

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

EFEITO DO AVANÇO DA FRENTE DE UMIDADE NA
REDUÇÃO DA SUCCÃO E DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE UM PERFIL DE SOLO COLUVIONAR
EM MEDELLÍN-COLOMBIA

BRUNO ROGÉRIO DA HORA LÔBO

ORIENTADOR: HERNÁN EDUARDO MARTINEZ
CARVAJAL

CO-ORIENTADOR: EDWIN FABIAN GARCIA ARISTIZABAL

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 217/12

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO / 2012
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**EFEITO DO AVANÇO DA FRENTE DE UMIDADE NA
REDUÇÃO DA SUÇÃO E DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE UM PERFIL DE SOLO COLUVIONAR
EM MEDELLÍN-COLOMBIA**

BRUNO ROGÉRIO DA HORA LÔBO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

**HERNÁN EDUARDO MARTINEZ CARVAJAL, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**EDWIN FABIAN GARCIA ARISTIZABAL, DSc (UDEA)
(CO-ORIENTADOR)**

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**CARLOS ALEXANDER RE CAREY MORFA, PhD (UCLV)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 9 de NOVEMBRO de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

LÔBO, BRUNO ROGÉRIO DA HORA

Efeito do avanço da frente de umidade na redução da sucção e da resistência ao cisalhamento de um perfil de solo coluvionar em Medellín-Colômbia [Distrito Federal] 2012

xviii, p. 110, 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

- | | |
|--|---|
| 1. Infiltração em solos não saturados | 2. Modelagem numérica |
| 3. Estabilidade de taludes não saturados | 4. Redução na resistência ao cisalhamento |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LÔBO, B. R. H. (2012). Efeito do avanço da frente de umidade na redução da sucção e da resistência ao cisalhamento de um perfil de solo coluvionar em Medellín-Colômbia. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-217/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p 110.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno Rogério da Hora Lôbo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Efeito do avanço da frente de umidade na redução da sucção e da resistência ao cisalhamento de um perfil de solo coluvionar em Medellín-Colômbia.

GRAU / ANO: Mestre / 2012

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

BRUNO ROGÉRIO DA HORA LÔBO

Av. São Rafael, Cond. Bosque Imperial, Bl. 24 Ap. 302

CEP 41.250-580 São Marcos, Salvador/BA – Brasil

e-mail: bruno.rhl@hotmail.com

DEDICATÓRIA

Aos meus avós Cecilinho e Amelinha, Cachoeira (in memoriam) e Carmem (in memoriam).

Aos meus pais Roberto e Iara. Às minhas afilhadas lindas, Tetê, Duda e Ricka.

Agradecimentos

Quero começar agradecendo muito a Deus por tudo!

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Hernán Eduardo Martinez Carvajal e Prof. Dr. Edwin Fabian Garcia Aristizabal, pela a liberdade e confiança referente ao presente trabalho, além das indiscutíveis amizades e compreensão nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus colegas de mestrado PPG/UNB, em especial a Alex, Mateo, Ewerton, Vivi, Carol, Julieta, “El Perro”, Tati, Lívia. Obrigada pela força e por não terem me deixado desistir.

Agradeço de maneira muito especial a Marquinhos e Jana, por salvar a minha vida diversas vezes em Brasília e contribuir de maneira expressiva para conclusão não só dessa dissertação, mas sim de todo o mestrado.

Agradeço também de forma especial a “Ivo”, amiga fiel que esteve ao meu lado em momentos cruciais da elaboração dessa dissertação.

Agradeço a todos os amigos da geotecnia pelo enorme aprendizado, apoio e carinho. Na “geo” percebi que o aprendizado é uma construção diária cujo ingrediente principal é o afeto. A esta rede de apoio que me acolheu, os meus mais sinceros agradecimentos.

Quero agradecer a Sabrina por toda paciência de ser companheira de um louco em fase final de dissertação e por ter colaborado com muita boa vontade nesse período.

À Prof^a. Miriam de Fátima Carvalho e ao Prof. Sandro Lemos Machado agradeço a eles toda a base acadêmica fornecida, sem dúvidas são dois grandes exemplos de amor e dedicação à pesquisa. Muito obrigado de todo o coração!

Ao apoio financeiro fomentado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Deixar que os fatos sejam fatos naturalmente, sem que sejam forjados para acontecer. Deixar que os olhos vejam os pequenos detalhes lentamente. Deixar que as coisas que lhe circundam estejam sempre inertes, como móveis inofensivos, pra lhe servir quando for preciso, e nunca lhe causar danos, sejam eles, morais, físicos ou psicológicos

Chico Science

Os movimentos de massa causados pelas chuvas, geralmente denominados deslizamentos superficiais complexos, caracterizam-se por apresentar pequenos perfis com espessuras que variam entre 0,3 e 2,0 m. Para entender esses movimentos de terra provocados por chuvas em regiões montanhosas sob condições de clima tropical, este estudo buscou elucidar a questão da redução da sucção e a consequente perda de resistência em um perfil de solo coluvionar devido ao avanço da frente de umidade em um talude natural localizado na cidade de Medellin - Colômbia. Neste talude, o objetivo foi verificar a aplicabilidade da equação de Lumb (1975) para determinar o avanço da frente de umidade em perfis de solo não saturados, desencadeado pela infiltração da chuva. Esta equação é utilizada para calcular a profundidade crítica (profundidade onde a perda máxima de sucção ocorre). A profundidade crítica obtida pela equação de Lumb foi comparada com a obtida pelos perfis de sucção, antes e depois das chuvas. Os perfis de sucção foram obtidos a partir de simulações numéricas, utilizando um método de infiltração que inclui uma relação de sucção-saturação (van Genuchten, 1980). Com as propriedades do solo, os parâmetros de infiltração e da geometria do talude, foi possível obter os fatores de segurança para o talude estudado. Os resultados deste trabalho são a determinação de uma metodologia consistente para a determinação da profundidade crítica da frente de umidade gerado pela infiltração de chuva.

ABSTRACT

Slope failures caused by rainfall are characterized by shallow depths with thicknesses ranging between 0.3 and 2.0 m. In order to understand these landslides triggered by rainfalls in mountainous regions under tropical climate, this study tried to elucidate the issue of reduction of suction and the consequent loss of strength in a colluvial soil profile due to the advance of the wetting front in natural slopes located in the city of Medellin – Colombia. In these slopes, the purpose was to verify the applicability of the Lumb's equation (1975) in determining the advance of the water front on unsaturated soil profiles triggered by the rainfall infiltration. This equation is used to estimate the critical depth (depth where the maximum loss of suction occurs). The critical depth obtained by Lumb's equation was compared with that obtained by the suction profiles, before and after the rainfalls. The suction profiles were obtained from numerical simulations using a seepage method which includes a suction-saturation relationship (van Genuchten, 1980). With the soil properties, the infiltration parameters, and geometry of the slopes, it was possible to obtain the safety factors for the studied slopes. The results of this work are the determination of a consistent methodology for determining the critical depth of the water front generated by the rainfall infiltration.

Índice

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA | 2 |
| 1.2. OBJETIVOS | 3 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA | 4 |
| CAPÍTULO 2 | 5 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1. MOVIMENTOS DE MASSA CAUSADOS POR CHUVAS | 5 |
| 2.1.1. Histórico | 5 |
| 2.2. Solos não saturados | 6 |
| 2.3. Curva Característica dos solos | 9 |
| 2.3.1. Equações de ajuste da curva característica | 11 |
| 2.3.1.1. Equação de Van Genuchten (1980) | 11 |
| 2.3.1.2. Equação de Fredlund & Xing (1994) | 12 |
| 2.4. Lei de fluxo e propriedades hidráulicas | 12 |
| 2.4.1. Fluxo de água no solo | 13 |
| 2.4.2. Infiltração da água no solo | 14 |
| 2.4.3. Avanço da frente de umidade – profundidade crítica | 15 |
| 2.5. Comportamento mecânico dos solos não saturados | 16 |
| 2.6. Análise numérica unidimensional de infiltração em solos não saturados | 17 |
| 2.7. Resistência ao cisalhamento dos solos não saturados | 20 |
| CAPÍTULO 3 | 22 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO | 22 |
| 3.1. Equações Governantes | 22 |
| 3.2. Tensor de tensões | 22 |
| 3.3. Conservação de massa | 23 |
| 3.4. Conservação de momento | 24 |
| CAPÍTULO 4 | 28 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 28 |
| 4.1. Materiais | 28 |
| 4.1.1. Área de estudo | 28 |

| | | |
|------------|---|----|
| 4.1.2. | Geologia Superficial | 29 |
| 4.1.3. | Coleta da amostra | 32 |
| 4.1.4. | Caracterização Geotécnica | 33 |
| 4.1.5. | Ensaio de condutividade hidráulica | 34 |
| 4.1.5.1. | Infiltrômetro de anel ou cilindro duplo | 34 |
| 4.1.5.2. | Método Porchet | 36 |
| 4.1.5.2.1. | Base de dados – Permeabilidade | 37 |
| 4.1.6. | Ensaio de cisalhamento direto | 38 |
| 4.1.7. | Curvas características | 40 |
| 4.1.8. | Apresentação dos resultados de caracterização do solo | 42 |
| 4.1.8.1. | Curva Granulométrica e Limites | 42 |
| 4.1.8.2. | Cisalhamento direto | 45 |
| 4.1.8.3. | Curva Característica | 47 |
| 4.2. | Métodos | 48 |
| 4.2.1. | Infiltração no talude utilizando métodos numéricos | 48 |
| 4.2.2. | Características Geométricas do talude 1 | 48 |
| 4.2.3. | Condições de contorno | 49 |
| 4.2.4. | Infiltração no talude utilizando métodos analíticos | 50 |
| | CAPÍTULO 5 | 51 |
| 5. | Apresentação e análise dos resultados da modelagem numérica | 51 |
| 5.1. | Resultados das simulações | 51 |
| 5.2. | Comparação entre as profundidades críticas obtidas pelo método analítico e o método numérico | 66 |
| 5.3. | Cálculo dos fatores de segurança | 70 |
| 6. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 73 |
| 6.1. | Sugestões para pesquisas futuras | 74 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |
| 8. | ANEXOS | 80 |

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Variação do fator de segurança de uma encosta não saturada em função da sucção Ignacius et al. (1991)..... | 5 |
| Figura 2. 2 – Elemento de solo não saturado com fase ar contínua (Fredlund & Rahardjo, 1993- modificado)..... | 6 |
| Figura 2.3 – Representação da sucção osmótica..... | 7 |
| Figura 2.4- Representação da sucção matricial..... | 8 |
| Figura 2.5– Elementos da curva característica (modificado de Fredlund e Xing, 1994)..... | 9 |
| Figura 2.6- Curvas de retenção para diferentes tipos de solo (Fredlund& Xing, 1994)..... | 10 |
| Figura 2.7 - Tipos de fluxos do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total e b) medição da sucção matricial, Marinho (1995)..... | 10 |
| Figura 2. 8 - Avanço da frente úmida causada pela infiltração da água (Lumb, 1975). | 16 |

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Figura 4.1– Localização da estação pluviométrica SIATA e ilustração da área piloto de 1km ² | 28 |
| Figura 4. 2 – Localização da estação pluviométrica SIATA e ilustração da área piloto de 1km ² dentro do setor de Pajarito..... | 29 |
| Figura 4.3 – Mapa geológico com as diferentes unidades geológicas para o município de Medellín. | 31 |
| Figura 4.4 – Talude 1. | 32 |
| Figura 4.5 - Talude 2..... | 32 |
| Figura 4.6 - Dificuldade na amostragem devido à presença de blocos de pedra | 33 |
| Figura 4.7 - Amostra recém extraída em campo e posteriormente extraída do tubo em laboratório. | 33 |
| Figura 4.8 – Materiais utilizados no ensaio (martelo, anéis, tábua)..... | 35 |
| Figura 4.9 – Enchimento dos anéis com água..... | 35 |
| Figura 4.10 – Acompanhamento das medições..... | 36 |
| Figura 4.11 – Locais onde se realizaram os ensaios. | 36 |
| Figura 4. 12 - Ilustração do ensaio Porchet..... | 37 |
| Figura 4.13– Mapa de permeabilidade de Medellín..... | 38 |
| Figura 4.14 - Moldagem do corpo de provas | 39 |
| Figura 4.15 - Montagem da caixa de cisalhamento..... | 39 |
| Figura 4.16 - Extração do corpo de prova para a caixa de cisalhamento | 39 |
| Figura 4.17 – Acompanhamento das medições de cisalhamento direto | 40 |
| Figura 4.18 – Corpos de prova acondicionados na caixa térmica | 41 |
| Figura 4.19 – Curva granulométrica sem defloculante da Amostra 1 – Areia silto-argilosa com vestígios de pedregulho..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.20 – Curva granulométrica com defloculante da Amostra 1 – Argila areno-siltosa com vestígios de pedregulho. | 43 |
| Figura 4.21 – Curva granulométrica sem defloculante da Amostra 2 – Areia silto-argilosa com pedregulho. | 44 |
| Figura 4.22 – Curva granulométrica com defloculante da Amostra 2 – Argila areno-siltosa com pedregulho. | 44 |
| Figura 4.23 - Curva Tensão x Deformação - Amostra 1 – Umidade natural (40%). | 45 |
| Figura 4.24 - Curva Tensão x Deformação - Amostra 1 – Abaixo da Umidade natural (25%). | 45 |
| Figura 4.25 - Curva Tensão x Deformação - Amostra 1 – Acima da Umidade natural (78%). | 46 |
| Figura 4.26 - Curva Tensão Cisalhante x Sucção (b) - Amostra 1. | 46 |
| Figura 4.27 – Curva característica da Amostra 1. | 47 |
| Figura 4.28 – Curva característica da Amostra 2. | 47 |
| Figura 4.29 – Geometria, malha e localização do perfil no talude 1. | 49 |
| Figura 4. 30 – Esquematisação do contorno de deslocamento do talude 1. | 49 |
| Figura 4. 31 – Condições de infiltração | 50 |

Capítulo 5

| | |
|---|----|
| Figura 5.1 – Perfil de Sucção para a chuva de 1mm/h. | 51 |
| Figura 5.2 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 1mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h). | 52 |
| Figura 5. 3 – Perfil de saturação para a chuva de 1mm/h. | 52 |
| Figura 5.4 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 1mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (24h). | 53 |
| Figura 5.5 - Perfil de Sucção para a chuva de 4mm/h. | 53 |
| Figura 5.6 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 4mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h). | 54 |
| Figura 5.7 – Perfil de saturação para a chuva de 4 mm/h. | 54 |
| Figura 5.8 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 4mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h). | 55 |
| Figura 5.9 - Perfil de Sucção para a chuva de 8mm/h. | 56 |
| Figura 5.10 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 8mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h). | 56 |
| Figura 5.11 – Perfil de saturação para a chuva de 8 mm/h. | 57 |
| Figura 5.12 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 8 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h). | 57 |
| Figura 5.13 - Perfil de Sucção para a chuva de 12 mm/h. | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.14 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 12 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h) | 58 |
| Figura 5.15 – Perfil de saturação para a chuva de 12 mm/h | 59 |
| Figura 5.16 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 12 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h) | 59 |
| Figura 5.17 - Perfil de Sucção para a chuva de 16 mm/h | 60 |
| Figura 5.18 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 16 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h) | 60 |
| Figura 5.19 – Perfil de saturação para a chuva de 16 mm/h | 61 |
| Figura 5.20 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 16 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h) | 61 |
| Figura 5.21 – Perfil de sucção para a chuva de 24 mm/h | 62 |
| Figura 5.22 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 24 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h) | 62 |
| Figura 5.23 – Perfil de saturação para a chuva de 24 mm/h | 63 |
| Figura 5.24- Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 24 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (10h) – d) Perfil de saturação (24h) | 63 |
| Figura 5.25 – Perfil de sucção para a chuva de 50 mm/h | 64 |
| Figura 5.26 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 50 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h) | 64 |
| Figura 5. 27 – Perfil de saturação para a chuva de 50 mm/h. | 65 |
| Figura 5.28 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 50 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (14h) – d) Perfil de saturação (24h) | 65 |
| Figura 5.29 – Curva do Fator de segurança x Profundidade do talude, calculado para diferentes níveis sucções. | 71 |
| Figura 5.30 - Curva do Fator de segurança x Profundidade calculado para diferentes níveis sucções (Simulação de Ruptura). | 72 |

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

| | |
|---|---|
| Tabela 2. 1 - Métodos para a medida de sucção Vilar (1997)..... | 8 |
|---|---|

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Tabela 4. 1 – Listagem das diferentes unidades geológicas de Medellín. | 30 |
| Tabela 4.2 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização. | 42 |
| Tabela 4. 3 – Parâmetros utilizados para a realização da simulação..... | 48 |

Capítulo 5

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1- Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 4mm/h | 53 |
| Tabela 5.2- Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 8mm/h | 55 |
| Tabela 5.3 - Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 12mm/h. | 58 |
| Tabela 5.4- Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 16mm/h. | 60 |
| Tabela 5.5 - Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 24mm/h | 62 |
| Tabela 5.6 - Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 50mm/h | 64 |
| Tabela 5.7 – Tabela resumo do cálculo analítico de ($ZW - TW - vi$) para a chuva de 1 mm/h. | 66 |
| Tabela 5.8 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($ZW - TW - vi$) para a chuva de 4 mm/h. | 66 |
| Tabela 5.9 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($ZW - TW - vi$) para a chuva de 8 mm/h. | 67 |
| Tabela 5.10 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($ZW - TW - vi$) para a chuva de 12 mm/h..... | 67 |
| Tabela 5.11 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($ZW - TW - vi$) para a chuva de 16 mm/h..... | 67 |
| Tabela 5.12 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($ZW - TW - vi$) para a chuva de 24 mm/h..... | 67 |
| Tabela 5.13 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($ZW - TW - vi$) para a chuva de 50 mm/h..... | 68 |
| Tabela 5.14 – Tabela comparativa entre as profundidades críticas obtidas para os métodos analítico e numérico. | 69 |
| Tabela 5.15 - Tabela resumo de profundidades onde ocorre a ruptura à diferentes níveis de sucção | 72 |

NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMVA – *Área Metropolitana del Valle del Aburrá*

FORTTRAN – *Formula Translation*

NBR – Norma Brasileira

SIATA – *Sistema de Alerta Temprana de Medellín*

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos solos

$(u_a - u_w)$: Sucção matricial.

$(\sigma - u_w)$: Tensão normal efetiva no plano de ruptura;

$\hat{S}_{ji,j}$: Tensor de tensões totais

\bar{F}_i : é o vetor de força de corpo

c' : Coesão efetiva, a qual corresponde ao intercepto de resistência quando a tensão normal efetiva é igual a zero;

D_{ii} : Variação volumétrica

$D^{\alpha\gamma}$: Parâmetros que descrevem a interação entre as fases α e γ

h_1 : nível d'água no tempo inicial

h_n : é o nível d'água no tempo final

k^G : Coeficiente de permeabilidade para a fase de ar

k^w : Coeficiente de permeabilidade para a fase de água

P^w : Poropressão da água

t_1 : o tempo inicial

t_n : é o tempo final

T_w : Tempo necessário para saturar o solo até a profundidade z_w

u_a : Poropressão de ar

u_w : Poropressão de água

V_i : Velocidade aparente

v_i^s : Velocidade da fase sólida

v_i^α : Velocidade da fase α

z_w : Profundidade crítica

θ_0 : Umidade volumétrica inicial do solo.

θ_f : Umidade volumétrica final do solo;

θ_r : Umidade volumétrica residual;

θ_s : Umidade volumétrica na saturação;

$(\sigma - u_a)$: Tensão líquida

σ_{ij} : Tensor de tensões totais

ϕ^b : Ângulo indicando a taxa de aumento da resistência ao cisalhamento

Ψ_f : Sucção na frente de umedecimento;

π_{ji} : Tensão nominal

$\frac{D}{Dt}$: Material derivado pelo tempo

L_{ij} : Tensor gradiente de velocidade

N_j : Vetor unitário normal a dS_0

P^F : Poropressão média calculada de acordo com a saturação

P^G : Pressão de poro do ar

n : Porosidade

n^α : Fração volumétrica da fase α

t_i : Superfície do vetor de tração

ρ_α : Densidade do material

σ_{ij} : Tensor de tensões de Cauchy

e : 2,71828 (constante matemática neperiana).

$f(t)$: Capacidade de infiltração no tempo (t);

$F(t)$: Infiltração acumulada no tempo (t).

G_s : Peso específico dos sólidos

h : Carga hidráulica;

I_p : Índice de plasticidade

k : Coeficiente de permeabilidade dos solos saturados.

$k(\theta)$: Coeficiente de permeabilidade dos solos não saturados.

W_L : Limite de liquidez

W_P : Limite de plasticidade

$$m = 1 - \frac{1}{n^v}, \text{ para } 0 < m < 1;$$

MH : Solo orgânico de alta plasticidade

OH : Argila ou silte de alta plasticidade

r : raio do poço

Uv: Pressão de vapor de água na interface menisco ar.

Uv0: Pressão de vapor de água na interface com água pura.

Uv1: Pressão de vapor de água em equilíbrio com água do solo

v : Vazão específica ou aparente;

α , n^v , m: Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção.

γ_d : Peso específico aparente seco

$\Delta\theta$: Variação da umidade volumétrica do solo antes e depois da passagem da frente de umedecimento;

θ : Umidade volumétrica;

σ : Tensão total

τ : Resistência ao cisalhamento no plano de ruptura;

ϕ' : Ângulo de atrito efetivo.

χ : Parâmetro que depende do grau de saturação, tipo de solo e efeitos de histerese;

Ψ : carga de pressão (sucção);

dS_0 : Superfície na configuração inicial

v : Vetor de velocidade

ρ : Massa específica

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos em massa constituem uma das causas mais frequentes de perdas humanas e econômicas em todo o mundo, e por isso diversos pesquisadores buscam cada vez mais avaliar a ameaça destes movimentos e desenvolver a capacidade de prever tais eventos (Schuster, 1996).

Sidle & Ochiai (2006) apontam que o continente asiático tem liderado o ranking de vítimas por movimentos em massa, com destaque para Nepal com 186 vítimas mortais por ano, seguido do Japão e da China, com 170 e 145 vítimas por ano, respectivamente. Na América Latina, o Brasil ocupa o primeiro lugar com uma média de 88 mortes por ano. Em termos econômicos, o país mais afetado por movimentos em massa é o Japão. Estima-se que a sua perda seja de 4000 milhões de dólares ao ano; seguido por Itália, Estados Unidos e Índia com perdas que variam entre 1000 e 2000 milhões de dólares ao ano. Segundo Aristizabal & Gomez (2007), no caso da Colômbia, a falta de dados sistemáticos e, conseqüentemente, de valorações precisas dos níveis de perdas econômicas e humanas tem feito com que este país não esteja considerado no ranking latino americano, não obstante, considerando os eventos ocorridos nos últimos anos, a sua posição poderia ter mudado substancialmente.

Os escorregamentos ocorrem por múltiplas causas, dentre os principais deflagradores dos movimentos de massa, podem se citar os fatores geológicos, os geotécnicos, os hidrológicos, os climáticos e os antrópicos. No caso de taludes em solos não saturados, a dinâmica da água na atmosfera e no solo, e todos os seus condicionantes merecem especial atenção, já que, alterações na sucção interferem de maneira significativa no comportamento da massa de solo (Santos, 2004). Os movimentos de massa ocasionados pelas chuvas são bastante característicos e comuns em regiões tropicais montanhosas em todo o mundo. Destacam-se nesta categoria o caso de Hong Kong, alguns países da América Central e a Colômbia, Venezuela e o Brasil na América do Sul (Aristizabal *et al.*, 2010).

Por se tratar de um problema altamente complexo existem muitas incertezas, principalmente na previsão de sua ocorrência. A determinação de limites críticos de chuva, definidos a partir de modelos físicos ou estatísticos, tem sido aplicada nos últimos anos como parte fundamental dos sistemas de alerta preventivo (Aristizabal *et al.*, 2010).

Tendo em mente o importante papel da redução da sucção causada pela infiltração de águas pluviais, resta elucidar quão rápido é o avanço da frente de umidade num talude ou encosta natural composto por solo em condições não saturadas, determinando a profundidade máxima que a frente irá alcançar e o tempo necessário de chuva que irá permitir a infiltração de água até esta zona.

1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Na Colômbia ainda são poucos os estudos levando em conta a precipitação como fator detonante dos movimentos de massa. Nos últimos anos o país vem sofrendo uma série de deslizamentos catastróficos que têm ocasionado perdas econômicas enormes, além das perdas humanas de valor incalculável. Aristizábal & Gómez (2007) citam que o Valle de Aburrá (região geográfica localizada na parte norte da cordilheira central dos andes colombianos onde se encontra a cidade de Medellín e a sua área metropolitana anexa) é uma das áreas metropolitanas mais afetadas por escorregamentos deflagrados por chuvas na Colômbia.

O Valle de Aburrá concentra um total de 3,4 milhões de habitantes, os deslizamentos correspondem a 30% dos desastres que ocorrem na região e deixam um saldo trágico de 75% da totalidade de vítimas anuais. Iniciativas para reverter esse quadro foram adotadas e como resultado foi estabelecido um convênio entre a Universidade Nacional da Colômbia – Sede Medellín e Área Metropolitana do Valle de Aburrá (AMVA) chamado “Projeto de Zoneamento da Ameaça, Vulnerabilidade, e Riscos por Movimento em Massa, Inundações e Chuvas torrenciais”.

Visando complementar este projeto, é que se tentará desenvolver um trabalho que possa elucidar os efeitos da redução ou perda de sucção a partir do avanço da frente de umidade. Cabe destacar que os resultados deste trabalho, embora seja realizado em perfis de solos tropicais na Colômbia, poderão ser estendidos a casos no Brasil. A semelhança de alguns dos materiais encontrados, por exemplo, no Rio de Janeiro com os solos e rochas de Medellín, possibilitaria tal extrapolação.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é elucidar a questão da redução da sucção e consequente perda de resistência num perfil de solo coluvionar, situado na cidade de Medellín – Colômbia, devido ao avanço da frente de umedecimento, causado pela infiltração de água da chuva.

Para isso, propõe-se verificar a aplicabilidade da equação de Lumb (1975), um modelo analítico amplamente utilizado nas décadas de 70 e 80, o modelo estima a profundidade máxima (Z_w) que a frente de umidade irá atingir dentro de um perfil de solo num tempo t (ver Equação 1.1).

$$Z_w = \frac{k \cdot t}{n(\theta_f - \theta_0)} \quad (1.1)$$

Onde,

k : Coeficiente de permeabilidade dos solos saturados.

θ_f : Umidade volumétrica final do solo;

θ_0 : Umidade volumétrica inicial do solo.

n = Porosidade

Cabe esclarecer que nesta aproximação, a profundidade máxima pode ser interpretada como crítica, quando a mesma corresponde ao ponto onde ocorre a perda máxima de sucção. A verificação ocorrerá comparando-se a profundidade obtida através da equação de Lumb com a profundidade crítica obtida a partir das simulações numéricas. A modelagem numérica foi realizada utilizando-se um código FORTRAN (Kyoto University, Oka Laboratory) baseado em elementos finitos. O mesmo código já foi utilizado na tese de doutorado de García (2010) obtendo na época resultados satisfatórios e mostrando-se apto à utilização.

Pretende-se ainda estimar o tempo necessário de chuva para que a camada de solo seja saturada até a profundidade crítica. O anterior será realizado via análises realizadas a cerca do modelo de Green & Ampt (1911), e estendido por Pradel & Raad's (1993) (ver equação 1.2). A análise será realizada com ajuda de informações obtidas da simulação numérica visando comparação entre os métodos analíticos e numéricos.

$$T_w = \frac{\theta_f - \theta_o}{k} \left[z_w - \Psi_f \ln \left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f} \right) \right] \quad (1.2)$$

Onde T_w é o tempo necessário para saturar o solo até a profundidade z_w , θ_f e θ_o são os graus de saturação final e inicial respectivamente, k é a condutividade hidráulica saturada do solo e Ψ_f é a sucção capilar na frente de umidade.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa desenvolvida é dividida em cinco capítulos. Descreve-se, de maneira resumida, a enumeração de cada capítulo apresentando o assunto que é tratado por cada um deles:

Capítulo 1: Introdução; apresenta-se a motivação da pesquisa e seus objetivos.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica; apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre movimentos de massa causados por chuvas, mecânica dos solos não saturados, leis de fluxo e todo o embasamento teórico para fundamentar a metodologia adotada.

Capítulo 3: Referencial teórico; apresenta-se o referencial teórico para análise de infiltração no talude.

Capítulo 4: Materiais e métodos; descreve os materiais utilizados (solo em estudo) e os seus respectivos ensaios de caracterização. São descritos os ensaios e os métodos adotados para se cumprir os objetivos propostos por essa pesquisa.

Capítulo 5: Apresentação e análise das modelagens numéricas; apresentam-se os resultados da modelagem numérica utilizando-se um código FORTRAN, baseado em elementos finitos, utilizado para simular a infiltração 2-d em um talude solo não saturado.

Capítulo 6: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros; são apresentadas as conclusões do presente estudo, as recomendações de projeto e as sugestões para futuros estudos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre movimentos de massa causados por chuvas, mecânica dos solos não saturados, leis de fluxo e todo o embasamento teórico para fundamentar a metodologia adotada.

2.1. MOVIMENTOS DE MASSA CAUSADOS POR CHUVAS

2.1.1. Histórico

Os movimentos de massa causados por chuvas, geralmente denominados deslizamentos superficiais complexos, caracterizam-se por apresentar pequenos perfis com espessuras variando entre 0,3 e 2,0 m Anderson & Sitar (1995). Estes movimentos são gerados durante eventos intensos de chuva, quando ocorre um aumento rápido das poropressões ou quando é anulada a componente de coesão aparente do solo Crosta (1998).

As propriedades do solo e a intensidade da chuva são fatores primários que governam a instabilidade dos taludes. A taxa de redução do fator de segurança é diretamente proporcional à intensidade da chuva, quanto maior a intensidade, mais rápido decresce o fator de segurança, em função da redução da sucção Rahardjo et al. (2007).

Ignacius et al. (1991) apresentam um estudo em que exemplifica a redução do fator de segurança em função da redução da sucção. A Figura 2.1 apresenta os resultados obtidos pelo autor em análises de estabilidade de taludes envolvendo condições de rupturas rasas, com aproximadamente 1,0m de profundidade, planares, em solos não saturados da Serra do Mar, na região de Cubatão, São Paulo.

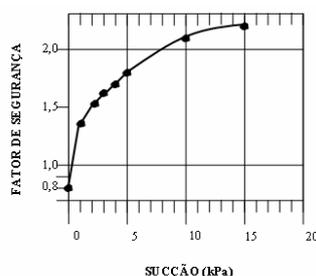


Figura 2.1 - Variação do fator de segurança de uma encosta não saturada em função da sucção Ignacius et al. (1991)

Cho & Lee (2002) estudaram os mecanismos de ruptura em taludes compostos por solos residuais não saturados e encontraram que o campo de tensões na massa de solo é modificado pela distribuição da pressão de poros, e esta por sua vez é controlada por variações espaciais da condutividade hidráulica durante a infiltração da chuva. Além disso, os autores mostram que, mesmo o talude sendo homogêneo texturalmente, a condutividade hidráulica terá uma distribuição não homogênea, já que tal variável é uma função do teor de água e da sucção.

2.2. Solos não saturados

Um solo na condição saturada possui duas fases: a fase sólida, constituída pelos grãos dos solos, e a fase líquida, constituída pela água. No caso de um solo não saturado, duas novas fases vão surgir: a fase gasosa, formada pelo ar livre e vapor de água, e uma quarta fase formada pela interação entre a fase gasosa não dissolvida e a fase líquida, denominada por Fredlund et al. (1978) de película contráctil, como mostra a Figura 2. 2.

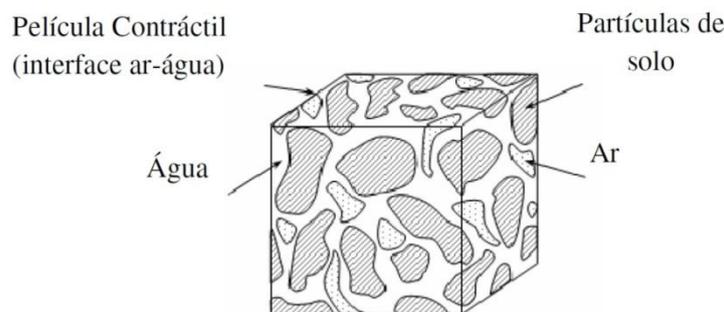


Figura 2. 2 – Elemento de solo não saturado com fase ar contínua (Fredlund & Rahardjo, 1993- modificado).

Fredlund *et al.* (1978) afirmam que a consideração de um sistema multifásico é vantajosa para análise do comportamento mecânico e que as quatro fases do solo podem ser agrupadas duas a duas: sólidos e película contráctil que estão em equilíbrio estático e ar e água que podem fluir. Com base no experimento null test foi ratificada a necessidade de se relacionar a influência da película contráctil na análise do estado de tensões do solo. Tal procedimento mostrou que as variáveis que melhor definem o estado de tensões no solo não saturado são $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$, onde σ é a tensão total, u_a é a poropressão de ar e u_w é a poropressão de água. A primeira variável corresponde à tensão líquida e a segunda a sucção matricial.

A interação solo-água pode ser quantificada a partir da afinidade que um solo não saturado tem por água. Se colocado em contato com um reservatório de água, o solo absorve água, isto é, ele exerce uma sucção sobre a água. Se uma pressão de sucção é aplicada sobre o reservatório de água livre, de sorte a impedir o fluxo de água, essa pressão na água livre equivale à pressão de água no solo, o que constitui uma medida de sucção Vilar (1997). A sucção total em um solo pode ser admitida como a soma entre a sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção osmótica é função da concentração química da água no interior do solo. A diferença de pressão necessária para anular o fluxo de uma solução de água pura para uma solução mais concentrada, através de uma membrana semipermeável, por osmose, é chamada de pressão osmótica ou sucção osmótica, como apresentado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Representação da sucção osmótica

Onde,

U_{v1} : Pressão de vapor de água em equilíbrio com água do solo;

U_{v0} : Pressão de vapor de água na interface com água pura.

A sucção matricial pode ser entendida como uma componente de sucção que resulta do efeito combinado entre a ação de forças capilares e de adsorção, que surgem devido à interação entre a água e as partículas minerais que compõem o solo Calle (2000). A componente matricial de energia livre é equivalente à pressão de vapor de água em equilíbrio com a água do solo, na interface com o menisco, tomando como referência a pressão de vapor existente em equilíbrio com solução de igual concentração à da água do solo, ver esquema representativo na Figura 2.4 Santos (2007).

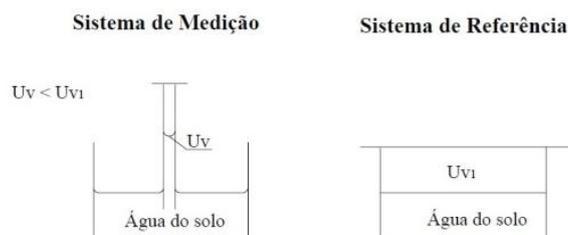


Figura 2.4- Representação da sucção matricial

Onde,

U_v : Pressão de vapor de água na interface menisco ar.

Fredlund & Rahardjo (1993) mostram que o desenvolvimento dos conceitos e da teoria da sucção no solo tem sua origem nos princípios da Termodinâmica utilizados por estudiosos em física dos solos, e vem sendo utilizados desde o início do século XX. Existem diversos métodos que permitem fazer medidas de sucção, a Tabela 2. 1 apresenta um resumo destes métodos.

