope stability and land use*. American Geophysical Union. Washington. 141p.
- Silva, E. R. (1996). *Propriedades físicas e características hidrológicas dos solos da estação de agrometeorologia da UFRJ*. Departamento de Geografia - IGEO - UFRJ: Rio de Janeiro. 72p.
- Silveira, A. L.; Louzada, J. A. e Beltrame, L. (1993). *Infiltração e armazenamento no solo*. In Hidrologia - Ciência e Aplicação. Tucci, C. E. M. (Org), São Paulo. pp 335-372.
- Souza, A. P.; Mendes, C. A. R. e Mahler, C. F. (2000). *Mensuração do potencial mátrico através de tensiômetros, TDR e GMS p/ fins de monitoramento dos fluxos de água nos solos*. III Simpósio Nacional de Geomorfologia, Campinas - São Paulo. p 146.
- Stephens, D. B. (1996). *Vadose zone hydrology*, Lewis Publishers. 347p.
- Tsukamoto, Y.; Ohta, T. e Noguchi, H. (1982). *Hydrological and geomorphological studies of debris slides on forested hillslopes in Japan*. International Association of Hydrological Scientists Publication, 137: pp 89-98.
- Vargas Jr, E.; Oliveira, A. R. B.; Filho, L. M. C. e Campos, L. E. P. (1986). *A Study of the Relationship Between the Stability of Slopes in Residual Soils and Rain Intensity*. International Symposium on Environmental Geotechnology, U.S.A, Envo Publishing. pp 491-500.
- Vieira, B. C. (1998). *Estudo Comparativo dos Movimentos de Massa Ocorridos em Fevereiro de 1996 nas Bacias dos Rios Quitite e Papagaio, Jacarepaguá (RJ)*. IGEO/Depto. de Geografia, UFRJ. Rio de Janeiro 61p.
- Vieira, B. C.; Junior, E. C. e Fernandes, N. F. (1998). *Controles fito-morfológicos dos escorregamentos da bacia do Quitite (RJ)*. Revista GEOSUL, 27: pp 324-328.
- Vieira, B. C.; Vieira, A. C. F.; Fernandes, N. F. e Amaral, C. P. (1997). *Geomorfologia, cobertura e uso dos solos como fatores controladores da magnitude dos deslizamentos em bacias de drenagem*. XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Rio de Janeiro. CD Room.
- Wang, C.; Mckeague, J. A. e Switzer-House, K. D. (1985). *Saturated hydraulic conductivity as an indicator of structural degradation in clay solis of Ottawa area, Canada*. Soil & Tillage Research, 5: pp 19-31.

- Willatt, S. T. e Pullar, D. (1983). *Changes in soil physical properties under grazed pastures*. Aust. J. Soil Res., 22: pp 343-348.
- Wilson, C. J. (1988). *Runoff and pore pressures in hollows*, PhD. Dissertation. University of California, Berkeley. 284p.
- Wolle, C. M. e Carvalho, C. S. (1989). *Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil*. Solos e Rochas, 12: pp 27-36.
- Wolle, C. M. e Carvalho, C. S. (1994). *Taludes Naturais*. In: Solos do litoral de São Paulo. Falconi, F. F. e Negro Jr., A. (Org). Associação Brasileira de Mecânica de Solos - Núcleo Regional de São Paulo - ABMS. São Paulo. pp 180-203.

9 – Anexos

Anexo 1 – Desenvolvimento simplificado da Equação 6 a partir da Figura 10.

a) Considerando a Lei de Darcy ($V=Ki$),

$$\bar{v}_g = -K_{fs} \left. \frac{\partial \psi_z}{\partial z} \right|_{z=0} \hat{k} \quad (\text{i})$$

$$\bar{v}_{zp} = -K_{fs} \left. \frac{\partial \psi_p}{\partial z} \right|_{z=0} \hat{k} \quad (\text{ii})$$

$$\bar{v}_{rp} = -K_{fs} \left. \frac{\partial \psi_p}{\partial r} \right|_{r=a} \hat{r} \quad (\text{iii})$$

onde,

\hat{k} - vetor da direção z
 \hat{r} - vetor da direção r
 ψ_p - carga de pressão
 ψ_z - carga de elevação

