UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DAS CARACTERÍSTICAS
GEOTÉCNICAS RELACIONADAS AOS PROCESSOS EROSIVOS
COM ENSAIOS *IN SITU*

SIMONE ANDREA FUREGATTI

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: PROF. DR. LÁZARO VALENTIN ZUQUETTE

SÃO CARLOS - SP
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

F983a	<p>Furegatti, Simone Andrea Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ / Simone Andrea Furegatti ; orientador Lázaro Valentin Zuquette. -- São Carlos, 2012.</p> <p>Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.</p> <p>1. Erosão linear. 2. Penetrômetro dinâmico. 3. Simulador de chuva. 4. Infiltrômetro de duplo anel. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheiro **SIMONE ANDRÉA FUREGATTI**.

Título da Tese: "Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios *in situ*".

Data da defesa: 16/10/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Lázaro Valentin Zuquette - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Titular **Osni José Pejon**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Titular **José Augusto de Lollo**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Ilha Solteira)

Aprovada

Prof. Dr. **José Alcino Rodrigues Carvalho**
(Universidade Nova de Lisboa/Portugal)

Aprovado

Prof. Associado **Reinaldo Lorandi**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedicatória

*Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Julia Trento Furegatti e
Sergio Sylvio Furegatti (in memorian)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette, mais que por sua orientação no trabalho, pelo incentivo recebido, por seu apoio, confiança, amizade e até pelos momentos de “desorientação”, que me fizeram crescer ainda mais.

Sou muito grata aos técnicos de laboratório do departamento de Geotecnia da EESC, que me ajudaram nos trabalhos de laboratório e de campo, inclusive aos que contribuíram com um simples palpite, ou com uma ajuda instantânea, pois toda ajuda fez parte da construção deste trabalho. São eles: Oscar, Zé, Décio, Dito e especialmente o Sr. Antônio, pois foi quem mais me acompanhou e ajudou em todos os trabalhos práticos, meu sincero agradecimento! Nessa equipe, devo agradecer também ao pessoal da secretaria, que, como todos do departamento, além da presteza com que ajudam a todos os estudantes, torceram por mim. Obrigada Maristela, Neiva e Álvaro. E ao pessoal de apoio, Herivelto e Toninho.

Outro agradecimento especial é para o Ademar, parceiro em todos os trabalhos de campo, eficiente, otimista, ponta firme em todos os momentos, muito obrigada!

Agradeço aos professores do departamento de Geotecnia pelas dicas, questionamentos, troca de ideias e conversas inspiradoras, em especial às professoras doutoras Valéria Guimarães e Cristina Tsuha, pela amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a todas as pessoas ligadas às propriedades nas quais pude desenvolver meu trabalho de campo, entre proprietários, administradores e funcionários. Assim, agradeço ao pessoal da Fazenda Guarasemini, citando algumas pessoas com quem tive maior contato, como o Sr. Orlando, o Sr. José, a D. Luzia, Cintia e Marília. Ao pessoal do Seminário, citando o Pde Mário e a Sueli. E ao pessoal do sítio N. Sra. Aparecida, Sr. José e Sr. Valdemir. Agradeço ao pessoal da fazenda Fênix, citando Cássio e Fernando. Também agradeço às pessoas da fazenda São Luis e da fazenda São Pedro – Olho D’água. Agradeço à Usina Iracema, por intermédio do engenheiro Ricardo e à usina COSAN, por intermédio do engenheiro Luis Eduardo, por sua contribuição.

O grupo da oficina mecânica da EESC foi prestativo e eficiente em todas as ocasiões que precisamos deles no desenvolvimento dos equipamentos, por isso agradeço a todos do grupo, representados pelo Penazi e pelo Pedro. Da mesma forma agradeço à prefeitura do campus da EESC pela disponibilidade em ajudar.

Agradeço aos colegas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todo o apoio e incentivo, especialmente aos amigos Cristiano Poletto, Lucia Bressiani, Rodnny de Jesus e Lucas Boabaid.

A família e os amigos também nos ajudam nessa jornada do desenvolvimento de uma pesquisa com finalidade de defender uma tese. Algumas vezes a ajuda é direta, com troca de ideias ou ajuda física na execução de alguns experimentos. Nesse ponto os amigos ajudaram muito, mas existe a ajuda emocional, o incentivo que vem, principalmente, dessas pessoas. Por isso, agradeço à minha família, meus irmãos Sylvia e Sylvio, meu cunhado Denilson e, claro, aos meus pais Maria Julia e Sergio, por seu apoio e efetiva ajuda, na saúde e na doença, na alegria e na tristeza.

Também, à minha família escolhida em São Carlos, por seu imenso apoio em todos os sentidos. Minhas amigas: Ana Elisa Abreu, Wanessa Soares, Luciana Montanari, Josiele Patias, Claudia Rotta, Juliana Jovanini, Aline Freitas, Rafaela Faciola, Junio Fagundes, Fagner França e Marília, Felipe Lemos, Thiago Peixoto e ao Miguel Peters Garcia. Ainda, à Fernanda Ramos de Andrade, com quem dividi casa, comida e roupa lavada, e amizade, alegrias e angústias também.

Aos queridos amigos do vôlei CAASO e do vôlei Animal, que ajudaram a transformar as dificuldades em alegrias! No mesmo sentido, pela ajuda em transformar as dificuldades em alegrias, agradeço ao querido Nino!

Aos primeiros amigos que me acolheram em São Carlos, Juliana Andressa, Potó, Liliane, Eloísa e Rafael Reis. E aos que me acolheram em seguida, os amigos da república, Valéria, Fagner e Marília, Crisley e Alberto e ao Diogo.

Às companheiras na viagem por outra língua, Juliana Lukiantchuki e Mariele Lukiantchuki, pelo incentivo e amizade.

E aos amigos queridos, que apesar de distantes fisicamente, me acompanharam, incentivaram e apoiaram de perto: Eliane e Zé, Márcia e Marcos, Adriane, Luciene, Daniel, Eder Santos, Marcos Barbosa, Antonio Vaz, Lucia e Hildor, Cybelle e Carla.

O incentivo dado pelos professores da Unicamp, ainda na fase de projeto da tese foi muito importante, por isso agradeço aos professores doutores Pedro Gonçalves, Carlos Lobão, Luiz Ferreira Vaz, David Carvalho e Miriam Miguel.

Hemerso e Nadia e a Patrícia Casarotto apareceram durante a jornada e me ajudaram bastante, diretamente e com apoio e amizade, muito obrigada, amigos!

Agradeço ainda, a todos os colegas que passaram pelo departamento de Geotecnia da EESC, durante o longo período em que frequentei o departamento, por sua ajuda em alguns momentos, pela troca de ideias e pelos bons papos. Em nome de todos cito a Claudinha e a Juliana, pois foram as que mais me acompanharam nos ensaios de campo. E, na raspinha do tacho, agradeço ao Bruno, Camila e Camilete e Rômulo pela ajuda e diversão.

Finalmente, a Deus, agradeço pela vida!

RESUMO

FUREGATTI, S. A. (2012). **Avaliação da Variabilidade das Características Geotécnicas Relacionadas aos Processos Erosivos com Ensaios *In Situ***. 465 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

A inadequada utilização do meio físico tem gerado desequilíbrios ambientais com sérias consequências socioeconômicas, por vezes de proporções desastrosas, como é o caso das feições erosivas encontradas em vários estados do país. No estado de São Paulo, somente na região entre as cidades de São Pedro e Corumbataí (SP) ocorrem milhares de feições erosivas de portes variados. Os estudos sobre erosão têm apresentado resultados diversos em função de aspectos como a variabilidade das informações consideradas, a diversidade e pequeno número de pesquisas com validação espacial e temporal e a falta de continuidade e detalhamento dos estudos. Os modelos de previsão de erosão existentes mensuram e avaliam principalmente a quantidade de sedimento gerado por erosão laminar. É possível observar a inexistência de modelos que considerem os processos envolvidos na incisão e permanência de erosões lineares, ou que forneçam uma previsão de ocorrência desse tipo de erosão. A complexidade e dificuldade de obtenção de dados para alimentar e validar um modelo estão entre as principais justificativas do baixo número de tentativas de desenvolvimento de modelos de erosão linear. A presente tese buscou identificar e gerar dados de variáveis envolvidas nos processos erosivos lineares e analisar a variabilidade espacial e temporal dos resultados. Adicionalmente, foi avaliada a dificuldade de obtenção de tais dados. Ensaios de caracterização geotécnica, resistência à penetração dinâmica, taxa de infiltração e erodibilidade do solo foram empregados para esse fim. O levantamento da rugosidade do terreno e ensaios com simulador de chuva foram utilizados para a determinação de valores de escoamento superficial e geração de sedimento. Os ensaios com simulador de chuva promoveram, ainda, a observação da ocorrência de incisões no terreno e do processo erosivo. Como resultado obtiveram-se séries de dados para alimentar um modelo de erosão linear. Optou-se por tratar os dados como uma distribuição aleatória e utilizar a ferramenta estatística de análise de variância, a ANOVA, para comprovar a igualdade significativa dos valores obtidos. Dentre as respostas obtidas a partir dos resultados, destaca-se a comprovação da dificuldade em gerar dados para alimentar um modelo de erosão, principalmente de obter dados de incisão no solo, para validar um possível modelo de erosão linear. Em uma área que possui um determinado material geológico, em geral, a variabilidade dos dados de caracterização do solo mostrou-se pequena. E a resistência do solo à penetração, por sua vez, apresentou grande variabilidade em função da umidade do solo.

Palavras Chave: Erosão linear. Variabilidade. Resistência à penetração. Escoamento superficial. Infiltração.

ABSTRACT

FUREGATTI, S. A. (2012). **Evaluation of Variability of Geotechnical Characteristics Related to Erosion Processes using *In Situ* Tests**. 465 p. Thesis (Doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Inappropriate use of physical environment has led to an environmental imbalance with serious social and economic consequences. In many cases, such as erosive features found in several Brazilian States, these problems reached disastrous proportions. Thousands of erosive features with different sizes and depths can be found between the municipalities of São Pedro and Corumbataí, in São Paulo State, Brazil. Researches regarding erosion processes in this region have provided inconclusive results due to aspects related to data variability, and lack of both researches with reliable validation and continuity of studies. Current erosion prediction methods are mainly concerned with the amount of sediment resulted from laminar erosion processes. In addition, prediction models for linear erosion processes are rarely reported in technical literature, mainly due to their complexity and difficulty of obtaining reliable validating data. In this regard, the objective of this study is to identify the variables involved in linear erosion processes and build a database with these parameters in order to analyze both spatial and temporal distribution of such phenomenon. As a secondary objective, the difficulty of collecting data was evaluated. Field and laboratory tests were performed in this research, including geotechnical characterization, dynamic penetration test, infiltration rate and erodibility tests. Besides, a rain simulator was developed and used in field tests to cause an erosive process. These observations combined with characteristics of terrain roughness allowed the determination of both runoff and infiltration amounts. As a result, it was possible to provide validation data to a linear erosion prediction model. Data was evaluated as a random distribution using a statistical tool for variance analysis (ANOVA). Among the results, it is important to notice the difficult to collect reliable data to be used in validation of a linear erosion model, mainly those related with the soil incision. Areas with the same soil cover have presented similar data variability referred to soil characterization. On the other hand, penetration resistance values were found to be highly dependent on the soil water content.