Tabela 2. 1 - Métodos para a medida de sucção Vilar (1997).

| Método | Realizado em: | Tipo de sucção | Faixa de medida (kPa) | Observações |
|------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|---|
| Funil de pedra porosa | Laboratório | Matricial | 0-70 | Para baixas sucções Sucção aplicada diretamente à amostra |
| Tensiômetro | Laboratório e Campo | Matricial | 0-70 | Tempo de resposta é função da condutividade da pedra porosa |
| Blocos Porosos | Laboratório e Campo | Matricial | 10-1000 | Histerese pronunciada; Longo tempo de resposta; Fácil deterioração do material. |
| Placa de pressão | Laboratório | Matricial | 20-1500 | Depende da capacidade da pedra porosa; Utiliza a técnica de translação de eixos |
| Psicrômetro | Laboratório e Campo | Total e Osmótica | 100-8000 | Recomendado para laboratório; Rigorous controle de temperatura. |
| Membranas de pressão | Laboratório | Matricial | Até 10000 | Emprega técnica de translação de eixos; Emprega membrana de celulose. |
| Papel filtro | Laboratório | Matricial e Total | Todos os valores | Precisa máxima precisão na pesagem. |

2.3. Curva Característica dos solos

A curva característica do solo representa uma relação entre a sucção e o teor de umidade ou grau de saturação do solo. Outras terminologias são comumente utilizadas: curva de sucção matricial e curva de retenção. A curva característica é determinada em laboratório por um dos seguintes procedimentos:

- Por secagem: quando a amostra previamente saturada é exposta a sucções crescentes, o que implica ir diminuindo a umidade do solo;
- Por umedecimento: (molhamento), quando uma amostra seca tem sua sucção reduzida gradualmente, incrementando-se a umidade.

Da curva característica do solo é possível definir alguns importantes parâmetros utilizados na descrição do comportamento de um solo não saturado: a umidade volumétrica de saturação (θ_s), a umidade residual (θ_r) e a pressão de entrada de ar. A Figura 2.5 mostra os elementos da curva.

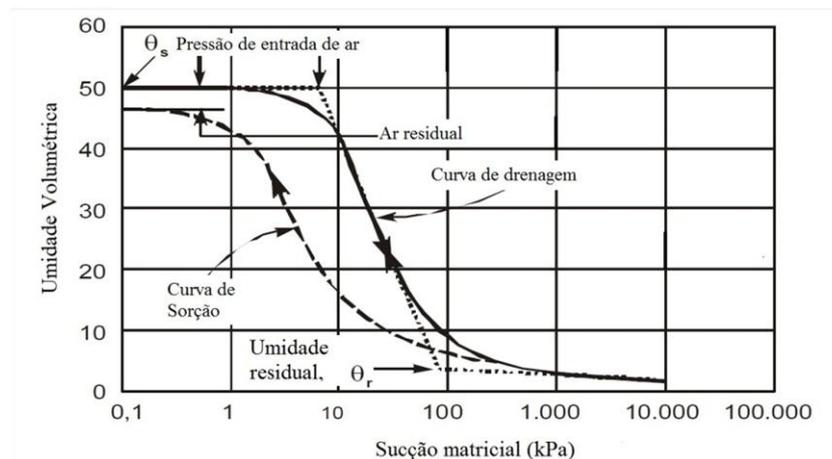


Figura 2.5– Elementos da curva característica (modificado de Fredlund e Xing, 1994).

Os principais fatores que interferem na forma da curva de retenção dos solos são a distribuição granulométrica, a distribuição dos poros, a estrutura e a mineralogia das partículas. Nas curvas de retenção referentes a diferentes solos (Figura 2.6) pode se observar que os solos argilosos apresentam maior capacidade de retenção de água para uma mesma sucção.

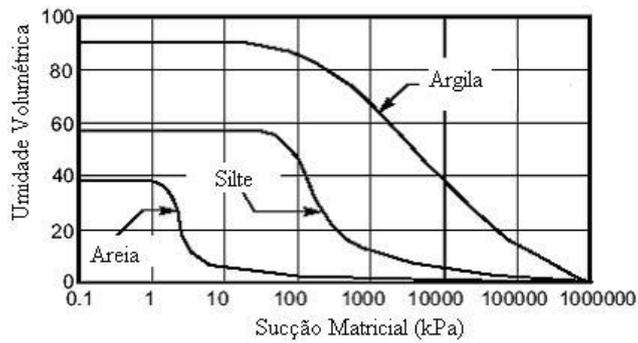


Figura 2.6- Curvas de retenção para diferentes tipos de solo (Fredlund & Xing, 1994)

Além disso, pequenas variações de sucção respondem por praticamente toda a variação de umidade nos solos arenosos, diferentemente dos solos argilosos que necessitam de amplas variações de sucção para apresentar modificações sensíveis de umidade. Fredlund & Xing (1994).

A técnica do papel filtro é um dos métodos mais utilizados para obtenção da medida de sucção. Trata-se de um método indireto cujo objetivo é determinar a tensão de sucção do solo através de uma curva de calibração, que relaciona sucção com a umidade de uma folha de papel filtro (referência Whatman nº 42) colocada sobre a amostra de solo num arranjo selado com um filme plástico dentro de um recipiente fechado. A sucção matricial é obtida pelo contato direto do papel filtro com o corpo de prova, enquanto que a sucção total é medida, utilizando-se um disco plástico perfurado para separar o papel filtro do solo. A Figura 2.7 apresenta os dois tipos de fluxo para o papel filtro.

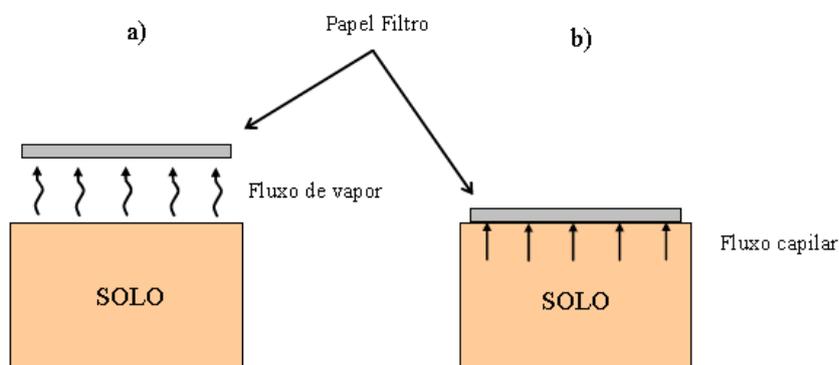


Figura 2.7 - Tipos de fluxos do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total e b) medição da sucção matricial, Marinho (1995).

2.3.1. Equações de ajuste da curva característica

Muitas equações têm sido propostas para estimativa da curva característica do solo sendo que, as mais utilizadas são as propostas por Brooks & Corey (1964), Van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994). As propostas são compostas por parâmetros que, geralmente, não apresentam significado físico e são utilizados como parâmetros de ajuste da equação à resultados experimentais.

2.3.1.1. Equação de Van Genuchten (1980)

A expressão proposta por Van Genuchten (1980), Equação 2.1, para estimar a curva de retenção é definida como:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\Psi)^{n^v}]^m} \quad (2.1)$$

Onde,

θ : Umidade volumétrica;

θ_s : Umidade volumétrica na saturação;

θ_r : Umidade volumétrica residual;

Ψ : carga de pressão (sucção);

$m = 1 - \frac{1}{n^v}$, com $0 < m < 1$;

α , n^v , m : Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção.

Segundo Fredlund & Xing (1994) uma maior flexibilidade e precisão podem ser obtidas deixando-se os parâmetros n^v e m independentes e sem uma correlação fixa.

No que diz respeito à influência dos parâmetros α , n^v e m na Equação 2.2, pode-se dizer que o parâmetro α está diretamente relacionado ao valor da pressão de entrada de ar. Este parâmetro não é responsável por alterações na forma da curva, mas, sim pela posição da curva (fazendo-a tender a regiões com valores maiores ou menores de sucção). O parâmetro n^v controla a inclinação da curva e relaciona-se com a distribuição granulométrica, de tal modo que, quanto mais uniforme for o solo maior será o valor de n^v . O parâmetro m determina o

ponto de inflexão da parte inferior da curva de retenção e o patamar mínimo da mesma. Van Genuchten (1980).

2.3.1.2. Equação de Fredlund & Xing (1994)

A Equação 2.2 proposta por Fredlund & Xing (1994) é apresentada abaixo:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{\ln \left(e + \left(\frac{\Psi}{\alpha} \right)^n \right)} \right]^m \quad (2.2)$$

Onde,

e : 2,71828 (constante matemática neperiana).

A proposta apresentada por Fredlund & Xing (1994) mostrada na Equação 2.2 está baseada na existência de uma similaridade entre a geometria dos poros e a curva granulométrica. Trata-se de uma proposta amplamente utilizada e que se adequa muito bem à ajustes em solos brasileiros.

2.4. Lei de fluxo e propriedades hidráulicas

A análise do escoamento de um fluido requer uma lei para relacionar a taxa de escoamento com o potencial de transporte, usando-se coeficientes apropriados (Freeze & Cherry, 1979). É sabido que a água flui de um ponto de maior carga total para um ponto de menor carga total, sem distinguir as cargas de pressão entre positivas ou negativas. O fluxo de ar, como uma fase contínua, é governado pela concentração ou gradiente de pressão. O gradiente de pressão é comumente o mais considerado como potencial de transporte para a fase ar. O movimento relativo do ar e da água através de um meio poroso não saturado é função da porosidade, grau de saturação, distribuição de poros e propriedades específicas dos fluidos como densidade e viscosidade (Fredlund & Rahardjo, 1993).

O fluxo de água e ar, através de um solo não saturado, depende do grau de saturação. A permeabilidade da fase ar decresce com o acréscimo do teor volumétrico de água ou grau de

saturação e a permeabilidade do ar permanece significativamente maior que a permeabilidade da água para grandes diminuições de teores de água no solo.

2.4.1. Fluxo de água no solo

O caminho a ser percorrido pela água no solo será sempre pelos vazios do mesmo, através dos poros quando preenchidos por água. Os poros preenchidos com ar não permitem o fluxo da água e por isso, esses poros ocupados por ar comportam-se, do ponto de vista do fluxo de água, como se fossem barreiras. Quando o solo passa a ser não saturado o ar ocupa primeiro os poros maiores, forçando a água a fluir pelos poros menores, aumentando o caminho de percolação da mesma (Fredlund & Rahardjo, 1993).

O fluxo de água em um solo não saturado tem sido explicado por diversos conceitos, nos quais o potencial governante do fluxo pode ser o potencial de sucção mátrica, a umidade ou o a carga hidráulica (pressão + elevação). Fredlund & Rahardjo (1993) demonstram que o potencial fundamental e apropriado para engenharia é a carga hidráulica.

A Lei de Darcy (1856) mostrada na Equação 2.3, define o movimento de água nos solos e é válida tanto para a condição saturada quanto para a condição não saturada. Assim, independente do grau de saturação do solo, a água percola na direção do gradiente hidráulico, partindo de onde há mais energia para onde há menos energia. Fredlund & Rahardjo (1993) citam o trabalho de Childs & Collis-George (1950), que comprovam a aplicabilidade da lei de Darcy para solos não saturados. Sendo a condutividade hidráulica função do índice de vazios e do grau de saturação (ou teor de água).

$$v = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.3)$$

Onde,

v : Vazão específica ou aparente;

h : Carga hidráulica;

A extensão da lei de Darcy para a situação não saturada é chamada de lei de Darcy-Buckingham e é mostrada na Equação 2.4. O coeficiente de permeabilidade passa a ser função

da sucção mátricial, enquanto que para solos saturados geralmente é considerado constante (Fredlund & Rahardjo, 1993).

$$v = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.4)$$

Onde,

$k(\theta)$: Coeficiente de permeabilidade dos solos não saturados.

Segundo Van Genuchten (1980) o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado pode variar consideravelmente durante um processo de fluxo transiente. Este comportamento reflete mudanças nas propriedades do solo. Estimativas confiáveis da condutividade hidráulica do solo não saturado são difíceis de obter, devido à sua extensiva variabilidade no campo, e também devido ao tempo e custo elevados para obtenção dos parâmetros.

2.4.2. Infiltração da água no solo

A infiltração, definida como a penetração de água nos poros do solo, pode ocorrer em uma dada superfície do solo, a partir de uma precipitação, de irrigação ou de lâmina de água sobre a superfície (“poças”). Quando a intensidade da precipitação ou a taxa de irrigação são pequenas, a água infiltra sem a formação de poças na superfície do terreno. O regime de infiltração não é determinado apenas pela disponibilidade de água na superfície do solo, mas também pela capacidade de infiltração desta superfície (Santos, 2004).

Existem várias equações empíricas que podem ser utilizadas para exprimir a capacidade de infiltração de um solo. Em geral, estas equações são aplicadas à situações físicas nas quais a superfície do solo se mantém saturada durante todo o processo de infiltração d’água no solo. Entretanto nas simulações hidrológicas existe a possibilidade da intensidade pluviométrica ser superior ou inferior à capacidade de infiltração do solo, além da possibilidade de ocorrência de precipitações intermitentes que permitem a recuperação da capacidade de infiltração. Em experimentos controlados, Righetto (1998) mostra que a infiltração tende a um decaimento aproximadamente exponencial com o tempo, para a condição de superfície saturada.

Green & Ampt (1906) apud Fourier (1996) apresentam um modelo físico simplificado do avanço da frente de umedecimento em solos não saturados, Equação 2.5:

$$f(t) = k \left(1 + \frac{f}{F(t)} \right) \quad (2.5)$$

$f(t)$: Capacidade de infiltração no tempo (t);

Ψ_f : Sucção na frente de umedecimento;

$\Delta\theta$: Variação da umidade volumétrica do solo antes e depois da passagem da frente de umedecimento;

$F(t)$: Infiltração acumulada no tempo (t).

2.4.3. Avanço da frente de umidade – profundidade crítica

Para que a frente de umidade possa penetrar até uma profundidade crítica (z), duas condições são necessárias (Pradel & Raad's, 1993):

- A intensidade da chuva deve ser suficientemente grande, a ponto de exceder a capacidade de infiltração do solo;
- A duração da chuva deve ser longa o suficiente para saturar o solo até a profundidade crítica.

Uma abordagem amplamente utilizada nas décadas de 70 e 80 para se calcular a profundidade (z_w) que a frente de umidade irá penetrar no talude num tempo (t) é proposta por Lumb (1975) e é mostrada na Equação 1.

Utilizando valores típicos para permeabilidade do solo e intensidade de chuva, Lumb (1975) mostrou que em poucas horas o nível da água poderia atingir uma profundidade crítica no talude, profundidade onde ocorre a perda máxima de sucção. A Figura 2. 8 mostra de forma esquemática o avanço da frente de umedecimento causada pela infiltração da água.

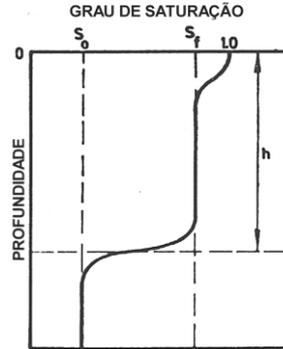


Figura 2. 8 - Avanço da frente úmida causada pela infiltração da água (Lumb, 1975).

Segundo este modelo, o solo estará completamente saturado apenas na superfície, mas estará úmido (θ_f , variando entre 80 e 90%) abaixo desta até a profundidade h . Trata-se de um modelo com muitas limitações, pois, prevê fluxo em apenas uma direção (não prevê fluxo em direção à face do talude), não leva em consideração a intensidade da precipitação, nem a dependência da condutividade hidráulica em função das sucções atuantes.

2.5. Comportamento mecânico dos solos não saturados

O conceito de tensão efetiva forma a base fundamental de estudo da mecânica dos solos saturados. Para o caso de um solo não saturado a análise de seu comportamento mecânico, em termos de tensão efetiva, torna-se mais complexa em função da existência de um número maior de fases. Das diversas tentativas de se estender o princípio das tensões efetivas aos solos parcialmente saturados, pode-se citar algumas de maior relevância (Croney, 1952; Bishop, 1959; Aitchison, 1961; Jennings, 1962).

Bishop (1959) elaborou uma das primeiras e mais utilizadas expressões para relacionar a resistência ao cisalhamento com a sucção matricial. Com a inserção de dois novos parâmetros (poropressão de ar e o parâmetro de Bishop) na equação de Terzaghi, Bishop estendeu o princípio das tensões efetivas aos solos não saturados. Ver Equação 2.6.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.6)$$

Onde,

χ : Parâmetro que depende do grau de saturação, tipo de solo e efeitos de histerese;

u_a : Poropressão de ar;

$(u_a - u_w)$: Sucção matricial.

Na Equação 8, χ é um parâmetro que está relacionado com o grau de saturação e outras variáveis. Para o solo seco, $\chi = 0$ e para o solo saturado, $\chi = 1$. Para valores intermediários, o parâmetro χ sofre a influência do grau de saturação, sucção mátrica, teor de água, tipo de solo e histórico de tensões. Segundo Lloret & Alonso (1980) praticamente todos os fatores que controlam o comportamento de deformação e resistência estão presentes no parâmetro χ .

Jennings & Burland (1962) questionam a validade da expressão (2.6), já que a mesma define uma tensão intergranular e não efetiva. A suposição de que o comportamento do solo saturado e solo parcialmente saturado podem ser analisados utilizando tensões efetivas, mostrou ser falha na previsão do comportamento de solos que tendem ao colapso à medida que se aproximam da saturação.

A reavaliação das equações propostas fez com que os pesquisadores buscassem novas alternativas para explicar o comportamento dos solos não saturados, com isso, Fredlund & Morgenstern (1977), por exemplo, sugeriram a combinação de duas, das seguintes variáveis independentes de estado $(\sigma - u_a)$, $(\sigma - u_w)$ e $(u_a - u_w)$ para descrever o comportamento mecânico dos solos não saturados.

2.6. Análise numérica unidimensional de infiltração em solos não saturados

Recentemente, tem-se aumentado a atenção à análise numérica acoplada para solo não saturados. Isso se dá principalmente pelo fato de muitos problemas geotécnicos estarem relacionados a solos não saturados, como as falhas de taludes induzidos pela chuva e solos expansivos. Colapsos de aterros e taludes acontecem usualmente por dois fatores, infiltrações curtas e longas, causadas pela chuva ou derretimento da neve. A água, infiltrando em solos não saturados, resulta em acréscimos da saturação. Isto, por sua vez, permite mudanças na poropressão (redução da sucção) e um decréscimo da resistência ao cisalhamento dos solos. A infiltração unidimensional em solos não saturados trata-se de um tópico interessante devido à necessidade do entendimento da resposta complexa não linear de solos não saturados.

Garcia *et al.* (2011) resumem algumas pesquisas que têm conduzido o problema da infiltração usando ensaios de coluna, dessa maneira: Liakopoulos (1964) relatou ensaios de coluna

utilizados para investigar o vazamento em materiais arenosos resultando de drenagem vertical a partir de um estado inicial saturado, Yang *et al.* (2004) usaram um equipamento com colunas de solo que simultaneamente media todas as variáveis de um processo de infiltração, Yang *et al.* (2006) apresentaram resultados de ensaio de laboratório de infiltração vertical em duas colunas de solo de agregados mais finos sob agregados mais grossos, sujeitos simultaneamente, a chuva dentro de condições de *no-ponding* até a superfície e carga constante até a base, e Bathurst *et al* (2007) reportou os resultados dos ensaios usados para investigar a resposta hidráulica da transição entre condição saturada e não saturada de areias e camadas de areia – geotêxtil dentro de condições de infiltração unidimensional de cabeça constante.

A Infiltração da chuva dentro de solos não saturados tem sido avaliada por soluções analíticas. Por exemplo, Srivastava & Yeh (1991) derivaram soluções analíticas para descrever o fluxo de infiltração para chuva em condições de infiltração unidimensional em solos homogêneo e em duas camadas de solo. Zhan & Ng (2004) usaram a solução analítica obtida por Srivastava & Yeh (1991) para investigar o efeito de parâmetros hidráulicos e condições de chuva na infiltração de solos não saturados. Juntamente com os parâmetros hidráulicos estudados foi encontrado que poropressões negativas devido à infiltração da chuva é controlada principalmente pela permeabilidade saturada e o coeficiente de de-saturação, o qual controla a razão de redução do teor de água e a permeabilidade não saturada com um acréscimo da sucção. Wu & Zhang (2009) é o primeiro em obter a solução analítica para o problema unidimensional acoplado de infiltração e deformação aplicada à integral transformada de Fourier. Na sua formulação, o modelo constitutivo incrementado-linear elástico de Fredlund & Rahardjo (1993) para solos não saturados é implementado. Os resultados apresentam que o volume muda devido a mudanças na sucção do solo e sua relação de intensidade de chuva em permeabilidade saturada (q/K_s) tem um efeito significativo na distribuição da poropressão negativa e deformações ao longo do perfil de solo. Também demonstraram que tanto a infiltração e as deformações desempenham um papel muito importante na infiltração do solo não saturado.

Recentemente, soluções numéricas têm sido utilizadas para analisar o problema de solos não saturados. Análises numéricas são necessárias devido às complexas condições iniciais de contorno, as multicamadas de solo, às diferentes intensidades de chuva, e à geometria de

muitos problemas de engenharia, já que, por meio de soluções analíticas não podem ser obtidas.

Muitos estudos numéricos que podem calcular pela inerente complexidade de problemas de infiltração dentro dos solos não saturados tem sido apresentados em anos passados, e.g. Pinder & Gray (2008) analisaram a infiltração e o comportamento drenante das fases de água e uma fase não aquosa densa fluindo em camadas homogêneas e heterogêneas de solo. Seus resultados apresentaram os efeitos da infiltração primária e secundária e processos de drenagem na saturação e a distribuição da por pressão negativa, assim como o impacto da fase não aquosa densa dentro do fluxo transitório unidimensional. Cai & Ugai (2004) investigaram os efeitos das características hidráulicas no fluxo de água transitória através de taludes de solos não saturados e saturados e sua relação com a estabilidade. Griffiths & Lu (2005) analisaram a estabilidade de taludes em condições não saturadas devido à infiltração usando o método de Bishop pelos esforços efetivos de solos não saturados combinado com a teoria unidimensional de sucção.

Ehlers *et al.* (2004) utilizaram a aproximação acoplada à infiltração – deformação que inclui a poropressão efetiva e o conceito de esforço efetivo para analisar a deformação e a localização de esforços em solos não saturados devido ao fluxo de infiltração. Cho & Lee (2001) empregaram o conceito de rede de esforço no método acoplado, infiltração-deformação, para analisar a instabilidade de taludes sob condições não saturadas. Além disso, usando o conceito de malha de esforço, Alonso *et al.* (2003) calcularam deformações e a mudança do fator de segurança com o tempo de um talude instável em um perfil pré-adensado e intemperizado de argila por meio de um modelo acoplado hidromecânico não saturado.

Oka *et al.* (2009) e Kato *et al.* (2009) pesquisaram a características do acoplamento, infiltração –deformação, num dique não saturado sob condições de infiltração; na suas formulações a poropressão é incorporada na estrutura de tensões, assim como o efeito da sucção no modelo constitutivo.

A análise numérica utilizada no presente trabalho esta baseada na teoria de (Biot 1941; Biot 1962) ampliado pela teoria dos meios porosos, e.g. Ehlers (2003). Os materiais são assumidos como compostos de sólidos, água e ar, os quais são assumidos como continuamente distribuídos através do espaço à nível macroscópico.

Os resultados calculados de poropressão de água, saturação mostram que o método acoplado pode descrever completamente a redução na sucção e o acréscimo na saturação dentro de solo não saturado quando é sujeito à infiltração da chuva, bem como a redução em sua resistência ao cisalhamento devido à geração de poropressão da água.

2.7. Resistência ao cisalhamento dos solos não saturados

A resistência ao cisalhamento dos solos saturados é descrita usando o critério de ruptura de Mohr – Coulomb e os conceitos de tensões efetivas no solo Terzaghi (1936), ver Equação 2.7.

$$\tau = c' + (\sigma - u_w)\tan\phi' \quad (2.7)$$

Onde,

τ : Resistência ao cisalhamento no plano de ruptura;

c' : Coesão efetiva, a qual corresponde ao intercepto de resistência quando a tensão normal efetiva é igual a zero;

$(\sigma - u_w)$: Tensão normal efetiva no plano de ruptura;

σ : Tensão normal total no plano de ruptura;

u_w : Poropressão da água na ruptura;

ϕ' : Ângulo de atrito efetivo.

Uma das primeiras equações para avaliação da resistência dos solos não saturados foi proposta por Bishop & Blight (1963). Desde então o desenvolvimento de novos critérios de ruptura de solos não saturados vêm sendo discutidos e diversas equações vem sendo propostas. O critério de ruptura definido por Fredlund *et al.* (1978) é um dos mais conhecidos e utilizados, de modo que muitos autores consideram seus resultados satisfatórios (Vanapalli & Fredlund, 1997; Teixeira & Vilar, 1997; Kiyohara *et al.*, 2010). A envoltória sugerida por Fredlund *et al.* (1978) é apresentada na Equação 2.8. Nesta equação é possível observar a existência de dois fatores: um relacionado à variação da resistência devido à variações na tensão normal aplicada e outro cujo, variações na resistência se devem à variações na sucção.

$$= c + (\sigma - u_a)\tan \phi + (u_a - u_w)\tan \phi^b \quad (2.8)$$

Ao plotar tensão cisalhante – sucção, sob tensão normal constante, se obtém uma envoltória cuja inclinação é representada pelo ângulo ϕ^b . Rohm e Vilar (1994) estudaram um solo arenoso laterizado da região de São Carlos, SP com o objetivo de avaliar a não linearidade da relação entre a resistência ao cisalhamento com a sucção matricial. Os autores chegaram à conclusão de que para o solo em questão, ao ultrapassar o valor de sucção de 200 kPa, ϕ^b tendia a ficar constante e a um valor próximo de zero.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Equações Governantes

Neste tópico são apresentadas as equações utilizadas na modelagem numérica de infiltração do talude em estudo. As equações dividem-se em tensor de tensões, conservação de massa e conservação de momento. A seguir são apresentadas suas deduções, extraídas da tese de doutorado de Garcia (2010).

3.2. Tensor de tensões

O comportamento do material é descrito dentro da estrutura de uma aproximação macroscópica mecânica contínua através do uso da teoria dos meios porosos (Ehlers 2003; Boer 1998). A teoria é considerada uma generalização da teoria da mistura de duas fases de Biot para solos saturados (Biot 1941; Biot 1962). Terzaghi (1943) definiu o conceito de tensor de tensões para materiais saturados com água. No caso de solos não saturados, porém, o conceito precisa ser redefinido para considerar materiais compressíveis. Na seguinte formulação, o tensor de tensões σ'_{ij} é definido e em seguida utilizado pela variável de esforço na relação constitutiva para o tensor do solo (Jommi 2000; Laloui e Nuth 2009). Jommi chamou isso de tensor médio de tensões. Laloui e Nuth consideraram-no como a generalização de esforços efetivos. O tensor de tensões totais σ_{ij} é obtido através da soma de valores de esforços parciais, a saber:

$$\sum_{\alpha} \sigma_{ij}^{\alpha} = \sigma_{ij} \quad (\alpha = S, W, G) \quad (3.1)$$

$$\sigma_{ij}^S = \sigma'_{ij} + n^S P^F \delta_{ij} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{ij}^W = n^W P^W \delta_{ij} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{ij}^G = n^G P^G \delta_{ij} \quad (3.4)$$

Onde P^w e P^G são a poropressão da água e a pressão de poro do ar, respectivamente, n é a porosidade, n^α é a fração volumétrica da fase α , e P^F é a poropressão média calculada de acordo a saturação dada por:

$$P^F = sP^W + (1 - s)P^G \quad (3.5)$$

Das equações 3.1 a 3.5 tem-se:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad (3.6)$$

O tensor de tensões é utilizado como a básica variável de esforço no modelo para solos não saturados. A definição da equação (3.6) pode ser reescrita abaixo como a definição de Bishop de esforços efetivos para solos não saturados. Em adição à equação (3.6), o efeito da sucção também é considerado no modelo constitutivo.

3.3. Conservação de massa

A conservação da massa é dada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n^\alpha \rho_\alpha) + (n^\alpha \rho_\alpha v_i^\alpha), i = 0 \quad \alpha = S, W, G \quad (3.7)$$

Na qual ρ_α é a densidade do material e v_i^α é a velocidade da fase α . Supondo que as derivadas espaciais da fração de volume n^α e a densidade do material ρ_α são insignificantes, e assumindo que a partícula de solo e água são incompressíveis, sabendo-se que, $\dot{\rho}_s = 0$ e $\dot{\rho}_w = 0$, as leis de conservação na equação (3.7) podem ser expressas em função da saturação da água s e a porosidade n , isto é:

$$-\dot{n} + (1 - n)v_{i,i}^S = 0 \quad (3.8)$$

$$sD_{ii} + \dot{s}n = -V_{i,i}^W \quad (3.9)$$

$$(1 - s)D_{ii} - \dot{s}n + (1 - s)n\frac{\dot{\rho}_G}{\rho_G} = -V_{i,i}^G \quad (3.10)$$

Onde v_i^s é a velocidade da fase sólida, D_{ii} é a variação volumétrica, e v_i é a velocidade aparente. Na equação (3.9), a densidade da água é assumida constante. Para descrever as mudanças na densidade do ar, a equação para gases ideais é usada.

3.4. Conservação de momento

O equilíbrio de momentos para cada fase é dado por:

$$n_\alpha \rho_\alpha v_i^\alpha = \sigma_{ji,j}^\alpha + \rho_\alpha n^\alpha \bar{F}_i - \sum_\gamma D^{\alpha\gamma} (v_i^\alpha - v_i^\gamma) \quad \alpha = S, W, G \quad (3.11)$$

Na qual \bar{F}_i é a aceleração da gravidade ou a força da gravidade por unidade de massa e $D^{\alpha\gamma}$ são os parâmetros que descrevem a interação entre as fases α e γ , a qual é definida como:

$$D^{WS} = \frac{(n^W)^2 \rho_w g}{k^W}, \quad D^{GS} = \frac{(n^G)^2 \rho_G g}{k^G} \quad (3.12)$$

Na qual k^W e k^G são os coeficientes de permeabilidade para a fase de água e fase de ar, respectivamente, os quais são dados em L/T (unidades). Desprezando a aceleração e a interação entre ar e água, a equação de equilíbrio de momento é reduzida à equação de equilíbrio para cada fase, obtida como:

$$\sigma'_{ji,j} + (n^S P^F)_{i,j} + \rho_s n^S \bar{F}_i - D^{SW} (v_i^S - v_i^W) - D^{SG} (v_i^S - v_i^G) = 0 \quad (3.13)$$

$$(n^W P^W)_{i,j} + \rho_w n^W \bar{F}_i - D^{WS} (v_i^W - v_i^S) = 0 \quad (3.14)$$

$$(n^G P^G)_{i,j} + \rho_G n^G \bar{F}_i - D^{GS} (v_i^G - v_i^S) = 0 \quad (3.15)$$

Quando é assumido que a derivada da fração de volume n_i^α é desprezado, A lei de Darcy para a fase de água e ar são obtidas das equações (3.14) e (3.15), respectivamente, como:

$$V_i^W n^w (v_i^w - v_i^s) = \frac{K^W}{\rho_W g} (P_{,i}^W + \rho_W \bar{F}_i) \quad (3.16)$$

$$V_i^G n^g (v_i^g - v_i^s) = \frac{K^G}{\rho_G g} (P_{,i}^G + \rho_G \bar{F}_i) \quad (3.17)$$

Da somatória das equações 3.13 – 3.15 obtêm-se:

$$\sigma_{j_i,j} + \rho_W \bar{F}_i = 0 \quad (3.18)$$

Quando consideramos um domínio arbitrário V , com contorno S , o incremento tipo do problema de contorno é dado por:

$$\frac{D}{D_t} \int_V (\sigma_{j_i,j} + \rho_W \bar{F}_i) dV = 0 \quad (3.19)$$

A conservação do momento linear para a mistura configuração atual é dada pela seguinte equação:

$$\frac{D}{D_t} \int_V \rho v dV = \int_S t_i dS + \int_V \rho \bar{F}_i dV \quad (3.20)$$

Na qual $\frac{D}{D_t}$ é o material derivado pelo tempo, ρ é a massa específica, v é o vetor de velocidade, t_i é a superfície do vetor de tração, e \bar{F}_i é o vetor de força de corpo. Considerando as condições quase estáticas com força de corpo constante, i.e. força gravitacional constante, a relação de equilíbrio é expressada com a seguinte equação:

$$\frac{D}{D_t} \int_S t_i dS = 0 \quad (3.21)$$

Quando tomamos a configuração inicial em um momento t , a tração nominal s_i é escrita como:

$$s_i = \pi_{ji} N_j \quad (3.22)$$

Onde π_{ji} é a tensão nominal e N_j é o vetor unitário normal a dS_0 e dS_0 é a superfície na configuração inicial. Tendo $t_i dS = s_i dS_0$ e depois da manipulação das equações (3.20)-(3.22), obtemos a relação da equação equilíbrio:

$$\frac{D}{D_t} \int_S t_i dS = \frac{D}{D_t} \int_S s_i dS_0 = \frac{D}{D_t} \int_S \pi_{ji} N_j dS_0 = 0 \quad (3.23)$$

Por adoção da lei de Nanson e o teorema de Gauss, a equação (3.22) fornece a relação das equações de equilíbrio na configuração atual definida como:

$$\int_V \hat{S}_{ji,j} dV = 0 \quad (3.24)$$

Na qual $\hat{S}_{ji,j}$ é o tensor de tensões totais. O incremento na equação de equilíbrio pode ser usado para atualizar a formulação lagrangeana no problema de valor sobre o contorno

A relação de conservação do momento é dada por:

$$\hat{S}_{ji,j} = 0 \quad (3.25)$$

Na equação anterior as mudanças na densidade do material são ignoradas. Na equação mencionada acima o tensor de tensões totais $\hat{S}_{ji,j}$ é definido como:

$$\hat{S}_{ji,j} = \dot{\sigma}_{ij} + L_{pp} \sigma_{ij} - \sigma_{qj} L_{iq} \quad (3.26)$$

Onde σ_{ij} é o tensor de tensões de Cauchy, $\dot{\sigma}_{ij}$ é a variação do tempo com relação à tensão, e L_{ij} é o tensor gradiente de velocidade. Destas equações, o tensor de tensões e a média da poropressão obtida da equação (3.6), são representados na equação a seguir:

$$\hat{S}_{j\bar{i},j} = \dot{S}_{ij} + \dot{P}^F \delta_{ij} + L_{kk} P^F \delta_{ij} - P^F \delta_{ik} L_{jk} \quad (3.27)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram executados ensaios de caracterização do solo, resistência ao cisalhamento, condutividade hidráulica e sucção. Neste capítulo será descrita a área de estudo bem como o solo em questão, além dos procedimentos realizados para obtenção dos parâmetros do solo. Todos esses ensaios supracitados foram realizados segundo técnicas e rotinas de execução que garantiram a sua repetibilidade.

4.1. Materiais

4.1.1. Área de estudo

A área de estudo escolhida foi o setor denominado Pajarito na cidade de Medellín – Colômbia. O setor foi escolhido como zona piloto por estar num processo de expansão urbana, por ser uma zona de fácil acesso e por ter uma geologia bem conhecida com estudos anteriores já realizados.

Pajarito situa-se na encosta ocidental da cidade de Medellín - Colômbia, ver Figura 4.1 Em um trabalho recente para obtenção do mapa de permeabilidade da cidade de Medellín, AMVA (2009) delimitou uma área de aproximadamente 35 km² e realizou 300 ensaios de permeabilidade de campo usando o método Porchet e também 300 ensaios de caracterização e índice de plasticidade do solo.

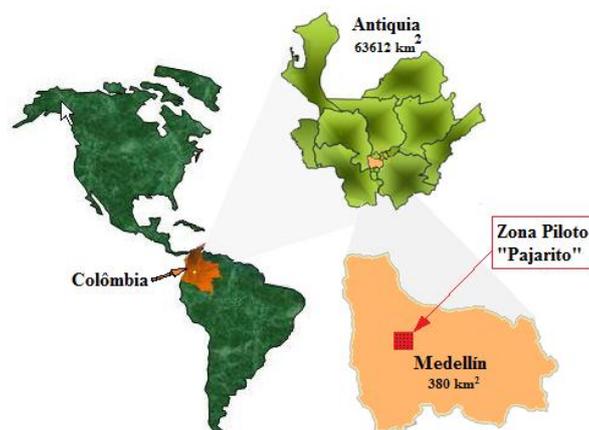


Figura 4.1– Localização da estação pluviométrica SIATA e ilustração da área piloto de 1km²

Para atender a proposta do presente trabalho, uma área menor, de 1km² foi delimitada em torno da estação pluviométrica *Fundación Hogares Claret* (ver Figura 4. 2) situada dentro da área piloto de Pajarito.