b) O fluxo total (Q) dentro do furo é escrito,

$$Q_t = \int_{A_w} \bar{v}_{rp} \cdot d\bar{A}_w + \int_{A_b} \bar{v}_{zp} \cdot d\bar{A}_b + \int_{A_b} \bar{v}_g \cdot d\bar{A}_b \quad (\text{iv})$$

c) Onde dA_w e dA_b representam a área diferencial da parede e da base do furo

$$d\bar{A}_w = 2\pi a \, dz(\hat{r}) \quad (\text{v})$$

$$d\bar{A}_b = 2\pi r \, dr(-\hat{k}) \quad (\text{vi})$$

d) Substituindo as equações i, ii, iii, v e vi dentro da equação iv, tem-se Equação vii:

$$Q_t = \pi K_{fs} \left[-2a \int_0^H \frac{\partial \psi_p}{\partial r} \Big|_{r=a} dz + 2 \int_0^a \frac{\partial \psi_p}{\partial z} \Big|_{z=0} r dr + a^2 \right] \quad (\text{vii})$$

e) Tornando a Equação vii adimensional através de variáveis dimensionais, obtêm-se a Equação viii resolvendo-se para K.

$$K_{fs} = \frac{Q_t}{2\pi H^2 \underbrace{\left[- \int_0^1 \frac{\partial \psi_p^*}{\partial r^*} \Big|_{r^*=1} dz^* + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \int_0^1 \frac{\partial \psi_p^*}{\partial z^*} \Big|_{z^*=0} r^* dr^* + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right]}_C} \quad (\text{viii})$$

f) Onde C é igual a:

$$C = \frac{1}{\left[- \int_0^1 \frac{\partial \psi_p^*}{\partial r^*} \Big|_{r^*=1} dz^* + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \int_0^1 \frac{\partial \psi_p^*}{\partial z^*} \Big|_{z^*=0} r^* dr^* \right]} \quad (\text{ix})$$

g) Para encontrar o valor da K_{fs} ou K_{sat} utiliza-se a Equação x.

$$K_{fs} = \frac{CQ_t}{2\pi H^2 \left[1 + \frac{C}{2} \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right]} \quad (\text{x})$$

Anexo 2 – Desenvolvimento simplificado da Equação 8 a partir da Figura 10 e considerando fluxos não saturados (baseado em Richards).

a) Considerando a Lei de Darcy-Buckingham,

$$v_{rp} = -K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=a} \hat{r} \quad (\text{i})$$

$$v_{zp} = -K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=a} \hat{k} \quad (\text{ii})$$

$$v_g = -K(\psi) \frac{\partial \psi_z}{\partial z} \Big|_{z=a} \hat{k} = -k_{fs} \hat{k} \quad (\text{iii})$$

b) As Equações i e ii representam a influência combinada da zona saturada (bulbo saturado) do entorno não saturado e da carga de pressão inicial. Assim, K_{fs} ou K_{sat} substitui $K(\psi)$ na Equação iii porque quando $z=0$ V_g depende somente de K e considerando o potencial matricial definido por Gardner (1958).

$$\phi = \int_{\Psi_1}^{\Psi} K(\Psi) d\Psi \quad (\text{iv})$$

$$\bar{v}_{zp} = - \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} \hat{k} \quad (\text{v})$$

$$\bar{v}_{rp} = - \frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=a} \hat{r} \quad (\text{vi})$$

c) Seguindo a mesma seqüência do Anexo 1, o fluxo sob influência da zona não saturada pode ser medido através da Equação vii.

$$Q_t = 2\pi H^2 \left[\underbrace{-\frac{a}{H^2} \int_b^H \frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=a} dz + \frac{1}{H^2} \int_b^a \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} r dr}_{C^*} + \frac{K_{fs}}{2} \left(\frac{a}{H} \right)^2 \right] \quad (\text{vii})$$

d) Onde Q e K_{sat} (K_{fs}) podem ser encontrados através da Equação viii.

$$Q_t = \left[\left(\frac{2\pi H^2}{C^*} \right) + \pi a^2 \right] K_{sat} + \left(\frac{2\pi H}{C^*} \right) \phi_m \quad (\text{viii})$$