Keywords: Linear erosion. Variability. Soil penetration resistance. Infiltration ratio. Roughness.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes esquemáticos do balanço hidrológico próximo à superfície (CARSON & KIRKBY, 1975).....	45
Figura 2: Avaliação de modelo de previsão de capacidade máxima de armazenamento de água no solo (MDS). 74	
Figura 3: Localização da primeira área de estudo, na região de Corumbataí, SP.	90
Figura 4: Localização da segunda área de estudo, na região de Ibaté, SP.	94
Figura 5: Amostra indeformada preparada para definição da massa específica natural do solo (ρ): (a) vista superior da amostra; (b) vista lateral, mostrando a identificação da amostra e (c) vista inferior da amostra.	108
Figura 6: Ensaio com penetrômetro dinâmico.	110
Figura 7: Infiltrômetro de Anel Duplo (IAD): A – Equipamento do Ensaio; B – Processo de Infiltração do Solo; Comportamento Ideal da Infiltração da Água pelo Anel Interno (B_1) e Externo (B_2)	111
Figura 8: Ensaio com Infiltrômetro de Duplo Anel (D.A.).	112
Figura 9: Vista superior do ensaio com Infiltrômetro de Duplo Anel (D.A.).	112
Figura 10: Ensaio de absorção de água.....	114
Figura 11: Quantificação da perda de massa do solo.....	114
Figura 12: Recipiente de coleta do escoamento superficial e do sedimento gerado.	115
Figura 13: Pote de armazenamento do escoamento superficial e sedimento gerado.	115
Figura 14: Sacos plásticos contendo as amostras deformadas vindas do campo e pequenas formas pesadas, posteriormente levadas à estufa para secagem.	116
Figura 15: Vista geral do ensaio com Simulador de Chuva.....	117
Figura 16: Vista da área do ensaio.....	117
Figura 17: Detalhe do bico 50W utilizado no simulador de chuva.....	118
Figura 18: Detalhe do bico 50W utilizado no simulador de chuva.....	118
Figura 19: Detalhe do nível vertical utilizado para nivelar o bico.	119
Figura 20: Detalhe da corda que sustenta o nível vertical, alinhada com o tubo de chegada do bico.	119
Figura 21: Tripé montado para um teste no campo.	120
Figura 22: Área delimitada para captação de escoamento superficial e sedimento.	121
Figura 23: Projeção da área ensaiada, da área molhada e dos eixos horizontal e vertical, em relação à projeção do bico (C) e, ainda, esquema da distribuição dos pluviômetros.	121
Figura 24: Segmentos de chapa utilizados para delimitação da área ensaiada.	122
Figura 25: Pluviômetros.	123
Figura 26: Detalhe da bomba pequena, de 2 tempos.	124
Figura 27: Detalhe da bomba grande, de 4 tempos.....	124
Figura 28: Vista geral de um teste realizado no campus da EESC. Notar a caixa d'água e a bomba no canto direito da foto.....	125
Figura 29: Tanque de 7.000 litros enchendo a caixa d'água que abastece o simulador de chuva.	125
Figura 30: Esquema da locação dos pluviômetros nos ensaios com simulador de chuva.	129

Figura 31: Montagem do ensaio 7.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.	129
Figura 32: Esquema da distribuição dos eixos para definição da malha de medidas de alturas para cálculo de RR.	130
Figura 33: Medição da declividade e rugosidade do local demarcado para o ensaio.	131
Figura 34: Trena flexível nivelada no plano horizontal e régua medindo a diferença de altura em um ponto da malha da área ensaiada.	131
Figura 35: Linha superior de estacas metálicas, com marcadores (prendedores de madeira) definindo os níveis do plano horizontal.	131
Figura 36: Linha inferior de estacas metálicas, com marcadores (prendedores de madeira) definindo os níveis do plano horizontal e trena esticada em um dos eixos.	131
Figura 37: Superfície considerada no cálculo da rugosidade randômica (RR).	132
Figura 38: Identificação das encostas na área de estudo da região de Corumbataí.	143
Figura 39: Distribuição dos locais ensaiados nas encostas da área de estudo da região de Corumbataí.	144
Figura 40: Croqui com exemplos de localização das séries de ensaios de caracterização (planta e corte).	145
Figura 41: Área de pasto mostrando a faixa em cavidade anterior ao cordão em nível formada por sua construção. Observar a diferença de declividade da faixa em relação à área entre cordões em nível.	146
Figura 42: Área de pasto mostrando a faixa em cavidade, anterior ao cordão em nível (marcados por tracejado). Observar a água acumulada na superfície.	147
Figura 43: Área de pasto mostrando a faixa em cavidade, anterior ao cordão em nível (marcado por tracejado). Observar a água acumulada na superfície e o sedimento acumuladno na faixa.	147
Figura 44: Distribuição dos ensaios no Local 1 e Local 2.	148
Figura 45: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 1, para as profundidades: 20, 150 e 250 cm.	149
Figura 46: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 1.	149
Figura 47: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 1, para o solo seco e úmido.	150
Figura 48: Curva de Infiltração da água no solo do Local 1.	150
Figura 49: Curvas de absorção d'água do Local 1, para as profundidades: 10, 30, 40, 50 e 60 cm.	151
Figura 50: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 2.	152
Figura 51: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 2, para o solo seco e úmido.	152
Figura 52: Curva de Infiltração da água no solo do Local 2.	152
Figura 53: Curvas de absorção d'água do Local 2, para as profundidades: 30, 40, 50 e 60 cm.	153
Figura 54: Distribuição dos ensaios no Local 3.	154
Figura 55: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 3.	155
Figura 56: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 3, para o solo seco e úmido.	155
Figura 57: Curva de Infiltração da água no solo do Local 3.	155
Figura 58: Distribuição dos ensaios no Local 4.	156
Figura 59: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 4, para as profundidades: 20 e 200 cm.	156

Figura 60: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 4.	157
Figura 61: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 4, para o solo seco e úmido.	158
Figura 62: Curva de Infiltração da água no solo do Local 4.	158
Figura 63: Curvas de absorção d'água do Local 4, para as profundidades: 30, 40 e 50 cm.	159
Figura 64: Distribuição dos ensaios no Local 5, Local 6 e Local 7.	159
Figura 65: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 5.	161
Figura 66: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 5, para o solo seco e úmido.	162
Figura 67: Curva de Infiltração da água no solo do Local 5.	162
Figura 68: Curvas de absorção d'água do Local 5, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm.	162
Figura 69: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 6.	164
Figura 70: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 6, para o solo seco e úmido.	165
Figura 71: Curva de Infiltração da água no solo do Local 6.	165
Figura 72: Curvas de absorção d'água do Local 6, para as profundidades: 30, 40 e 50 cm.	165
Figura 73: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 7, para as profundidades: 40 e 180 cm.	167
Figura 74: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 7.	168
Figura 75: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 7, para o solo seco e úmido.	169
Figura 76: Curva de Infiltração da água no solo do Local 7.	169
Figura 77: Curvas de absorção d'água do Local 7, para as profundidades: 20, 30, 40, 50 e 60 cm.	169
Figura 78: Distribuição dos ensaios no Local 8.	170
Figura 79: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 8.	172
Figura 80: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 8, para o solo seco e úmido.	173
Figura 81: Curva de Infiltração da água no solo do Local 8.	173
Figura 82: Curvas de absorção d'água do Local 8, para as profundidades: 30, 40, 50 e 60 cm.	173
Figura 83: Distribuição dos ensaios no Local 9 e Local 10.	174
Figura 84: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 9.	176
Figura 85: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 9, para o solo seco e úmido.	177
Figura 86: Curva de Infiltração da água no solo do Local 9.	177
Figura 87: Curvas de absorção d'água do Local 9, para as profundidades: 20, 30, 40, 50 e 60 cm.	177
Figura 88: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 10, para as profundidades: 40 e 200 cm.	179
Figura 89: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 10.	180
Figura 90: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 10, para o solo seco e úmido.	180
Figura 91: Curva de Infiltração da água no solo do Local 10.	180
Figura 92: Curvas de absorção d'água do Local 10, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm.	181

Figura 93: Distribuição dos ensaios no Local 11.	181
Figura 94: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 11, para as profundidades: 40 e 180 cm.	183
Figura 95: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 11.	184
Figura 96: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 11, para o solo seco e úmido.	185
Figura 97: Curva de Infiltração da água no solo do Local 11.	185
Figura 98: Curvas de absorção d'água do Local 11, para as profundidades: 30, 40 e 50 cm.	185
Figura 99: Distribuição dos ensaios no Local 12.	186
Figura 100: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 12.	188
Figura 101: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 12, para o solo seco e úmido.	188
Figura 102: Curva de Infiltração da água no solo do Local 12.	188
Figura 103: Curvas de absorção d'água do Local 12, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.	189
Figura 104: Distribuição dos ensaios no Local 13.	189
Figura 105: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 13, para as profundidades: 40 e 180 cm.	191
Figura 106: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 13.	191
Figura 107: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 13, para o solo seco e úmido.	192
Figura 108: Curva de Infiltração da água no solo do Local 13.	192
Figura 109: Curvas de absorção d'água do Local 13, para as profundidades: 10, 30, 40 e 50 cm.	192
Figura 110: Distribuição dos ensaios no Local 14.	193
Figura 111: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 14.	195
Figura 112: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 14, para o solo seco e úmido.	196
Figura 113: Curva de Infiltração da água no solo do Local 14.	196
Figura 114: Curvas de absorção d'água do Local 14, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.	196
Figura 115: Distribuição dos ensaios no Local 15 e Local 16.	197
Figura 116: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 15, para as profundidades: 40 e 200 cm.	198
Figura 117: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 15.	199
Figura 118: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 15, para o solo seco e úmido.	200
Figura 119: Curva de Infiltração da água no solo do Local 15.	200
Figura 120: Curvas de absorção d'água do Local 15, para as profundidades: 20, 30, 40 e 50 cm.	200
Figura 121: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 16.	202
Figura 122: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 16, para o solo seco e úmido.	203
Figura 123: Curva de Infiltração da água no solo do Local 16.	203
Figura 124: Curvas de absorção d'água do Local 16, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.	204
Figura 125: Distribuição dos ensaios no Local 13.	204
Figura 126: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 17, para as profundidades: 20 e 200 cm.	206

Figura 127: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 17.	207
Figura 128: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 17, para o solo seco e úmido.	207
Figura 129: Curva de Infiltração da água no solo do Local 17.	207
Figura 130: Curvas de absorção d'água do Local 17, para as profundidades: 20, 30, 40 e 50 cm.	208
Figura 131: Distribuição dos ensaios no Local 18.	209
Figura 132: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 18, para as profundidades: 20 e 310 cm.	210
Figura 133: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 18.	211
Figura 134: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 18, para o solo seco e úmido.	212
Figura 135: Curva de Infiltração da água no solo do Local 18.	212
Figura 136: Curva de absorção d'água do Local 18, para a profundidade de 30 cm.	212
Figura 137: Distribuição dos ensaios no Local 19.	213
Figura 138: Resultados de ensaios de do Solo à Penetração em estado seco (19A, 19B e 19C) e úmido 19 (ú), realizados no Local 19.	215
Figura 139: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 19, para o solo seco e úmido.	215
Figura 140: Curva de Infiltração da água no solo do Local 19.	215
Figura 141: Curvas de absorção d'água do Local 19, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.	216
Figura 142: Distribuição dos ensaios no Local 20.	216
Figura 143: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 20, para as profundidades: 40 e 200 cm.	218
Figura 144: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 20.	219
Figura 145: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 20, para o solo seco e úmido.	220
Figura 146: Curva de Infiltração da água no solo do Local 20.	220
Figura 147: Curvas de absorção d'água do Local 20, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.	220
Figura 148: Distribuição dos ensaios no Local 21.	221
Figura 149: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 21.	222
Figura 150: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 21, para o solo seco e úmido.	223
Figura 151: Curva de Infiltração da água no solo do Local 21.	223
Figura 152: Curvas de absorção d'água do Local 21, para as profundidades: 10, 30, 40 e 50 cm.	223
Figura 153: Distribuição dos ensaios no Local 22.	224
Figura 154: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 22, para as profundidades: 20 e 120 cm.	225
Figura 155: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 22.	226
Figura 156: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 22, para o solo seco e úmido.	227
Figura 157: Curva de Infiltração da água no solo do Local 22.	227
Figura 158: Curvas de absorção d'água do Local 22, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.	227
Figura 159: Distribuição dos ensaios no Local 23.	228