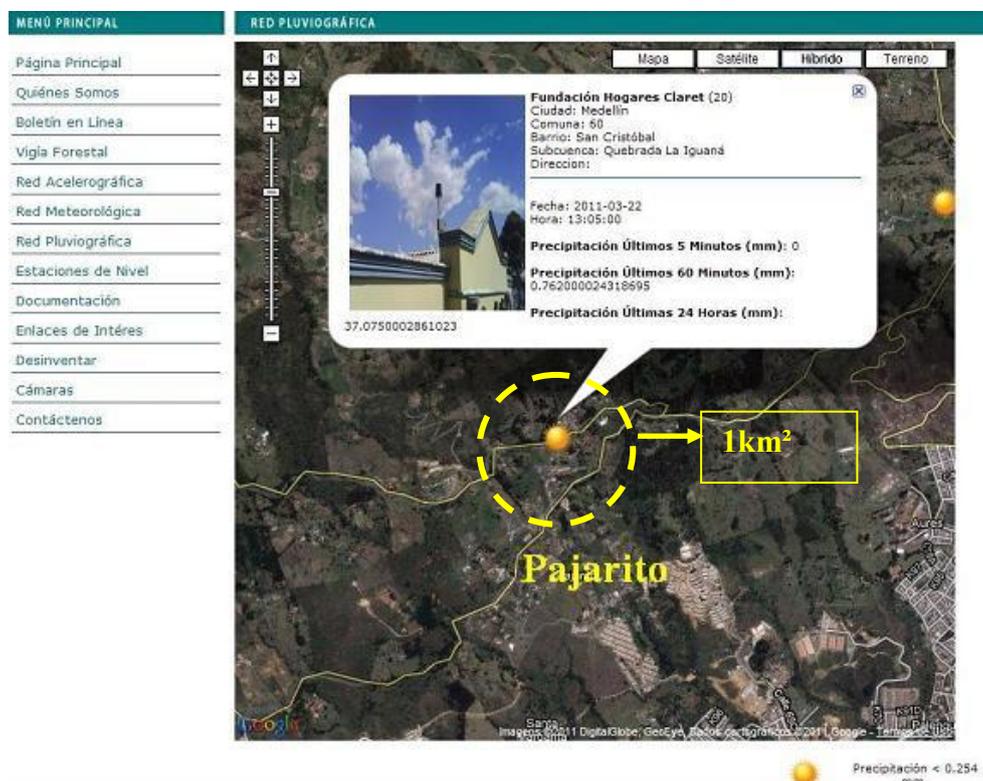


Figura 4. 2 – Localização da estação pluviométrica SIATA e ilustração da área piloto de 1km² dentro do setor de Pajarito.

Esta estação é uma das estações do SIATA (*Sistema de Alerta Temprana de Medellín*) e as suas bases de dados foram disponibilizadas para esta pesquisa no marco da parceria entre a Universidade Nacional da Colômbia – Medellín e a Universidade de Brasília.

4.1.2. Geologia Superficial

A geologia superficial é considerada como um fator predisponente primordial pela informação relevante à natureza física dos materiais envolvidos no fenômeno do deslizamento, assim como de suas propriedades e características de resistência mecânica.

Na Tabela 4. 1 apresentam-se as diferentes categorias levando-se em conta o processo de zonificação. Tais categorias foram escolhidas de acordo com a homogeneidade no comportamento mecânico.

Tabela 4. 1 – Listagem das diferentes unidades geológicas de Medellín.

| DESCRIÇÃO | UNIDADE | CATEGORIA |
|---|--------------|-----------|
| FLUXOS | | |
| Fluxos de escombros e/ou lodos | F I | 1 |
| Fluxos de escombros e/ou lodos | F II | |
| Fluxos de escombros e/ou lodos | F III | |
| Fluxos de escombros e/ou lodos | F IV | |
| Fluxos de escombros e/ou lodos aislados | Fa | |
| Fluxos de escombros e/ou lodos | Fpre I | |
| ROCHAS BÁSICAS | | |
| Gabros de Romeral | JgR | 2 |
| Metagabro del Picacho | KmP | |
| Gabros sem diferenciar | Jg | |
| Peridotita de Romeral | JuR | |
| IGNEAS | | |
| Stock de San Diego | JgSD | 3 |
| Batolito Antioqueño | KcdA | |
| Stock de Altavista | KdA | |
| Granodiorita de Amagá | TRgA | |
| GNAISSE | | |
| Gnaisse de La Iguaná | KnI | 4 |
| Gnaisse del Alto de Minas | PniAM | |
| Gnaisse de La Ceja | PRnLC | |
| Gnaisse Milonítico de Sajonia | PRnmS | |
| Gnaisse de Palmitas | PnP | |
| ANFIBOLITA-DUNITA | | |
| Dunitas de Medellín (Emplazamiento) | KuM | 5 |
| Anfibolitas de Medellín | PRaM | |
| Anfibolitas Granatíferas de Caldas | PaG | |
| VULCÁNICAS | | |
| Membro Vulcânico de Quebradagrande | KvQG | 6 |
| Membro Vulcânico sedimentario | KvsQG | |
| ALUVIAIS | | |
| Depósitos aluviales | Qal | 7 |
| Depósitos aluviotorrenciales | Qat | |
| Río Medellín | Río Medellín | |
| ESQUISTOS | | |
| | Pes | 8 |
| MIGMATITAS DE PUENTE PELAEZ | | |
| | PRmPP | 9 |
| DEPOSITOS DE DESLIZAMIENTO | | |
| | Qd | 10 |
| LLENOS ANTROPICOS | | |
| | Qll | 11 |

Na Figura 4.3 – Mapa geológico com as diferentes unidades geológicas para o município de Medellín.apresenta-se o mapa geológico com as diferentes unidades geológicas para o município de Medellín, tal mapa é produto do estudo de Microzonificação Sísmica do Valle de Aburrá (AMVA, 2007c).

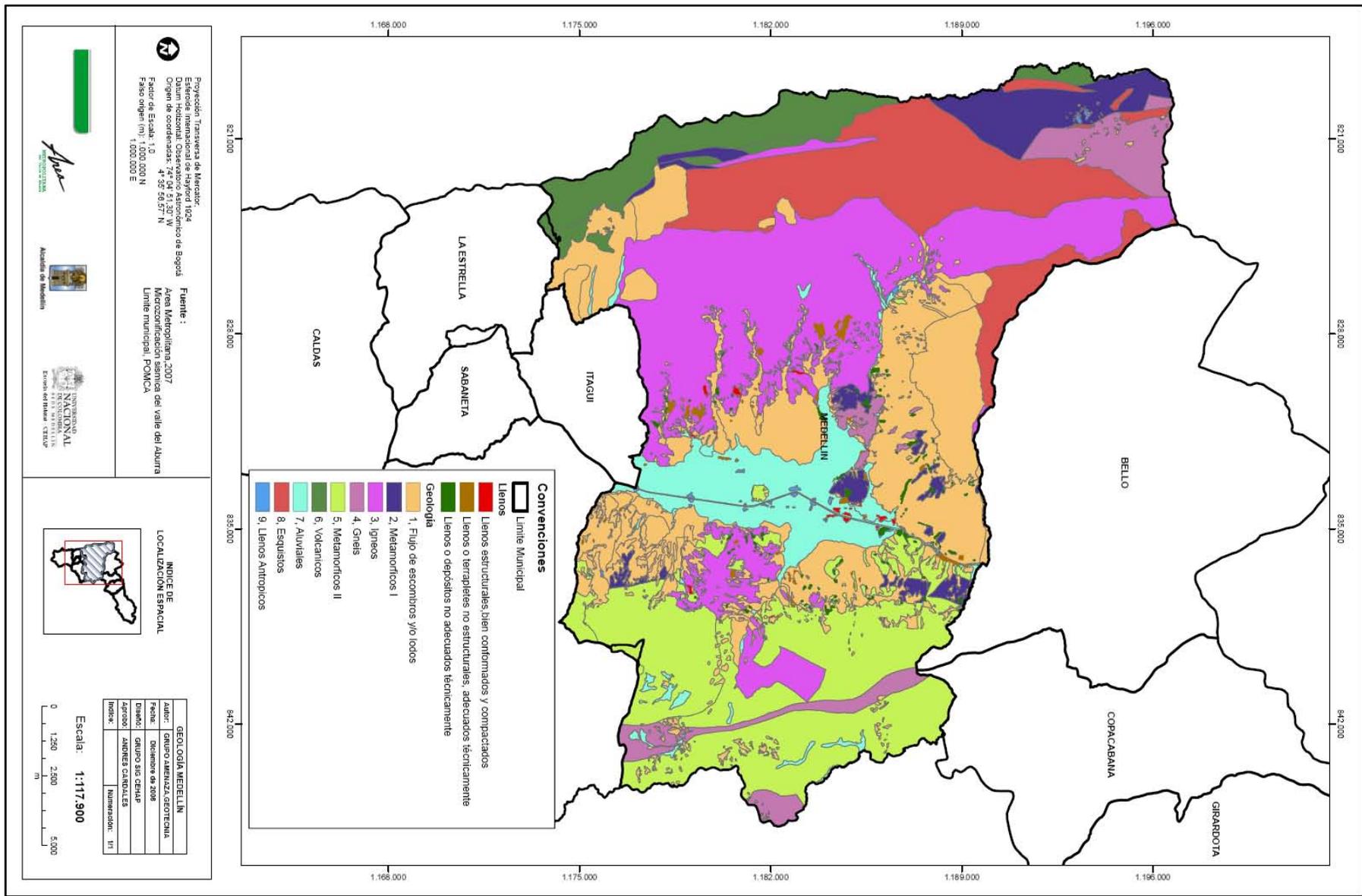


Figura 4.3 – Mapa geológico com as diferentes unidades geológicas para o município de Medellín.

4.1.3. Coleta da amostra

Para a realização dos ensaios foram utilizadas amostras indeformadas e deformadas, as quais foram retiradas de dois taludes situados dentro da Fundação *Hogares Claret*, ver Figura 4.4 e Figura 4.5.



Figura 4.4 – Talude 1.



Figura 4.5 - Talude 2.

Inicialmente foi realizada a tentativa de retirada dos blocos com pequenas dimensões, com 20 cm de aresta, no entanto, devido à presença de grandes blocos de pedra, essa extração foi

inviável. A Figura 4.6 apresenta os blocos de pedra encontrados na escavação e durante o processo de amostragem.



Figura 4.6 - Dificuldade na amostragem devido à presença de blocos de pedra

A alternativa encontrada nesse caso foi a de realizar a retirada das amostras utilizando tubos *Shelby*. A Figura 4.7 mostra os tubos em campo e posteriormente já extraídos no laboratório.



Figura 4.7 - Amostra recém extraída em campo e posteriormente extraída do tubo em laboratório.

4.1.4. Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica do solo em estudo foi realizada de acordo com as especificações existentes nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios realizados ao longo dessa pesquisa bem como as normas técnicas utilizadas estão abaixo listados:

- **Umidade Natural e Higroscópica (w,%):** Realizado de acordo com a norma da ABNT, NBR/6457/1986, calculou-se a média de três determinações de umidade por ponto. A determinação da umidade natural foi realizada imediatamente após a chegada das amostras no laboratório, no entanto, sempre que se submetia a(s) amostra(s) à ensaios de cisalhamento direto ou curva característica, os ensaios eram repetidos visando maior exatidão;
- **Peso específico dos Sólidos (γ_s , kN/m³):** Propriedade também determinada pela média de três ensaios de acordo com a NBR 6508/1984, sendo utilizados os grãos passados na peneira N° 10 (#2 mm);
- **Limite de liquidez pelo método de Casagrande (WL, %):** Determinado graficamente, a partir da interpolação de cinco pontos, realizado de acordo com a norma de ensaio NBR 6459/1984;
- **Limite de plasticidade (WP, %):** O ensaio foi realizado de acordo com a norma de ensaios NBR 7180/1984;
- **Análise granulométrica com e sem defloculante:** Determinada de acordo com os procedimentos da norma de ensaios NBR 7181/1984.
- **Índices físicos complementares:** Com o fim de complementar a caracterização do solo em estudo, com base nos dados supracitados, foi realizada a determinação do índice de vazios (e), porosidade (n) e grau de saturação (Sr), peso específico aparente seco (γ_d), índice de plasticidade (Wp).

4.1.5. Ensaios de condutividade hidráulica

4.1.5.1. Infiltrômetro de anel ou cilindro duplo

Utilizando este procedimento é possível medir a velocidade de penetração da água contida dentro de um cilindro metálico previamente cravado no solo a aproximadamente 10 cm de profundidade. Neste ensaio mede-se o rebaixamento da água dentro do cilindro ou o volume

de água utilizado para manter o nível constante com ajuda de um sistema *Mariotte*. No caso para este trabalho foi utilizado apenas o método de carga variável utilizando-se dois cilindros. A utilização de dois cilindros dá-se, pois, ao saturar o solo na região do cilindro maior seja garantido que grande parte do fluxo ocorra na vertical dentro do cilindro central.

O diâmetro dos cilindros varia de acordo com a variabilidade do solo, a velocidade de infiltração e a disponibilidade de transporte de água para realizar o ensaio. A medição de água infiltrada se faz a diferentes intervalos de tempo (dependendo de v_i) até que valores constantes sejam obtidos. A seguir apresentam-se fotos dos ensaios realizados nos taludes em questão (Figura 4.8 à Figura 4.11):



Figura 4.8 – Materiais utilizados no ensaio (martelo, anéis, tábua).



Figura 4.9 – Enchimento dos anéis com água



Figura 4.10 – Acompanhamento das medições



Figura 4.11 – Locais onde se realizaram os ensaios.

4.1.5.2. Método Porchet

O método Porchet consiste na perfuração de um poço a trado, onde o diâmetro do trado é conhecido e o poço tem uma profundidade conhecida, que é o perfil onde pretende-se obter o valor de condutividade hidráulica. A seguir as paredes do poço devem ser limpas, evitando assim o efeito de selamento das paredes. Em seguida o poço é preenchido com água até se obter a saturação do poço, à uma altura denominada h_1 . O tempo de saturação não deve ser inferior a 30 minutos. Após a saturação o poço deve ser novamente preenchido com água e

em seguida é realizada a medição sucessiva da velocidade de rebaixamento da água, (Kessler, 1971). A Figura 4. 12 apresenta um desenho esquemático do ensaio.

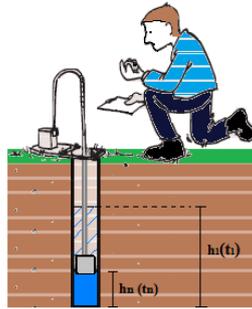


Figura 4. 12 - Ilustração do ensaio Porchet.

A partir dos dados da velocidade de rebaixamento d'água (nível e tempo) a permeabilidade é calculada no ponto determinado através da Equação 4.1.

$$K = 1,15. r. \frac{\log(h_1 + r/2) - \log(h_n + r/2)}{t_n - t_1} \quad (4.1)$$

Onde, r (cm) é o raio do poço; t_1 (s) é o tempo inicial; h_1 (cm) é o nível d'água no tempo inicial; t_n (s) é o tempo final; h_n (cm) é o nível d'água no tempo final; k (cm/s) é a permeabilidade saturada do solo.

4.1.5.2.1. Base de dados – Permeabilidade

Este trabalho contou com uma boa base de dados de permeabilidade, construída utilizando a metodologia do ensaio Porchet que é demonstrada a seguir. Como atestado de qualidade da base supracitada, apresenta-se o mapa de permeabilidade da cidade de Medellín (Figura 4.13), obtido a partir da extrapolação destes dados utilizando um modelo neural que correlacionou índices de plasticidade com valores de permeabilidade.

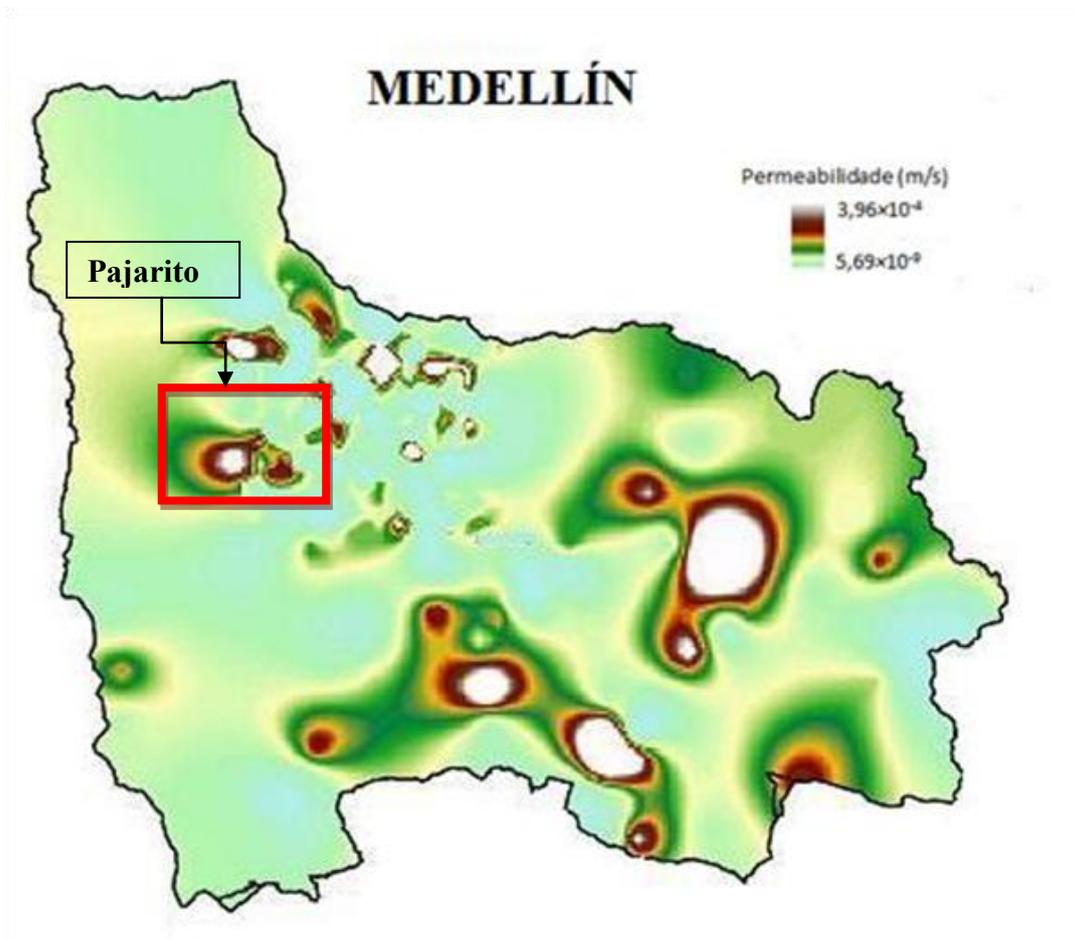


Figura 4.13– Mapa de permeabilidade de Medellín

4.1.6. Ensaio de cisalhamento direto

Com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência nos taludes estudados foram realizados ensaios de cisalhamento direto. A coesão, c' , e o ângulo de atrito, ϕ' , foram determinadas nas condições de campo, abaixo da umidade de campo e saturada. O objetivo deste procedimento é avaliar o efeito da sucção nos parâmetros em questão.

O procedimento adotado nos ensaios de cisalhamento direto foram os prescritos por Head (1982), onde a tensão é aplicada e permanece constante até que a estabilização das deformações verticais aconteça. A partir desta etapa a tensão de cisalhamento é aplicada à amostra a uma velocidade conhecida e suficiente para se garantir a drenagem. Para a realização do ensaio de cisalhamento na condição saturada a amostra foi deixada inundada pelo período de 1 hora antes da aplicação da tensão vertical e ao início da fase de cisalhamento. Para a determinação da envoltória de resistência as amostras foram submetidas

a três níveis de tensão normal iguais a 30 kPa, 60 kPa e 120 kPa e velocidade de deslocamento para a fase de cisalhamento foi de 0,4572 mm/min, definida em função do período de duração de 4 horas para garantir a drenagem durante a realização de cada ensaio. A determinação dos pontos da envoltória de resistência para obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito foi definida por meio da análise das tensões cisalhantes máximas e residuais para cada ensaio realizado. As Figura 4.14 à Figura 4.17 mostram procedimento de montagem dos corpos de provas a serem submetidos ao cisalhamento.



Figura 4.14 - Moldagem do corpo de provas



Figura 4.15 - Montagem da caixa de cisalhamento



Figura 4.16 - Extração do corpo de prova para a caixa de cisalhamento



Figura 4.17 – Acompanhamento das medições de cisalhamento direto

4.1.7. Curvas características

Visando caracterizar o comportamento hidráulico de solos não saturados foi feita a determinação das curvas características para os perfis de solo desta pesquisa. As curvas características permitiram a determinação indireta, aproximada, da sucção nos ensaios de laboratório e campo. A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de curva característica foi realizada com os mesmos anéis de moldagem utilizados nos ensaios de cisalhamento direto.

A curva característica do solo foi obtida utilizando-se o método do papel filtro. Este método foi escolhido por ser simples e por cobrir uma ampla faixa de medida sucção que atenderá as necessidades deste trabalho. Esta técnica consiste em manter um solo com uma umidade conhecida em contato com o papel filtro. O papel, com uma umidade menor acaba absorvendo uma determinada quantidade de água do solo, até que esse sistema (solo + papel) esteja equilibrado. Para esta determinação, o papel filtro utilizado foi o Whatman nº 42.

Antes de começar a manejar o solo, os papéis filtro foram recortados em uma circunferência correspondente ao diâmetro do molde e acondicionados em um ambiente seco e arejado. O manuseio dos papéis deu-se com o auxílio de uma pinça, tal ato, visa evitar preservar ao máximo as condições ideais do papel filtro. Os papéis foram retirados do envelope apenas quando se estava prestes a embalar as amostras

Os ensaios foram realizados em trajetórias mistas de molhagem e secagem. Após determinação do índice de vazios, umidade natural e da massa específica de cada uma das amostras, foi realizada a distribuição das umidades requeridas e as respectivas massas úmidas para alcançar tais pontos de umidade. Na trajetória de umedecimento, o corpo de prova foi submetido a gotejamento de água destilada com o auxílio de uma pipeta. Na trajetória de secagem, as umidades desejadas foram atingidas expondo as amostras à secagem ao ar.

Três papéis filtro foram utilizados por copo de prova, os dois papéis situados nas partes extremas (inferior e superior) apresentam o mesmo diâmetro, já o papel do meio apresenta uma dimensão ligeiramente menor tal procedimento é realizado como o intuito de protegê-lo contra a contaminação por partículas de solo do papel intermediário. Ao fim apenas o papel superior e o papel do meio são levados à pesagem.

As amostras foram postas em contato com os papéis filtro, envolvidas com papel filme e papel alumínio e devidamente lacradas com fita adesiva. Cada corpo de prova foi identificado segundo a umidade requerida e acondicionado numa caixa térmica em condições de temperatura constante como mostra a Figura 4.18. O tempo esperado para pesagem dos papéis filtro foi de 20 dias.



Figura 4.18 – Corpos de prova acondicionados na caixa térmica

Ao fim do prazo estimado para o equilíbrio os pacotes com os corpos-de-prova e os papéis foram abertos e, novamente, com o auxílio de uma pinça, os papéis filtros localizados no meio e na extremidade superior foram submetidos à pesagem em uma balança de precisão de

0,0001 mm. Estando o sistema (solo + papel) em equilíbrio, a pesagem destes papéis possibilita a verificação da execução correta do ensaio.

O procedimento de pesagem iniciou-se com a limpeza da estufa para garantir que impurezas não contaminassem os papéis. Posteriormente a mesma foi ligada e assim permaneceu por uma hora, antes de colocar os papéis. O objetivo desse procedimento é evitar variações na temperatura durante o acendimento do equipamento. Sob uma temperatura de aproximadamente 105° C, os papéis foram pesados e submetidos à secagem em estufa por um período de três horas, depois disso são pesados novamente.

A pesagem dos papéis filtro requer muita agilidade e atenção. Visando garantir que a remoção do papel filtro do ambiente de equilíbrio e da estufa ocorresse sem interferências significativas na umidade do papel, a transferência do sistema de equilíbrio para a balança e da estufa para balança foi realizada da maneira mais rápida possível. Finalizando o processo foram tomadas as umidades finais dos corpos de prova, as quais foram correlacionadas com os valores de sucção obtidos com base no papel filtro.

4.1.8. Apresentação dos resultados de caracterização do solo

4.1.8.1. Curva Granulométrica e Limites

A Tabela 4.2 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização. apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização para os solos estudados.

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.

| Ident. Das Amostras | Ensaio de Granulometria | | | | | | Limites de Consistência | | | Gs | K |
|---------------------|-------------------------|------|------|------|-------|------|-------------------------|----|----|-------------------|-----------------------|
| | PED | A.G. | A.M. | A.F. | SILTE | ARG | LL | LP | IP | kN/m ² | m/s |
| Am - 1 SD | 3,9 | 20,2 | 26,9 | 33 | 12,2 | 4,1 | | | | | |
| Am - 1 CD | 3,9 | 5,3 | 3,9 | 7,2 | 10,9 | 69,9 | 59 | 32 | 27 | 2,66 | 1,39.10 ⁻⁵ |
| Am - 2 SD | 6,4 | 10 | 14,3 | 31 | 29,5 | 8,5 | | | | | |
| Am - 2 CD | 6,4 | 7,2 | 7,4 | 2,9 | 12,7 | 63,4 | 58 | 42 | 16 | 2,71 | NA |

Para efeito de ilustração, as Figura 4.19 – Curva granulométrica sem defloculante da Amostra 1 – Areia silto-argilosa com vestígios de pedregulho. - Figura 4.22 – Curva granulométrica com defloculante da Amostra 2 – Argila areno-siltosa com pedregulho.apresentam as curvas granulométricas (com e sem defloculante) das Amostras 01 e 02 respectivamente.

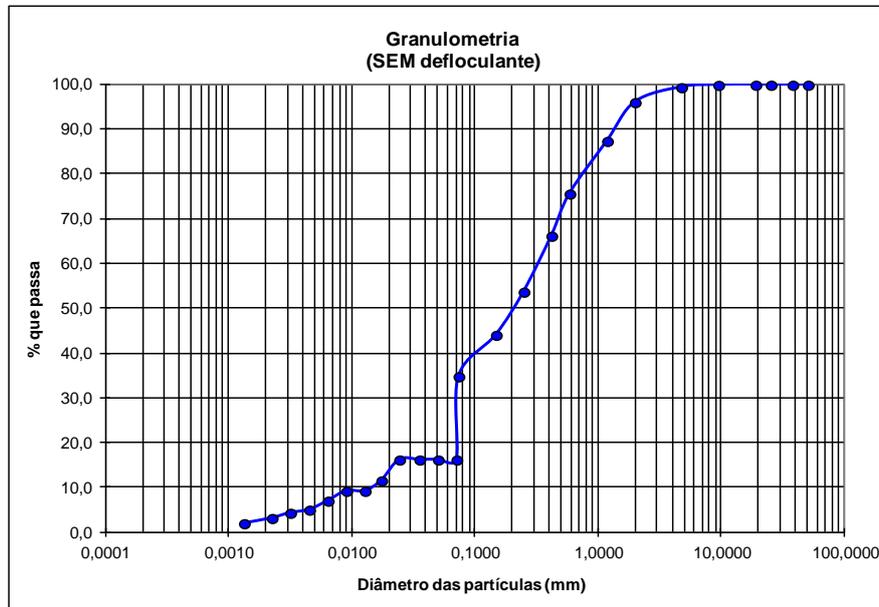


Figura 4.19 – Curva granulométrica sem defloculante da Amostra 1 – Areia silto-argilosa com vestígios de pedregulho.

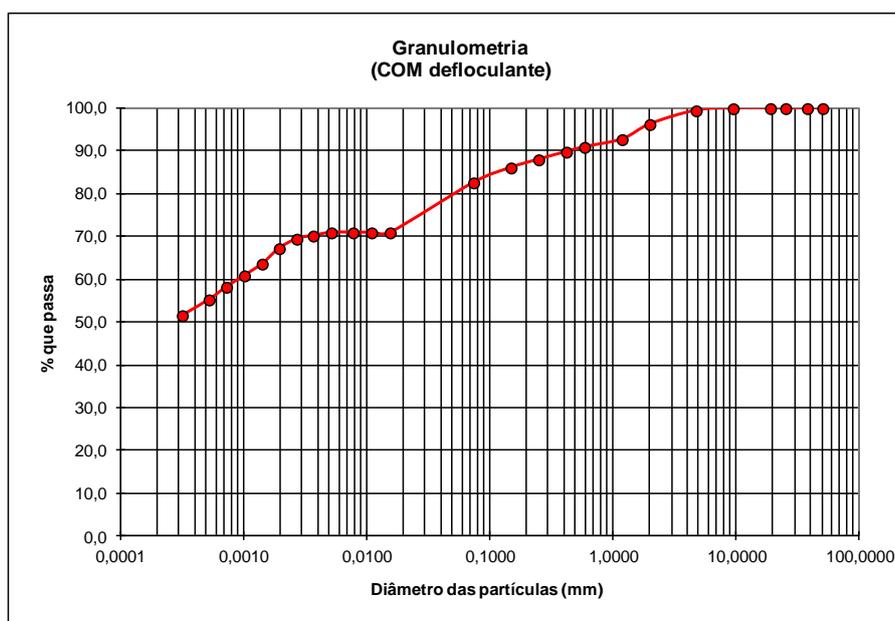


Figura 4.20 – Curva granulométrica com defloculante da Amostra 1 – Argila areno-siltosa com vestígios de pedregulho.

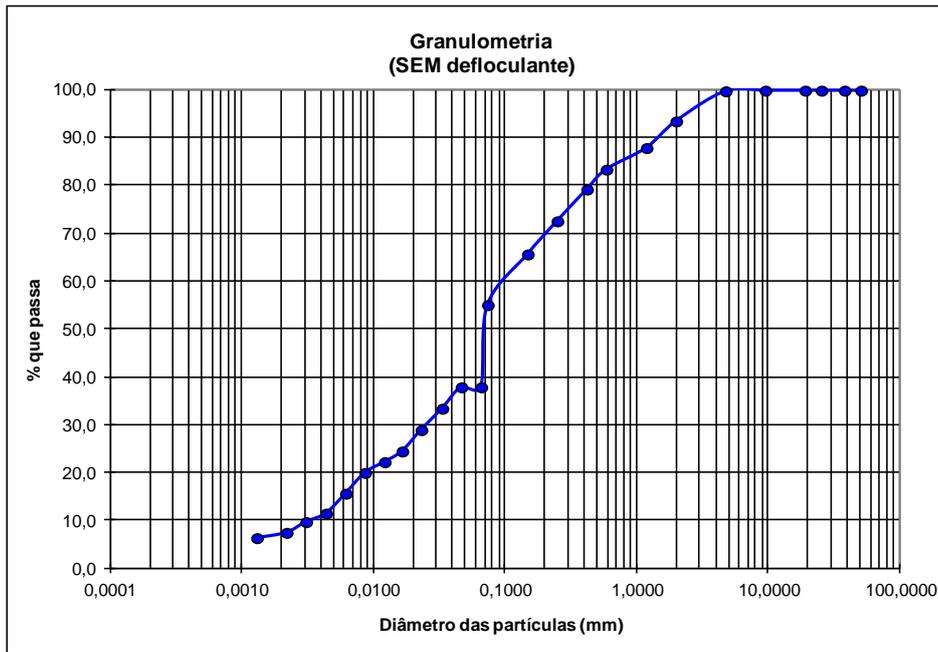


Figura 4.21 – Curva granulométrica sem defloculante da Amostra 2 – Areia silto-argilosa com pedregulho.

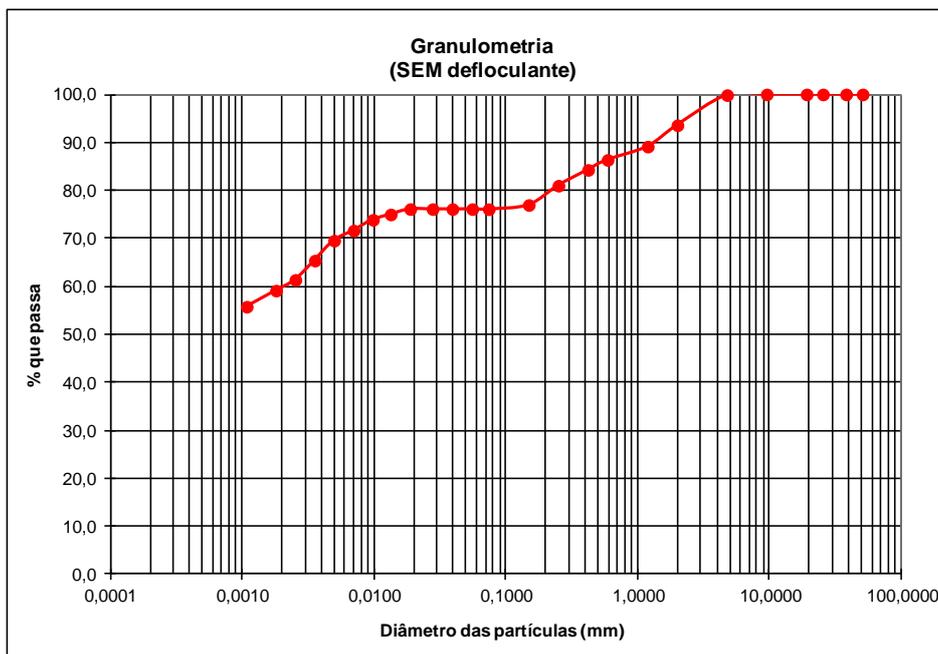


Figura 4.22 – Curva granulométrica com defloculante da Amostra 2 – Argila areno-siltosa com pedregulho.

O solo referente à Amostra 01 apresenta LL igual a 59%, LP igual a 32% e IP (índice de plasticidade) igual a 27%, foi classificado na carta de plasticidade de Casagrande como CH-MH (argila ou silte de alta plasticidade). O solo referente à Amostra 2, apresenta LL = 58%, LP = 42% e IP = 16% e foi classificado como OH (solo orgânico de alta plasticidade).

4.1.8.2. Cisalhamento direto

Nas Figura 4.23 à Figura 4.25 são apresentados os resultados de cisalhamento direto para diferentes condições de umidade (abaixo da umidade natural, na umidade natural, acima da umidade natural).

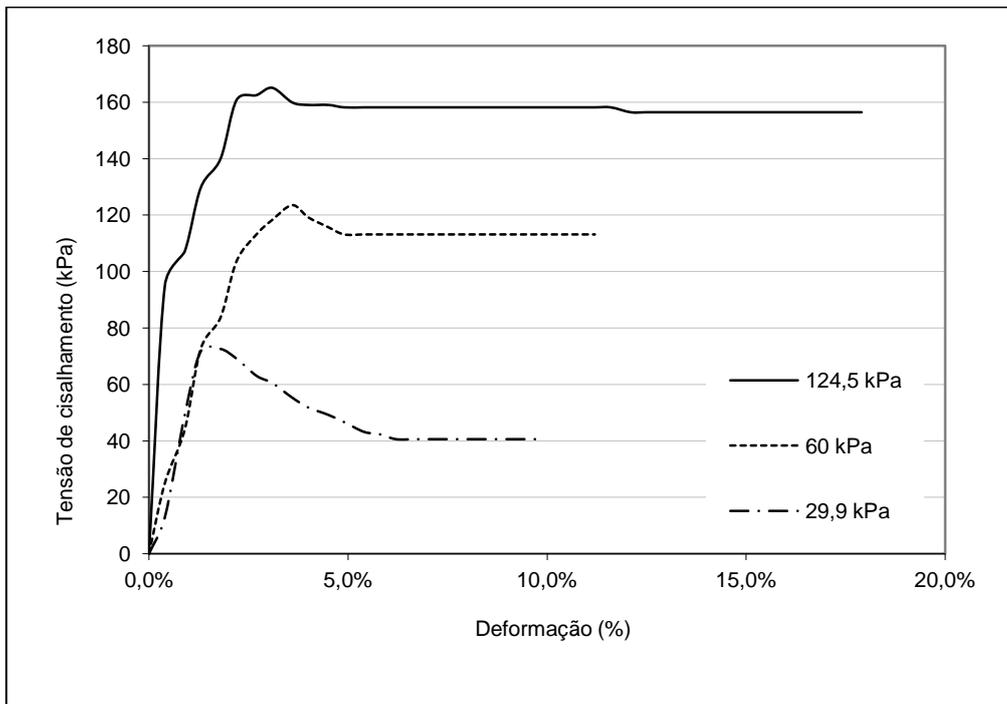


Figura 4.23 - Curva Tensão x Deformação - Amostra 1 – Umidade natural (40%).