Figura 160: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 23.	229
Figura 161: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 23, para o solo seco e úmido.	230
Figura 162: Curva de Infiltração da água no solo do Local 23.	230
Figura 163: Curvas de absorção d'água do Local 23, para as profundidades: 10, 20 e 40 cm.	231
Figura 164: Chuvas diárias de janeiro a dezembro de 2007, na área de estudos em Corumbataí.	233
Figura 165: Chuvas diárias de janeiro a dezembro de 2008, na área de estudos em Corumbataí.	234
Figura 166: Chuvas diárias de janeiro a dezembro de 2009, na área de estudos em Corumbataí.	234
Figura 167: Chuvas diárias de janeiro a novembro de 2010, na área de estudos em Corumbataí.	235
Figura 168: Intensidades de chuvas para eventos de aproximadamente 5 min, de janeiro de 2007 a novembro de 2010, na área de estudos em Corumbataí.	237
Figura 169: Chuvas diárias de janeiro a novembro de 2010, na área de estudos em Ibaté.	238
Figura 170: Chuvas diárias de janeiro a novembro de 2011, na área de estudos em Ibaté.	238
Figura 171: Intensidades de chuvas para eventos de aproximadamente 5 min, de outubro de 2010 a março de 2011, na área de estudos em Ibaté.	239
Figura 172: Identificação das encostas na área de estudo da região de Corumbataí.	243
Figura 173: Distribuição dos Locais ensaiados nas encostas da área de estudo da região de Corumbataí.	244
Figura 174: Identificação das encostas e distribuição dos Locais ensaiados nas encostas da área de estudo da região de Ibaté.	245
Figura 175: Rugosidade do terreno preparado para o ensaio 5.2, mantendo-se a cobertura por pasto.	246
Figura 176: Rugosidade do terreno preparado para o ensaio 5.3, com a cobertura por pasto retirada.	247
Figura 177: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S1.	247
Figura 178: Vista geral da localização dos ensaios, durante a realização do ensaio S1.2.	248
Figura 179: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração, com o solo seco (19.c e S1.a), mais ensaios com o solo úmido (S1.1A (ú), S1.1B (ú) e S1.2 (ú)), que representam os ensaios com simulador de chuva: S1.1 e S1.2.	249
Figura 180: Croqui com detalhe da distribuição dos ensaios com penetrômetro que representam os ensaios com simulador: S1.1 e S1.2, do Local S1.	250
Figura 181: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S1.b), mais ensaio com o solo úmido (S1.3 (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S1.3.	251
Figura 182: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S1 e Local 19, para o solo seco (s) e úmido (ú).	252
Figura 183: Montagem do ensaio S1.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.	253
Figura 184: Montagem do ensaio S1.3, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.	253
Figura 185: Montagem do ensaio S1.2, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.	254
Figura 186: Início de empoçamento do ensaio S1.1.	256
Figura 187: Escoamento superficial do ensaio S1.3.	256
Figura 188: Escoamento superficial do ensaio S1.2.	257

Figura 189: Escoamento superficial chegando à boca (ensaio S1.3).....	257
Figura 190: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S1.1.	258
Figura 191: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S1.2.	258
Figura 192: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S1.3.	259
Figura 193: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S1.2.....	259
Figura 194: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S1.3.....	260
Figura 195: Detalhe de sedimento coletado no ensaio S1.3.	260
Figura 196: Sedimento carregado para a boca de captação no ensaio S1.3 (1º detalhe).....	261
Figura 197: Sedimento carregado para a boca de captação no ensaio S1.3 (2º detalhe).....	261
Figura 198: Sedimento carregado para a boca de captação no ensaio S1.3 (3º detalhe).....	261
Figura 199: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S2.	263
Figura 200: Vista geral dos ensaios S2.1 (em andamento) e S2.2 (marcado).....	264
Figura 201: Vista geral do ensaios S2.2 em andamento, olhando de cima para baixo no terreno. Notar a feição erosiva que aparece destacada no alto da foto, atrás do veículo.	264
Figura 202: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S2, para as profundidades: 20 e 200 cm.	266
Figura 203: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva do Local S2, para o solo seco (s) e úmido ($ú$).	267
Figura 204: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S2.a e S2.b), mais ensaios com o solo úmido (S2.1 ($ú$), S2.2 ($ú$) e S2 D.A. ($ú$)), que representa o ensaio com simulador de chuva: S2.....	268
Figura 205: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S2.....	269
Figura 206: Curvas absorção d'água do Local S2, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 cm.	269
Figura 207: Montagem do ensaio S2.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.....	271
Figura 208: Montagem do ensaio S2.2, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.....	271
Figura 209: Início de empoçamento do ensaio S2.1.	273
Figura 210: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S2.1.	274
Figura 211: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S2.2.	275
Figura 212: Ensaio S2.2 em andamento, ainda sem empoçamento.	275
Figura 213: Início do escoamento superficial no ensaio S2.2. Notar a água sobrando na superfície e formando o escoamento.	275
Figura 214: Chegada do escoamento superficial na boca de captação do ensaio S2.2.	276
Figura 215: Escoamento superficial do ensaio S2.1.	276
Figura 216: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S2.1.....	277

Figura 217: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S2.2.277	
Figura 218: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S3 e Local S6.	278
Figura 219: Vista geral dos ensaios S3.1 em andamento.	279
Figura 220: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S3.a, S6.c e S6.d), mais ensaio com o solo úmido (S3.1 (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S3.1.	281
Figura 221: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva do Local S3 e do Local S6, para o solo seco (s) e úmido (ú).	282
Figura 222: Início de empoçamento do ensaio S3.1.	284
Figura 223: Empoçamento do ensaio S3.1.	285
Figura 224: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 3.1.	285
Figura 225: Escoamento superficial do ensaio S3.1,	286
Figura 226: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1.	286
Figura 227: Detalhe 1 da área ensaiada após o ensaio S3.1, mostrando o deslocamento e deposição do sedimento.	288
Figura 228: Detalhe 1 da área ensaiada após o ensaio S3.1, mostrando o deslocamento e deposição do sedimento.	288
Figura 229: Escoamento superficial concentrado fora da área ensaiada, mostrando o deslocamento e deposição do sedimento (ensaio S3.1).	288
Figura 230: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S4.	289
Figura 231: Vista geral da localização do ensaio S4.1 em andamento, mostrando que o ensaio foi feito sobre um cordão em nível formado recentemente.	290
Figura 232: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S4.a e S4.b), mais ensaios com o solo úmido (S4.1A (ú) e S4.1B (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S4.1.	291
Figura 233: Realização do ensaio com penetrômetro S4.a, com o solo seco.	292
Figura 234: Realização do ensaio com penetrômetro S4.1A (ú), com o solo úmido.	292
Figura 235: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva do local 4, para o solo seco (s) e úmido (ú).	293
Figura 236: Montagem do ensaio S4.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.	294
Figura 237: Início de empoçamento do ensaio S4.1.	296
Figura 238: Início do escoamento superficial do ensaio S4.1.	297
Figura 239: Início de formação de sulcos, no ensaio S4.1.	297
Figura 240: Sulcos formados na área ensaiada, após o término do ensaio S4.1.	298
Figura 241: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 4.1.	299
Figura 242: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1.	300

Figura 243: Coleta de amostra na boca de captação para medir o escoamento superficial e sedimento gerado, durante o ensaio S4.1.	300
Figura 244: Armazenamento de uma amostra coletada durante o ensaio S4.1.	301
Figura 245: Vista geral da área preparada para receber plantação de cana, antes da primeira chuva.	302
Figura 246: Detalhe de cordão em nível recém-construído na área preparada para receber plantação de cana, antes da primeira chuva.	303
Figura 247: Detalhes de sulcos ocorridos na área preparada para receber plantação de cana, durante uma das primeiras chuvas.	304
Figura 248: Vista geral da área preparada para receber plantação de cana, após as primeiras chuvas.	304
Figura 249: Vista geral da área preparada para receber plantação de cana, após 15 dias da primeira chuva.	305
Figura 250: Detalhes de sulcos ocorridos na área preparada para receber plantação de cana, após 15 dias da primeira chuva.	305
Figura 251: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S5.	306
Figura 252: Croqui com detalhe da distribuição dos ensaios com penetrômetro que representam o ensaio com simulador: S5.2 do Local S5.	308
Figura 253: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S5, para o solo seco (s) e úmido (ú).	308
Figura 254: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.	309
Figura 255: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S5.c, S5.d, S5.e e S5.g), que representam o ensaio com simulador de chuva: S5.1.	310
Figura 256: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S5.a e S5.c), mais ensaios com o solo úmido (S5.2A (ú) e S5.2B (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S5.2.	311
Figura 257: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S5.a, S5.b e S5.d), mais ensaio com o solo úmido (S5.3 (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S5.3.	311
Figura 258: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S5.	312
Figura 259: Curvas absorção d'água do Local S5, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 cm.	313
Figura 260: Montagem do ensaio S5.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.	315
Figura 261: Montagem do ensaio S5.2, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.	315
Figura 262: Montagem do ensaio S5.3, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.	316
Figura 263: Detalhe mostrando que toda a água era absorvida pelo solo durante o ensaio S5.1.	318
Figura 264: Detalhe mostrando que toda a água foi absorvida pelo solo durante a primeira parte do o ensaio S5.3.	319
Figura 265: Detalhe mostrando que houve escoamento superficial, mesmo que irrisório, durante a segunda parte do ensaio S5.3, com o aumento da intensidade de chuva.	319
Figura 266: Vista geral do ensaio S6.1.	321
Figura 267: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.	323
Figura 268: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S6.b, S6.d, S6.e e S6.f), do ensaio com simulador de chuva: S6.1.	323

Figura 269: Curvas de absorção d'água do Local S6, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm.	325
Figura 270: Montagem do ensaio S6.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.	326
Figura 271: Início de empoçamento do ensaio S6.1.	328
Figura 272: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 6.1.	329
Figura 273: Escoamento superficial gerado na boca de captação durante a primeira parte do ensaio S6.1.....	330
Figura 274: Escoamento superficial gerado na boca de captação durante a segunda parte do ensaio S6.1, com o aumento da intensidade de chuva.	330
Figura 275: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S7.	332
Figura 276: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.	333
Figura 277: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S7, para o solo seco (s) e úmido (ú).	334
Figura 278: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S7.a, S7.b, S7.c, S7.d, e S7.e), mais os ensaios com o solo úmido (S7.1 (ú) e S7 (D.A.)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S7.1.	335
Figura 279: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S7.	336
Figura 280: Curvas de absorção d'água do Local S7, para as profundidades: 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm.	336
Figura 281: Montagem do ensaio S7.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.	338
Figura 282: Início de empoçamento do ensaio S7.1.	340
Figura 283: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 7.1.	341
Figura 284: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S7.1.....	341
Figura 285: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S8.	342
Figura 286: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.	344
Figura 287: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S8, para o solo seco (s) e úmido (ú).	345
Figura 288: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S8.a, S8.b, S8.c), mais os ensaios com o solo úmido (S8.1 (ú) e S8 (D.A.)), que representam o Local S8.1.	346
Figura 289: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S8.	347
Figura 290: Curvas de absorção d'água do Local S8, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm. ...	348
Figura 291: Montagem do ensaio S8.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.	349
Figura 292: Início de empoçamento do ensaio S8.1.	351
Figura 293: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 8.1.	352
Figura 294: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S8.1.....	353
Figura 295: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S8.1.....	353
Figura 296: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1. .	354
Figura 297: Sulcos gerados durante o ensaio S8.1.....	355

Figura 298: Sulcos gerados em período de chuva na região onde foram realizados os ensaios dos locais 8 e 9 (foto tirada em janeiro de 2011).	356
Figura 299: Ravinas geradas em período de chuva na região onde foram realizados os ensaios dos locais 8 e 9 (foto tirada em janeiro de 2011).	357
Figura 300: Ravina gerada em período de chuva na região onde foram realizados os ensaios dos locais 8 e 9 (foto tirada em janeiro de 2011).	357
Figura 301: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S9.	358
Figura 302: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S9, para as profundidades: 20 e 150 cm.	360
Figura 303: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S9, para o solo seco (s) e úmido (ú).	360
Figura 304: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S9.a, S9.b, S9.c), mais os ensaios com o solo úmido (S9.1 (ú) e S9 (D.A.)), que representam o Local S9.1.....	361
Figura 305: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S9.	362
Figura 306: Curvas de absorção d'água do Local S9, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm. ...	363
Figura 307: Montagem do ensaio S9.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.	364
Figura 308: Início de empoçamento e do escoamento superficial do ensaio S9.1.....	366
Figura 309: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 7.1.	367
Figura 310: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S9.1.	368
Figura 311: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1.	369
Figura 312: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 1 minuto de ensaio.	370
Figura 313: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 9 minutos de ensaio.	370
Figura 314: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 11 minutos de ensaio.	370
Figura 315: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 14 minutos de ensaio.	370
Figura 316: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E1, Corumbataí.	378
Figura 317: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E1, Corumbataí.	378
Figura 318: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E2, Corumbataí.	379
Figura 319: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E2, Corumbataí.	379
Figura 320: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E2, Corumbataí.	381
Figura 321: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E2, Corumbataí.	381
Figura 322: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E3, Corumbataí.	381
Figura 323: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E3, Corumbataí.	381
Figura 324: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E3, Corumbataí.	383
Figura 325: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E3, Corumbataí.	383
Figura 326: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E4, Corumbataí.	383
Figura 327: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E4, Corumbataí.	383
Figura 328: Localização da série de ensaios do Local 15, na encosta E4, Corumbataí.	384
Figura 329: Localização das séries de ensaios dos Locais 15 e 16, na encosta E4, Corumbataí.	384
Figura 330: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E4, Corumbataí.	386
Figura 331: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E4, Corumbataí.	386

Figura 332: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E5, Corumbataí.....	386
Figura 333: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E5, Corumbataí.....	386
Figura 334: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E5, Corumbataí.....	388
Figura 335: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E5, Corumbataí.....	388
Figura 336: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E6, Corumbataí.....	389
Figura 337: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E6, Corumbataí.....	389
Figura 338: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E6, Corumbataí.....	390
Figura 339: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E6, Corumbataí.....	390
Figura 340: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E7, Corumbataí.....	391
Figura 341: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E7, Corumbataí.....	391
Figura 342: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E7, Corumbataí.....	392
Figura 343: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E7, Corumbataí.....	392
Figura 344: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E8, Corumbataí.....	394
Figura 345: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E8, Corumbataí.....	394
Figura 346: Local S7 na encosta E9, Ibaté.....	395
Figura 347: Local S7 em vista na encosta E9, Ibaté.....	395
Figura 348: Vista ampliada da encosta E9, posicionando o Local S7, Ibaté.....	395
Figura 349: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E10, Ibaté.....	397
Figura 350: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E10, Ibaté.....	397
Figura 351: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E10, Ibaté.....	398
Figura 352: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E10, Ibaté.....	398

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Modelos de Previsão de Capacidade Máxima de Armazenamento de Água na Superfície (<i>Maximum Depressional Storage – MDS</i>).....	73
Tabela 2: Coeficientes na Equação (7) correspondentes para diferentes fontes de dados.	87
Tabela 3 Descrição dos Bicos Utilizados no Simulador de Chuva.	118
Tabela 4: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 30W, por ordem de altura do bico.	134
Tabela 5: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 50W, por ordem de altura do bico.	135
Tabela 6: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 16W, por ordem de altura do bico.	136
Tabela 7: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 47W, por ordem de altura do bico.	136
Tabela 8: Resultados de todos os bicos, para os pluviômetros localizados num raio de 75 cm, por ordem de intensidade de chuva simulada.	138
Tabela 9: Sugestão de tipo e forma de utilização de equipamento para simular diversas intensidades médias de chuva.....	139
Tabela 10: Denominação e localização dos ensaios de caracterização da área de estudos.....	142
Tabela 11: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 60 cm, do Local 5.....	160
Tabela 12: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 80 cm, do Local 6.....	163
Tabela 13: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 180 cm.....	166
Tabela 14: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local 7.	170
Tabela 15: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 180 cm para o Local 8.	171
Tabela 16: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local 7.	174
Tabela 17: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 9.....	175
Tabela 18: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 10.	178
Tabela 19: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 11.	182

Tabela 20: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 12.	187
Tabela 21: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 13.	190
Tabela 22: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 14.	194
Tabela 23: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 15.	198
Tabela 24: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 16.	201
Tabela 25: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 17.	205
Tabela 26: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 330 cm, do Local 18.	210
Tabela 27: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 19.	214
Tabela 28: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 20.	217
Tabela 29: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 21.	221
Tabela 30: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 22.	225
Tabela 31: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 23.	229
Tabela 32: Maiores intensidades de chuva para eventos considerados de aprox. 5 min; Chuva acumulada do evento total; e Chuva acumulada no dia, para a área de estudos em Corumbataí.	236

Tabela 33: Maiores intensidades de chuva para eventos considerados de aprox. 5 min; Chuva acumulada do evento total; e Chuva acumulada no dia, para a área de estudos em Ibaté.....	239
Tabela 34: Denominação e localização dos ensaios com simulador de chuva.	242
Tabela 35: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S1.	251
Tabela 36: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S1.	253
Tabela 37: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para os ensaios S1.1 e S1.2, do Local S1.	255
Tabela 38: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S1.	255
Tabela 39: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica natural do solo (ρ), massa específica do solo seco (ρ_d), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S2.....	265
Tabela 40: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S2.	267
Tabela 41: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S2.....	270
Tabela 42: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S2.	270
Tabela 43: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para os ensaios S2.1 e S2.2, do Local S2.	272
Tabela 44: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S2.	273
Tabela 45: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 102 cm, do Local S3.	280
Tabela 46: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S3 e do Local S6.	282
Tabela 47: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S3.	283
Tabela 48: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S3.1, do Local S3.....	283
Tabela 49: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S3.	284
Tabela 50: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S4.	292
Tabela 51: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S4.	294
Tabela 52: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S4.1, do Local S4.....	295

Tabela 53: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S4.	296
Tabela 54: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 200 cm, do Local S5.	307
Tabela 55: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S5.	309
Tabela 56: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S5.	313
Tabela 57: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S5.	314
Tabela 58: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para os ensaios S5.1, S5.2 e S5.3, do Local S5.	317
Tabela 59: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S5.	317
Tabela 60: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 200 cm, do Local S6.	322
Tabela 61: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S6.	324
Tabela 62: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S6.	326
Tabela 63: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S6.1, do Local S6.	327
Tabela 64: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S6.	328
Tabela 65: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S5.	333
Tabela 66: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S7.	334
Tabela 67: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S7.	337
Tabela 68: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S7.	337
Tabela 69: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S7.1, do Local S7.	339
Tabela 70: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S7.	339
Tabela 71: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica natural do solo (ρ), massa específica do solo seco (ρ_d), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S8.	343

Tabela 72: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S8.	345
Tabela 73: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S8.	347
Tabela 74: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S8.	349
Tabela 75: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S8.1, do Local S8.	350
Tabela 76: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S8.	351
Tabela 77: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica natural do solo (ρ), massa específica do solo seco (ρ_d), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S9.	359
Tabela 78: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S9.	359
Tabela 79: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S9.	362
Tabela 80: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S9.	364
Tabela 81: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S9.1, do Local S9.	365
Tabela 82: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S9.	366
Tabela 83: Resumo dos resultados do ensaio com simulador de chuva, em todos os Locais ensaiados.	374
Tabela 84: Resumo dos resultados de Rugosidade e Capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS).	376
Tabela 85: Distribuição por encosta dos Locais ensaiados e a respectiva cidade da área de estudo.	399
Tabela 86: Distribuição por encosta dos Locais considerados.	401
Tabela 87: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 0 e 10 cm.	402
Tabela 88: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 0 e 20 cm.	403
Tabela 89: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 20 e 60 cm.	403
Tabela 90: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 60 e 100 cm.	404
Tabela 91: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 100 e 180 cm.	405
Tabela 92: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 0 e 10 cm.	406
Tabela 93: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 0 e 20 cm.	406
Tabela 94: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 20 e 60 cm.	406
Tabela 95: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 60 e 100 cm.	407
Tabela 96: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 100 e 180 cm.	407
Tabela 97: ANOVA Entre Encostas, para o solo úmido e todas as faixas de profundidade,	408
Tabela 98: ANOVA Entre Encostas, para o solo úmido e todas as faixas de profundidade,	408
Tabela 99: Resumo dos índices físicos para os ensaios da primeira e segunda etapas, para a profundidade entre 0 e 20 cm.	411

Tabela 100: Resumo da textura do solo, uso e erodibilidade no perfil, para todos os locais ensaiados.....413

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Tipos de escoamento em áreas de cabeceiras de bacias hidrográficas.	46
Quadro 2: Fatores que influenciam a erodibilidade dos materiais geológicos.....	48
Quadro 3: Características de diferentes tipos de processos erosivos.	51
Quadro 4: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos empíricos ou de regressão.	54
Quadro 5: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos conceituais.	55
Quadro 6: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos com base física.	57
Quadro 7: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos semi-quantitativos.	61
Quadro 8: Dados de entrada (<i>Input</i>), de saída (<i>output</i>) e processos constantes em modelos conceituais, que consideram erosão linear por gullies.....	64
Quadro 9: Dados de entrada (<i>Input</i>), de saída (<i>output</i>) e processos constantes em modelos com base física, que consideram erosão linear por gullies.....	65
Quadro 10: Parâmetros de entrada de modelos com base física, distribuídos espacialmente e que consideram sedimento gerado por feições lineares, acrescidos de um modelo para previsão de sedimento gerado por ravinas.....	102

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	39
Capítulo 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	43
1.1. <i>Processos Erosivos</i>	44
1.1.1. Fluxo Superficial e Subsuperficial	44
1.1.2. Destacamento, Transporte e Deposição	47
1.1.3. Erodibilidade dos Materiais Geológicos	47
1.2. <i>Tipos de Erosão</i>	49
1.3. <i>Fenômenos Erosivos</i>	52
1.4. <i>Modelos de Erosão</i>	52
1.4.1. Tipos de Modelos	53
1.4.2. Processos Erosivos Considerados nos Modelos	62
1.4.3. Modelos com base física	69
1.5. <i>Parâmetros de Entrada dos Modelos</i>	70
1.5.1. Forma de Entrada de Dados	71
1.5.2. Escala	71
1.5.3. Pluviometria	71
1.5.4. Relevo	72
1.5.4.1. Declividade	72
1.5.4.2. Rugosidade e Capacidade de Armazenamento de Água da Superfície	72
1.5.5. Infiltração da Água no Solo e Escoamento Superficial	75
1.5.6. Tensão de Cisalhamento do Fluxo	76
1.5.7. Relação entre Tensão Crítica de Cisalhamento do Solo e a Resistência do Solo à Penetração	76
1.5.7.1. Ensaio in situ: com Penetrômetro Dinâmico	79
1.5.8. Resistência do Solo à Penetração	81
1.5.9. Geração de sedimentos	83
1.5.9.1. Tamanho dos Lotes para Coleta de Sedimentos	84
1.5.9.2. Simulador de Chuva	84
1.5.10. Incisão no Solo: Início de formação de sulcos	86
Capítulo 2: CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	89
2.1. <i>Área de Estudo na Região de Corumbataí</i>	89
2.1.1. Geomorfologia.....	89
2.1.2. Clima	90
2.1.3. Substrato Rochoso.....	90
2.1.4. Pedologia	91
2.1.4.1. Neossolos	91
2.1.4.2. Neossolos Quartzênicos (Areias Quartzosas).....	91
2.1.4.3. Neossolos Litólicos	92
2.1.4.4. Podzólico amarelo com textura arenosa	92
2.1.4.5. Latossolo vermelho-amarelo arenoso	92
2.1.4.6. Neossolos Aluviais.....	93
2.1.5. Hidrografia.....	93