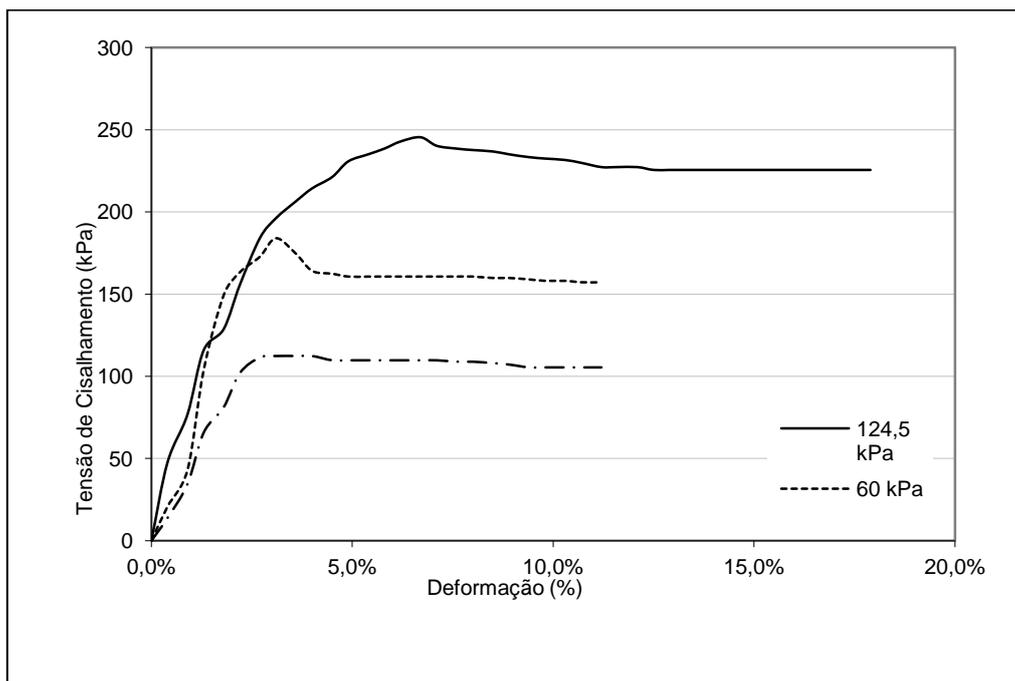


Figura 4.24 - Curva Tensão x Deformação - Amostra 1 – Abaixo da Umidade natural (25%).

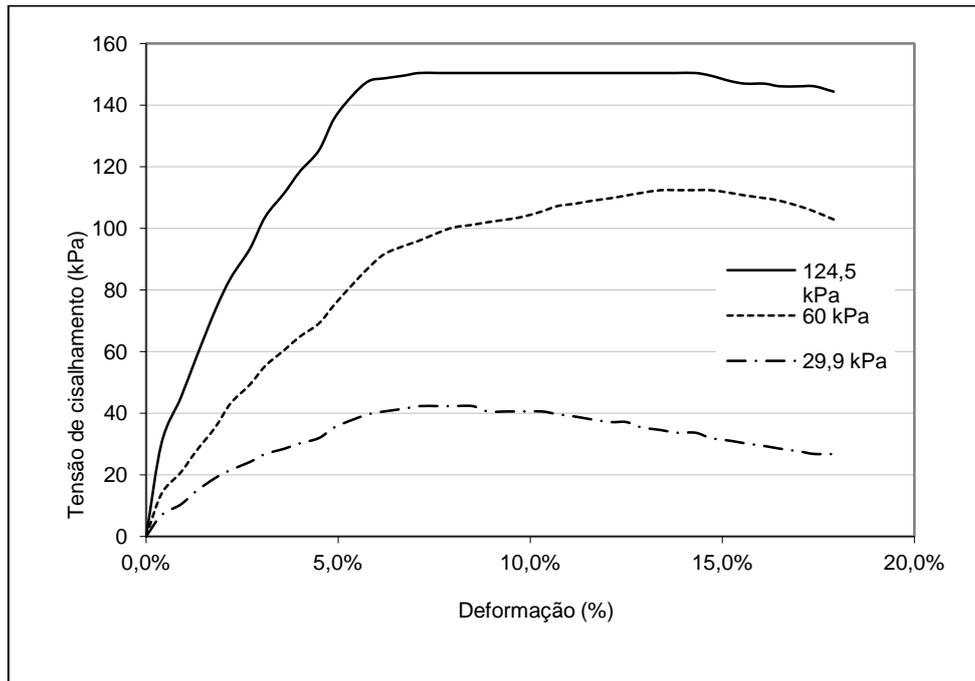


Figura 4.25 - Curva Tensão x Deformação - Amostra 1 – Acima da Umidade natural (78%).

Na Figura 4.26 apresenta-se a relação entre os valores obtidos de tensão cisalhante e os valores de sucção da Amostra 1. Os valores de sucção foram extraídos da curva característica do solo.

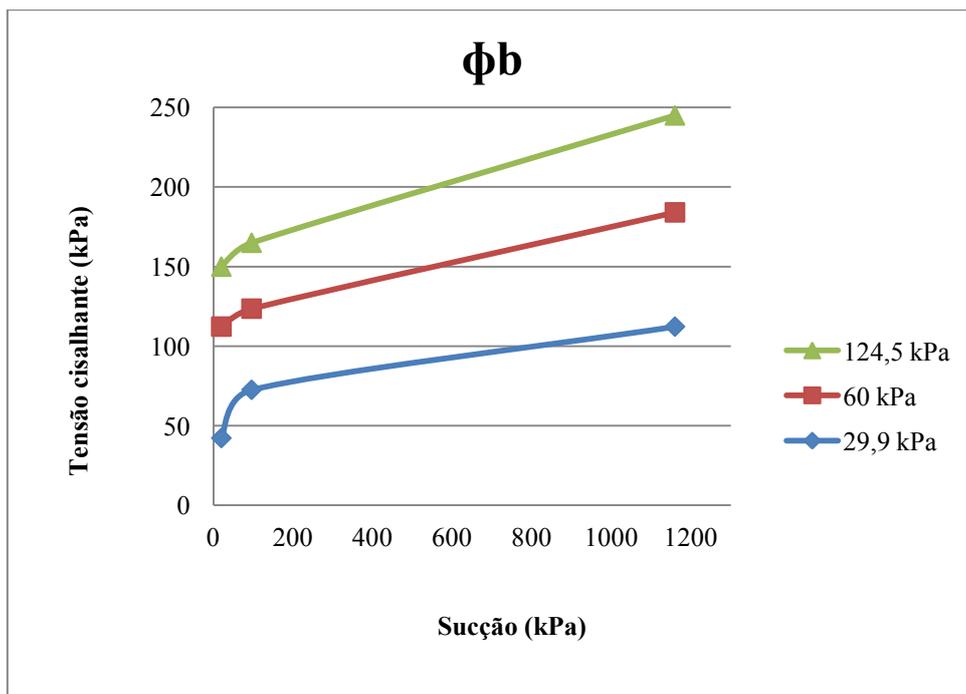


Figura 4.26 - Curva Tensão Cisalhante x Sucção (ϕ^b) - Amostra 1.

4.1.8.3. Curva Característica

Nas Figura 4.27 e Figura 4.28 apresentam-se as curvas características das Amostras 1 e 2. Nelas são apresentados os pontos e a curva de ajuste proposta por Van Genuchten (1980).

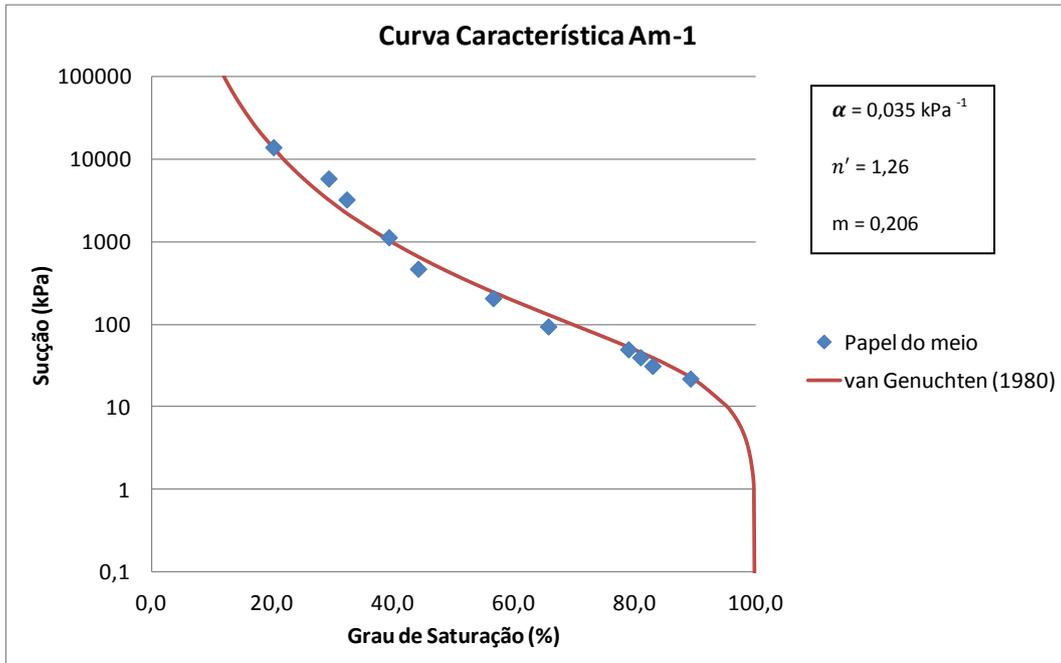


Figura 4.27 – Curva característica da Amostra 1.

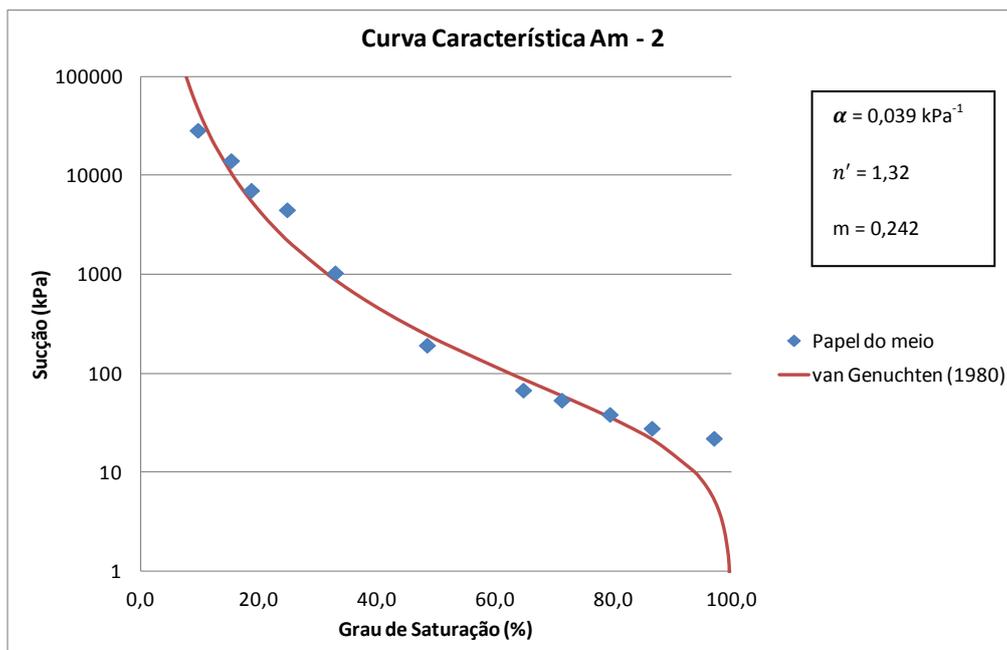


Figura 4.28 – Curva característica da Amostra 2.

4.2. Métodos

4.2.1. Infiltração no talude utilizando métodos numéricos

A modelagem numérica foi realizada utilizando-se um código FORTRAN baseado em elementos finitos. A este programa foi dado o nome de PROGRAM CONVI – KYOTO UNIVERSITY – OKA LABORATORY. Neste programa as equações de conservação de massa para água (Equação 17), conservação de massa para gás (Equação 18) e conservação de momento (Equação 33) foram discretizadas no tempo e espaço utilizando o método dos elementos finitos. Este programa é capaz de solucionar problemas de fronteira, tais como, processos de infiltração em meios porosos. As variáveis independentes são a poropressão de água e a poropressão do gás. Os elementos utilizados na modelagem são quadriláteros com quatro nós para o cálculo das poropressões de ar e água.

Com base nos ensaios de caracterização citados acima foram realizadas as simulações para diferentes infiltrações, a saber: 1 mm/h, 4 mm/h, 8 mm/h, 12 mm/h, 16 mm/h, 24 mm/h, 50 mm/h. Dessas simulações foram obtidas informações de variação de sucção, grau de saturação e poropressão. Este intervalo de precipitações foi determinado visando expor o talude à intensidades baixas, moderadas e intensidades que fossem bem próximas ao coeficiente de permeabilidade do solo (50mm/h).

4.2.2. Características Geométricas do talude 1

A seguir é apresentada a geometria do talude 1 (Figura 4.29), a malha utilizada na simulação e a localização do perfil de estudo. Devido à grande concentração de blocos de rocha no talude 2, a permeabilidade do mesmo não pode ser obtida. Em nenhuma camada foi possível realizar o ensaio de permeabilidade. A escolha do perfil foi feita visando uma localização em que pudesse ocorrer ruptura do talude. Os parâmetros utilizados para rodar as simulações estão apresentados abaixo na Tabela 4. 3.

Tabela 4. 3 – Parâmetros utilizados para a realização da simulação.

| Curva característica | | | Grau de saturação | | Permeabilidades (m/s) | | | | Porosidade |
|----------------------|------|-------|-------------------|-----|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|
| α | n' | m | Máx | Mín | k_{xw} | k_{yw} | k_{xg} | k_{yg} | η |
| 0,035 | 1,26 | 0,206 | 97% | 0 | $1,39 \cdot 10^{-4}$ | $1,39 \cdot 10^{-5}$ | $1,00 \cdot 10^{-3}$ | $1,00 \cdot 10^{-3}$ | 64,54% |

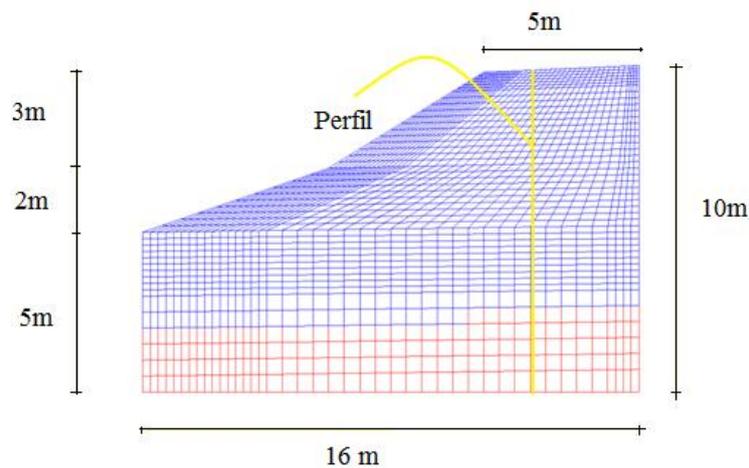


Figura 4.29 – Geometria, malha e localização do perfil no talude 1.

4.2.3. Condições de contorno

O esquema de deslocamento do talude é apresentado na Figura 4. 30. O esquema mostra que a superfície é livre enquanto que as laterais tem restrições na direção x. A parte inferior tem restrições tanto na direção “x” quanto em “y”

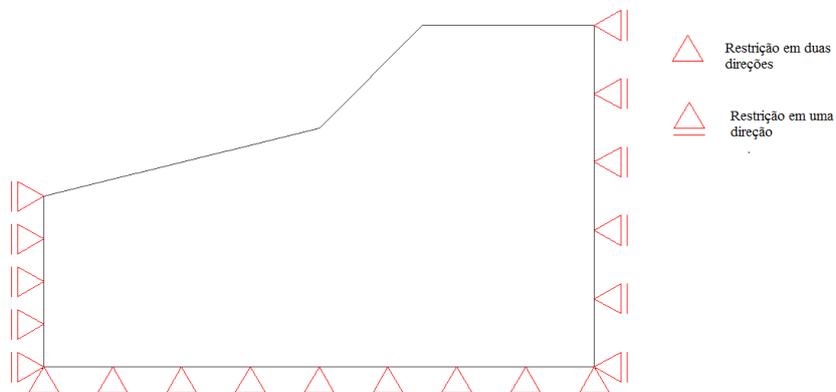


Figura 4. 30 – Esquematização do contorno de deslocamento do talude 1.
 Na Figura 4. 31 é apresentado o esquema das fronteiras de infiltração do talude 1. Na superfície encontra-se a fronteira de chuva, local por onde a água advinda da chuva infiltrará. Nas laterais encontram-se as fronteiras drenadas, locais por onde a água escoará.

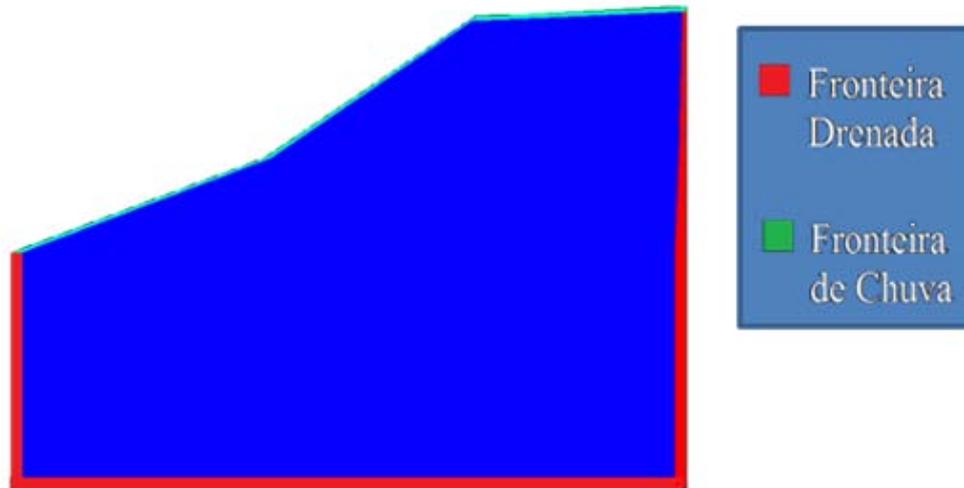


Figura 4. 31 – Condições de infiltração

4.2.4. Infiltração no talude utilizando métodos analíticos

A análise de infiltração no talude por meio do método analítico foi realizada utilizando-se três equações, a saber:

- Lumb (1975) – ver Equação 4.2;
- Pradel&Raad's (1993) – ver Equações 4.3 e 4.4;

$$z_w = \frac{k \cdot t}{n(\theta_f - \theta_o)} \quad (4.2)$$

$$T_w = \frac{\theta_f - \theta_o}{k} \left[z_w - \Psi_f \ln \left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$v_i = k \left[\frac{z_w + \Psi_f}{z_w} \right] \quad (4.4)$$

Onde v_i é a velocidade de avanço da frente úmida solo e Ψ_f é a sucção capilar na frente de umidade.

5. Apresentação e análise dos resultados da modelagem numérica

No presente capítulo serão apresentados, inicialmente, os resultados obtidos das simulações para diferentes intensidades de chuva. Em seguida serão apresentados os perfis de sucção e de saturação acompanhados de suas respectivas ilustrações. Na sequência serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos por solução analítica e modelagem numérica. Por fim são apresentados os fatores de segurança para o talude em estudo.

5.1. Resultados das simulações

O perfil de sucção referente à chuva de 1mm/h é apresentado na Figura 5.1. Através do perfil pode-se verificar perdas de sucção até a profundidade de 0,60 m.

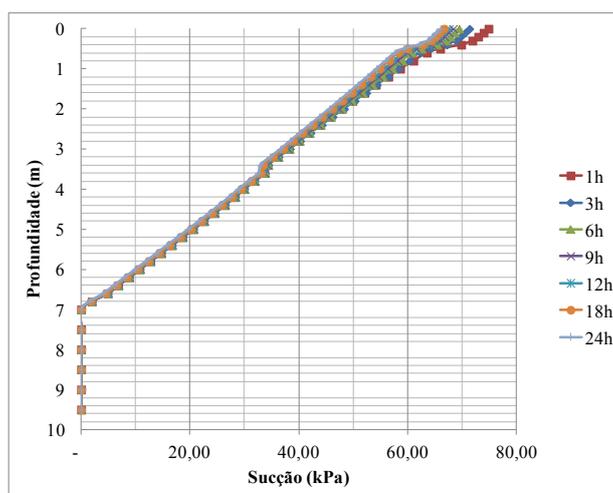


Figura 5.1 – Perfil de Sucção para a chuva de 1mm/h.

Na Figura 5.2 é mostrada a ilustração do perfil de sucção para a chuva de 1mm/h. A título de simplificação são mostradas as ilustrações nos tempos (1h – 10h – 20h – 24h). Abaixo do desenho do talude encontra-se a legenda com os valores de sucção variando entre 0,00 e 96 kPa.

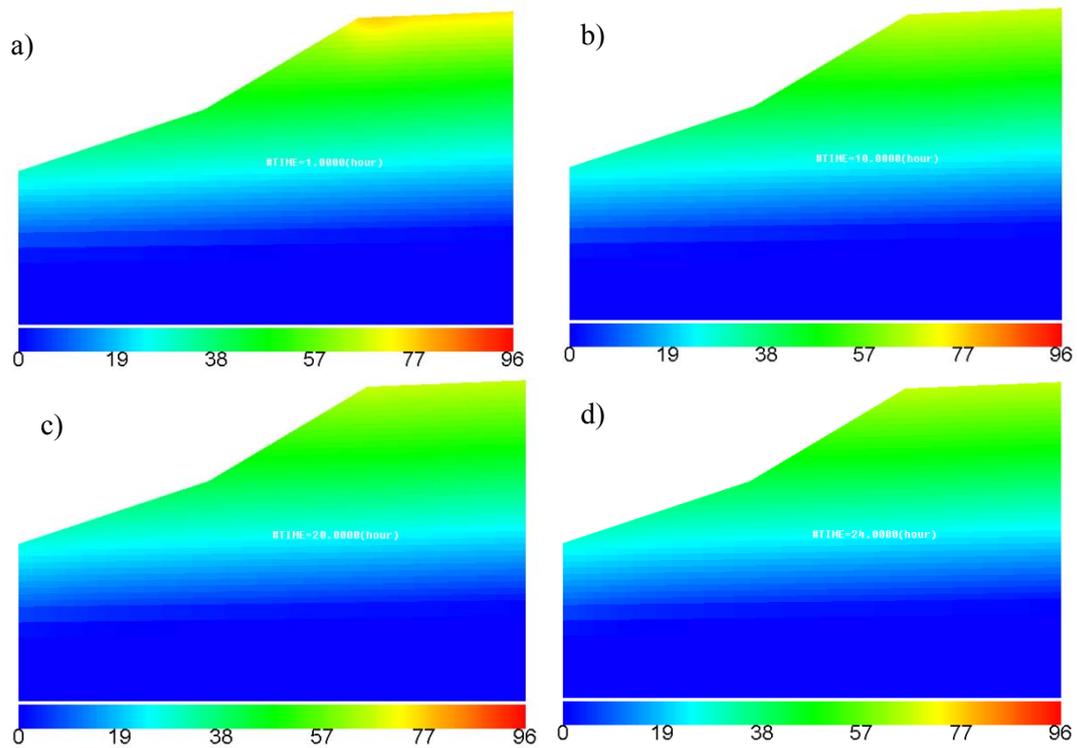


Figura 5.2 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 1mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h).

A Figura 5. 3 apresenta o perfil de saturação para a chuva de 1mm/h. O valor máximo obtido de grau de saturação (S_r), na frente de umidescimento, para 24h de precipitação foi de 75% atingindo somente às camadas superficiais (até os 60 cm).

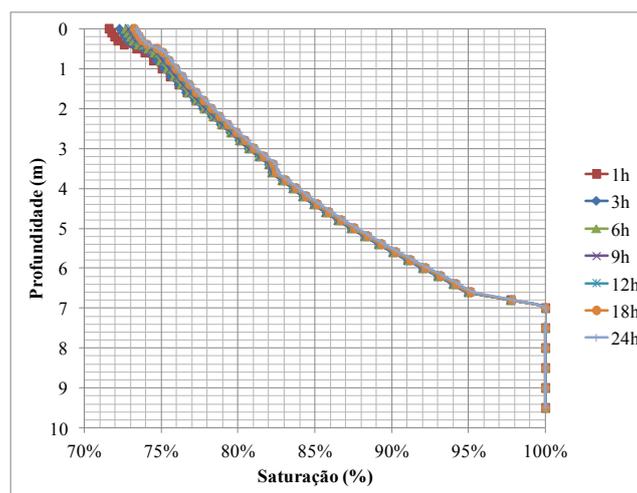


Figura 5. 3 – Perfil de saturação para a chuva de 1mm/h.

A Figura 5.4 apresenta a ilustração do perfil de saturação para a chuva de 1mm/h. Para uma intensidade relativamente baixa como a em questão é possível perceber que a alteração no

grau de saturação alcançou profundidades rasas, os valores de grau de saturação variam entre 68 e 100%

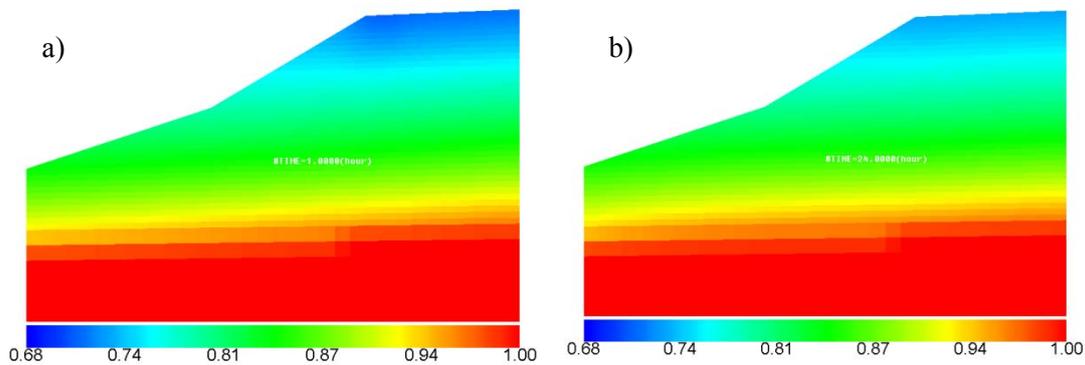


Figura 5.4 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 1mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (24h).

O perfil de sucção para a chuva de 4 mm/h é apresentado na Figura 5.5. A partir do exposto é possível acompanhar o avanço da frente de umidade. Ver Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Avanço da frente de umedecimento para a chuva de 4mm/h

| Avanço da frente de umedecimento para a chuva de 4mm/h | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|----|----|
| Tempo (h) | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 |
| Profundidade (m) | 1,2 | 2,2 | 3,2 | 3,8 | 7 | 7 |

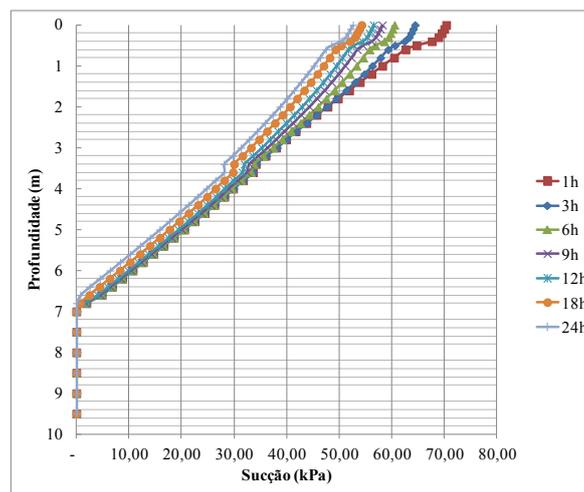


Figura 5.5 - Perfil de Sucção para a chuva de 4mm/h.

A Figura 5.6 mostra a ilustração do perfil de sucção para a chuva de 4mm/h.

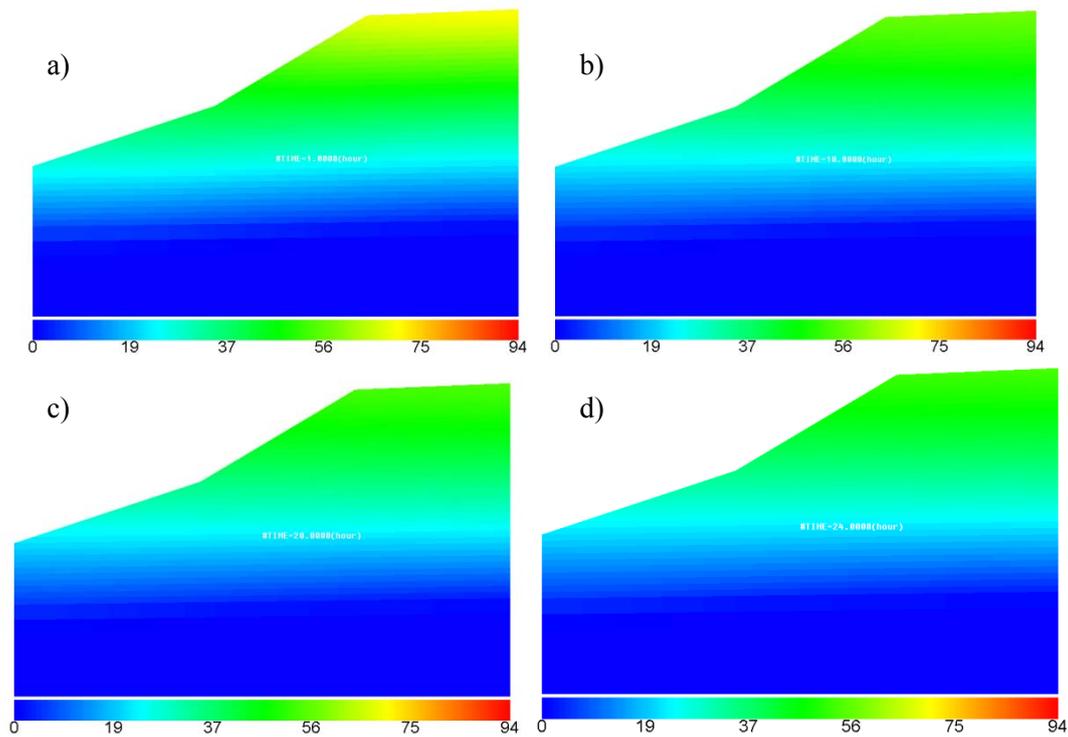


Figura 5.6 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 4mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h).

Na Figura 5.7 mostra-se o perfil de saturação do talude para a chuva de 4mm/h. Os valores de S_r obtidos mostram-se mais elevados à uma profundidade de 7,0 m, em plena concordância com o exposto no perfil de sucção da chuva de 4mm/h. A Figura 5.8 apresenta a ilustração dos perfis de saturação.

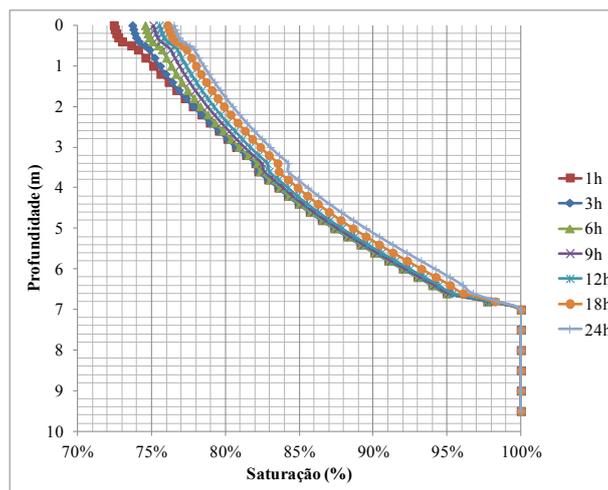


Figura 5.7 – Perfil de saturação para a chuva de 4 mm/h.

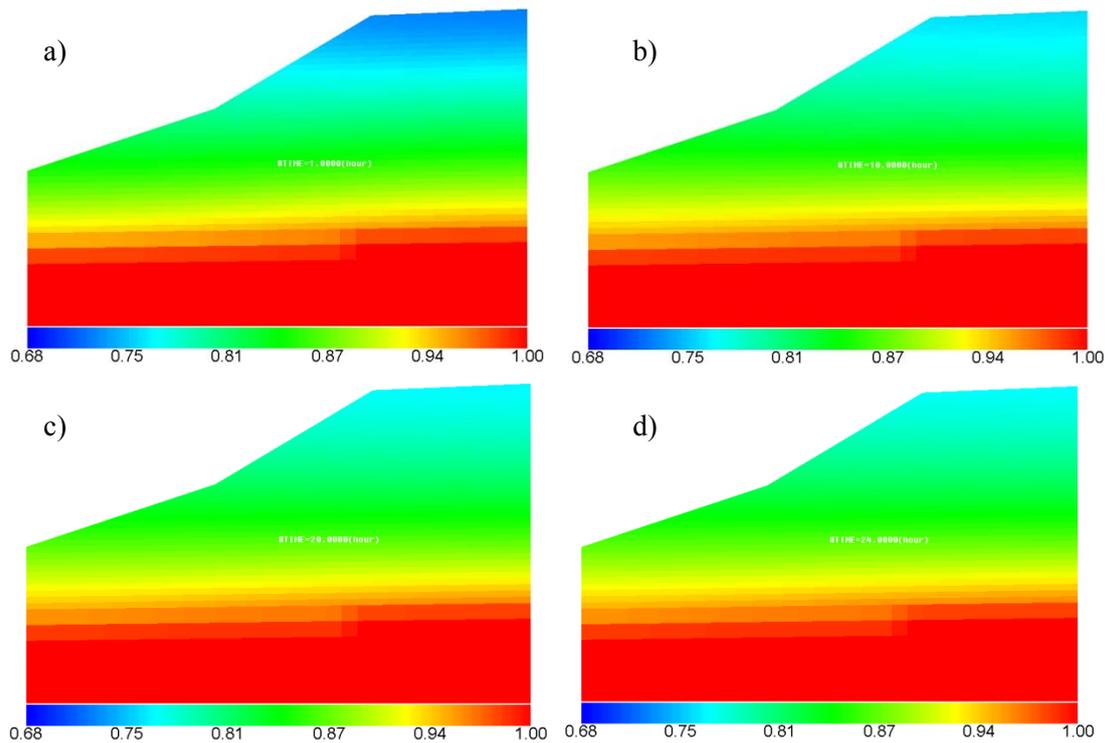


Figura 5.8 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 4mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h).