2.1.6. Vegetação	93
2.2. Área de Estudo na Região de Ibaté	93
2.2.1. Geologia e Geomorfologia	94
2.2.2. Clima	94
2.2.3. Hidrografia	95
2.2.4. Vegetação	95
Capítulo 3: MÉTODOS E MATERIAIS	97
3.1. Processos Erosivos Lineares	97
3.2. Dados de entrada dos modelos	101
3.3. Tipo de Solo	107
3.4. Resistência do Solo	108
3.4.1. Ensaio com Penetrômetro Dinâmico	108
3.5. Taxa de Infiltração de Água No Solo	110
3.5.1. Ensaio com Infiltrômetro de Duplo Anel (IAD) (ASTM-D 3385)	110
3.5.1.1. Procedimento do ensaio	113
3.6. Erodibilidade	113
3.6.1. Ensaio de Erodibilidade em laboratório	113
3.6.2. Coleta e Armazenamento de Escoamento Superficial e Sedimento Gerado	114
3.7. Perfis de Umidade do Solo	115
3.8. Simulador de Chuva e Coleta de Sedimento	116
3.8.1. Equipamento	116
3.8.1.1. Bico	118
3.8.1.2. Tripé	119
3.8.1.3. Determinação e Demarcação da Área de ensaio	120
3.8.1.4. Elementos Utilizados na Delimitação da Área Ensaída	122
3.8.1.5. Pluviômetros	123
3.8.1.6. Bombas, Mangueiras e Fonte de Água	123
3.8.2. Especificação do Simulador de Chuva	126
3.8.2.1. Medidas de Intensidade de Chuva	127
3.8.2.2. Intensidades de Chuva Simuladas Nos Ensaio	127
3.9. Declividade e Rugosidade do Terreno	130
3.9.1. Levantamento da Declividade e Rugosidade do Terreno	130
Capítulo 4: RESULTADOS DOS TESTES DE CALIBRAÇÃO DO SIMULADOR DE CHUVA (S.C.)	133
4.1. Resultados dos Testes	133
4.2. Conclusão dos Testes com Simulador de Chuva	139
Capítulo 5: RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PRIMEIRA ETAPA	141
5.1. Resultados dos Ensaio de Caracterização da Área de Estudos	141
5.1.1. Denominação e Localização dos Ensaio	142
5.1.2. Resultados do Local 1	148
5.1.3. Resultados do Local 2	151
Resultados do Local 3	153
5.1.4. Resultados do Local 4	156

5.1.5. Resultados do Local 5	159
5.1.6. Resultados do Local 6	163
5.1.7. Resultados do Local 7	166
5.1.8. Resultados do Local 8	170
5.1.9. Resultados do Local 9	174
5.1.10. Resultados do Local 10	178
5.1.11. Resultados do Local 11	181
5.1.12. Resultados do Local 12	186
5.1.13. Resultados do Local 13	189
5.1.14. Resultados do Local 14	193
5.1.15. Resultados do Local 15	196
5.1.16. Resultados do Local 16	201
5.1.17. Resultados do Local 17	204
5.1.18. Resultados do Local 18	208
5.1.19. Resultados do Local 19	213
5.1.20. Resultados do Local 20	216
5.1.21. Resultados do Local 21	220
5.1.22. Resultados do Local 22	224
5.1.23. Resultados do Local 23	228
 Capítulo 6: DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS	 233
6.1. Região de Corumbataí.....	233
6.2. Região de Ibaté	237
 Capítulo 7: RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA.....	 241
7.1. Denominação e Localização dos Ensaios	241
7.2. Ensaios do Local S1.....	247
7.2.1. Ensaios de Caracterização	248
7.2.2. Ensaios com Simulador de Chuva.....	252
7.2.2.1. Intensidade de Chuva.....	252
7.2.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	254
7.2.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	255
7.2.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo.....	257
7.2.2.5. Sedimento Gerado	259
7.2.3. Considerações Gerais Sobre os Ensaios do Local S1.....	262
7.3. Ensaios do Local S2.....	263
7.3.1. Ensaios de Caracterização	265
7.3.2. Ensaios com Simulador de Chuva.....	270
7.3.2.1. Intensidade de Chuva.....	270
7.3.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	271
7.3.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	272
7.3.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo.....	273
7.3.2.5. Sedimento Gerado	276
7.3.3. Considerações Gerais dos Ensaios do Local 2.....	277
7.4. Ensaios do Local S3.....	278

7.4.1. Ensaios de Caracterização	279
7.4.2. Ensaios com Simulador de Chuva	282
7.4.2.1. Intensidade de Chuva	282
7.4.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	283
7.4.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	284
7.4.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo	285
7.4.2.5. Sedimento Gerado	286
7.4.3. Considerações Gerais dos Ensaios do Local 3	287
7.5. Ensaios do Local S4.....	289
7.5.1. Ensaios de Caracterização	290
7.5.2. Ensaios com Simulador de Chuva	293
7.5.2.1. Intensidade de Chuva	293
7.5.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	295
7.5.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	295
7.5.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo	298
7.5.2.5. Sedimento Gerado	299
7.5.3. Considerações Gerais do Ensaio do Local 4	301
7.6. Ensaios do Local S5.....	306
7.6.1. Ensaios de Caracterização	306
7.6.2. Ensaios com Simulador de Chuva	314
7.6.2.1. Intensidade de Chuva	314
7.6.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	316
7.6.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	317
7.6.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo	318
7.6.2.5. Sedimento Gerado	320
7.6.3. Considerações Gerais dos Ensaios do Local 5	320
7.7. Ensaios do Local S6.....	320
7.7.1. Ensaios de Caracterização	321
7.7.2. Ensaios com Simulador de Chuva	325
7.7.2.1. Intensidade de Chuva	325
7.7.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	326
7.7.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	327
7.7.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo	328
7.7.2.5. Sedimento Gerado	331
7.7.3. Considerações Gerais do Local 6	331
7.8. Ensaios do Local S7.....	331
7.8.1. Ensaios de Caracterização	332
7.8.2. Ensaios com Simulador de Chuva	337
7.8.2.1. Intensidade de Chuva	337
7.8.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	338
7.8.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	339
7.8.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo	340
7.8.2.5. Sedimento Gerado	341

7.8.3. Considerações Gerais do Local 7	342
7.9. Ensaaios do Local S8.....	342
7.9.1. Ensaaios de Caracterização	343
7.9.2. Ensaaios com Simulador de Chuva.....	348
7.9.2.1. Intensidade de Chuva.....	348
7.9.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	350
7.9.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	350
7.9.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo.....	352
7.9.2.5. Sedimento Gerado	354
7.9.3. Considerações Gerais do Local S8	355
7.10. Ensaaios do Local S9.....	358
7.10.1. Ensaaios de Caracterização	358
7.10.2. Ensaaios com Simulador de Chuva.....	363
7.10.2.1. Intensidade de Chuva.....	363
7.10.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios	364
7.10.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial	365
7.10.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo.....	366
7.10.2.5. Sedimento Gerado	368
7.10.3. Considerações Gerais do Local S9	369
Capítulo 8: ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS	373
8.1. Análise dos Resultados dos Ensaaios com Simulador de Chuva.....	373
8.1.1. Dificuldades e incertezas na realização dos ensaios	376
8.2. Análise das Séries de Ensaaios por Encostas.....	377
8.2.1. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E1.....	378
8.2.2. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E2.....	379
8.2.3. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E3.....	381
8.2.4. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E4.....	383
8.2.5. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E5.....	386
8.2.6. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E6.....	388
8.2.7. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E7.....	390
8.2.8. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E8.....	393
8.2.9. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E9.....	395
8.2.10. Séries de Ensaaios dos Locais da Encosta E10.....	396
8.3. Análise Estatística por Parâmetros	398
8.3.1. Resistência do Solo à Penetração.....	400
8.3.1.1. Resultados Por Encosta Para o Solo Seco	401
8.3.1.2. Resultados Entre Encostas Para o Solo Seco.....	405
8.3.1.3. Resultados Entre Encostas Para o Solo Úmido	407
8.3.1.4. Considerações Gerais sobre Resultados de Resistência do Solo à Penetração	409
8.3.2. Índices Físicos	409
8.3.2.1. Porosidade do Solo na Profundidade de 20 cm	410
8.3.2.2. Índice de Vazios na Profundidade de 20 cm	410
8.3.2.3. Umidade Volumétrica, para o Solo Úmido	410
8.3.2.4. Grau de Saturação, para o Solo Úmido na Profundidade de 20 cm	412
8.3.3. Taxa de Infiltração de Água no Solo	412

8.3.4. Textura e Erodibilidade do Solo.....	412
Capítulo 9: CONCLUSÕES	415
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	417
APÊNDICE	427

INTRODUÇÃO

A ocupação inadequada do meio físico, sem a preocupação em se conhecer as limitações e as vantagens das condições naturais, gera desequilíbrios ambientais com sérias consequências socioeconômicas, por vezes de proporções desastrosas, como por exemplo, os processos erosivos no estado de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso, Goiás, Rio Grande do Sul, Mato grosso do Sul e Maranhão entre outros. O estado de São Paulo apresenta mais de 35.000 feições erosivas, sendo que entre as cidades de São Pedro e Corumbataí (SP) ocorrem milhares de feições erosivas de portes variados decorrentes das características de erodibilidade elevada dos materiais geológicos, associados aos usos inadequados dos terrenos, que condicionam, ao longo do tempo, as variações da intensidade da erosividade das águas pluviais. Nos estudos referentes aos processos erosivos normalmente observa-se o tratamento parcial do problema em função da formação dos técnicos envolvidos.

As bacias da região de São Carlos apresentam um conjunto de características comuns a todas as bacias que drenam para o sentido sul, ou seja, apresentam 3 níveis altimétricos e geomorfológicos distintos, constituídos pelo Planalto Paulista no terço a montante, as Cuestas no terço médio e a Depressão Periférica no terço inferior. Portanto, a geração de sedimentos está relacionada a uma diversidade muito grande de materiais geológicos e usos, assim como de escoamento superficial e aspectos de energia dos canais.

Os estudos dos processos erosivos são desenvolvidos com diferentes objetivos: a avaliação dos impactos ambientais, voltados à pesquisa científica, desenvolvimento de tecnologias de controle, elaboração de políticas de conservação e principalmente no sentido de previsão de erosão para implantação de medidas preventivas. No caso da previsão de erosão o predomínio dos estudos é voltado à geração de sedimentos, e alguns no sentido de prever a distribuição espacial das feições lineares em curso. As previsões relativas aos processos erosivos são, na sua totalidade, voltadas à geração de sedimentos e sempre com base em modelos com diferentes fundamentos.

Segundo diversos autores os estudos sobre erosão têm apresentado resultados muito variados em função de aspectos como a variabilidade das informações consideradas para o mesmo tipo de estudo, a diversidade e pequeno número de estudos com validação espacial e temporal e a falta de continuidade dos estudos em uma região, e respectivo detalhamento.

Diversos modelos matemático/computacionais foram desenvolvidos buscando, em quase sua totalidade, somente valores quantitativos de sedimento gerado. Na maioria desses modelos somente a erosão laminar era considerada e somente em alguns, feições de erosão linear são consideradas na somatória da quantidade de sedimento gerado. A previsão da quantidade de sedimento vinda de erosão laminar é feita, na maioria das vezes, levando-se em conta a extrapolação de dados geomorfológicos coletados em poucos locais para áreas extensas. Isso quando não se leva em conta dados de áreas similares, sem a realização de ensaios. Nos modelos que consideram na somatória a quantidade de sedimento originada de erosão linear, esse montante é obtido por meio das dimensões de feições existentes. Nenhum modelo de previsão de geração de sedimento prevê como, onde e quando aparecerão feições lineares, pois nenhum considera os processos envolvidos na geração desse tipo de erosão.

Alguns modelos buscam por meio do levantamento de feições existentes, somado a uma caracterização geotécnica da área estudada, determinar a ocorrência de novas feições por extrapolação de dados.

Existem estudos sobre processos erosivos lineares, mas não estão modelados no sentido de previsão de ocorrência de feições. Na atualidade os estudos apontam para o desenvolvimento de um modelo de previsão de erosão linear, baseado nos processos. Para tanto, seria necessário um levantamento mais detalhado de dados para alimentar esse tipo de modelo. As variáveis envolvidas nos processos erosivos lineares são inúmeras, portanto o conhecimento detalhado de uma pequena área, como uma sub-bacia, encosta ou mesmo uma área pontual sugere ser necessário. Tal sugestão leva ao questionamento a respeito da variabilidade e representatividade da quantidade de ensaios distribuídos numa pequena área, dependendo do material inconsolidado.

O trabalho realizado teve como objetivo principal avaliar a variabilidade e representatividade de características geotécnicas ligadas aos processos erosivos, obtidas no campo, buscando maior representatividade dos resultados em relação aos ensaios realizados em laboratório.

Como objetivos complementares tinham-se: gerar parte dos dados para alimentar e validar um possível modelo com base nos processos erosivos lineares e avaliar a dificuldade de obtenção desses dados.

Ensaio foram realizados em algumas encostas localizadas numa sub-bacia do córrego do Lajeado na região de Corumbataí/SP, e outros numa encosta localizada na região de Ibaté/SP.

Dois grupos de ensaios foram realizados em momentos distintos. Numa primeira etapa, no ano de 2006, foram realizados ensaios de caracterização de uma área que mais tarde teve modificado o uso do solo, inviabilizando a continuidade dos estudos, com a realização dos ensaios complementares nessa área. Somente em 2 locais todos os ensaios puderam ser concluídos. Nos ensaios de caracterização estão incluídos ensaios de infiltração da água no solo e de resistência ao cisalhamento do solo.

Numa segunda etapa, com ensaios realizados nos anos de 2007, 2009 e 2010, foram feitos ensaios de caracterização do solo, geração de sedimento, micro rugosidade e escoamento superficial, entre outros, ou seja, a maior parte dos ensaios necessários para alimentar um possível modelo físico de previsão de erosão linear. Os ensaios desta segunda etapa contaram com um simulador de chuvas para obtenção dos dados citados. Outro objetivo dos ensaios com simulador de chuvas foi o da observação do aparecimento de sulcos no terreno. Dado este, necessário para validar um possível modelo físico de previsão de erosão linear.

O trabalho apresentado a seguir constitui de revisão bibliográfica, definição dos métodos utilizados nos ensaios, os resultados obtidos e sua análise. Inicialmente, será apresentada revisão dos termos envolvidos no estudo de erosão, identificação dos processos envolvidos no estudo de erosão linear, identificação dos modelos existentes que incluem erosão linear, dos dados requeridos por tais modelos e estudo da obtenção desses dados. Na sequência serão descritos os métodos adotados e desenvolvidos para obtenção dos dados e finalmente serão apresentados os resultados obtidos, com análise dos mesmos.

Capítulo 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O crescente desenvolvimento das atividades antrópicas envolvendo os componentes do meio físico e a ocupação geralmente inadequada sem a devida relação de equilíbrio entre eles, gera na maioria dos casos, a curto e/ou longo prazo, o desencadeamento de processos geológicos acelerados tais como: inundações, deslizamentos de encostas, erosões, etc., que afetam diretamente as condições socioeconômicas e conseqüentemente a qualidade de vida do homem.

No campo dos estudos voltados à avaliação de processos naturais, destaca-se a Geologia de Engenharia, que interagindo com a Mecânica dos Solos e das Rochas, tem exercido um papel fundamental no emprego de investigações, técnicas e soluções (medidas corretivas e preventivas) relacionadas diretamente ao meio físico.

Os modelos matemático/computacionais constituem uma ferramenta bastante empregada na interpretação dos processos naturais, servindo de base para medidas preventivas. Na maioria dos casos os modelos são desenvolvidos para gerenciamento ambiental, incluindo diversas áreas do conhecimento e, portanto, diversos processos naturais, entre os quais estão os processos erosivos. Normalmente os modelos são divididos em módulos interligados, o que permite o desenvolvimento de cada grupo de processos independente dos demais. Os processos erosivos compõem um desses grupos. Os processos erosivos podem ser divididos em processos relativos à erosão laminar e processos relativos à erosão linear. Existem, atualmente, mais de 80 modelos que incluem um módulo de processos erosivos, sejam de previsão ou de retro-análise. Quase na totalidade dos modelos existentes, porém, estão inclusos somente processos relativos à erosão laminar, aparecendo algum processo de erosão linear somente nos modelos de retro-análise. Ainda assim, são raros os modelos que incluem algum processo erosivo linear, devido, principalmente, à complexidade dos parâmetros envolvidos e da dificuldade em obtenção de dados para alimentar o modelo.

O desenvolvimento de um modelo de previsão de erosão linear requer o levantamento do estado da arte em termos de modelos existentes, no que diz respeito aos parâmetros que os alimentam e aos resultados que fornecem. Para tanto, é necessário o devido entendimento dos processos envolvidos na formação do tipo de feição erosiva a ser modelado.

Na sequência é feita uma explanação das definições e formas das feições e da dinâmica dos processos erosivos, um apanhado dos modelos existentes e também breve descrição dos parâmetros envolvidos.

1.1. Processos Erosivos

1.1.1. Fluxo Superficial e Subsuperficial

De acordo com conceituação de CHOW (1964), escoamento é a parte da precipitação, bem como de qualquer outra contribuição, que é conduzida em canais superficiais de drenagem sob a forma perene ou intermitente. Dependendo da fonte da qual o fluxo é derivado, o escoamento pode ser caracterizado como superficial (*superficial runoff*), subsuperficial (*subsuperficial runoff*) e de água subterrânea (*groundwater runoff*). O escoamento superficial é aquela parte do *runoff* que flui sobre a superfície do terreno e através de canais e alcança a saída da bacia. A parte do escoamento superficial que se movimenta sobre a superfície do solo em direção aos canais de drenagem é chamada de *overland flow*.

HORTON (1933) define *overland flow* da seguinte maneira: "descartando a interceptação pela vegetação, o escoamento superficial é a parte da precipitação que não é absorvida pelo solo".

A água de escoamento superficial é o mais importante agente de transporte quando a erosão é causada pela chuva. Este escoamento pode se mover sobre o terreno, de diversas maneiras: sobre amplas superfícies sem apresentar canais perceptíveis, como uma lâmina delgada de água e é denominado escoamento laminar ou escoamento pré-canal; ou então, a água se movimenta confinada em micro-canais temporários, canais definitivos ou canais profundos.

Segundo CARSON & KIRKBY (1975) a água da chuva ao alcançar a superfície do terreno se subdivide em vários componentes (Figura 1). Uma parte da porção da chuva que é interceptada pela vegetação permanece sobre a superfície foliar e posteriormente evapora, enquanto que a parte restante chega à superfície do solo por gotejamento após sofrer um retardamento.

Figura 1: Componentes esquemáticos do balanço hidrológico próximo à superfície (CARSON & KIRKBY, 1975).

Parte da água da chuva que atinge a superfície do terreno, direta ou indiretamente, preenche pequenas irregularidades da superfície, produzindo o armazenamento superficial. Outra parte infiltra no solo e uma terceira acaba por constituir o escoamento superficial. A água que infiltra pela superfície do solo pode ser incorporada neste sob forma adsorvida, ou então, continuar percolando até atingir o nível d'água. No entanto, ocorrem situações em que os horizontes do solo menos permeáveis ou ainda o substrato rochoso está presente, nesse caso a água de percolação movimenta-se lateralmente formando um fluxo subsuperficial, que ao ser interceptado pela superfície dos terrenos da origem a fonte e aos canais de drenagem permanentes.

Diferentes tipos de escoamentos superficiais podem ser identificados em uma bacia de drenagem, como apresentados no Quadro 1, de acordo com DERBYSHIRE et al (1979).

A compreensão dos processos de escoamento superficial depende do estabelecimento do real significado de cada um dos sub-processos envolvidos, sendo que o escoamento superficial não confinado em canais pode ser originado por 4 condições básicas, que são responsáveis pela deflagração dos processos erosivos acelerados, a saber:

1- Escoamento superficial Hortoniano: ocorre quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração.

2- Escoamento superficial Hortoniano retardado: quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo após a influência de um fator de retardo, como umedecimento ou impacto de gotas de chuva.

3- Escoamento superficial por saturação da camada de topo: ocorre em regiões onde o solo permeável no topo do perfil encontra-se sobrejacente a uma camada menos permeável e, portanto, atinge a saturação em tempo inferior ao da duração da chuva.

4- Escoamento superficial por saturação: ocorre quando a capacidade de armazenamento do solo está completamente esgotada, de tal forma que toda adição de água, independente da sua taxa de aplicação, é forçada a escoar pela superfície.

Quadro 1: Tipos de escoamento em áreas de cabeceiras de bacias hidrográficas.

Tipo de Escoamento	Características	Ocorrência
Escoamento Rápido		
Escoamento superficial	Quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração	- regiões semiáridas - regiões úmidas - adjacentes a canais fluviais ou em encostas convergentes
Escoamento superficial saturado	Quando o solo está saturado e a capacidade de infiltração não foi excedida	- canais fluviais - locais onde o nível d'água aumenta rapidamente durante a chuva
Escoamento de Restituição		
Escoamento subsuperficial	Movimento de água no perfil de solo no sentido da parte baixa da vertente sob condições não saturadas	Vertentes com solos bem drenados guiado por discontinuidades no perfil
Escoamento subsuperficial saturado	Escoamento lateral em solos sob condições saturadas	Quando uma cunha saturada estende no sentido da parte alta da vertente do perfil de solo; o escoamento subsuperficial saturado ocorre imediatamente acima
Escoamento translatório	Escoamento lateral que ocorre por deslocamento da água armazenada devido à adição de "nova" água	Vertente de solo com zona saturada
Escoamento interno	Pode ser empregado como sinônimo de escoamento subsuperficial	Vertente com nível d'água permanente e presença de discontinuidade para guiar o escoamento lateral
Escoamento interno saturado	Ocorre sob condições saturadas	Em locais com presença de uma cunha saturada abaixo da superfície e que se estende para parte alta da vertente
Escoamento em tubos	Fluxo através da rede subsuperficial de canais ou tubos ("pipes") maiores do que vazios do solo, podendo ultrapassar 1 metro em diâmetro	Áreas variadas incluindo encostas íngremes, onde camadas erodíveis sobrejacentes a camadas menos permeáveis
Escoamento Retardado		
Escoamento de água subterrânea	A água subterrânea movimenta-se em direção as partes baixas das vertentes e em direção à superfície em taxas determinadas pela pressão hidráulica	Áreas onde a água subterrânea é armazenada.