Na Figura 5.9 mostra-se o perfil de sucção para chuva de 8mm/h. Para 24h de chuva verifica-se que a perda máxima de sucção atingiu uma profundidade de 6,2 m. Em seguida apresenta-se a ilustração do perfil de sucção na Figura 5.10. O resumo das profundidades atingidas pela frente de umidecimento para a chuva de 8mm/h estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 8mm/h

| Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 8mm/h | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|----|----|
| Tempo (h) | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 |
| Profundidade (m) | 2,2 | 3,2 | 4,2 | 5,2 | 7 | 7 |

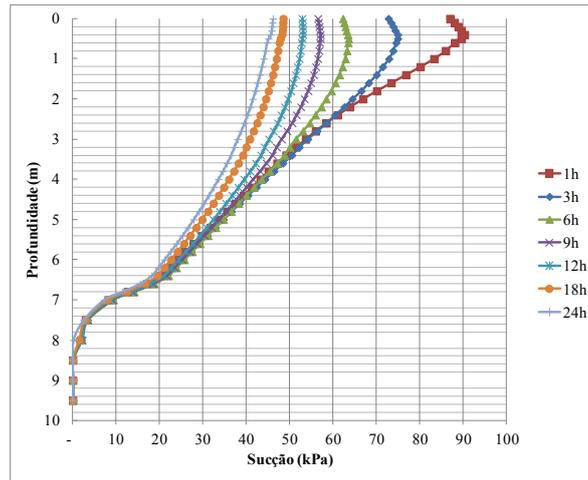


Figura 5.9 - Perfil de Sucção para a chuva de 8mm/h.

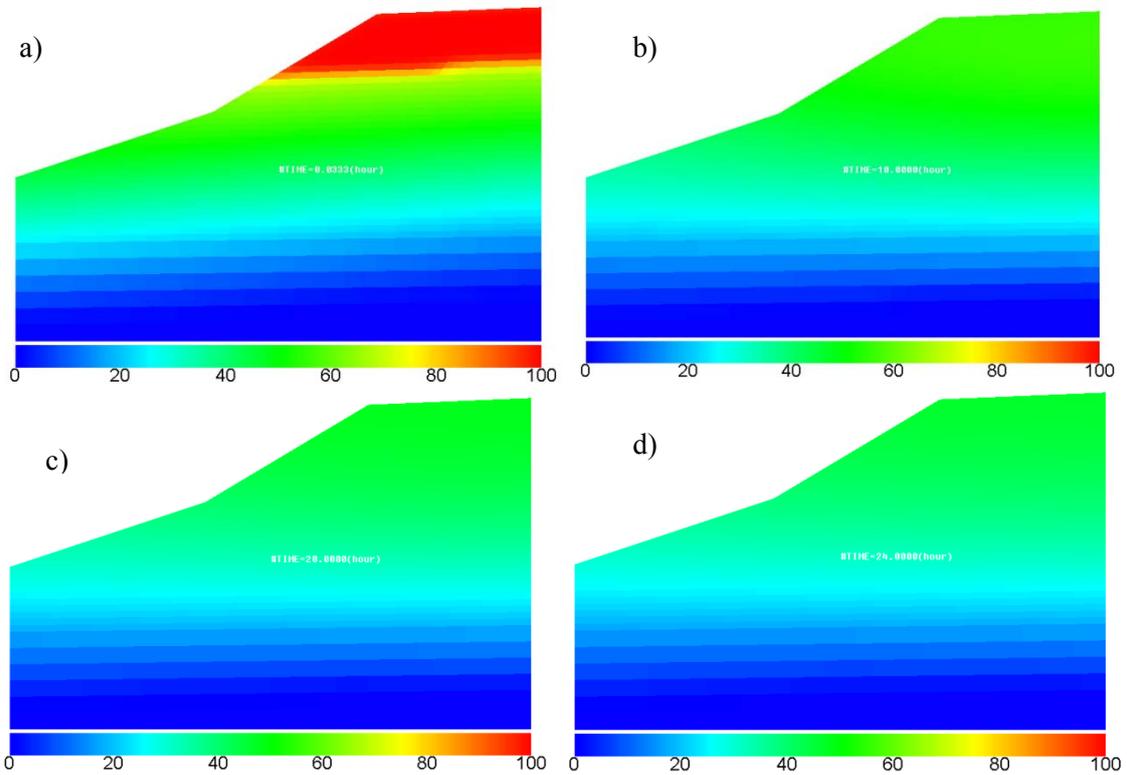


Figura 5.10 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 8mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h).

A Figura 5.11 apresenta o perfil de saturação obtido para chuva de 8mm/h. Na Figura 5.12 é apresentada a ilustração do processo.

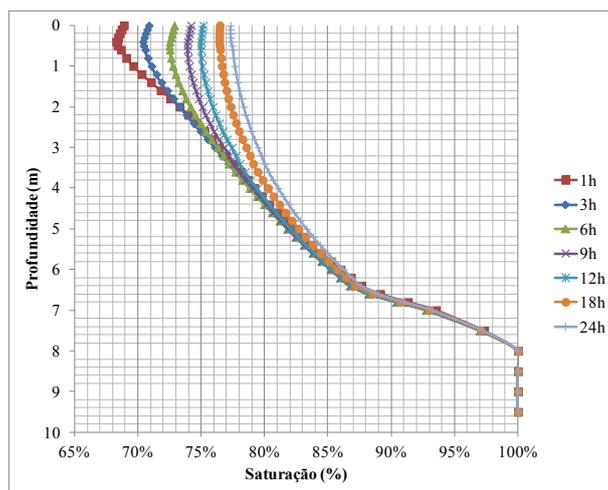


Figura 5.11 – Perfil de saturação para a chuva de 8 mm/h.

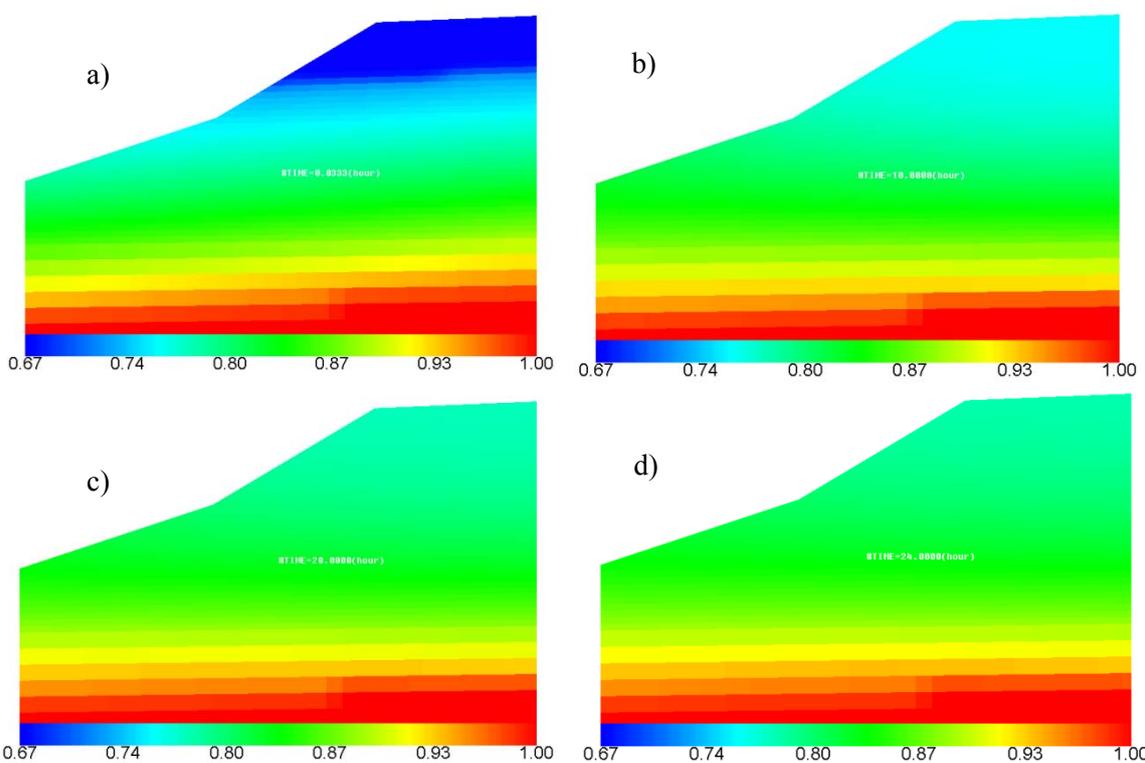


Figura 5.12 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 8 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h).

Na Figura 5.13 apresenta-se o perfil de sucção para a chuva de 12 mm/h. Com o aumento da intensidade da chuva a perda máxima de sucção ocorre mais rapidamente. A profundidade máxima atingida é de aproximadamente 7,0 m. O perfil de sucção para a chuva de 12mm/h esta ilustrado na Figura 5.14.

Tabela 5.3 - Avanço da frente de umedecimento para a chuva de 12mm/h.

| Avanço da frente de umedecimento para a chuva de 12mm/h | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|----|----|
| Tempo (h) | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 |
| Profundidade (m) | 2,2 | 3,6 | 4,8 | 5,8 | 7 | 7 |

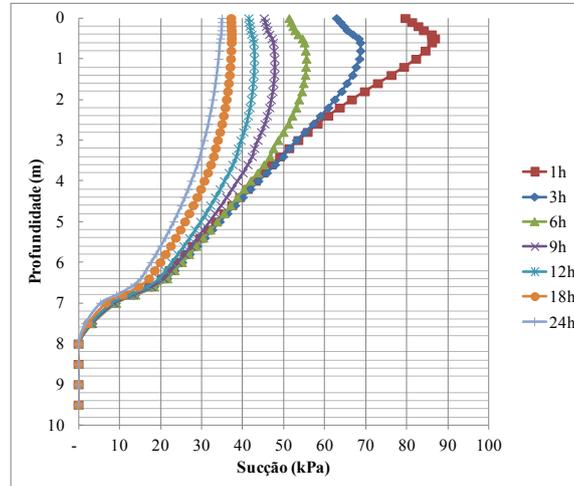


Figura 5.13 - Perfil de Sucção para a chuva de 12 mm/h.

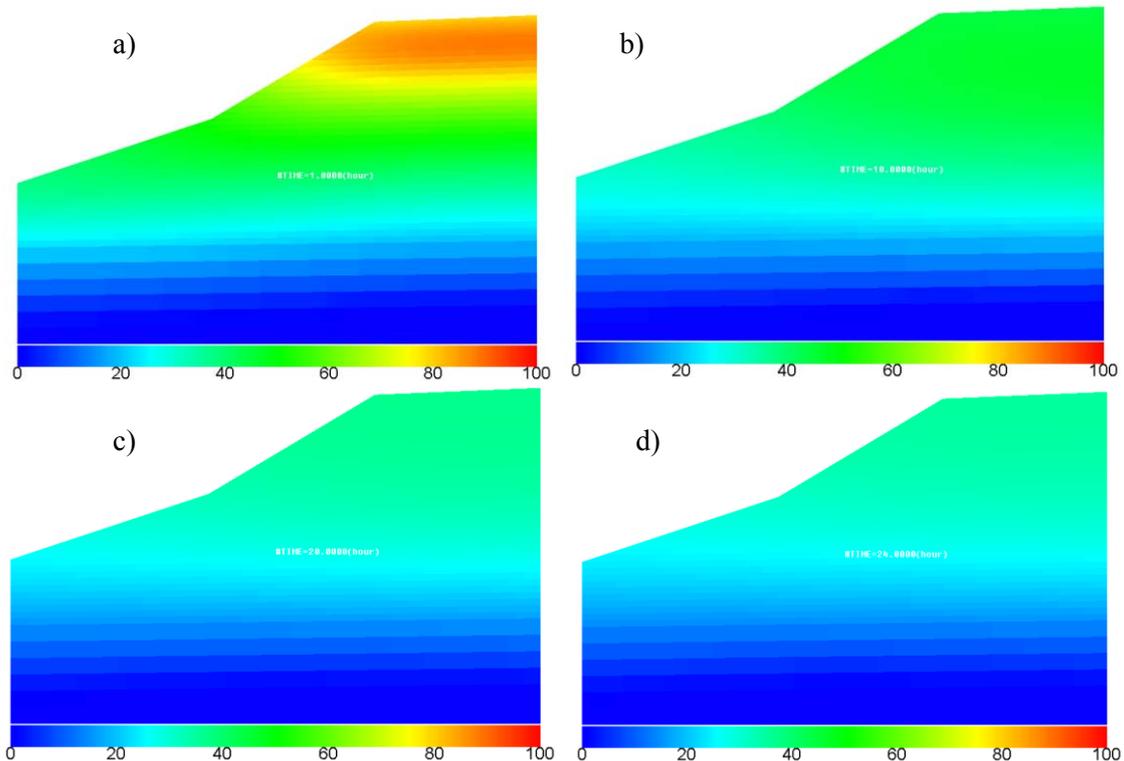


Figura 5.14 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 12 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h)

A Figura 5.15 mostra o perfil de saturação para a chuva de 12mm/h. O S_r máximo alcançado nesse perfil é de 80 %. Na ilustração do mesmo perfil (Figura 5.16) é possível verificar

também que com o aumento da intensidade da chuva profundidades maiores são alcançadas num tempo inferior.

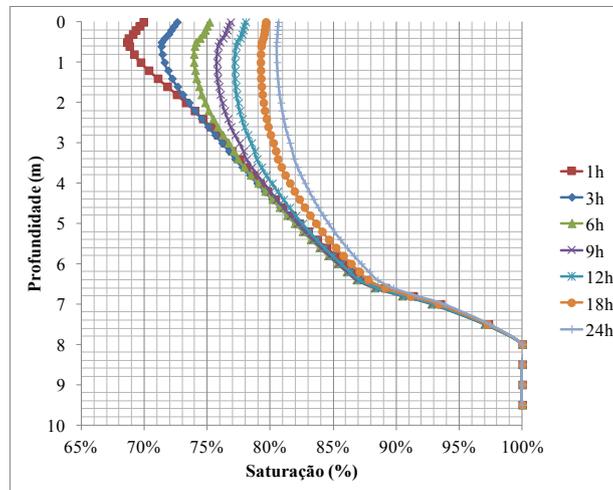


Figura 5.15 – Perfil de saturação para a chuva de 12 mm/h

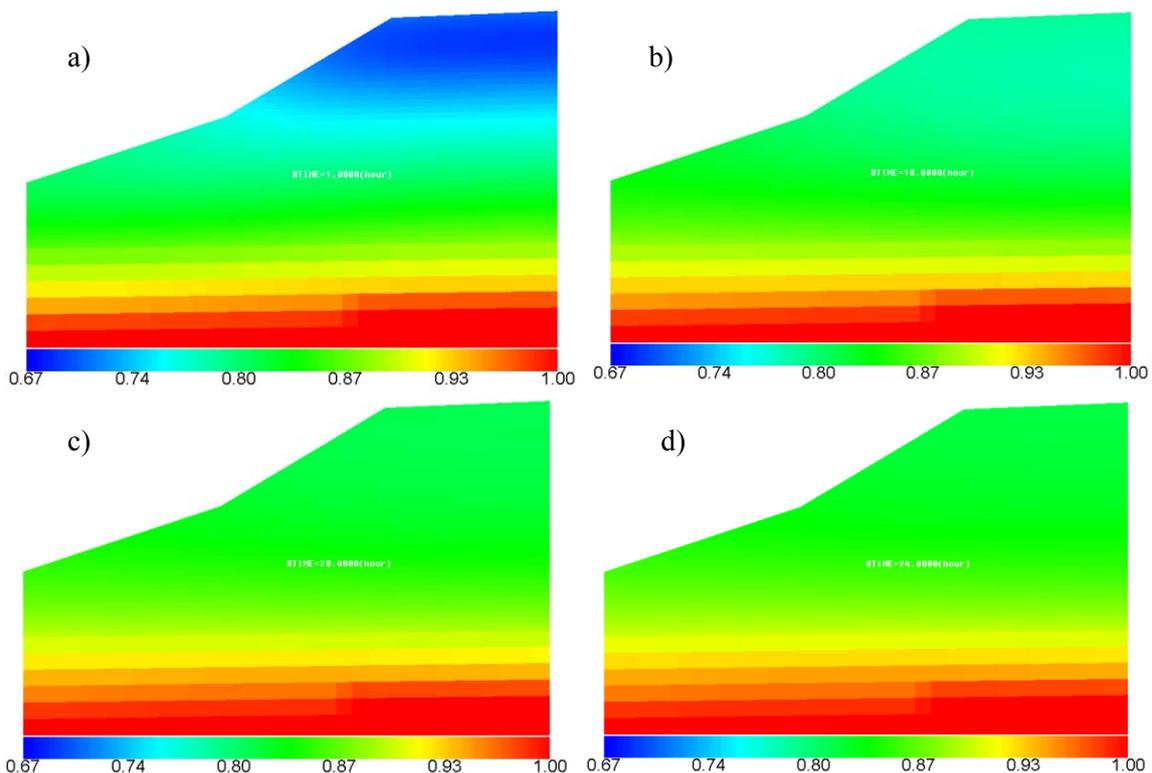


Figura 5.16 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 12 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h)

O perfil de sucção para a chuva de 16 mm/h é apresentado na Figura 5.17. A ilustração do seu processo de infiltração esta apresentada na Figura 5.18. A Tabela 5.4 apresenta o resumo das profundidades atingidas pela frente de umidade.

Tabela 5.4- Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 16mm/h.

| Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 16mm/h | | | | | | |
|---|---|-----|---|----|----|----|
| Tempo (h) | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 |
| Profundidade (m) | 3 | 5,4 | 7 | 7 | 7 | 7 |

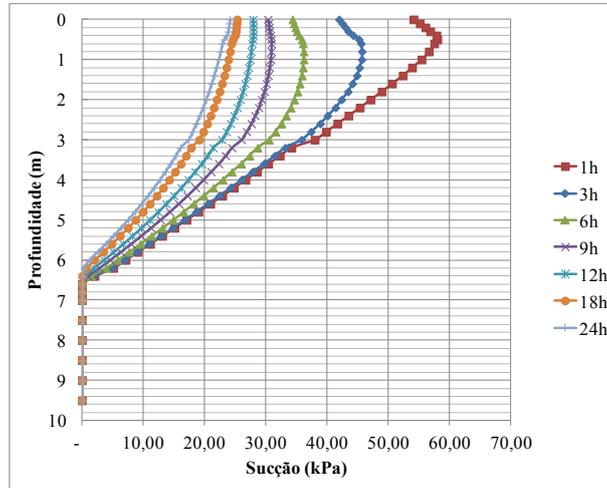


Figura 5.17 - Perfil de Sucção para a chuva de 16 mm/h

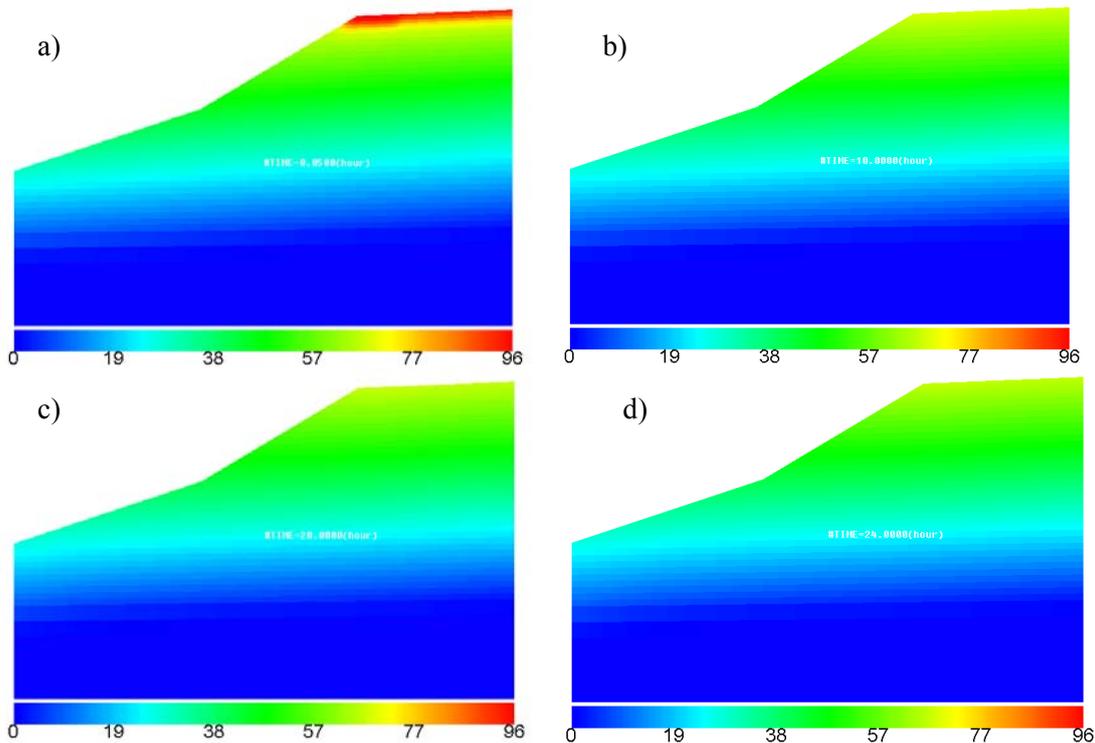


Figura 5.18 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 16 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h)

A Figura 5.19 mostra o perfil de saturação para a chuva de 16 mm/h. Na ilustração do mesmo perfil (Figura 5.20) é possível ver que A profundidade de 7,0 m é alcançada em 9h. Comparado com as chuvas de menor intensidade tem-se aqui a manutenção da lógica

anteriormente citada de que quanto maior a intensidade da chuva mais rapidamente maiores profundidades são atingidas.

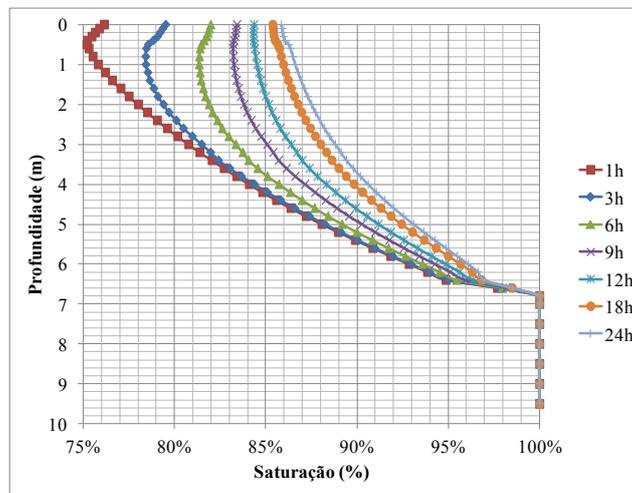


Figura 5.19 – Perfil de saturação para a chuva de 16 mm/h

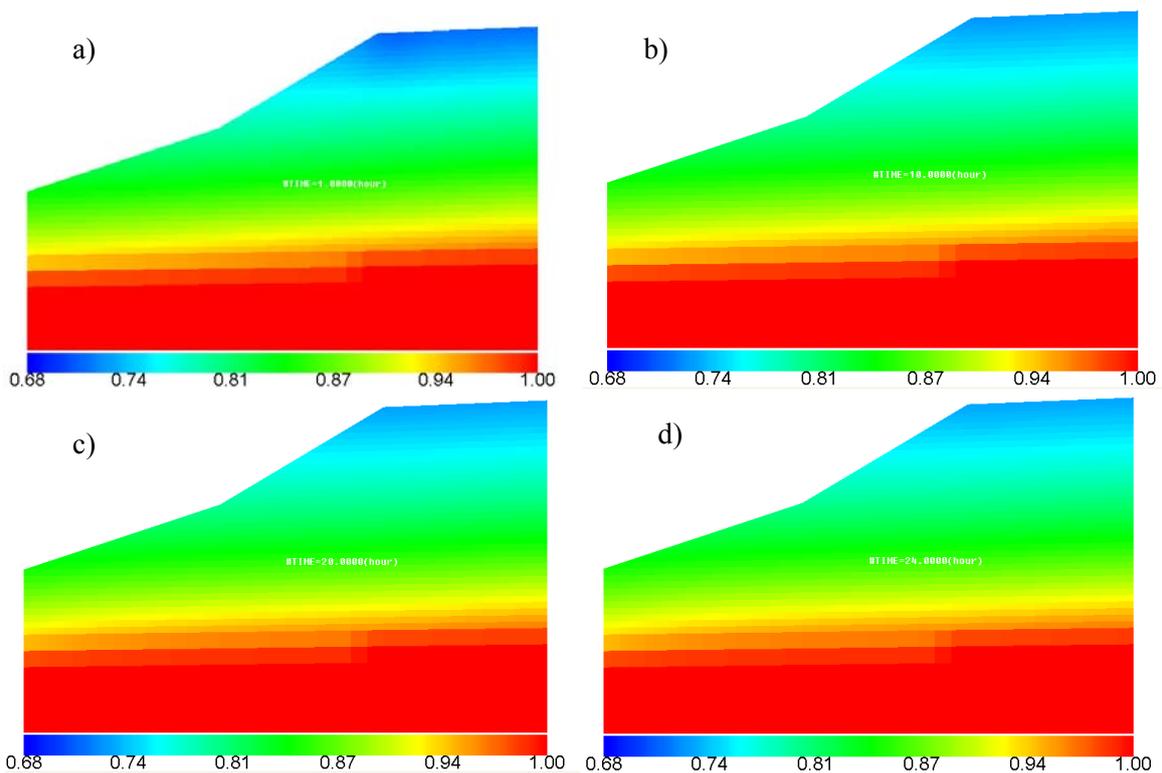


Figura 5.20 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 16 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (20h) – d) Perfil de saturação (24h)

Na Figura 5.21 apresenta-se o perfil de sucção para a chuva de 24 mm/h. A Tabela 5.5 mostra os avanços da frente de umedecimento ao longo do processo de infiltração da chuva de 24 mm/h. Mantendo a tendência, a perda máxima de sucção ocorre mais rapidamente e diretamente proporcional ao aumento da intensidade da precipitação.

Tabela 5.5 - Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 24mm/h

| Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 24mm/h | | | | | | |
|---|-----|---|---|----|----|----|
| Tempo (h) | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 |
| Profundidade (m) | 4,8 | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 |

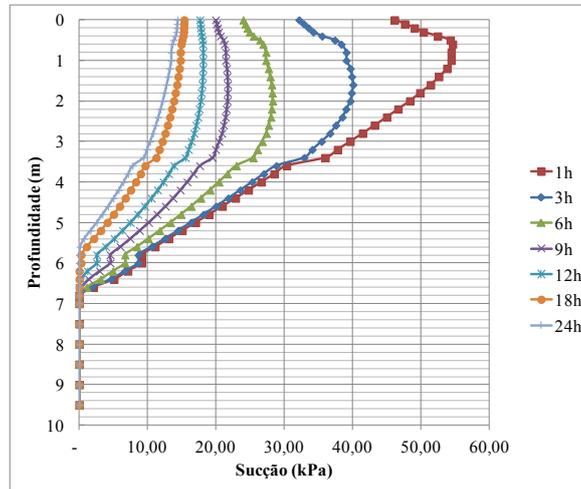


Figura 5.21 – Perfil de sucção para a chuva de 24 mm/h

A Figura 5.22 ilustra o perfil de sucção da chuva de 24 mm/h. Através deste perfil é possível verificar que a perda de sucção, por infiltração da água, no perfil em análise ocorre até às 9 h.

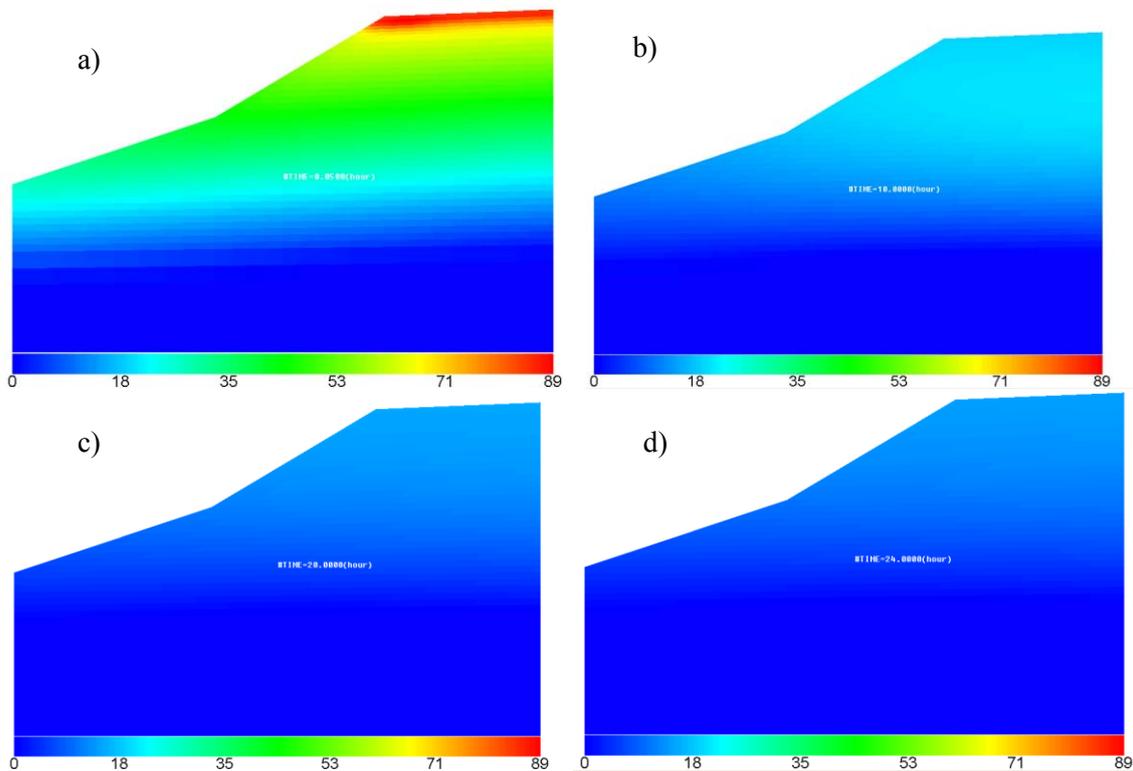


Figura 5.22 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 24 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) - d) Perfil de sucção (24h)

A Figura 5.23 mostra o perfil de saturação para a chuva de 24 mm/h. O S_r máximo alcançado nesse perfil é de 97 %. Na Figura 5.24 é possível ver a elevação do lençol freático até 6,5m.

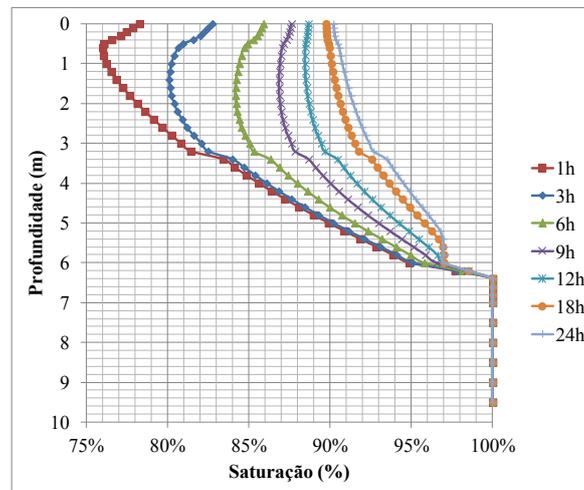


Figura 5.23 – Perfil de saturação para a chuva de 24 mm/h

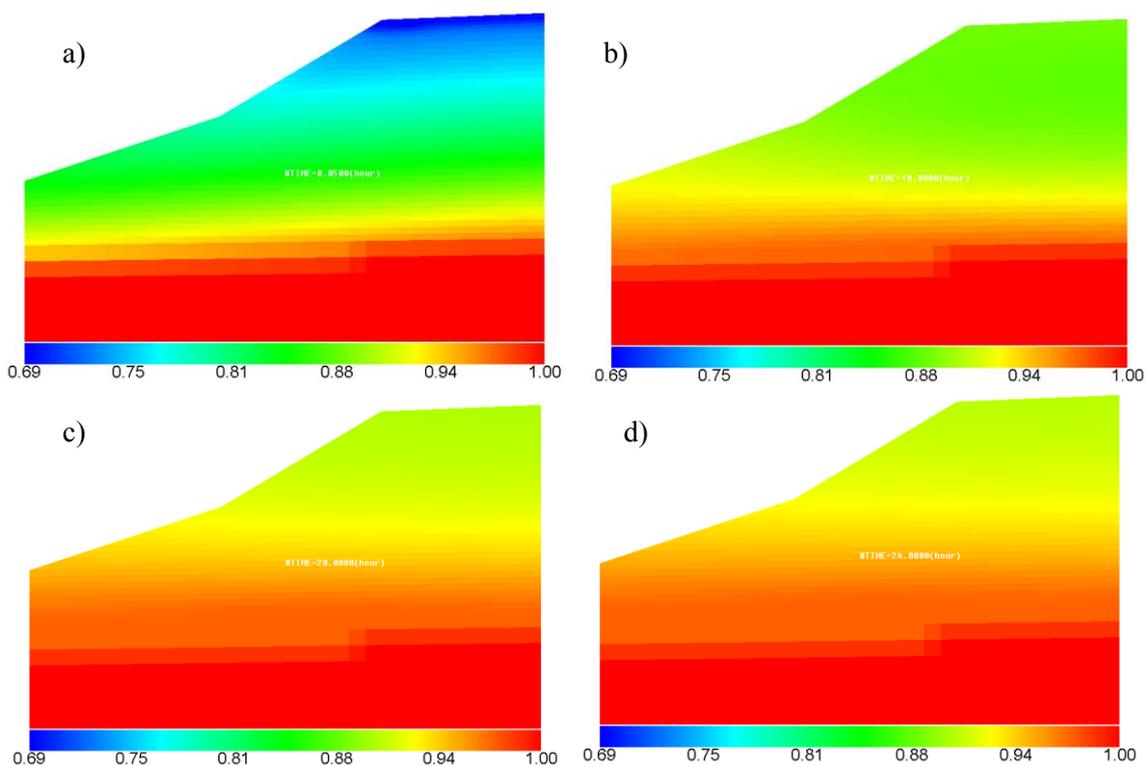


Figura 5.24- Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 24 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (10h) – d) Perfil de saturação (24h)

O perfil de sucção para a chuva de 50 mm/h é apresentado na. A Figura 5.25 ilustração do seu processo de infiltração esta apresentada na Figura 5.26. Foi simulada a infiltração para esta chuva visando atingir uma intensidade próxima à permeabilidade saturada do solo. O resultado foi uma saturação rápida de todo o talude já em poucas horas de chuva.

Tabela 5.6 - Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 50mm/h

| Avanço da frente de umidecimento para a chuva de 50mm/h | | | | | | |
|---|---|-----|---|----|----|----|
| Tempo (h) | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 |
| Profundidade (m) | 5 | 6,8 | 8 | 9 | 9 | 9 |

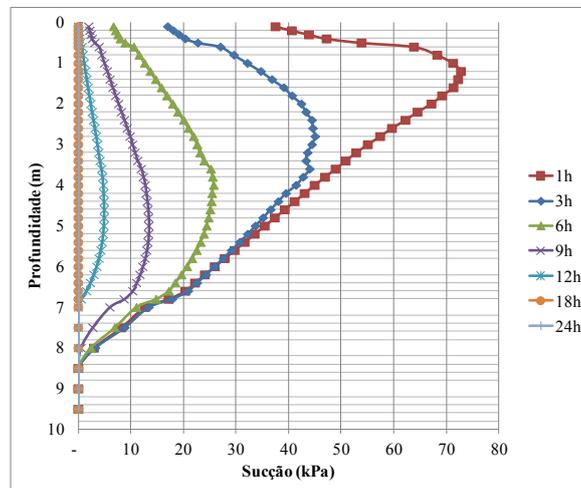


Figura 5.25 – Perfil de sucção para a chuva de 50 mm/h

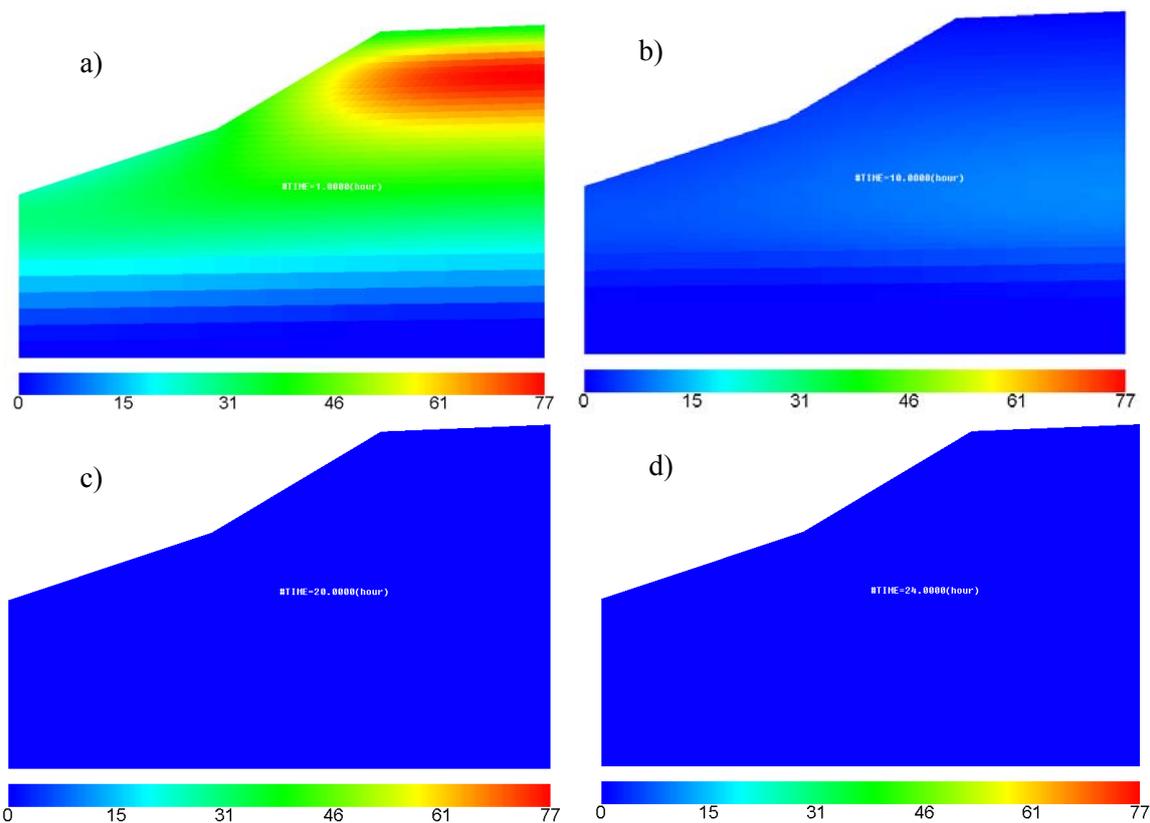


Figura 5.26 – Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 50 mm/h) – a) Perfil de sucção (1h) - b) Perfil de sucção (10h) - c) Perfil de sucção (20h) – d) Perfil de sucção (24h)

Finalizando a rodada de simulações com chuvas constantes apresenta-se o perfil de saturação para a chuva de 50 mm/h na Figura 5. 27 e sua respectiva ilustração na Figura 5.28.

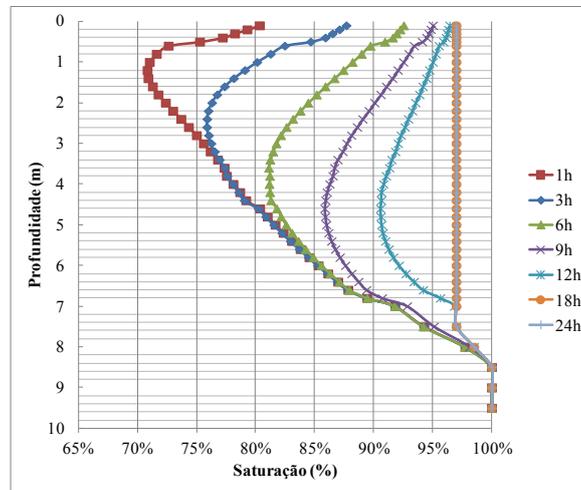


Figura 5. 27 – Perfil de saturação para a chuva de 50 mm/h.

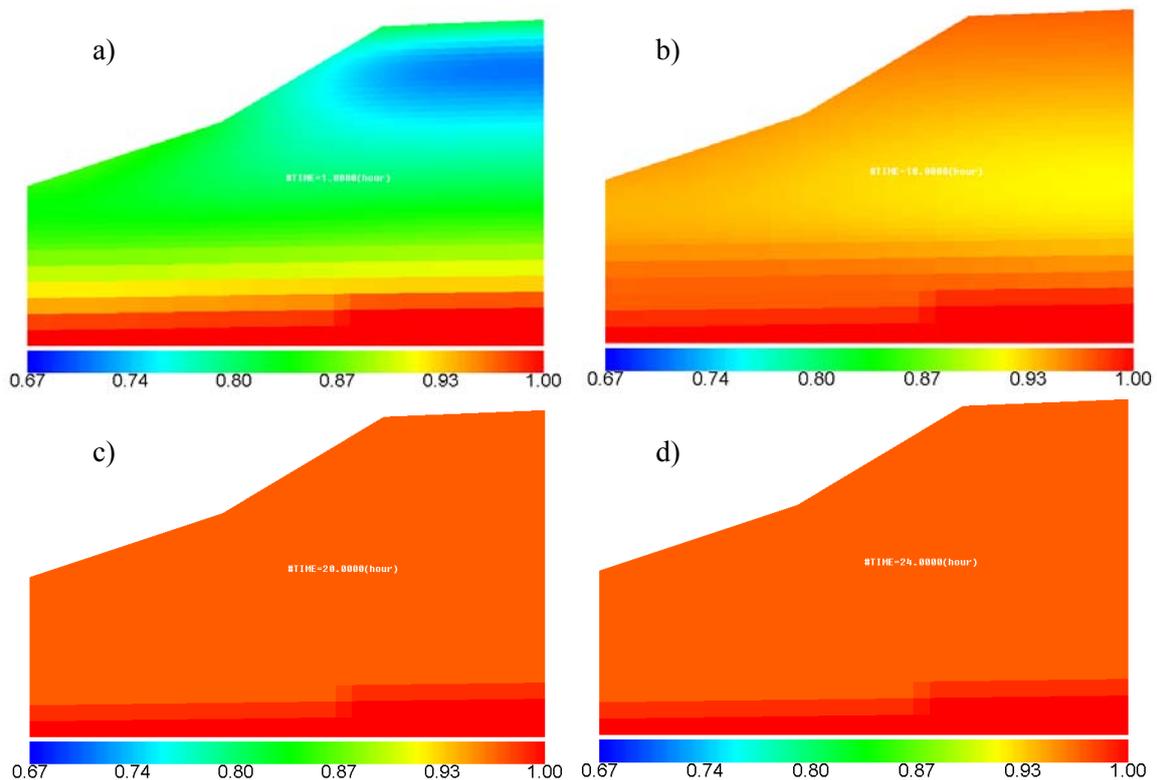


Figura 5.28 - Ilustração do processo de infiltração no talude (chuva - 50 mm/h) – a) Perfil de saturação (1h) - b) Perfil de saturação (10h) - c) Perfil de saturação (14h) – d) Perfil de saturação (24h)

5.2. Comparação entre as profundidades críticas obtidas pelo método analítico e o método numérico

A seguir são apresentados os valores de Z_W , T_W e v_i nas Tabela 5.7 –Tabela 5.13 são apresentados os valores de Z_W , T_W e v_i calculados por método analítico. Cabe explicar aqui que as características da intensidade de chuva são refletidos na formula de Lumb através dos graus de saturação. É possível verificar valores elevados de profundidade crítica em tempos bem reduzidos.

Tabela 5.7 – Tabela resumo do cálculo analítico de ($Z_W - T_W - v_i$) para a chuva de 1 mm/h.

| MÉTODO ANALÍTICO - Chuva 1 mm/h | | | |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Tempos de chuva | Cálculo Z_w (m) | Cálculo T_w (h) | Cálculo v_i (m/s) |
| 3h | 2,89 | 0,12 | 2,64E-04 |
| 6h | 5,13 | 0,46 | 1,44E-04 |
| 9h | 6,30 | 0,87 | 1,15E-04 |
| 12h | 7,11 | 1,38 | 9,80E-05 |
| 18h | 8,66 | 3,36 | 6,20E-05 |
| 24h | 6,60 | 17,40 | 2,02E-05 |

Na Tabela 5.7 verifica-se que o tempo necessário para se atingir a profundidade crítica é sempre subestimado utilizando-se o método analítico.

Tabela 5.8 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($Z_W - T_W - v_i$) para a chuva de 4 mm/h.

| MÉTODO ANALÍTICO - Chuva 4 mm/h | | | |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Tempos de chuva | Cálculo Z_w (m) | Cálculo T_w (h) | Cálculo v_i (m/s) |
| 3h | 4,62 | 0,15 | 2,22E-04 |
| 6h | 7,70 | 0,55 | 1,20E-04 |
| 9h | 8,66 | 1,14 | 8,93E-05 |
| 12h | 9,24 | 1,94 | 7,11E-05 |
| 18h | 11,55 | 5,63 | 3,92E-05 |
| 24h | 10,87 | 10,63 | 2,92E-05 |

Ainda na Tabela 5.8 as altas profundidades seguem sendo atingidas em pouco tempo, além disso, verificam-se valores que extrapolam as dimensões do talude. Isto ocorre, pois, a metodologia analítica em nenhum aspecto avalia condições geométricas.

Tabela 5.9 - Tabela resumo do cálculo analítico de $(Z_W - T_W - v_i)$ para a chuva de 8 mm/h.

| MÉTODO ANALÍTICO - Chuva 8 mm/h | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Tempos de chuva | Cálculo Zw (m) | Cálculo Tw (h) | Cálculo vi (m/s) |
| 3h | 5,03 | 0,21 | 1,57E-04 |
| 6h | 7,03 | 0,70 | 9,70E-05 |
| 9h | 8,10 | 1,30 | 7,91E-05 |
| 12h | 8,76 | 1,86 | 7,42E-05 |
| 18h | 9,55 | 3,89 | 5,47E-05 |
| 24h | 11,20 | 7,66 | 3,87E-05 |

A Tabela 5.9 apresenta ainda o mesmo problema encontrado na tabela anterior. Um avanço de frente umidade extrapolando as dimensões do talude em estudo.

Tabela 5.10 - Tabela resumo do cálculo analítico de $(Z_W - T_W - v_i)$ para a chuva de 12 mm/h.

| MÉTODO ANALÍTICO - Chuva 12 mm/h | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Tempos de chuva | Cálculo Zw (m) | Cálculo Tw (h) | Cálculo vi (m/s) |
| 3h | 5,03 | 0,18 | 1,80E-04 |
| 6h | 6,10 | 0,55 | 1,23E-04 |
| 9h | 8,10 | 1,47 | 7,06E-05 |
| 12h | 6,36 | 2,03 | 6,85E-05 |
| 18h | 7,92 | 4,58 | 4,72E-05 |
| 24h | 9,02 | 8,07 | 3,70E-05 |

Tabela 5.11 - Tabela resumo do cálculo analítico de $(Z_W - T_W - v_i)$ para a chuva de 16 mm/h.

| MÉTODO ANALÍTICO - Chuva 16 mm/h | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Tempos de chuva | Cálculo Zw (m) | Cálculo Tw (h) | Cálculo vi (m/s) |
| 3h | 1,59 | 0,10 | 3,20E-04 |
| 6h | 1,75 | 0,67 | 1,01E-04 |
| 9h | 2,44 | 13,93 | 1,39E-05 |
| 12h | 3,14 | 18,58 | 1,39E-05 |
| 18h | 4,71 | 27,88 | 1,39E-05 |
| 24h | 6,28 | 37,17 | 1,39E-05 |

A partir da Tabela 5.12, se tratando da chuva de 24mm/h, onde começa a ocorrer a elevação do lençol freático, percebe-se que a equação de Lumb já não pode ser aplicada, pois, o método analítico não prevê saturação senão pelo avanço da frente de umidade, de cima para baixo.

Tabela 5.12 - Tabela resumo do cálculo analítico de $(Z_W - T_W - v_i)$ para a chuva de 24 mm/h.

| MÉTODO ANALÍTICO - Chuva 24 mm/h | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Tempos de chuva | Cálculo Zw (m) | Cálculo Tw (h) | Cálculo vi (m/s) |
| 3h | 1,54 | 0,11 | 3,03E-04 |
| 6h | 1,57 | 9,29 | 1,39E-05 |
| 9h | 2,36 | 13,93 | 1,39E-05 |
| 12h | 3,14 | 18,58 | 1,39E-05 |
| 18h | 4,71 | 27,88 | 1,39E-05 |
| 24h | 6,28 | 37,17 | 1,39E-05 |

Tabela 5.13 - Tabela resumo do cálculo analítico de ($Z_W - T_W - v_i$) para a chuva de 50 mm/h.

| MÉTODO ANALÍTICO - Chuva 50 mm/h | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Tempos de chuva | Cálculo Zw (m) | Cálculo Tw (h) | Cálculo vi (m/s) |
| 3h | 2,70 | 0,17 | 1,94E-04 |
| 6h | 1,57 | 9,29 | 1,39E-05 |
| 9h | 2,36 | 13,93 | 1,39E-05 |
| 12h | 3,14 | 18,58 | 1,39E-05 |
| 18h | 4,71 | 27,88 | 1,39E-05 |
| 24h | 6,28 | 37,17 | 1,39E-05 |

Na Tabela 5.14 é apresentada a comparação entre os dois métodos. Como será visto os valores obtidos através do método analítico sempre se apresentam superiores aos obtidos através do método numérico.

Tabela 5.14 – Tabela comparativa entre as profundidades críticas obtidas para os métodos analítico e numérico.

| Intensidades da chuva | Tempos de chuva | MÉTODOS | MÉTODOS |
|-----------------------|-----------------|-----------|----------|
| | | ANALÍTICO | NUMÉRICO |
| | | Zw (m) | Zw (m) |
| 1 mm/h | 3h | 2,89 | 1,20 |
| | 6h | 5,13 | 2,20 |
| | 9h | 6,30 | 3,20 |
| | 12h | 7,11 | 3,80 |
| | 18h | 8,66 | 7,00 |
| | 24h | 6,60 | 7,00 |
| 4 mm/h | 3h | 4,62 | 1,20 |
| | 6h | 7,70 | 2,20 |
| | 9h | 8,66 | 3,20 |
| | 12h | 9,24 | 3,80 |
| | 18h | 11,55 | 7,00 |
| | 24h | 10,87 | 7,00 |
| 8 mm/h | 3h | 5,03 | 2,20 |
| | 6h | 7,03 | 3,20 |
| | 9h | 8,10 | 4,20 |
| | 12h | 8,76 | 5,20 |
| | 18h | 9,55 | 5,80 |
| | 24h | 11,20 | 6,20 |
| 12 mm/h | 3h | 5,03 | 2,20 |
| | 6h | 6,10 | 3,60 |
| | 9h | 8,10 | 4,80 |
| | 12h | 6,36 | 5,80 |
| | 18h | 7,92 | 6,20 |
| | 24h | 9,02 | 6,40 |
| 16 mm/h | 3h | 1,59 | 3,00 |
| | 6h | 1,75 | 5,40 |
| | 9h | 2,44 | 7,00 |
| | 12h | 3,14 | 7,00 |
| | 18h | 4,71 | 7,00 |
| | 24h | 6,28 | 7,00 |
| 24 mm/h | 3h | 1,54 | 4,80 |
| | 6h | 1,57 | 7,00 |
| | 9h | 2,36 | 7,00 |
| | 12h | 3,14 | 9,00 |
| | 18h | 4,71 | 9,00 |
| | 24h | 6,28 | 9,00 |
| 50 mm/h | 3h | 2,70 | 5,00 |
| | 6h | 1,57 | 6,80 |
| | 9h | 2,36 | 8,00 |
| | 12h | 3,14 | 9,00 |
| | 18h | 4,71 | 9,00 |
| | 24h | 6,28 | 9,00 |

Nas Tabela 5.7 à Tabela 5.13 que mostram o cálculo das profundidades críticas calculadas pelo método analítico, bem como, os tempos necessários para a infiltração d'água até a profundidade Z_w , verifica-se que nem sempre, de acordo com os cálculos realizados, profundidades maiores são obtidas com tempos superiores. Como exemplo, citam-se as chuvas de 50mm/h e a chuva de 8mm/h. Não é lógico que sob uma chuva de baixa intensidade seja obtida uma profundidade maior e em um tempo inferior, que numa chuva de maior intensidade, considerando-se as mesmas condições (permeabilidade).

Diante da comparação feita entre os dois métodos (Tabela 5.14) é possível perceber que em quase boa parte das vezes o método analítico teve sua profundidade crítica superestimada. Acredita-se que isto ocorre pelo fato do método analítico ter a sua variação de grau de saturação inversamente proporcional à profundidade crítica. Ou seja, sempre que a variação no grau de saturação é pequena o valor de Z_w é superior. Por isso, à intensidades baixas a diferença entre os dois métodos mostra-se mais marcante.

Outra observação feita à respeito da comparação acima é que fica claro que o método analítico embora esteja trabalhando com a altura do talude não leva em consideração a altura do mesmo, visto que, em alguns casos encontra-se alturas incompatíveis com a geometria do talude em estudo.

5.3. Cálculo dos fatores de segurança

Os fatores de segurança foram calculados com base nas sucções obtidas da simulação numérica. De posse dos dados de sucção observou-se que o máximo valor obtido foi de 100 kPa e o mínimo de 0 kPa. Utilizando-se uma fórmula simples para taludes infinitos (Equação 5.1), foram obtidas as curvas de fator de segurança vs profundidade para diferentes níveis de sucção, ilustrada Figura 5.29.

$$FS = \left[\frac{c' + (\gamma_t \cdot z - u_w) \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi'}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \right] \quad (5.1)$$

Onde, c' e φ' são os parâmetros de resistência do solo; γ_t é o peso unitário total do solo; z é a profundidade em estudo; u_w é a poropressão; α é a inclinação do talude.

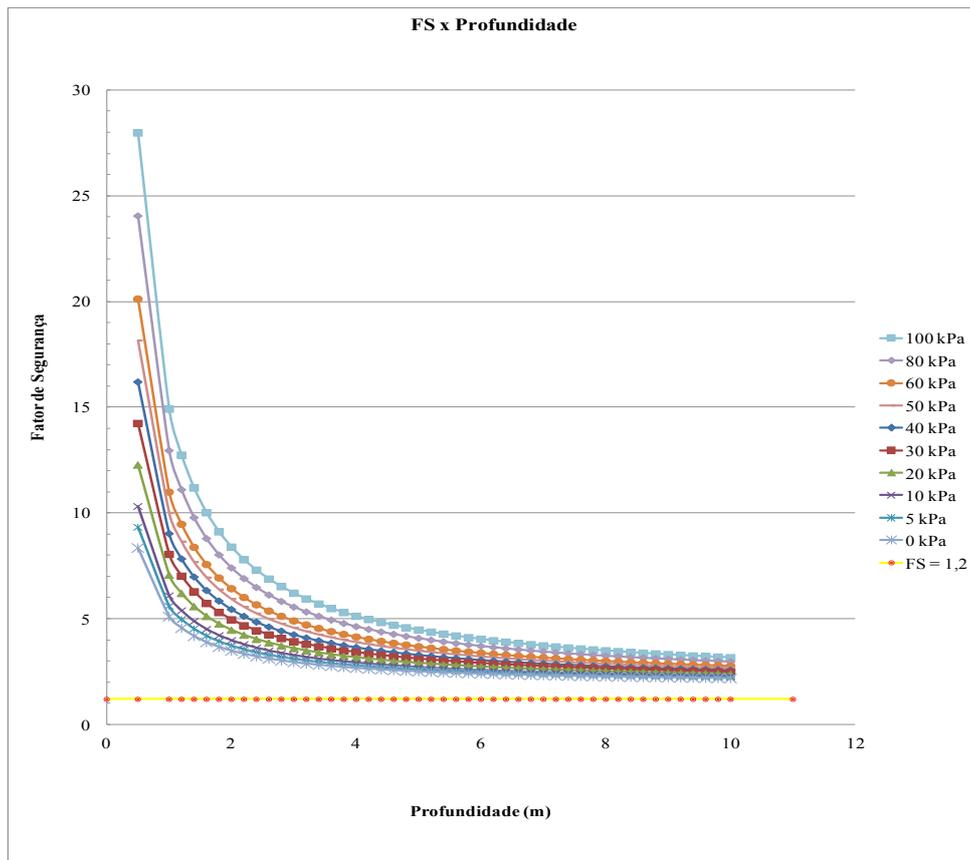


Figura 5.29 – Curva do Fator de segurança x Profundidade do talude, calculado para diferentes níveis sucções.

As curvas acima traçadas foram calculadas com base nos parâmetros obtidos por meio de ensaios de laboratório e medições de campo no caso da geometria do talude. Estes parâmetros são apresentados a seguir:

$$c' = 24,67 \text{ kPa}; \alpha = 26,57^\circ; \phi' = 43^\circ; \gamma_t = 19 \text{ kN/m}^3.$$

Na Figura 5.29 pode-se verificar que o fator de segurança apresenta uma redução mais significativa nas camadas superficiais. Isso mantém a hipótese de que a perda de sucção tem maior influência nas camadas superficiais de solos.

Buscando simular a ruptura do talude em estudo, realizou-se a manipulação de alguns dos parâmetros acima citados, induzindo-os para condições mais adversas, talude mais íngreme e solo menos resistente. O resultado é mostrado na Figura 5.30. Três parâmetros foram alterados, a coesão aparente do solo (0 kPa), o ângulo de atrito interno (30°) e o ângulo de inclinação do talude (45°).

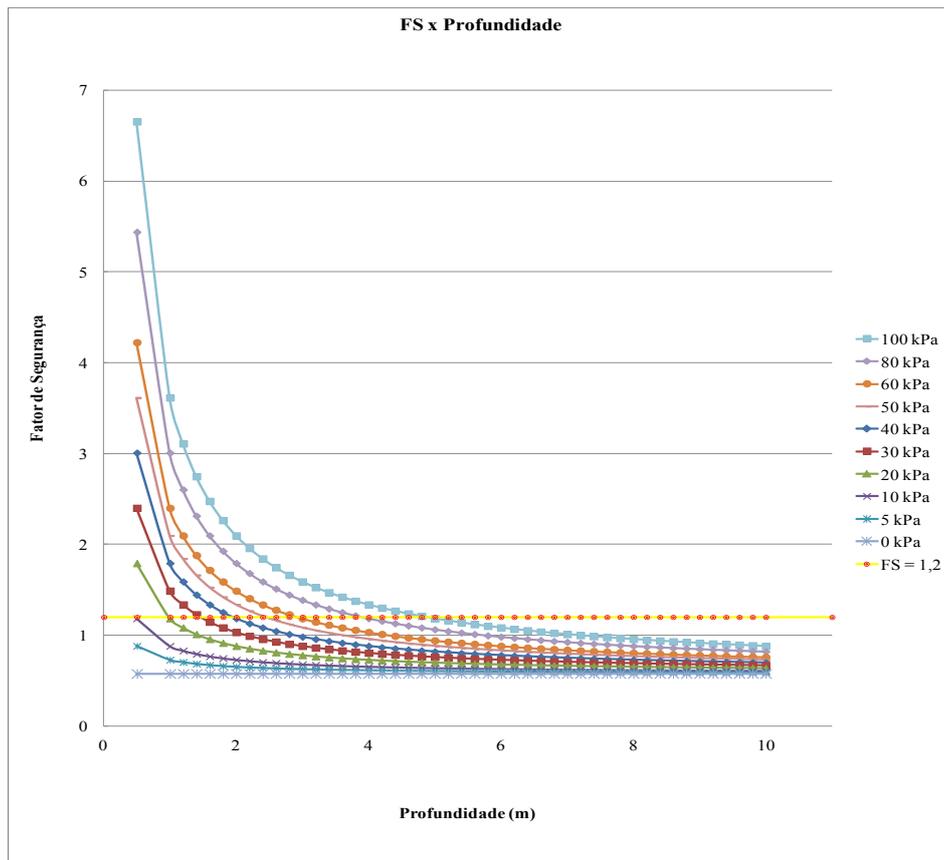


Figura 5.30 - Curva do Fator de segurança x Profundidade calculado para diferentes níveis sucções (Simulação de Ruptura).

Considerando um $FS = 1,2$ como limítrofe à condição de estabilidade, pode-se verificar que para diferentes níveis de sucção a ruptura ocorre à diferentes profundidades. Na Tabela 5.15 são apresentados os valores de sucção e as respectivas profundidades em que ocorre ruptura.

Tabela 5.15 - Tabela resumo de profundidades onde ocorre a ruptura à diferentes níveis de sucção

| Sucção (kPa) | Profundidade (m) |
|--------------|------------------|
| 100 | 5,6 |
| 80 | 4,2 |
| 60 | 3,2 |
| 50 | 2,8 |
| 40 | 2 |
| 30 | 1,8 |
| 20 | 1 |
| 10 | 0,5 |

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo desta pesquisa. Com base nas conclusões aqui apresentadas são feitas as sugestões para pesquisas futuras.

Os resultados obtidos do modelo numérico utilizando elementos finitos descreveram bem o comportamento hidráulico do solo parcialmente saturado em estudo, já que permitiram acompanhar os comportamentos dos graus de saturação, sucções e poropressões. É sabido que ainda falta muito para refletir nas simulações algumas eventuais condições que se vê em campo, como a presença de raízes, e sua interferência na estabilidade e controle da infiltração. No entanto a modelagem numérica segue mostrando-se uma ótima ferramenta para resolução de problemas complexos.

As profundidades e os tempos necessários para o avanço da frente de umidade através do método numérico divergiram das obtidas via método analítico. As profundidades calculadas pelo método analítico na maior parte das vezes atingiram uma camada mais profunda e num tempo inferior. Acredita-se que tal fato tenha ocorrido pelas limitações que o método apresenta como não levar em consideração as características do talude, relação de dependência da condutividade hidráulica do solo e a sucção atuante e fluxo em direção à face do talude.

Considerando o discutido acima e associando-se ao objetivo proposto do trabalho de verificar a aplicabilidade das equações de Lumb (1975) e Pradel & Raad's (1993), conclui-se que diante das limitações impostas pelos modelos analíticos, a utilização de modelagem numérica deve ser uma opção cada vez mais recorrente para casos complexos. Isso devido à facilidade de acesso a ferramentas computacionais cada vez mais poderosas, que ajudam na capacidade de processamento das análises.

A presente pesquisa é de grande relevância, pois, o estudo de solos parcialmente saturados e a realização de ensaios de curva característica na cidade de Medellín – Colômbia é bastante carente, com poucas pesquisas deste tipo sendo realizadas.

6.1. Sugestões para pesquisas futuras

Aplicar o modelo numérico utilizando parâmetros de chuvas de intensidades variáveis em solos estratificados com diferentes permeabilidades e curvas características. Além de estudar propriedades de deformação em solos não saturados.

Verificar a possibilidade de utilizar equipamentos que permitam o acompanhamento da frente de umidade em campo. Tensiômetros e/ou medidores de umidade que permitam notar alterações com precisão e maior veracidade da frente úmida.

Utilizar mais de um método para obtenção da curva característica, já que, existem métodos para sucções mais elevadas e mais baixas. No caso de estabilidade de taludes métodos que cubram um intervalo de 0 à 200 kPa com precisão são mais recomendáveis.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitchison, G. D. (1961). Relationship of moisture and effective stress function in unsaturated soils. Pore pressure and suction in soils conf. organized by the British National Soc. of the Int. Soc. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 47-65.
- Alonso EE, Gens A, Delahaye CH., (2003) Influence of rainfall on the deformation and stability of a slope in overconsolidated clays: a case study. *Hydrogeology Journal*; 174–192.
- AMVA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, (2009). Evaluación de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgos generados por Movimientos en Massa, Inundación y Avenidas Torrenciales en el Valle de Aburrá. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Anderson S.A., Sitar N. (1995). Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering*. Pág. 544-552.
- Aristizábal, E., Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007. *Revista Gestión y Ambiente*, Vol. 10 No 2. Pág. 17-30.
- Aristizábal, E., Martínez H. & Vélez, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Vol. XXXIV, No 131. Pág. 210-227.
- Bathurst RJ, Ho AF, Siemens G., (2007) A column apparatus for investigation of 1-D unsaturated-saturated response of sand-geotextile systems. *Geotechnical Testing Journal*; 1–9.
- Biot MA., (1941). General theory of the three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*; 12:155–164.
- Biot MA., (1962). Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*; 1482–1498.
- Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk ukeblad*, 106 (39): 859-863.
- Bishop, A.W., Blight, G.E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Géotechnique*, 13-3, 177-193.
- Boer RD. Theory of porous media - past and present. (1998) *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*; 441–466.
- Brooks, R.H. & Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties for porous media. “Hydrological Paper no.3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27p.
- Cai F, Ugai K., (2004). Numerical analysis of rainfall effects on slope stability. *International Journal of Geomechanics*; 69–78.

- Calle, J. A. C. (2000). Análise de ruptura de talude em solo não saturado. Dissertação de mestrado. EESC-USP.
- Childs, E.C. and Collis-George, N. (1950). The permeability of porous materials. Proc. Royal Society, London, 392-405.
- Cho S.E., Lee S.R. (2002). Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 9. Pág. 756-763.
- Cho SE, Lee SR., (2001) Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. Computers and Geotechnics; 185–208.
- Croney, D. (1952). The movement and distribution of water in soils. Géotechnique, p.1-16
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation. Environmental Geology, 35, (2-3), 131-145.
- Ehlers W, Graf T, Ammann M., (2004). Deformation and localization analysis of partially saturated soil. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2004; 2885–2910.
- Ehlers W., (2003). Continuum and numerical simulation of porous materials in science and technology chapter 9. In Modeling and Mechanics of Granular and Porous Materials, Capriz G, Ghionna VN, Giovine P (eds). Birkhauser: Basel; 245–292.
- Fourier, A.B., (1996). Predicting rainfall induced slope instability. Proc. Instn Civ. Engrs. Geotech. Engng, 119; 211–218
- Fredlund D. G, Rahardjo H., (1993) Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Wiley: New York.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, New York, USA, 517 p.
- Fredlund, D. G. & Xing, A. (1994). Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, 533-546
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. e Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, n. 3, 313-321.
- Freeze, R. A. e Cherry, J. A. (1979). Groundwater. New Jersey: Prentice – Hall. 604p.
- Garcia, E. (2010). Numerical Analysis of the Rainfall Infiltration Problem in Unsaturated Soil, Ph.D. Thesis, Kyoto University.
- Garcia, E. ; Oka, F. ; Kimoto, S., (2011) . Numerical analysis of a one-dimensional infiltration problem in unsaturated soil by a seepage-deformation coupled method. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 35, p. 544-568.
- Green W.H., and G.A. Ampt. (1911). Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils. J. Agric. Sci., 1-24.

- Griffiths DV, Lu N., (2005) Unsaturated slope stability analysis with steady infiltration or evaporation using elasto-plastic finite elements. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*; 249–267.
- Head, K.H. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing. Volume 3: Effective Stress Test*. ELE, Londres, Inglaterra.
- Ignacius, S.G.; Tognon, A.A., (1991). Saad, A. M. & Carvalho, C.S., *Ensaio Geotécnicos em Solos Não-Saturados no Intuíto de Pesquisas Tecnológicas – IPT,SP, Anais do Simpósio Sobre Solos Não-Saturados*, 50-70, UnB, Brasília, 1991.
- Jennings, J.E.B. & Burland, J.B., (1962). Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils, *Géotechnique*, 125-144.
- Jommi C., (2000). Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils. In *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Tarantino A, Mancuso C (eds). Balkema: Rotterdam; 139–153.
- Kato R, Sunami S, Oka F, Kimoto S, Kodaka T., (2009) A seepage–deformation coupled analysis method for unsaturated river embankments. In *Proceedings of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation*, Kyoto, Oka F, Murakami A, Kimoto S (eds). Taylor & Francis Group: London, U.K.; 401–407.
- Kessler, J., Oosterbaan, R. J., (1971) *Determinação da condutividade hidráulica dos solos Princípios e aplicações de drenagem, estudos e investigações Vol. 3. Págs.275-320. International institute for land reclamation and improvement, Wageningen, Holanda.*
- Kiyohara, Y., Kazama, M., Uzuoka, R. (2010). Strength behavior of undisturbed cohesive soil under unsaturated conditions. *Unsaturated soils – Experimental Studies in Unsaturated Soils and Expansive Soils. Proceedings of 4th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils*, Newcastle, Australia, 115-120.
- Laloui L, Nuth M., (2009) On the use of the generalised effective stress in the constitutive modelling of unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*; 20–23.
- Liakopoulos A., (1964). *Transient flow through unsaturated porous media. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley.*
- Lloret, A. & Alonso, E.E. (1980). Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior. *Geotechnique*, 449-477.
- Lumb P. (1975), Slope failures in Hong kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8, 31-65.
- Marinho F.A M. (1995). *A técnica do papel filtro para medição de sucção. Encontro Sobre Solos não Saturados, Rio Grande do Sul, 1995.*
- Oka F, Kimoto S, Takada N, Higo Y., (2009). A multiphase elasto-viscoplastic analysis of an unsaturated river embankment associated with seepage flow. In *Proceedings of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation*, Kyoto, Oka F, Murakami A, Kimoto S (eds). Taylor & Francis Group: London, U.K., ; 127–132.

- Pinder GF, Gray WG., (2008). *Essentials of Multiphase Flow and Transport in Porous Media*. Wiley: Hoboken, New Jersey.
- Pradel D. and Raad G. (1993), "Influence of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes". *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 2, 315-332.
- Rahardjo H., Ong T.H., Rezaur R.B., Leong E.C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 12. Pág.1532-1543.
- Righetto, A. M. (1998) *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos, EDUSP, Escola de Engenharia de São Carlos. USP.
- Rohm, S.A., Vilar, O.M. (1994) A influência da estrutura de um solo arenoso laterizado não saturado na sua resistência ao cisalhamento, In: 2ª Simpósio de solos não saturados, Recife, p. 211-216.
- Santos, C. R. (2004). *Análise paramétrica da infiltração e sua influência em solo não saturado*. Dissertação de mestrado. EESC-USP.
- Santos, M.A.A., (2007). *Influência das Condições Tridimensionais de Tensão e Fluxo na Estabilidade de Um Talude em Solos Não Saturados*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 204 p.
- Schuster R. L. (1996). Socioeconomic significance of landslides. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds.) *Landslides Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, ISA.129-177 pp.
- Sidle R.C., Ochiai H. (2006). *Landslides: processes, prediction, and land use*. Water Resources Monograph 18. American Geophysical Union, Washington D.C.
- Srivastava R, Yeh TCJ., (1991). Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous layered soils. *Water Resources Research* 1991; 753–762.
- Teixeira, R.S., Vilar, O.M. (1997). Resistência ao cisalhamento de um solo compactado não saturado. *Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – Solos não saturados*, Vol.1, 34-45. Rio de Janeiro.
- Terzaghi K., (1936). The shearing resistance of saturated soils, *Proceedings of the first international conference on soil mechanics*, volume 1, pp. 54-56..
- Terzaghi K., (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley: New York.
- Van Genuchten, M. Th., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-899.
- Vanapalli, S.K., and D.G. Fredlund. 1997. Interpretation of undrained shear strength of unsaturated soils in terms of stress state variables. *Proceedings of the 3rd Brazilian*

Symposium on Unsaturated Soils, April 21-25, ed. Sung-Wan Hong et al. Tacio de Campos & E.A. Vargas, Freitas Editora, pp. 35-45.

Vilar, O.M. (1997). Introdução a mecânica de solos não saturados. Notas de aula.

Wu LZ, Zhang LM., (2009). Analytical solution to 1D coupled water infiltration and deformation in unsaturated soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* ;773–790.

Yang H, Rahardjo H, Leong EC., (2006). Behavior of unsaturated layered soil columns during infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering* 2006; 329–337.