Fonte: Derbyshire et al, (1979).

1.1.2. Destacamento, Transporte e Deposição

O processo erosivo inclui destacamento, transporte e deposição de partículas de solo, que são causados pelo poder erosivo das gotas de chuva e do fluxo de água superficial. Nos modelos de erosão é comum se dividir conceitualmente os processos relativos ao fluxo que ocorre nos sulcos e inter-sulcos. Considerando-se essa divisão, nos sulcos o fluxo pode atuar para destacar partículas de solo sempre que sua tensão de cisalhamento superar a ligação das forças entre partículas na massa de solo. Nos sulcos, o fluxo também atua como agente de transporte para carregar o solo destacado no próprio sulco, ou vindos das áreas inter-sulcos. O destacamento nas áreas inter-sulcos é induzido primeiramente pelo impacto das gotas de chuva, antes da formação do escoamento superficial, que é a outra forma de destacamento das partículas (NEARING et al., 1994). O fluxo gerado pelo escoamento superficial desloca as partículas no sentido de maior declividade, depositando-as em cotas de nível mais baixas, ou as desloca para os sulcos. A energia requerida para mover as partículas de solo é muito menor que aquela requerida para destacá-las. O transporte por gotas de chuva é muito pequeno. (NEARING et al., 1994)

1.1.3. Erodibilidade dos Materiais Geológicos

Os materiais geológicos apresentam diversos comportamentos quanto à erodibilidade em função dos constituintes sólidos (minerais, matéria orgânica e outros), do cimento entre as partículas, da dimensão das partículas e do estado de evolução genética. O Quadro 2 apresenta os fatores que estão associados à erodibilidade dos materiais.

Quadro 2: Fatores que influenciam a erodibilidade dos materiais geológicos.

Propriedades	Fatores	Características
Mecânicas e antrópicas	Textura	<ul style="list-style-type: none"> • Influi no destacamento e carreamento de partículas do solo. • Determina a facilidade com que o solo é disperso. • Determina a força limite necessária para o destacamento.
	Estrutura	<ul style="list-style-type: none"> • Formação de agregados que resistem à dispersão, aos efeitos abrasivos da água de escoamento e ao destacamento. • Grau de agregação e distribuição de agregados estáveis. • Tamanho dos agregados.
	Tamanho dos torrões e cultivos do solo	<ul style="list-style-type: none"> • Superfície rugosa e cheia de torrões possui elevada capacidade de retenção. • Resistência à desagregação pela chuva e erosão pelo vento.
	Formação de crosta por cimentação	<ul style="list-style-type: none"> • Responsável pela alta taxa de escoamento superficial. • Desenvolve-se em solos com baixa porcentagem de matéria orgânica.
Resistência Mecânica	Resistência ao cisalhamento	<ul style="list-style-type: none"> • Importante no destacamento de partículas de solo (impacto e escoamento superficial) • Rolamento e deslizamento de grãos.
Hidrológicas	Retenção de água	<ul style="list-style-type: none"> • O estado de energia da água do solo ou pressão neutra influencia a resistência ao cisalhamento do solo. • Resistência do solo ao arrastamento pela água é influenciada pela umidade inicial ou antecedente. • Solos secos são mais susceptíveis à erosão pelo vento e pela água do que solos úmidos. • A umidade fornece coesão entre as partículas
	Transmissão de água no solo – infiltração	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de infiltração determina o maior ou menor volume de escoamento superficial.
	Permeabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Solos com permeabilidade extremamente baixa a moderada geram mais escoamento superficial.
Reológicas	Sistema solo/água	<ul style="list-style-type: none"> • A umidade do solo influi na susceptibilidade à erosão por afetar a coesão, a resistência ao cisalhamento, a consistência e a plasticidade.
Químicas e Mineralógicas	Matéria orgânica	<ul style="list-style-type: none"> • Influencia a distribuição granulométrica, propriedades de retenção e transmissão de água. • Fortalece as ligações que estabilizam as unidades estruturais e mantém um balanço favorável entre retenção e transmissão nos poros. • Diminui o efeito compactação. • Concentração de matéria orgânica nos micro-agregados aumenta a sua resistência à desagregação ("Slaking") e à dispersão.
	Argilo-minerais	<ul style="list-style-type: none"> • Elevadas concentrações de M.O. em alguns solos são responsáveis pelas características hidrofóbicas. • A estrutura do solo e a sua resistência são influenciadas pela quantidade e natureza dos argilo-minerais. • A fração fina do solo interage com a M. O. para formar agregados estáveis que resistem ao impacto das gotas da chuva.
Características do Perfil	Diretos e indiretos	<ul style="list-style-type: none"> • Influencia a erosão direta e indiretamente. • Influência sobre o escoamento subsuperficial de água em decorrência de mudanças nas propriedades hidrológicas de diferentes horizontes. • Influência sobre o crescimento vegetal.

Fonte: Adaptado de LAL (1990) por Nishiyama, (1998).

1.2. Tipos de Erosão

A erosão dos solos pode ser dividida em erosão laminar e erosão linear, as quais se desenvolvem de acordo com a forma que toma o escoamento nas vertentes. Escoamento difuso das águas de chuva causa erosão laminar ou em lençol, pois provocam a remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo. A concentração do escoamento das águas de chuva em linhas de fluxo provoca a erosão do tipo linear: formação de sulcos, pequenas incisões na superfície do terreno que podem evoluir, por aprofundamento, à ravinas ou voçorocas (SALOMÃO, 1999, p. 229).

A denominação dos tipos de feições erosivas lineares varia entre pesquisadores brasileiros. Alguns diferenciam sulcos, ravinas e voçorocas de acordo com suas dimensões (longitudinal e seção transversal) e forma da seção transversal, enquanto outros consideram o aparecimento ou não de água para diferenciar ravinas de voçorocas. A definição de sulcos normalmente é a mesma, variando somente o limite das dimensões da seção transversal. O surgimento dos sulcos normalmente se dá de forma distribuída, não ocorrendo grandes concentrações de água. O aumento da concentração de água em um sulco pode fazê-lo evoluir para ravinas ou voçorocas (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006). Sulcos são pequenos canais com até 10 cm de profundidade. Ravinas seriam canais entre 10 e 50 cm de profundidade. O limite máximo de 50 cm de profundidade está atrelado à estabilidade de talude, “pois mesmo para solos granulares a impregnação de matéria orgânica e a presença de raízes na camada superficial asseguram-lhe certa estabilidade até essa profundidade” (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006). Feições com profundidade acima daquela estabelecida para a ravina e sobre as quais passam a intervir a instabilização dos taludes associada ou não aos fenômenos de erosão interna ou de esqueletização, são chamadas voçorocas (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006).

A ampliação de sulcos pela erosão superficial forma vales fluviais, em forma de V, com vertentes inclinadas e fundo estreito. As boçorocas (ou voçorocas) são incisões que se instalam em vertentes sobre o manto intempérico, sedimentos ou rochas sedimentares pouco consolidadas. Podem ter profundidades de decímetros até vários metros e tem, normalmente, seção transversal em U com paredes abruptas e fundo plano. Essas feições podem atingir dimensões de até várias dezenas de metros de largura e profundidade, com várias centenas de metros de extensão (KARMANN, 2000).

Os sulcos ou ravinas são formados pela ação erosiva do escoamento superficial concentrado em linhas, enquanto as boçorocas são feições mais desenvolvidas, que tem influência da ação da água subterrânea (KARMANN, 2000; IWASA et al., 1998).

As ravinas, portanto, são feições lineares de dimensões maiores que os sulcos, podendo chegar à mesma ordem de grandeza das boçorocas, porém são causadas por uma grande concentração do escoamento superficial.

Definida a nomenclatura brasileira considerada neste trabalho, convém esclarecer os termos usados na literatura internacional para definir cada tipo de feição erosiva linear. Os termos encontrados são *rills*, que definem os sulcos, *ephemeral gullies* (que algumas vezes podem ser caracterizados como *ravines*, HIGGINS et al., 1990) e *gullies*, ou *permanent gullies (classical gullies)*, que podem ser comparadas às voçorocas, de acordo com a definição brasileira considerada acima.

Nos anos 1980, o termo *ephemeral gully erosion* foi introduzido para incluir um tipo de erosão com fluxo concentrado maior que *rill erosion*, mas menor que *classical gully erosion*. O termo surgiu como consequência da crescente preocupação com essa fonte de sedimento, até então desprezada na avaliação da erosão do solo (FOSTER, 1986).

O Quadro 3 apresenta uma explanação da diferença entre cada termo, que resume as definições de vários autores (FOSTER, 1986; POESEN et al., 2003; LAFLÉN et al., 1985).

As feições erosivas lineares, quando atingem dimensões de ravinas, removem porções significativas de solo produtivo, dividem a área de cultivo ou pastagem, com redução da eficiência de equipamentos agrícolas. As ravinas também reduzem a qualidade e o valor das áreas de cultivo (FOSTER, 1986).

Quadro 3: Características de diferentes tipos de processos erosivos.

Erosão em lençol e sulcos <i>(Sheet and rill erosion)</i>	Erosão em ravinas efêmeras <i>(Ephemeral Gully erosion)</i>	Erosão em voçorocas <i>(Gully erosion)</i>
Ocorre em áreas com declive suave acima das linhas de drenagem.	Ocorre ao longo da jusante de linhas de drenagem rasas a partir da incisão de canais ou ravinas.	Geralmente ocorre em linhas de drenagem bem definidas.
Pode ter qualquer dimensão, mas usualmente menor que canais de fluxo concentrado.	Pode ter qualquer dimensão, mas usualmente maior que sulcos e menor que ravinas permanentes.	Usualmente maior que canais de fluxo concentrado e sulcos.
Padrão de fluxo desenvolve diversos canais pequenos e paralelos desconectados, os quais terminam em canais de fluxo concentrado, canais em terraço ou em áreas de deposição.	Normalmente forma um padrão dentrítico ao longo de cursos d'água iniciando onde o fluxo superficial, incluindo sulcos, converge. Padrão de fluxo influenciado por lavoura, curvas de nível, terraplenagem, características antrópicas.	Padrão dentrítico ao longo de cursos naturais de água. Podem ocorrer em padrões não dentríticos em fossos de estrada, terraços ou canais diversos, etc.
Seções transversais de sulcos normalmente são estreitas em relação à profundidade.	Seções transversais normalmente são largas em relação à profundidade. Paredes laterais não são bem definidas. Cabeceiras não definidas; não se torna proeminente por causa da lavoura.	Seções transversais normalmente estreitas em relação à profundidade. Paredes laterais são íngremes. Cabeceiras proeminentes. Canal erodindo avança à jusante.
Sulcos regularmente removidos pela lavoura, normalmente não ocorrem novamente no mesmo lugar.	Características temporárias, normalmente removidas pela lavoura; ocorrem no mesmo lugar.	Não removidos pela lavoura.
Solo removido em finas camadas ou canais superficiais. Perfil de solo fica mais esbelto sobre o declive completo.	Solo removido ao longo do caminho estreito do fluxo, para profundidade atingida pela lavoura se a camada não atingida é resistente à erosão, ou mais profundo se a camada não atingida for menos resistente.	Solo pode erodir por toda a profundidade do perfil, e pode erodir em formações rochosas brandas.
Taxa de erosão baixa não visivelmente perceptível.	Área pode ou não ser visível erodindo.	Erosão visivelmente perceptível.
Destacamento e transporte por gotas de chuva e fluxo d'água.	Destacamento e transporte somente por fluxo d'água.	Destacamento por fluxo d'água, escorregamento de ribeiras instáveis e cabeceira retraída; transporte por fluxo d'água.