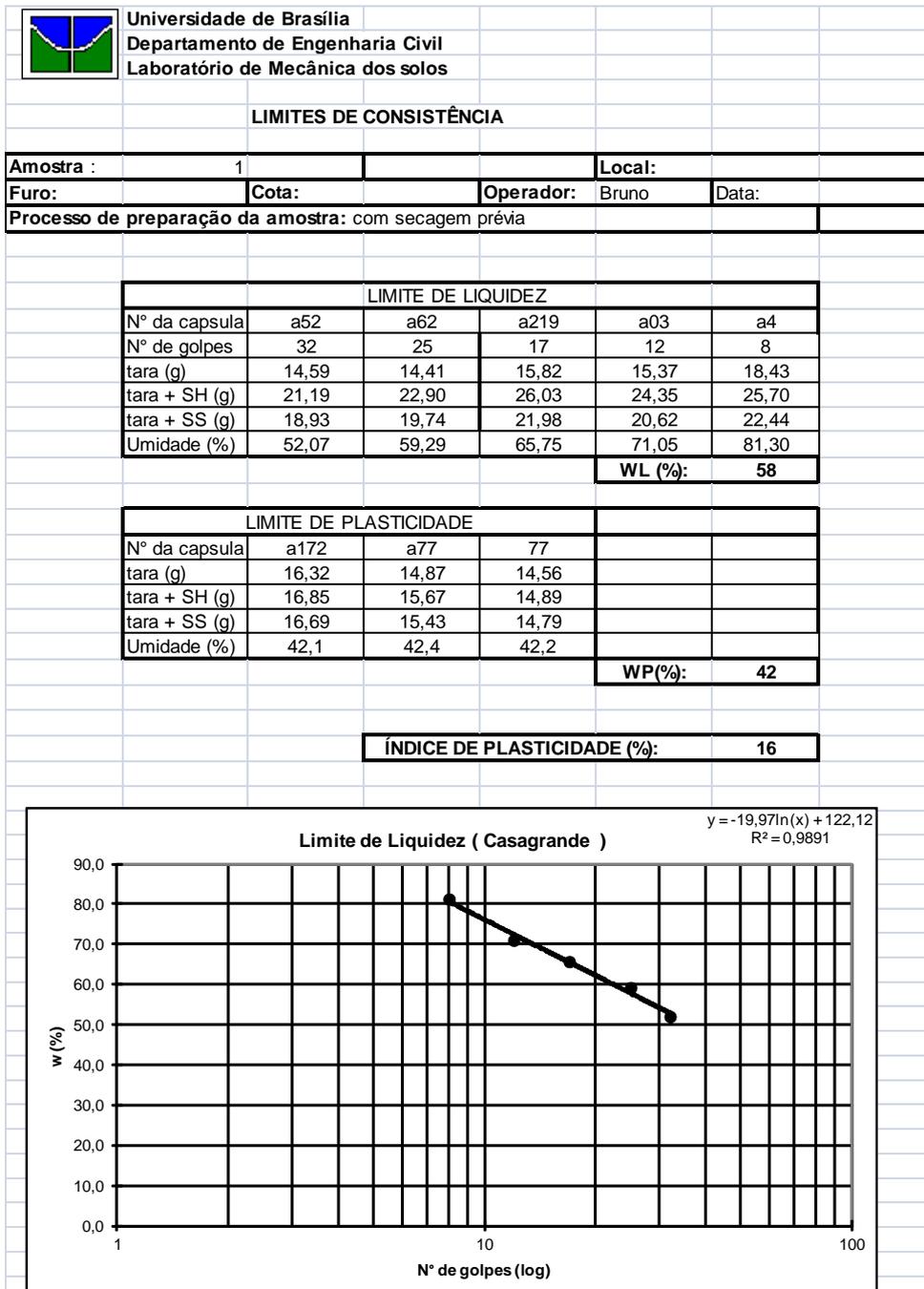
Yang H, Rahardjo H, Wibawa B, Leong EC., (2004) A soil column apparatus for laboratory infiltration study. *Geotechnical Testing Journal*; 347–355.

Zhan LT, Ng CWW., (2004). Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils. *International Journal of Geomechanics*; 273–284.

8. ANEXOS

Apresentação das planilhas de caracterização dos solos. Curva Característica e permeabilidade.

Limites de Consistência Amostra 1



Limites de Consistência Amostra 2



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil
Laboratório de Mecânica dos solos

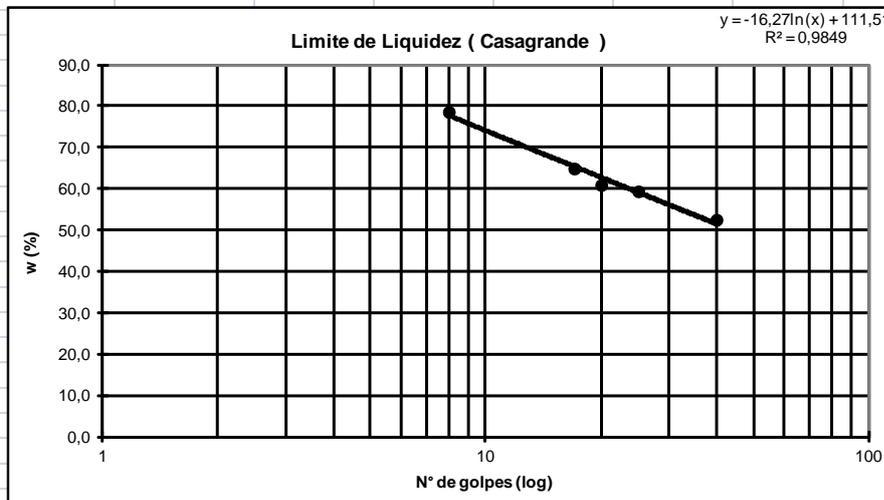
LIMITES DE CONSISTÊNCIA

| | | | | | |
|---|---|-------|--|-----------|-------|
| Amostra : | 2 | | | Local: | |
| Furo: | | Cota: | | Operador: | Bruno |
| Processo de preparação da amostra: com secagem prévia | | | | Data: | |

| LIMITE DE LIQUIDEZ | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|---------|-------|
| Nº da capsula | a73 | a208 | a156 | a103 | a4 |
| Nº de golpes | 17 | 20 | 40 | 25 | 8 |
| tara (g) | 16,20 | 15,71 | 14,83 | 15,23 | 18,43 |
| tara + SH (g) | 29,23 | 21,52 | 21,13 | 19,55 | 25,70 |
| tara + SS (g) | 24,10 | 19,32 | 18,96 | 17,94 | 22,50 |
| Umidade (%) | 64,94 | 60,94 | 52,54 | 59,41 | 78,62 |
| | | | | WL (%): | 59 |

| LIMITE DE PLASTICIDADE | | | |
|------------------------|-------|-------|--------|
| Nº da capsula | a148 | a212 | a161 |
| tara (g) | 20,98 | 16,30 | 17,14 |
| tara + SH (g) | 21,64 | 17,18 | 17,68 |
| tara + SS (g) | 21,48 | 16,97 | 17,55 |
| Umidade (%) | 32,0 | 31,3 | 31,7 |
| | | | WP(%): |
| | | | 32 |

ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%): 27



Granulometria Amostra 1 sem defloculante



ENSAIO DE GRANULOMETRIA - SEM DEFLOCULANTE

| | | | | | |
|---------------|-----|-----------|------------|-------|------------|
| Amostra: | 1 | Local: | | Data: | 15/10/2011 |
| Furo/Estaca: | | Obra: | Progea | N: | |
| Profundidade: | 1,5 | Operador: | Bruno Lôbo | E: | |

| Umidade higroscópica | | | Massa específica dos grãos # 2mm | | | | |
|----------------------|-------|-------|----------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|
| Capsula Nº | A157 | A123 | A33 | Ensaio com picnômetro: | A | B | C |
| tara (g) | 15,86 | 14,56 | 16,30 | Picnômetro Nº | 608 | 107 | 608 |
| tara + SH (g) | 47,53 | 42,32 | 40,71 | Temperatura (°C) | 27,0 | 27,0 | 27,0 |
| tara + SS (g) | 45,78 | 40,79 | 39,38 | Pic. + água (g) | 659,35 | 657,63 | 659,35 |
| Umidade (%) | 5,85 | 5,83 | 5,76 | Pic. + água + solo (g) | 694,70 | 693,12 | 694,79 |
| | | | | G (g/cm³) | 2,65 | 2,66 | 2,66 |
| | | | | G _s : | | 2,66 | |
| | | | | w (%) | | 5,81 | |

Obs.: Defina o tipo de material do ensaio colocando abaixo o valor "1" ao lado da descrição e no outro campo colocar o valor "0".

| | | | | | | |
|--|------|---|----|--|---------|---|
| ARBA (valor da fórmula) = | 60 | 0 | OK | ARGLA (valor da fórmula) = | 60 | 1 |
| Massa da amostra seca ao ar M _a (g) = | 1473 | | | Massa total da amostra seca M _t (g) = | 1394,84 | |

| Peneiramento Grosso | | | | |
|---------------------|--------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| Peneira | Abertura(mm) | Solo retido(g) | Solo retido acumulado(g) | % de material que passa |
| 2" | 50,8 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 1 1/2" | 38,1 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 1" | 25,4 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 3/4" | 19,1 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 3/8" | 9,5 | 0,49 | 0,49 | 99,9649 |
| 4 | 4,76 | 7,08 | 7,57 | 99,4573 |
| 10 | 2,00 | 46,61 | 54,18 | 96,1157 |

| Peneiramento Fino | | | | |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| Peneira | Abertura(mm) | Solo retido(g) | Solo retido acumulado(g) | % de material que passa |
| 16 | 1,19 | 5,96 | 5,96 | 87,5 |
| 30 | 0,59 | 8,09 | 14,05 | 75,7 |
| 40 | 0,42 | 6,48 | 20,53 | 66,3 |
| 60 | 0,25 | 8,60 | 29,13 | 53,8 |
| 100 | 0,149 | 6,63 | 35,76 | 44,2 |
| 200 | 0,074 | 6,37 | 42,13 | 34,9 |

| SEDIMENTAÇÃO | | | | | | | |
|---|-----------|------------|-----------|------------|----------------|----------|--------|
| Massa do material úmido submetido à sedimentação M _h (g) = | | | | 70 | Densímetro nº: | LAB UNAL | |
| tempo | tempo (s) | temp. (°C) | L (g/cm³) | Ld (g/cm³) | a (cm) | QS (%) | d (mm) |
| 30 s | 30 | 25,0 | 1,0040 | 0,9970 | 15,3 | 16,3 | 0,0712 |
| 1 min. | 60 | 25,0 | 1,0040 | 0,9970 | 15,3 | 16,3 | 0,0503 |
| 2 min. | 120 | 25,0 | 1,0040 | 0,9970 | 15,3 | 16,3 | 0,0356 |
| 4 min. | 240 | 25,0 | 1,0040 | 0,9970 | 14,4 | 16,3 | 0,0244 |
| 8 min. | 480 | 25,0 | 1,0020 | 0,9970 | 14,8 | 11,6 | 0,0175 |
| 15 min. | 900 | 25,0 | 1,0010 | 0,9970 | 14,9 | 9,3 | 0,0128 |
| 30 min. | 1800 | 25,0 | 1,0010 | 0,9970 | 14,9 | 9,3 | 0,0091 |
| 1 h | 3600 | 25,3 | 1,0000 | 0,9969 | 15,1 | 7,1 | 0,0064 |
| 2 h | 7200 | 26,0 | 0,9990 | 0,9968 | 15,3 | 5,1 | 0,0045 |
| 4 h | 14400 | 27,0 | 0,9985 | 0,9966 | 15,4 | 4,4 | 0,0032 |
| 8 h | 28800 | 27,0 | 0,9980 | 0,9966 | 15,4 | 3,3 | 0,0023 |
| 24 h | 86400 | 24,5 | 0,9980 | 0,9971 | 15,4 | 2,1 | 0,0013 |

Massa específica da água = 1,0000

Obs.: Escolha o densímetro e o tipo de proveta colocando o valor "1" ao lado da descrição e nos demais campos colocar o valor "0".

| Densímetro | Opção | Valor de Y | Valor de Z | OK | Densímetro | Opção | Valor de Y | Valor de Z |
|--------------|-------|------------|------------|----|--------------|-------|------------|------------|
| (1) 43310/06 | 0 | 1,0048 | 0,0002 | | (4) 17905/01 | 0 | 1,0117 | 0,0004 |
| (2) 2607/06 | 0 | 1,0044 | 0,0002 | | lab unal | 1 | 1,0020 | 0,0002 |
| (3) 9911/06 | 0 | 1,0042 | 0,0002 | | (6) 77200/09 | 0 | 1,0010 | 0,0002 |

Onde: Y = Z(temperatura)

Obs.: Escolha o tipo de proveta colocando o valor "1" ao lado da descrição e nos demais campos colocar o valor "0".

| Proveta | Opção | Valor de Y | Valor de Z | OK | Proveta | Opção | Valor de Y | Valor de Z |
|--|-------|------------|------------|----|--|-------|------------|------------|
| Sem base com densímetro (1) (2) (3) | 0 | 186,43 | 203,22 | | linhas 1 a 3 Base Vermelha com densímetro (5) | 1 | 169,60 | 165,60 |
| Base Vermelha com densímetro (1) (2) (3) | 0 | 186,43 | 203,22 | | linhas 4 a 12 Base Vermelha com densímetro (6) | 0 | 169,60 | 164,70 |
| | | | | | | | 165,70 | 161,90 |
| | | | | | | | 165,70 | 161,20 |

Onde: -Y (temperatura) + Z

Obs.: Para os ensaios (A) (B) (C) escolha o picnômetro colocando o valor "1" ao lado da descrição e nos demais campos colocar o valor "0".

| Ensaio com picnômetro (A) | | | Ensaio com picnômetro (B) | | | Ensaio com picnômetro (C) | | |
|---------------------------|---|---------|---------------------------|---|---------|---------------------------|---|---------|
| Balão 01 | 0 | 659,459 | Balão 01 | 0 | 659,459 | Balão 01 | 0 | 659,459 |
| Balão 02 | 0 | 674,107 | Balão 02 | 0 | 674,107 | Balão 02 | 0 | 674,107 |
| Balão 03 | 0 | 665,504 | Balão 03 | 0 | 665,504 | Balão 03 | 0 | 665,504 |
| Balão 04 | 0 | 659,518 | Balão 04 | 0 | 659,518 | Balão 04 | 0 | 659,518 |
| Balão 05 | 0 | 665,951 | Balão 05 | 0 | 665,951 | Balão 05 | 1 | 659,347 |
| Balão 06 | 0 | 648,559 | Balão 06 | 0 | 648,559 | Balão 06 | 0 | 648,559 |
| Balão 07 | 1 | 659,347 | Balão 07 | 0 | 670,099 | Balão 07 | 0 | 670,099 |
| Balão 08 | 0 | 657,985 | Balão 08 | 0 | 657,985 | Balão 08 | 0 | 660,523 |
| Balão 09 | 0 | 659,334 | Balão 09 | 0 | 659,334 | Balão 09 | 0 | 659,334 |
| Balão 10 | 0 | 649,954 | Balão 10 | 0 | 649,954 | Balão 10 | 0 | 649,954 |
| Balão 11 | 0 | 662,878 | Balão 11 | 0 | 662,878 | Balão 11 | 0 | 662,878 |
| Balão 12 | 0 | 656,663 | Balão 12 | 0 | 656,663 | Balão 12 | 0 | 656,663 |
| Balão 13 | 0 | 639,402 | Balão 13 | 1 | 657,828 | Balão 13 | 0 | 639,402 |
| Balão 14 | 0 | 657,768 | Balão 14 | 0 | 657,768 | Balão 14 | 0 | 657,768 |
| Balão 15 | 0 | 665,304 | Balão 15 | 0 | 665,304 | Balão 15 | 0 | 665,304 |
| Balão 16 | 0 | 658,829 | Balão 16 | 0 | 658,829 | Balão 16 | 0 | 658,829 |
| Balão 17 | 0 | 658,519 | Balão 17 | 0 | 658,519 | Balão 17 | 0 | 658,519 |
| Balão 18 | 0 | 652,594 | Balão 18 | 0 | 652,594 | Balão 18 | 0 | 652,594 |
| Balão 19 | 0 | 664,913 | Balão 19 | 0 | 664,913 | Balão 19 | 0 | 664,913 |
| Balão 20 | 0 | 652,913 | Balão 20 | 0 | 652,913 | Balão 20 | 0 | 652,913 |
| Balão 21 | 0 | 667,848 | Balão 21 | 0 | 667,848 | Balão 21 | 0 | 667,848 |
| Balão 22 | 0 | 664,762 | Balão 22 | 0 | 664,762 | Balão 22 | 0 | 664,762 |
| Balão 23 | 0 | 676,059 | Balão 23 | 0 | 676,059 | Balão 23 | 0 | 676,059 |
| Balão 24 | 0 | 633,978 | Balão 24 | 0 | 633,978 | Balão 24 | 0 | 633,978 |
| Balão 25 | 0 | | Balão 25 | 0 | | Balão 25 | 0 | |
| Balão 26 | 0 | 651,877 | Balão 26 | 0 | 651,877 | Balão 26 | 0 | 651,877 |

| d (mm) | % mat. passa | % mat.ret. | MATERIAL* | % do material |
|--|--------------|------------|--------------------------------------|---------------|
| 50,80 | 100,0 | 0,0 | 20,0< Pedregulho grosso <60,0 | 0,0 |
| 38,10 | 100,0 | 0,0 | | |
| 25,40 | 100,0 | 0,0 | | |
| 19,10 | 100,0 | 0,0 | 6,0< Pedregulho médio <20,0 | 0,4 |
| 9,52 | 100,0 | 0,0 | | |
| 4,76 | 99,5 | 0,5 | 2,0< Pedregulho fino <6,0 | 3,5 |
| 2,00 | 96,1 | 3,9 | | |
| 1,190 | 87,5 | 12,5 | 0,6< Areia grossa <2,0 | 20,2 |
| 0,590 | 75,7 | 24,3 | 0,2< Areia média <0,6 | 26,9 |
| 0,420 | 66,3 | 33,7 | | |
| 0,250 | 53,8 | 46,2 | | |
| 0,149 | 44,2 | 55,8 | 0,06< Areia fina <0,2 | 32,7 |
| 0,074 | 34,9 | 65,1 | | |
| 0,0712 | 16,3 | 83,7 | | |
| 0,0503 | 16,3 | 83,7 | 0,002 < Silte < 0,06 | 12,2 |
| 0,0356 | 16,3 | 83,7 | | |
| 0,0244 | 16,3 | 83,7 | | |
| 0,0175 | 11,6 | 88,4 | | |
| 0,0128 | 9,3 | 90,7 | | |
| 0,0091 | 9,3 | 90,7 | | |
| 0,0064 | 7,1 | 92,9 | | |
| 0,0045 | 5,1 | 94,9 | | |
| 0,0032 | 4,4 | 95,6 | | |
| 0,0023 | 3,3 | 96,7 | | |
| 0,0013 | 2,1 | 97,9 | Argila < 0,002 | 4,1 |
| * ABNT - NBR 6502, Rochas e Solos - setembro 1995 (unidade em mm) | | | | 100,0 |

Granulometria Amostra 2 sem defloculante



ENSAIO DE GRANULOMETRIA - SEM DEFLOCULANTE

| | | | | | |
|---------------|---|-----------|-------------|-------|------------|
| Amostra: | 2 | Local: | | Data: | 15/10/2011 |
| Furo/Estaca: | | Obra: | DISSERTAÇÃO | N: | |
| Profundidade: | | Operador: | Bruno Lôbo | E: | |

| Umidade higroscópica | | | Massa específica dos grãos # 2mm | | | | |
|----------------------|-------|-------|----------------------------------|------------------------|--------|------------------|--------|
| Capsula Nº | A175 | A03 | A4 | Ensaio com picnômetro: | A | B | C |
| tara (g) | 15,76 | 15,37 | 18,43 | Picnômetro Nº | 608 | 107 | 608 |
| tara + SH (g) | 36,83 | 29,21 | 31,51 | Temperatura (°C) | 24,0 | 24,0 | 24,0 |
| tara + SS (g) | 35,70 | 28,47 | 30,81 | Ptc. + água (g) | 659,70 | 657,98 | 659,70 |
| Umidade (%) | 5,67 | 5,65 | 5,65 | Ptc. + água + solo(g) | 695,70 | 693,84 | 695,62 |
| | | | | G (g/cm³) | 2,72 | 2,71 | 2,71 |
| | | | w (%): 5,66 | | | G _s : | 2,71 |

Obs.: Defina o tipo de material do ensaio colocando abaixo o valor "*" ao lado da descrição e no outro campo colocar o valor "0".

AREIA (valor da fórmula) = 60 OK ARGILA (valor da fórmula) = 60 1

Massa da amostra seca ao ar M_s (g) = 1353 Massa total da amostra seca M_t (g) = 1284,98

| Peneiramento Grosso | | | | |
|---------------------|--------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| Peneira | Abertura(mm) | Solo retido(g) | Solo retido acumulado(g) | % de material que passa |
| 2" | 50,8 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 1 1/2" | 38,1 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 1" | 25,4 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 3/4" | 19,1 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 3/8" | 9,5 | 0,00 | 0,00 | 100,0000 |
| 4 | 4,76 | 1,80 | 1,80 | 99,8599 |
| 10 | 2,00 | 80,75 | 82,55 | 93,5758 |

| Peneiramento Fino | | | | |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| Peneira | Abertura(mm) | Solo retido(g) | Solo retido acumulado(g) | % de material que passa |
| 16 | 1,19 | 3,15 | 3,15 | 89,1 |
| 30 | 0,59 | 1,97 | 5,12 | 86,3 |
| 40 | 0,42 | 1,47 | 6,59 | 84,3 |
| 60 | 0,25 | 2,33 | 8,92 | 81,0 |
| 100 | 0,149 | 2,85 | 11,77 | 77,0 |
| 200 | 0,074 | 0,62 | 12,39 | 76,1 |

| SEDIMENTAÇÃO | | | | | | | |
|---|------------|-----------|------------|----------------|----------|--------|--------|
| Massa do material úmido submetido à sedimentação M _h (g) = | | | 70 | Densímetro n.º | 28482/10 | | |
| tempo (s) | temp. (°C) | L (g/cm³) | Ld (g/cm³) | a (cm) | QS (%) | d (mm) | |
| 30 s | 30 | 25,0 | 1,0370 | 1,0030 | 9,6 | 76,1 | 0,0554 |
| 1 min. | 60 | 25,0 | 1,0370 | 1,0030 | 9,6 | 76,1 | 0,0392 |
| 2 min. | 120 | 25,0 | 1,0370 | 1,0030 | 9,6 | 76,1 | 0,0277 |
| 4 min. | 240 | 25,0 | 1,0370 | 1,0030 | 8,8 | 76,1 | 0,0188 |
| 8 min. | 480 | 25,0 | 1,0365 | 1,0030 | 8,9 | 75,0 | 0,0133 |
| 15 min. | 900 | 25,0 | 1,0360 | 1,0030 | 9,0 | 73,9 | 0,0098 |
| 30 min. | 1800 | 25,0 | 1,0350 | 1,0030 | 9,2 | 71,6 | 0,0070 |
| 1 h | 3600 | 25,3 | 1,0340 | 1,0029 | 9,3 | 69,5 | 0,0050 |
| 2 h | 7200 | 26,0 | 1,0320 | 1,0028 | 9,7 | 65,4 | 0,0035 |
| 4 h | 14400 | 27,0 | 1,0300 | 1,0026 | 10,0 | 61,3 | 0,0025 |
| 8 h | 28800 | 27,0 | 1,0290 | 1,0026 | 10,2 | 59,1 | 0,0018 |
| 24 h | 86400 | 24,5 | 1,0280 | 1,0031 | 10,4 | 55,7 | 0,0011 |

Massa específica da água = 1,0000

Obs.: Escolha o densímetro e o tipo de proveta colocando o valor "*" ao lado da descrição e nos demais campos colocar o valor "0".

| Densímetro | Opção | Valor de Y | Valor de Z | OK | Densímetro | Opção | Valor de Y | Valor de Z |
|--------------|-------|------------|------------|----|--------------|-------|------------|------------|
| (1) 43310/05 | 0 | 10048 | 0,0002 | | (4) 17905/01 | 0 | 10117 | 0,0004 |
| (2) 2607/06 | 0 | 10044 | 0,0002 | | lab unal | 1 | 10080 | 0,0002 |
| (3) 9911/06 | 0 | 10036 | 0,0002 | | (6) 77200/09 | 0 | 10080 | 0,0002 |

Onde: Y = e^{20/temperatura}

Obs.: Escolha o tipo de proveta colocando o valor "*" ao lado da descrição e nos demais campos colocar o valor "0".

| Proveta | Opção | Valor de Y | Valor de Z | OK | Proveta | Opção | Valor de Y | Valor de Z |
|--|-------|------------|------------|----|----------------------------------|-------|------------|------------|
| Sem base com densímetro (1) (2) (3) | 0 | 86,43 | 203,22 | | Base Vermelha com densímetro (5) | 1 | 89,60 | 85,50 |
| Base Vermelha com densímetro (1) (2) (3) | 0 | 86,43 | 202,42 | | linhas 4 a 12 | | 89,60 | 84,70 |
| | | 86,43 | 203,22 | | Base Vermelha com densímetro (6) | 0 | 86,70 | 81,90 |
| | | 86,43 | 202,52 | | linhas 4 a 12 | | 86,70 | 81,20 |

Onde: -Y (temperatura) + Z

bs.: Para os ensaios (A) (B) (C) escolha o picnômetro colocando o valor "*" ao lado da descrição e nos demais campos colocar o valor "0".

| Ensaio com picnômetro (A) | | Ensaio com picnômetro (B) | | Ensaio com picnômetro (C) | |
|---------------------------|---|---------------------------|----------|---------------------------|---------|
| Balão 01 | 0 | 659,811 | Balão 01 | 0 | 659,811 |
| Balão 02 | 0 | 674,498 | Balão 02 | 0 | 674,498 |
| Balão 03 | 0 | 665,903 | Balão 03 | 0 | 665,903 |
| Balão 04 | 0 | 659,931 | Balão 04 | 0 | 659,931 |
| Balão 05 | 0 | 666,217 | Balão 05 | 0 | 666,217 |
| Balão 06 | 0 | 648,948 | Balão 06 | 0 | 648,948 |
| Balão 08 | 0 | 658,436 | Balão 08 | 0 | 658,436 |
| Balão 09 | 0 | 659,777 | Balão 09 | 0 | 659,777 |
| Balão 10 | 0 | 650,324 | Balão 10 | 0 | 650,324 |
| Balão 11 | 0 | 663,294 | Balão 11 | 0 | 663,294 |
| Balão 12 | 0 | 657,057 | Balão 12 | 0 | 657,057 |
| Balão 13 | 0 | 639,771 | Balão 13 | 1 | 657,977 |
| Balão 14 | 0 | 658,390 | Balão 14 | 0 | 658,390 |
| Balão 15 | 0 | 665,717 | Balão 15 | 0 | 665,717 |
| Balão 16 | 0 | 659,258 | Balão 16 | 0 | 659,258 |
| Balão 17 | 0 | 658,927 | Balão 17 | 0 | 658,927 |
| Balão 18 | 0 | 652,992 | Balão 18 | 0 | 652,992 |
| Balão 19 | 0 | 665,297 | Balão 19 | 0 | 665,297 |
| Balão 20 | 0 | 653,322 | Balão 20 | 0 | 653,322 |
| Balão 21 | 0 | 668,260 | Balão 21 | 0 | 668,260 |
| Balão 22 | 0 | 665,177 | Balão 22 | 0 | 665,177 |
| Balão 23 | 0 | 676,445 | Balão 23 | 0 | 676,445 |
| Balão 24 | 0 | 634,328 | Balão 24 | 0 | 634,328 |
| Balão 25 | 0 | | Balão 25 | 0 | |
| Balão 26 | 0 | 651579 | Balão 26 | 0 | 651579 |

| d (mm) | % mat. passa | % mat.ret. | MATERIAL* | % do material |
|--|--------------|------------|--------------------------------------|---------------|
| 50,80 | 100,0 | 0,0 | 20,0< Pedregulho grosso <60,0 | 0,0 |
| 38,10 | 100,0 | 0,0 | | |
| 25,40 | 100,0 | 0,0 | | |
| 19,10 | 100,0 | 0,0 | 6,0< Pedregulho médio <20,0 | 0,1 |
| 9,52 | 100,0 | 0,0 | | |
| 4,76 | 99,9 | 0,1 | 2,0< Pedregulho fino <6,0 | 6,3 |
| 2,00 | 93,6 | 6,4 | | |
| 1,190 | 89,1 | 10,9 | 0,6< Areia grossa <2,0 | 7,2 |
| 0,590 | 86,3 | 13,7 | 0,2< Areia média <0,6 | 7,4 |
| 0,420 | 84,3 | 15,7 | | |
| 0,250 | 81,0 | 19,0 | | |
| 0,149 | 77,0 | 23,0 | 0,06< Areia fina <0,2 | 2,9 |
| 0,074 | 76,1 | 23,9 | | |
| 0,0554 | 76,1 | 23,9 | | |
| 0,0392 | 76,1 | 23,9 | | |
| 0,0277 | 76,1 | 23,9 | 0,002 < Silte < 0,06 | 12,7 |
| 0,0188 | 76,1 | 23,9 | | |
| 0,0133 | 75,0 | 25,0 | | |
| 0,0098 | 73,9 | 26,1 | | |
| 0,0070 | 71,6 | 28,4 | | |
| 0,0050 | 69,5 | 30,5 | | |
| 0,0035 | 65,4 | 34,6 | | |
| 0,0025 | 61,3 | 38,7 | | |
| 0,0018 | 59,1 | 40,9 | Argila < 0,002 | 63,4 |
| 0,0011 | 55,7 | 44,3 | | |
| * ABNT - NBR 6502, Rochas e Solos - setembro 1995 (unidade em mm) | | | | 100,0 |

Curva Característica amostra 1

| | | Universidade de Brasília | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|--|-----------|--------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------|--------|-------|
| | | Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | | Campo experimental | | | | | | | | | | | | |
| | | Laboratório de Geotecnia | | | | | | | | | | | | | | |
| Amostra: | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Umidade Natural do Campo | | | | | Bloco | | | | | | | | | | | |
| Cap | Pcap | Púmido (g) | Pseco (g) | Umidade (%) | $\gamma_g = 26,67$ | kN/m ³ | C.P. | M _s (g) | M _p (g) | M _i (g) | V _s (cm ³) | γ (kN/m ³) | γ^d (kN/m ³) | e | Sr (%) | w (%) |
| a289 | 16,3 | 24,02 | 21,62 | 45,11 | G _s = 2,72 | | 1 | 31,68 | | | 23,5 | 13,47 | 9,29 | 1,870 | 64,1 | 45 |
| a65 | 15,43 | 22,27 | 20,19 | 43,70 | e = 1,82 | | | | | | | | | | | |
| a182 | 16,28 | 25,12 | 22,38 | 44,92 | n = 64,54 | % | | | | | | | | | | |
| | | | | 45 | | 1,00 | g/cm ³ | | | | | | | | | |

| Corpo de prova | Púmido (g) | Pseco (g) | Pideal (g) | Westimada (%) | Papel Filtro - Meio | | | | | Papel Filtro - Superior | | | | | w(%) Corpos | Sr (%) |
|----------------|------------|-----------|------------|---------------|---------------------|--------------------|------------|--------------|------|-------------------------|--------------------|------------|--------------|------|----------------|--------|
| | | | | | P _h (g) | P _s (g) | Wpapel (%) | Sucção (kPa) | pF | P _h (g) | P _s (g) | Wpapel (%) | Sucção (kPa) | pF | | |
| 1 | | | | | 0,1646 | 0,1483 | 11,0 | 14333,3 | 5,16 | 0,2141 | 0,1933 | 10,8 | 14814,9 | 5,18 | 14,1 | 20,1 |
| 2 | | | | | 0,1706 | 0,1457 | 17,1 | 5984,2 | 4,79 | 0,2282 | 0,1956 | 16,7 | 6358,2 | 4,81 | 20,5 | 29,2 |
| 3 | | | | | 0,1762 | 0,1454 | 21,2 | 3329,8 | 4,53 | 0,2388 | 0,1971 | 21,2 | 3342,3 | 4,53 | 22,6 | 32,2 |
| 4 | | | | | 0,1828 | 0,1422 | 28,6 | 1159,1 | 4,07 | 0,2467 | 0,1966 | 25,5 | 1798,6 | 4,26 | 27,5 | 39,2 |
| 6 | | | | | 0,1949 | 0,1447 | 34,7 | 481,0 | 3,69 | 0,2674 | 0,1932 | 38,4 | 282,6 | 3,46 | 30,9 | 44,1 |
| 5 | | | | | 0,2032 | 0,1447 | 40,4 | 211,5 | 3,33 | 0,2802 | 0,1949 | 43,8 | 131,1 | 3,13 | 39,6 | 56,5 |
| 8 | | | | | 0,2157 | 0,1478 | 45,9 | 96,1 | 2,99 | 0,2969 | 0,2010 | 47,7 | 77,1 | 2,90 | 46 | 65,6 |
| 9 | | | | | 0,2283 | 0,1459 | 56,5 | 50,7 | 2,71 | 0,3068 | 0,1972 | 55,6 | 52,8 | 2,73 | 55,3 | 78,9 |
| 10 | | | | | 0,2439 | 0,1508 | 61,7 | 40,7 | 2,62 | 0,3246 | 0,2003 | 62,1 | 40,2 | 2,61 | 56,7 | 80,9 |
| 7 | | | | | 0,2498 | 0,1486 | 68,1 | 31,9 | 2,51 | 0,3232 | 0,1935 | 67,0 | 33,2 | 2,53 | 58,1 | 82,9 |
| 11 | | | | | 0,2582 | 0,1446 | 78,6 | 22,4 | 2,36 | 0,3467 | 0,1975 | 75,5 | 24,7 | 2,40 | 62,5 | 89,2 |

Curva Característica amostra 2

| | | Universidade de Brasília | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|--|-----------|--------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------|--------|-------|
| | | Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | | Campo experimental | | | | | | | | | | | | |
| | | Laboratório de Geotecnia | | | | | | | | | | | | | | |
| Amostra: | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Umidade Natural do Campo | | | | | Bloco | | | | | | | | | | | |
| Cap | Pcap | Púmido (g) | Pseco (g) | Umidade (%) | $\gamma_g = 26,09$ | kN/m ³ | C.P. | M _s (g) | M _p (g) | M _i (g) | V _s (cm ³) | γ (kN/m ³) | γ^d (kN/m ³) | e | Sr (%) | w (%) |
| a103 | 15,41 | 27,75 | 24,03 | 43,16 | G _s = 2,66 | | 1 | 32,84 | | | 24,3 | 13,52 | 9,45 | 1,761 | 63,8 | 43 |
| a145 | 14,97 | 17,83 | 16,97 | 43,00 | e = 1,76 | | | | | | | | | | | |
| a81 | 14,9 | 28,5 | 24,85 | 36,68 | n = 63,77 | % | | | | | | | | | | |
| | | | | 43 | | 1,00 | g/cm ³ | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | e = 1,76 | | |

| Corpo de prova | Púmido (g) | Pseco (g) | Pideal (g) | Westimada (%) | Papel Filtro - Meio | | | | | Papel Filtro - Superior | | | | | w(%) Corpos | Sr (%) |
|----------------|------------|-----------|------------|---------------|---------------------|--------------------|------------|--------------|------|-------------------------|--------------------|------------|--------------|------|----------------|--------|
| | | | | | P _h (g) | P _s (g) | Wpapel (%) | Sucção (kPa) | pF | P _h (g) | P _s (g) | Wpapel (%) | Sucção (kPa) | pF | | |
| 1 | | | | | 0,1553 | 0,1467 | 5,9 | 29878,9 | 5,48 | 0,2100 | 0,1978 | 6,2 | 28599,6 | 5,46 | 6,5 | 9,6 |
| 2 | | | | | 0,1574 | 0,1417 | 11,1 | 14152,7 | 5,16 | 0,2173 | 0,1956 | 11,1 | 14123,7 | 5,16 | 10,3 | 15,3 |
| 3 | | | | | 0,1669 | 0,1458 | 14,5 | 8706,6 | 4,95 | 0,2213 | 0,1909 | 15,9 | 7071,2 | 4,86 | 12,6 | 18,7 |
| 4 | | | | | 0,1623 | 0,1345 | 20,7 | 3584,1 | 4,56 | 0,2277 | 0,1912 | 19,1 | 4493,7 | 4,66 | 16,7 | 24,7 |
| 5 | | | | | 0,1856 | 0,1438 | 29,1 | 2374,2 | 4,38 | 0,2394 | 0,1851 | 29,3 | 1035,9 | 4,02 | 22,2 | 32,9 |
| 6 | | | | | 0,1818 | 0,1272 | 42,9 | 1823,9 | 4,27 | 0,2472 | 0,1752 | 41,1 | 192,2 | 3,29 | 32,7 | 48,5 |
| 7 | | | | | 0,1827 | 0,1211 | 50,9 | 65,8 | 2,83 | 0,2593 | 0,1725 | 50,3 | 67,6 | 2,84 | 43,7 | 64,7 |
| 8 | | | | | 0,1932 | 0,1277 | 51,3 | 64,4 | 2,82 | 0,2688 | 0,1731 | 55,3 | 53,5 | 2,74 | 48,1 | 71,3 |
| 9 | | | | | 0,1992 | 0,1206 | 65,2 | 35,6 | 2,56 | 0,2938 | 0,1800 | 63,2 | 38,4 | 2,59 | 53,6 | 79,4 |
| 10 | | | | | 0,2148 | 0,1245 | 72,5 | 27,3 | 2,44 | 0,2932 | 0,1705 | 72,0 | 27,8 | 2,45 | 58,4 | 86,5 |
| 11 | | | | | 0,2284 | 0,1258 | 81,6 | 20,4 | 2,32 | 0,3048 | 0,1702 | 79,1 | 22,0 | 2,35 | 65,5 | 97,0 |

Base de dados permeabilidade

| id | k(m/s) | ESTE(m) | NORTE(m) | LL | LP | IP |
|------|----------|-----------|------------|-------|-------|-------|
| 139B | 7,30E-07 | 830854,38 | 1184965,69 | 64,20 | 32,76 | 31,44 |
| 140A | 8,22E-06 | 831041,31 | 1185166,12 | 31,59 | 28,74 | 2,85 |
| 154A | 1,18E-05 | 831056,21 | 1184579,75 | 48,58 | 27,17 | 21,41 |
| 153B | 2,50E-05 | 830893,25 | 1184371,88 | 49,17 | 21,17 | 28,00 |
| 168A | 3,85E-06 | 831007,01 | 1184153,98 | 30,06 | 22,86 | 7,20 |
| 165A | 7,06E-08 | 829591,67 | 1184078,82 | NA | NA | NA |
| 151B | 4,80E-05 | 829964,79 | 1184227,08 | 32,56 | 24,35 | 8,21 |
| 166A | 4,70E-06 | 830182,03 | 1184064,19 | 37,76 | 29,91 | 7,84 |
| 167A | 9,63E-06 | 830693,22 | 1184108,80 | 41,98 | 28,11 | 13,88 |
| 150B | 1,04E-06 | 829506,12 | 1184477,33 | 55,34 | 24,64 | 30,71 |
| 137B | 1,22E-07 | 829904,52 | 1184437,45 | NA | NA | NA |
| 152B | 1,99E-06 | 830230,94 | 1184386,71 | 40,60 | 26,55 | 14,05 |
| 151A | 1,21E-05 | 829506,12 | 1184477,33 | NA | NA | NA |
| 152A | 6,42E-07 | 830190,43 | 1184412,64 | 38,32 | 26,12 | 12,20 |
| 150A | 2,86E-07 | 829098,64 | 1184567,03 | 45,84 | 27,11 | 18,72 |
| 135B | 2,87E-06 | 828375,23 | 1185137,05 | 34,17 | 25,12 | 9,05 |
| 121B | 2,65E-05 | 828185,87 | 1185570,90 | 73,33 | 40,97 | 32,36 |
| 121A | 1,15E-06 | 828319,33 | 1185991,51 | 60,28 | 40,75 | 19,53 |
| 120A | 6,03E-06 | 827830,48 | 1186011,39 | 68,51 | 26,39 | 42,12 |
| 149B | 2,22E-06 | 828457,32 | 1184817,21 | 49,98 | 26,39 | 23,59 |
| 164A | 2,75E-04 | 828828,32 | 1184453,51 | 35,10 | 26,81 | 8,29 |
| 149A | 1,82E-05 | 828267,33 | 1185042,10 | 29,41 | 23,22 | 6,18 |
| 153A | 3,17E-06 | 830259,55 | 1184919,48 | 44,75 | 33,69 | 11,07 |
| 163A | 5,03E-06 | 828176,01 | 1184314,07 | 60,04 | 38,81 | 21,23 |
| 138B | 3,19E-06 | 830412,85 | 1184765,39 | 45,50 | 28,11 | 17,39 |
| 138A | 6,89E-06 | 830023,29 | 1185095,33 | 73,72 | 49,83 | 23,89 |
| 123A | 8,66E-07 | 829560,06 | 1185465,45 | 39,70 | 24,32 | 15,38 |
| 125A | 2,91E-07 | 830253,40 | 1185970,46 | 69,24 | 49,14 | 20,10 |
| 110B | 1,00E-09 | 830023,39 | 1186180,10 | 63,06 | 43,70 | 19,37 |
| 124A | 6,72E-06 | 829539,43 | 1185769,73 | 78,73 | 37,90 | 40,82 |
| 122B | 1,12E-06 | 829136,43 | 1185709,46 | 72,23 | 49,04 | 23,19 |
| 137A | 1,00E-09 | 829317,33 | 1185530,69 | 43,68 | 30,73 | 12,94 |
| 111B | 1,00E-09 | 830472,17 | 1186126,54 | 33,23 | 25,15 | 8,08 |
| 97A | 1,39E-05 | 830788,24 | 1186961,47 | NA | NA | NA |
| 97B | 6,16E-06 | 830541,47 | 1186691,77 | 46,10 | 31,08 | 15,02 |
| 96B | 7,68E-06 | 829858,48 | 1186567,78 | 71,65 | 43,37 | 28,27 |
| 110A | 7,92E-06 | 829704,23 | 1186393,07 | 52,28 | 34,07 | 18,21 |
| 93A | 1,94E-06 | 828588,65 | 1186599,17 | 80,84 | 45,40 | 35,43 |
| 109A | 1,00E-02 | 829129,01 | 1186321,01 | 61,84 | 39,00 | 22,84 |
| 94B | 2,41E-04 | 828936,35 | 1186681,11 | 55,29 | 35,29 | 20,00 |
| 94A | 2,78E-07 | 828724,87 | 1186915,29 | 85,90 | 44,62 | 41,28 |
| 109B | 1,05E-06 | 829408,26 | 1186129,66 | 79,32 | 43,99 | 35,33 |
| 95A | 1,00E-09 | 829127,42 | 1186824,98 | 76,86 | 51,41 | 25,45 |
| 111A | 2,00E-05 | 830325,43 | 1186418,91 | 64,53 | 42,98 | 21,55 |
| 92A | 1,05E-06 | 828119,59 | 1186658,94 | 62,60 | 42,33 | 20,26 |
| 91B | 1,23E-06 | 827583,22 | 1186623,66 | 60,19 | 42,99 | 17,20 |
| 105A | 1,37E-06 | 827422,86 | 1186467,41 | 55,06 | 38,46 | 16,60 |
| 106A | 5,91E-06 | 827699,36 | 1186383,62 | 82,62 | 52,95 | 29,67 |
| 93B | 1,51E-05 | 828846,53 | 1186669,70 | 70,62 | 46,50 | 24,12 |
| 107A | 1,15E-06 | 828351,35 | 1186421,64 | 42,50 | 32,46 | 10,04 |
| 92B | 1,72E-05 | 828013,88 | 1186680,77 | 45,67 | 29,84 | 15,83 |
| 90B | 3,11E-05 | 826959,08 | 1186643,95 | 63,87 | 43,32 | 20,55 |
| 78B | 8,01E-06 | 828764,21 | 1186907,80 | 83,39 | 57,24 | 26,15 |
| 79B | 8,85E-06 | 828541,22 | 1187198,55 | 65,16 | 48,43 | 16,72 |
| 68A | 1,68E-05 | 829686,82 | 1187794,40 | 67,55 | 47,94 | 19,61 |
| 67A | 1,00E-09 | 829468,61 | 1187828,85 | 60,25 | 49,60 | 10,65 |
| 68B | 1,58E-05 | 830055,46 | 1187679,62 | 67,36 | 52,40 | 14,96 |
| 80B | 3,92E-05 | 828962,85 | 1187326,37 | 73,34 | 52,14 | 21,20 |
| 81A | 4,96E-06 | 829381,37 | 1187441,91 | 66,45 | 50,39 | 16,06 |
| 65B | 1,65E-06 | 828573,13 | 1187591,80 | 73,59 | 54,47 | 19,12 |
| 67B | 1,00E-09 | 829464,93 | 1187622,97 | 69,04 | 45,43 | 23,61 |
| 82A | 2,79E-05 | 830122,63 | 1187099,24 | 81,10 | 65,33 | 15,77 |
| 66B | 9,26E-07 | 829301,44 | 1187445,22 | 70,68 | 52,78 | 17,90 |
| 80A | 1,49E-06 | 828803,12 | 1187379,08 | 77,64 | 50,06 | 27,58 |

| id | k(m/s) | ESTE(m) | NORTE(m) | LL | LP | IP |
|------|----------|-----------|------------|--------|--------|-------|
| 60A | 2,13E-06 | 825656,44 | 1188043,02 | NA | NA | NA |
| 47B | 9,13E-06 | 826393,82 | 1187847,20 | 96,43 | 52,32 | 44,11 |
| 75A | 1,00E-09 | 826186,61 | 1187448,33 | 81,71 | 52,13 | 29,59 |
| 61A | 1,35E-06 | 826326,15 | 1187841,26 | 93,84 | 54,27 | 39,57 |
| 15A | 1,16E-04 | 824006,48 | 1189461,62 | 52,25 | 36,65 | 15,60 |
| 3B | 2,69E-05 | 827309,56 | 1189719,01 | 75,51 | NA | NA |
| 32A | 5,84E-07 | 825708,36 | 1188946,33 | 46,28 | 33,61 | 12,67 |
| 4B | 1,00E-09 | 825824,11 | 1189603,62 | 71,45 | 52,26 | 19,19 |
| 46A | 1,00E-09 | 825669,94 | 1188442,47 | 82,96 | 48,62 | 34,34 |
| 1B | 1,64E-05 | 824465,29 | 1189681,48 | 46,19 | 38,63 | 7,56 |
| 16B | 3,56E-05 | 825007,71 | 1189080,59 | 65,99 | 46,21 | 19,77 |
| 18B | 1,00E-09 | 825991,95 | 1189182,11 | 52,11 | 36,16 | 15,95 |
| 16A | 2,24E-05 | 824738,00 | 1189370,28 | NA | NA | NA |
| 17B | 4,26E-06 | 825703,02 | 1189216,78 | 78,59 | 59,44 | 19,15 |
| 1A | 3,61E-06 | 824207,78 | 1189934,26 | 46,19 | 38,63 | 7,56 |
| 127B | 2,07E-05 | 824390,49 | 1185290,30 | 138,22 | 107,85 | 30,38 |
| 115A | 1,06E-05 | 825247,19 | 1185902,33 | NA | NA | NA |
| 127A | 1,71E-05 | 824271,02 | 1185441,24 | 46,30 | 34,33 | 11,97 |
| 129A | 5,89E-06 | 825067,61 | 1185494,16 | NA | NA | NA |
| 100A | 6,95E-06 | 824895,34 | 1186493,42 | 50,37 | 37,22 | 13,15 |
| 113B | 2,14E-05 | 824388,41 | 1185619,13 | 47,41 | 38,50 | 8,91 |
| 114B | 3,81E-04 | 824944,98 | 1185617,45 | 57,50 | 54,27 | 3,23 |
| 102C | 3,21E-07 | 825921,09 | 1186063,18 | 43,35 | 36,81 | 6,54 |
| 86B | 5,19E-05 | 824957,12 | 1186585,42 | 62,70 | 46,07 | 16,63 |
| 103B | 1,85E-07 | 826410,75 | 1186310,63 | 46,47 | 33,99 | 12,48 |
| 128A | 1,64E-07 | 824677,01 | 1185470,75 | 53,16 | 33,32 | 19,84 |
| 101A | 2,10E-05 | 825304,02 | 1186396,92 | 47,66 | 36,90 | 10,76 |
| 101B | 3,67E-05 | 825453,71 | 1186067,66 | 64,63 | 46,87 | 17,76 |
| 116A | 2,12E-05 | 825760,90 | 1185965,32 | NA | NA | NA |
| 37A | 2,82E-05 | 827562,65 | 1188698,01 | 69,70 | 45,39 | 24,31 |
| 5A | 1,87E-05 | 826286,44 | 1189974,06 | 65,45 | 50,64 | 14,80 |
| 6A | 5,72E-05 | 826657,93 | 1189791,64 | 68,44 | 66,71 | 1,73 |
| 2A | 1,81E-05 | 825435,03 | 1191089,08 | 67,49 | 52,68 | 14,80 |
| 3A | 1,70E-05 | 825510,49 | 1190624,82 | 47,49 | 44,61 | 2,89 |
| 23B | 1,13E-04 | 828284,27 | 1188686,64 | 73,04 | 64,88 | 8,16 |
| 36B | 9,35E-05 | 827973,39 | 1188580,01 | 58,42 | 53,48 | 4,94 |
| 4A | 8,62E-06 | 825804,59 | 1190270,53 | 62,06 | 45,98 | 16,08 |
| 5B | 4,15E-06 | 826451,51 | 1189653,97 | 81,20 | NA | NA |
| 59A | 3,88E-06 | 825345,36 | 1187871,86 | 67,02 | 51,01 | 16,01 |
| 15B | 1,42E-05 | 824152,56 | 1188966,41 | 56,55 | 43,16 | 13,39 |
| 30A | 1,41E-04 | 824355,47 | 1188956,57 | 66,01 | 42,15 | 23,86 |
| 29A | 6,16E-07 | 824118,36 | 1188843,59 | 45,79 | 39,99 | 5,80 |
| 29B | 1,00E-09 | 824409,94 | 1188667,54 | 50,47 | 38,18 | 12,29 |
| 44A | 1,28E-05 | 824772,29 | 1188509,72 | 49,80 | 33,97 | 15,82 |
| 44B | 3,84E-07 | 824977,40 | 1188211,01 | 58,20 | 48,81 | 9,38 |
| 37B | 1,30E-05 | 828418,36 | 1188283,68 | 80,97 | 51,60 | 29,37 |
| 17A | 1,00E-09 | 824950,25 | 1190414,47 | 75,38 | 52,74 | 22,64 |
| 26B | 2,26E-06 | 829439,68 | 1189491,43 | 73,39 | 53,88 | 19,51 |
| 59B | 2,33E-06 | 825488,77 | 1187502,66 | 74,79 | 42,81 | 31,98 |
| 53A | 9,89E-06 | 829067,13 | 1188278,69 | 67,32 | 43,73 | 23,59 |
| 88B | 7,75E-07 | 825767,27 | 1187065,45 | 72,87 | 40,91 | 31,96 |
| 88A | 8,05E-06 | 825648,02 | 1187287,07 | 58,68 | 31,27 | 27,40 |
| 45A | 1,15E-05 | 825384,89 | 1188741,42 | 78,66 | 54,52 | 24,14 |
| 30B | 1,39E-06 | 825065,50 | 1188871,45 | 66,50 | 47,60 | 18,90 |
| 45B | 6,97E-07 | 825706,22 | 1188236,47 | 65,08 | 46,42 | 18,65 |
| 43A | 5,28E-06 | 824350,92 | 1188471,04 | 65,16 | 49,24 | 15,92 |
| 2B | 2,14E-06 | 825007,73 | 1191118,03 | 59,60 | 42,38 | 17,22 |
| 57A | 7,60E-06 | 824259,89 | 1187859,78 | 84,20 | 46,00 | 38,19 |
| 58A | 8,15E-06 | 824850,77 | 1188023,93 | 70,89 | 47,67 | 23,22 |
| 31A | 1,91E-05 | 824988,91 | 1189981,05 | 54,41 | 39,47 | 14,94 |
| 72B | 7,16E-07 | 824971,21 | 1187178,48 | 54,01 | 47,30 | 6,71 |
| 87B | 6,73E-06 | 825838,91 | 1186346,15 | 73,52 | 53,91 | 19,61 |
| 72A | 6,27E-06 | 824873,66 | 1187458,42 | NA | NA | NA |
| 73A | 1,45E-06 | 825098,21 | 1187485,40 | 58,39 | 40,30 | 18,09 |

| id | k(m/s) | ESTE(m) | NORTE(m) | LL | LP | IP |
|------|----------|-----------|------------|-------|-------|-------|
| 84A | 2,64E-07 | 830718,89 | 1187428,77 | 64,71 | 57,93 | 6,78 |
| 83B | 1,00E-02 | 830527,40 | 1187140,47 | 37,61 | 28,61 | 9,00 |
| 69B | 3,43E-06 | 830762,60 | 1187656,04 | 77,70 | 63,12 | 14,59 |
| 82B | 1,00E-09 | 830293,48 | 1187058,18 | 69,38 | 48,29 | 21,08 |
| 55B | 1,00E-02 | 830517,82 | 1188068,54 | 73,26 | 45,19 | 28,07 |
| 69A | 1,00E-09 | 830117,86 | 1187986,74 | 60,80 | 39,38 | 21,41 |
| 83A | 1,40E-05 | 830230,02 | 1187439,42 | 69,04 | 41,07 | 27,97 |
| 55A | 1,00E-09 | 830251,63 | 1188517,97 | 63,99 | 40,92 | 23,07 |
| 54B | 2,42E-05 | 830026,18 | 1188180,60 | NA | NA | NA |
| 70A | 1,00E-09 | 830618,70 | 1187868,50 | 75,18 | 54,68 | 20,50 |
| 41B | 1,11E-04 | 830583,79 | 1188547,73 | 53,05 | 35,07 | 17,98 |
| 13B | 5,29E-07 | 830796,17 | 1189674,89 | 61,47 | 42,35 | 19,12 |
| 28A | 1,58E-06 | 830967,30 | 1189314,85 | 57,92 | 38,44 | 19,48 |
| 14A | 1,00E-06 | 830978,23 | 1189895,61 | 63,45 | 46,38 | 17,07 |
| 42A | 7,50E-06 | 830937,81 | 1188691,12 | 56,66 | 44,07 | 12,60 |
| 56A | 1,13E-06 | 830903,29 | 1188451,53 | 66,27 | 46,15 | 20,12 |
| 12A | 5,56E-06 | 829887,01 | 1189997,15 | 75,10 | NA | NA |
| 27B | 5,37E-06 | 830803,37 | 1188983,45 | 63,61 | 43,88 | 19,74 |
| 41A | 1,95E-04 | 830264,24 | 1188625,49 | 64,03 | 46,03 | 18,00 |
| 11A | 4,34E-06 | 829413,18 | 1189887,92 | 94,98 | 85,91 | 9,07 |
| 13A | 1,46E-06 | 830714,36 | 1190086,91 | 59,67 | 46,01 | 13,67 |
| 27A | 7,79E-06 | 830369,99 | 1189036,96 | 93,22 | 54,04 | 39,18 |
| 40A | 3,65E-05 | 829987,32 | 1188558,70 | 72,19 | 50,08 | 22,11 |
| 25B | 1,13E-04 | 829302,36 | 1188800,41 | 58,71 | 36,50 | 22,21 |
| 39A | 1,24E-06 | 829025,20 | 1188656,79 | 70,48 | 64,79 | 5,69 |
| 38A | 6,47E-05 | 828761,92 | 1189044,77 | 78,23 | NA | NA |
| 26A | 5,31E-07 | 829823,96 | 1189468,78 | 59,71 | 45,04 | 14,66 |
| 10B | 9,37E-06 | 828963,25 | 1189542,00 | 65,13 | 51,57 | 13,56 |
| 38B | 6,54E-06 | 828869,03 | 1188875,44 | 72,88 | 59,68 | 13,20 |
| 24A | 5,22E-05 | 828717,69 | 1189684,09 | 60,10 | 53,32 | 6,78 |
| 10A | 2,48E-06 | 828699,43 | 1189748,67 | 56,85 | 39,27 | 17,58 |
| 24B | 1,00E-09 | 828894,28 | 1189093,55 | 73,58 | 53,33 | 20,26 |
| 12B | 3,33E-06 | 829756,97 | 1189690,23 | 58,23 | 48,60 | 9,63 |
| 9B | 3,71E-05 | 828145,10 | 1189452,24 | 83,30 | NA | NA |
| 11B | 2,96E-06 | 829541,14 | 1189488,05 | 63,27 | 64,31 | NA |
| 54A | 1,15E-05 | 829673,30 | 1188427,48 | 53,15 | 35,99 | 17,15 |
| 39B | 1,20E-05 | 829439,33 | 1188329,83 | 73,27 | 49,20 | 24,07 |
| 52B | 5,64E-05 | 829011,63 | 1188226,61 | 56,06 | 37,38 | 18,68 |
| 52A | 1,44E-06 | 828741,29 | 1188307,31 | 68,67 | 66,62 | 2,05 |
| 51B | 3,22E-06 | 828559,40 | 1188148,05 | 66,98 | 46,14 | 20,85 |
| 8A | 5,89E-06 | 827690,41 | 1189576,51 | 72,72 | NA | NA |
| 21B | 2,45E-06 | 827504,73 | 1189177,57 | 77,43 | 50,79 | 26,64 |
| 22A | 9,50E-06 | 831336,45 | 1189375,23 | 50,32 | 33,66 | 16,66 |
| 36A | 2,87E-05 | 827654,49 | 1188872,90 | 70,51 | 48,51 | 21,99 |
| 53B | 5,35E-07 | 829331,29 | 1188185,72 | 62,79 | 38,96 | 23,83 |
| 35A | 1,08E-05 | 827448,62 | 1188919,61 | 75,77 | NA | NA |
| 51A | 5,95E-05 | 828252,45 | 1188327,20 | 50,07 | 39,84 | 10,23 |
| 22B | 1,08E-05 | 827898,80 | 1189345,41 | 73,62 | NA | NA |
| 66A | 1,29E-06 | 828847,89 | 1187962,82 | 67,58 | 45,07 | 22,51 |
| 8B | 1,00E-09 | 828170,42 | 1189694,93 | 60,99 | 59,42 | 1,57 |
| 35B | 8,44E-07 | 827586,07 | 1188614,97 | 65,77 | 53,34 | 12,43 |
| 6B | 2,52E-05 | 826983,03 | 1189514,09 | 63,48 | 44,22 | 19,27 |
| 20B | 5,23E-06 | 827018,71 | 1189108,34 | 70,04 | 54,07 | 15,97 |
| 34B | 1,00E-09 | 826934,29 | 1188641,50 | 63,48 | 44,22 | 19,27 |
| 20A | 9,95E-06 | 826764,42 | 1189413,34 | 68,87 | 48,58 | 20,28 |
| 21A | 7,41E-06 | 826942,56 | 1189348,27 | 75,73 | 61,60 | 14,13 |
| 7A | 4,59E-06 | 827141,15 | 1189953,06 | 70,91 | 61,13 | 9,78 |
| 7B | 2,35E-06 | 827167,80 | 1189611,88 | 64,29 | NA | NA |
| 34A | 1,04E-05 | 826682,74 | 1188835,85 | 88,56 | 54,88 | 33,67 |
| 64A | 8,30E-06 | 827805,44 | 1187935,18 | 77,23 | 43,97 | 33,26 |
| 19B | 6,63E-06 | 826324,37 | 1189294,81 | 76,80 | 54,57 | 22,23 |
| 49B | 1,00E-09 | 827710,54 | 1188076,82 | 77,28 | 47,47 | 29,81 |
| 49A | 4,55E-07 | 827195,39 | 1188554,67 | 64,76 | 42,39 | 22,37 |
| 162A | 1,22E-05 | 827788,73 | 1184373,60 | 76,32 | 46,54 | 29,78 |

| id | k(m/s) | ESTE(m) | NORTE(m) | LL | LP | IP |
|------|----------|-----------|------------|--------|--------|-------|
| 73B | 1,93E-06 | 825167,77 | 1187101,06 | 70,43 | 49,41 | 21,01 |
| 86A | 1,56E-06 | 825046,88 | 1186778,76 | 66,26 | 49,68 | 16,58 |
| 102A | 3,53E-07 | 826229,63 | 1186412,58 | 73,92 | 62,44 | 11,48 |
| 87A | 2,87E-06 | 825452,03 | 1186534,76 | 61,03 | 42,24 | 18,79 |
| 85B | 1,06E-04 | 824865,46 | 1186779,30 | 67,70 | 44,99 | 22,71 |
| 74A | 6,94E-07 | 825224,99 | 1188738,83 | 59,38 | 43,81 | 15,57 |
| 85A | 5,47E-06 | 824361,94 | 1187035,89 | 72,10 | 48,22 | 23,87 |
| 117B | 6,24E-06 | 826685,57 | 1185667,55 | 92,68 | 60,17 | 32,51 |
| 104B | 2,13E-06 | 827200,71 | 1186213,01 | NA | NA | NA |
| 145A | 5,61E-07 | 826250,07 | 1185020,44 | 55,01 | 44,52 | 10,49 |
| 131B | 9,84E-07 | 826426,26 | 1185327,21 | 67,11 | 53,14 | 13,97 |
| 119A | 2,10E-05 | 827190,14 | 1185758,23 | 50,51 | 38,62 | 11,90 |
| 105B | 7,15E-07 | 827692,52 | 1186150,09 | NA | NA | NA |
| 102B | 1,33E-06 | 826378,97 | 1185966,55 | 69,31 | 41,38 | 27,93 |
| 119B | 2,80E-07 | 827497,84 | 1185828,00 | 52,92 | 50,39 | 2,54 |
| 106B | 1,00E-09 | 827885,00 | 1185731,59 | 70,71 | 47,76 | 22,95 |
| 118A | 7,06E-07 | 826676,96 | 1185873,47 | 56,86 | 42,00 | 14,86 |
| 146A | 2,41E-07 | 826487,19 | 1185136,50 | 84,35 | 56,49 | 27,85 |
| 104A | 6,23E-06 | 826739,94 | 1186371,11 | 56,86 | 34,25 | 22,61 |
| 118B | 1,00E-09 | 827005,96 | 1185866,34 | 57,75 | 48,52 | 9,23 |
| 135A | 9,42E-06 | 828188,32 | 1185361,93 | 69,35 | 41,41 | 27,94 |
| 160A | 9,04E-06 | 827624,73 | 1184029,91 | 65,31 | 43,59 | 21,72 |
| 134B | 8,09E-06 | 827911,20 | 1185233,68 | NA | NA | NA |
| 161A | 9,09E-06 | 827339,36 | 1184233,57 | 70,14 | 46,69 | 23,45 |
| 136B | 4,07E-06 | 829005,87 | 1185227,38 | NA | NA | NA |
| 134A | 1,38E-06 | 827798,32 | 1185535,17 | 30,49 | 23,86 | 6,63 |
| 136A | 7,27E-07 | 828855,40 | 1185295,43 | 35,38 | 27,24 | 8,14 |
| 133A | 5,93E-06 | 827319,38 | 1185791,65 | 40,59 | 24,90 | 15,69 |
| 95B | 8,92E-07 | 829504,72 | 1186516,57 | 76,56 | 44,00 | 32,56 |
| 108B | 5,39E-07 | 829057,53 | 1186063,08 | 62,32 | 40,76 | 21,56 |
| 108A | 4,93E-06 | 828781,83 | 1186417,29 | 87,13 | 50,14 | 36,99 |
| 96A | 3,21E-06 | 829351,73 | 1186772,08 | NA | NA | NA |
| 107B | 3,39E-06 | 828433,85 | 1186243,16 | 78,90 | 53,63 | 25,27 |
| 122A | 3,63E-06 | 828707,36 | 1186190,11 | 48,50 | 34,04 | 14,46 |
| 117A | 6,06E-06 | 825930,02 | 1185964,82 | NA | NA | NA |
| 116B | 1,14E-05 | 826061,47 | 1185706,29 | 59,01 | 39,89 | 19,11 |
| 130A | 8,12E-06 | 825950,35 | 1185568,33 | 73,10 | NA | NA |
| 130B | 2,69E-06 | 825971,16 | 1185328,57 | 46,88 | 38,30 | 8,58 |
| 131A | 1,41E-06 | 826118,46 | 1185226,72 | 58,63 | 40,48 | 18,15 |
| 143B | 3,65E-07 | 825533,87 | 1185114,77 | 80,55 | 56,91 | 23,64 |
| 129B | 1,68E-05 | 825479,53 | 1185452,97 | 59,93 | 41,72 | 18,21 |
| 143A | 1,37E-06 | 825439,20 | 1185333,24 | 51,53 | 37,79 | 13,74 |
| 57B | 1,07E-06 | 824311,55 | 1187656,80 | 73,96 | 49,23 | 24,73 |
| 31C | 2,34E-07 | 824988,91 | 1189981,05 | 49,96 | 41,47 | 8,49 |
| 100B | 1,58E-06 | 824767,48 | 1185900,70 | 50,56 | 42,43 | 8,12 |
| 114A | 3,50E-05 | 824598,23 | 1185858,19 | 60,31 | 45,22 | 15,09 |
| 113A | 2,13E-05 | 824222,71 | 1185736,40 | 95,93 | 95,18 | 0,75 |
| 99B | 7,78E-05 | 824122,43 | 1186130,06 | 148,36 | 132,53 | 15,83 |
| 99A | 1,66E-05 | 825061,04 | 1186376,14 | 66,50 | 53,50 | 13,00 |
| 125B | 3,19E-06 | 830535,83 | 1185812,91 | 66,29 | 42,23 | 24,06 |
| 139A | 4,07E-06 | 830113,02 | 1185285,60 | NA | NA | NA |
| 124B | 6,92E-07 | 830298,68 | 1185681,47 | 49,65 | 29,27 | 20,38 |
| 159A | 4,86E-06 | 828419,39 | 1185511,82 | 50,62 | 37,40 | 13,21 |
| 146B | 2,18E-06 | 826351,72 | 1185081,59 | 38,28 | 29,48 | 8,80 |
| 128B | 1,38E-06 | 824962,56 | 1185328,53 | 47,49 | 35,50 | 12,00 |
| 142A | 5,47E-07 | 824897,06 | 1185021,42 | 62,36 | 41,81 | 20,54 |
| 141A | 4,27E-06 | 824227,10 | 1185152,51 | 58,21 | 43,99 | 14,22 |
| 144B | 4,04E-06 | 825979,35 | 1184981,30 | 56,78 | 40,36 | 16,42 |
| 145B | 1,59E-05 | 826428,59 | 1185078,29 | 58,08 | 37,75 | 20,32 |
| 141B | 7,84E-07 | 824392,98 | 1184076,44 | 59,84 | 37,50 | 22,33 |
| 155A | 2,77E-06 | 824393,44 | 1184230,09 | 40,66 | 30,76 | 9,90 |
| 142B | 6,33E-06 | 824776,22 | 1184717,55 | 68,14 | 47,18 | 20,95 |
| 156A | 1,89E-06 | 825042,26 | 1184221,99 | 66,49 | 45,48 | 21,01 |
| 148A | 1,00E-09 | 826640,24 | 1184902,50 | 65,36 | 47,81 | 17,54 |

| | | | | | | |
|------|----------|-----------|------------|-------|-------|-------|
| 33A | 3,04E-06 | 826332,59 | 1188962,90 | 71,58 | 44,23 | 27,35 |
| 62A | 7,34E-07 | 826682,79 | 1187824,82 | 61,18 | 39,18 | 22,01 |
| 133B | 5,07E-06 | 827387,78 | 1185007,83 | 51,64 | 38,64 | 13,00 |
| 147A | 4,75E-07 | 827292,07 | 1184879,05 | 49,93 | 36,44 | 13,50 |
| 132B | 1,06E-06 | 827004,35 | 1185325,49 | 43,47 | 29,44 | 14,03 |
| 132A | 6,47E-06 | 826707,98 | 1184933,03 | 49,70 | 32,57 | 17,14 |
| 76A | 2,87E-05 | 826703,26 | 1187471,36 | 50,17 | 30,90 | 19,27 |
| 62B | 1,64E-06 | 827612,77 | 1187253,54 | 72,57 | 49,76 | 22,80 |
| 63A | 9,73E-06 | 827638,15 | 1187514,67 | 61,67 | 36,79 | 24,87 |
| 23A | 1,18E-05 | 829709,89 | 1189364,64 | 65,92 | 40,75 | 25,17 |
| 58B | 5,07E-06 | 825018,34 | 1187510,23 | 62,69 | 41,20 | 21,49 |
| 43B | 1,19E-06 | 824638,50 | 1187990,77 | 87,82 | 55,45 | 32,37 |
| 157A | 1,95E-06 | 825453,04 | 1183796,68 | 42,98 | 34,08 | 8,89 |
| 158A | 1,41E-05 | 826221,78 | 1183785,16 | 57,23 | 41,79 | 15,43 |
| 147B | 4,76E-06 | 827915,61 | 1184646,72 | 53,86 | 45,79 | 8,08 |
| 18A | 1,39E-05 | 825619,05 | 1189398,56 | 38,99 | 28,06 | 10,93 |
| 47A | 2,72E-06 | 826284,99 | 1188468,28 | 57,52 | 42,05 | 15,47 |
| 32B | 3,00E-07 | 825965,91 | 1188702,79 | 79,49 | 57,39 | 22,10 |
| 46B | 5,50E-06 | 825906,08 | 1188235,87 | NA | NA | NA |
| 48B | 4,03E-06 | 826830,84 | 1187978,03 | 36,80 | 27,34 | 9,45 |

| | | | | | | |
|------|----------|-----------|------------|-------|-------|-------|
| 133B | 5,07E-06 | 827387,78 | 1185007,83 | 51,64 | 38,64 | 13,00 |
| 147A | 4,75E-07 | 827292,07 | 1184879,05 | 49,93 | 36,44 | 13,50 |
| 132B | 1,06E-06 | 827004,35 | 1185325,49 | 43,47 | 29,44 | 14,03 |
| 132A | 6,47E-06 | 826707,98 | 1184933,03 | 49,70 | 32,57 | 17,14 |
| 76A | 2,87E-05 | 826703,26 | 1187471,36 | 50,17 | 30,90 | 19,27 |
| 62B | 1,64E-06 | 827612,77 | 1187253,54 | 72,57 | 49,76 | 22,80 |
| 63A | 9,73E-06 | 827638,15 | 1187514,67 | 61,67 | 36,79 | 24,87 |
| 23A | 1,18E-05 | 829709,89 | 1189364,64 | 65,92 | 40,75 | 25,17 |
| 58B | 5,07E-06 | 825018,34 | 1187510,23 | 62,69 | 41,20 | 21,49 |
| 43B | 1,19E-06 | 824638,50 | 1187990,77 | 87,82 | 55,45 | 32,37 |
| 157A | 1,95E-06 | 825453,04 | 1183796,68 | 42,98 | 34,08 | 8,89 |
| 158A | 1,41E-05 | 826221,78 | 1183785,16 | 57,23 | 41,79 | 15,43 |
| 147B | 4,76E-06 | 827915,61 | 1184646,72 | 53,86 | 45,79 | 8,08 |
| 18A | 1,39E-05 | 825619,05 | 1189398,56 | 38,99 | 28,06 | 10,93 |
| 47A | 2,72E-06 | 826284,99 | 1188468,28 | 57,52 | 42,05 | 15,47 |
| 32B | 3,00E-07 | 825965,91 | 1188702,79 | 79,49 | 57,39 | 22,10 |
| 46B | 5,50E-06 | 825906,08 | 1188235,87 | NA | NA | NA |
| 48B | 4,03E-06 | 826830,84 | 1187978,03 | 36,80 | 27,34 | 9,45 |
| 48A | 6,52E-05 | 826650,40 | 1188304,31 | 87,19 | 71,06 | 16,13 |
| 61B | 8,98E-07 | 826500,37 | 1187490,41 | 85,04 | 52,15 | 32,89 |