Fonte: Laflen et al. (1985)

1.3. Fenômenos Erosivos

O desenvolvimento da erosão inicia com o fenômeno chamado de *splash*, infiltração e formação de poças na superfície do solo. No início do escoamento superficial se dá o escoamento em lençol (*sheetflow*), seguido do fluxo linear (*flowline*), microsulcos (*micro-rills*), microsulcos com cabeceiras (*headcuts*), bifurcações através dos pontos de ruptura (*knickpoints*), ravinas e, finalmente, as voçorocas.

A identificação dos estágios de evolução dos sulcos é de importância fundamental, uma vez que o sulco é o ponto de partida do processo erosivo linear. Além disso, é só a partir do entendimento do início do processo que se pode tomar medidas no sentido de se evitar o estabelecimento do processo erosivo linear.

Principais mecanismos responsáveis pela erosão por ravinas e voçorocas:

- a) Deslocamento de partículas por impacto de gotas de chuva (*raindrop*) – *splash erosion*;
- b) Transporte de partículas de solo pelo escoamento superficial difuso: rugosidade do terreno => atrito ao escoamento superficial => turbulência no fluxo;
- c) Transporte de partículas por fluxos concentrados: converge para micro depressões do terreno formando sulcos, ravinas e voçorocas;
- d) Erosão por quedas d'água (*plunge pool erosion*): se origina a partir da água de escoamento superficial que desemboca no interior de incisões erosivas;
- e) Solapamento da base de taludes;
- f) Liquefação de materiais de solo;
- g) Movimentos de massa localizados;
- h) Arraste de partículas por percolação;
- i) Arraste de partículas por fluxos concentrados em túneis ou dutos.

1.4. Modelos de Erosão

A erosão dos solos é assunto de interesse da agricultura e do planejamento rural e urbano. Esse interesse tem estimulado estudos aprofundados sobre o assunto e, conseqüentemente, o desenvolvimento de modelos matemáticos e computacionais que buscam mapear a ocorrência de processos erosivos e identificar ou prever a quantidade de sedimento gerado por tais processos.

Na maioria dos casos os modelos são desenvolvidos para diversas finalidades ambientais, nas quais está incluído o assunto erosão. Assim, foram identificados, na atualidade, mais de 80 modelos que possuem processos erosivos em sua estrutura, seja como um módulo independente, seja como parte intrínseca do modelo. O estudo teve como ponto de partida 6 artigos que analisam aspectos variados de grupos de modelos. Dois desses artigos agrupam e analisam modelos de erosão e transporte de sedimentos (MERRITT et al., 2003; AKSOY e KAVVAS, 2005). Outros dois analisam a base matemática de modelos hidrológicos em escala de bacia (BORAH, 2003; SINGH et al., 2002), sendo que um deles avaliou também modelos de poluição de origem não pontual (BORAH, 2003).

Outro artigo analisou um grupo de modelos semi-quantitativos, de predição de erosão do solo e produção de sedimento, para escala de bacia (VENTE e POESEN, 2004).

Finalmente, um último artigo agrupa modelos matemáticos de evolução de *landform*, que consistem na representação dos processos, entre os quais se encontram os processos hidrológicos e de erosão (WILLGOOSE, 2005).

1.4.1. Tipos de Modelos

São destacadas dos modelos levantados sete categorias que incluem processos erosivos em sua estrutura: conceitual, fundamentado em processos, com base física, empírico ou de regressão, semi-quantitativo, de avaliação global de degradação do solo e de evolução de *landform*. Os modelos com base física podem, ainda, ser subdivididos em outras 3 categorias: com base em evento de chuva, com base em continuidade de chuva e espacialmente distribuído.

Merritt et al. (2003) identificaram 3 destas categorias: empírico ou estatístico/métrico, conceitual e com base física. Modelos empíricos são geralmente baseados na hipótese de sistema estacionário, ou seja, é assumido que condições subjacentes permanecem inalteradas durante o período de estudo. Esta hipótese limita o potencial para tais modelos serem aplicados à predição de efeitos de mudança da bacia (MERRITT et al., 2003). Em outras palavras, modelos empíricos são limitados às condições em que foram desenvolvidos (AKSOY e KAVVAS, 2005). As variáveis empregadas para definir um modelo empírico podem ou não ter um significado físico, o mesmo ocorrendo com a expressão matemática resultante que, frequentemente não tem nenhuma associação com as leis físicas que determinam o fenômeno considerado. No Quadro 4 estão relacionados os modelos empíricos

ou de regressão identificados até o momento e características como escala, se considera erosão linear e se é distribuído em células, de cada modelo. Dentre os modelos classificados como empíricos ou de regressão não foi identificado nenhum que considere dados de erosão por ravinas efêmeras ou permanentes (*ephemeral or permanent gullies*), nem mesmo processos deste tipo de feição erosiva.

Quadro 4: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos empíricos ou de regressão.

Modelo	Referência	Escala	Consideração de erosão linear	Distribuição em células
Empírico ou de Regressão				
USLE (RUSLE) (MUSLE)		encosta	Considera sulcos; não inclui gullies.	
SLEMSA (Soil Loss Estimation for Southern Africa)	http://ag.arizona.edu/OALS/malawi/Reports/RecommendationsErosion.pdf			
SEDD (Sediment Delivery Distributed)	http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JHYEFF00005000004000411000001&idtype=cvips&prog=normal			Dividido em unidades morfológicas de aspecto, comprimento e declividade claramente definidos

Os modelos conceituais tendem a fazer uma descrição geral dos processos da bacia, sem incluir detalhes específicos das interações dos processos. Tais interações podem requerer informações detalhadas da bacia (MERRIT et al., 2003). No Quadro 5 estão relacionados os modelos conceituais identificados até o momento e características como escala, se considera erosão linear e se é distribuído em células, de cada modelo. Dentre os modelos classificados como conceituais, os modelos AGNPS e SEDNET consideram dados de erosão por ravinas efêmeras ou permanentes (*ephemeral or permanent gullies*), enquanto o SWRRB menciona características dos canais como entrada de dados.

Quadro 5: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos conceituais.

Modelo	Referência	Escala	Consideração de erosão linear	Distribuição em células
Conceitual				
AGNPS (Agricultural NonPoint Source pollution)	GORDON (2007) http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5199	pequenas bacias	Inclui gully.	Distribui em células de 0,4 a 16 ha; considera transferência entre células.
EMSS (Environmental Management Support System)	http://www.tucson.ars.ag.gov/isco/isco13/PAPERS%20A-E/CARROLL%201.pdf	bacia	Não menciona.	Lumped
IQQM (Integrated Quality and Quantity Model)		bacia		
LASCAM (Large Scale Catchment Model)	http://www.clw.csiro.au/publications/technical2003/tr39-03.pdf	bacia	Não menciona.	Hidrológico: é dividido em sub-bacias, que somadas dão uma bacia.
SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (SWRRB-WQ)	http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2001/may-jun/art-8.pdf	bacia	Menciona características dos canais como entrada.	Divide a bacia em regiões relativamente homogêneas - considera dados de saída das sub-bacias p/ a saída da bacia.
SEDNET	WILKINSON (2004) http://www.toolkit.net.au/sednet	bacia (maior que 3.000 km ²)	Considera gullies.	A rede fluvial é dividida entre ligações de rios que representam um trecho reto entre 2 junções; reservatórios são representados como links na rede fluvial.
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	NEITSCH (2004) http://www.brc.tamus.edu/swat/	sub-bacia ou bacia	Não considera sulcos, ravinas, ou qualquer outro tipo de canal.	Distribui em sub-bacias, mas pode ser usado com distribuição em encostas ou em células.
MMF (Morgan, Morgan and Finney model)	http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/109924563/PDFSTART	bacia		

(continua)

(conclusão)

Modelo	Referência	Escala	Consideração de erosão linear	Distribuição em células
HSPF (Hydrological Simulation)	http://www.epa.gov/ceampubl/swater/hspf/ABSTRACT.TXT	bacia		É dividido em segmentos de terra hidrologicament e homogêneos.
HYDROLOG (Daily Conceptual Rainfall-Runoff Model)				
SIMHYD (Simplified Hydrology Model)	CHIEW (2005)		Modela somente chuva e escoamento superficial.	
ACTMO (Agricultural Transport Model)				

O modelo com base física considera soluções de equações físicas fundamentais. Tais processos estão relacionados às equações de conservação de massa e de momento, à capacidade de transporte do fluxo, à tensão de cisalhamento causada pelo fluxo e às tensões resistentes do solo.

Um modelo físico fundamentado em evento de chuva simula a produção de sedimento de um único evento de *rainfall-runoff* (AKSOY e KAVVAS, 2005). Enquanto um modelo contínuo simula a produção de sedimento de vários eventos consecutivos de *rainfall-runoff* ocorrendo durante uma estação ou período mais longo (AKSOY e KAVVAS, 2005).

No Quadro 6 estão relacionados os modelos com base física, identificados até o momento e características como escala, se considera erosão linear e se é distribuído em células, de cada modelo. Dentre os modelos classificados com base física, os modelos MEDRUSH, ANSWERS e CREAMS (GLEAMS) consideram dados de erosão por ravinas efêmeras ou permanentes (*ephemeral or permanent gullies*), enquanto o EGEM foi um modelo desenvolvido especificamente para quantificar geração de sedimento por esse tipo de feição.

Quadro 6: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos com base física.

Modelo	Referência	Escala	Consideração de erosão linear	Distribuição em células
Com Base Física				
GUEST	Yu <i>et al.</i> (1997)	escala pontual	Pode considerar ou não sulcos.	
PERFECT (diário)		escala de campo	O mesmo q o MUSLE: não inclui sulcos nem gullies.	
MIKE-11 (composto por vários módulos)	http://www.dhisoftware.com/mike11/Support/FAQs/FAQ_m11_about.htm#General	bacia	Ignora processo de erosão por gully.	Lumped rainfall-runoff
MEDRUSH	http://mwnta.nmw.ac.uk/GCTEFocus3/Publications/reports/Report6/erosmod/MEDRUSHmod.htm	bacia	Considera sulcos, gullies e ribeira.	
TOPIKAPI (Topographic Kinematic Approximation and Integration Model)				
SIRG (Surface Runoff, Infiltration, River Discharge and Groundwater Flow)				
Modular (Kinematic Model for Runoff Simulation)				
GBHM (Geomorphology-Based Hydrology Simulation Model)				
CONCEPTS (Conservational Channel Erosion and Pollutant Transport System)	http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5453			

(continua)

(continuação)

Com Base em Evento Físico

ANSWERS	http://www3.bae.ncsu.edu/Regional-Bulletins/Modeling-Bulletin/answers2k-draft0.html	pequenas bacias	Considera sulcos apenas para parâmetro de rugosidade (Manning); considera gullies.	Divide o terreno em células q são modeladas individualmente e somadas.
LISEM (baseado no EUROSEM)	Hessel <i>et al.</i> (2003)	pequenas bacias (0,01 km ² a 100 km ²)	Não considera sulcos nem gullies - o Aksoy diz q considera sulcos.	Distribuição espacial: células entre 2 e 20 m.
CREAMS (GLEAMS)		escala de campo (40-400 há)	Considera sulcos e gullies.	Os dados de saída são fornecidos para um catchment assumindo topografia e uso do solo uniformes **dados de saída de erosão e hidrologia são utilizados em outros modelos.
EUROSEM (composto por vários módulos)	MORGAN <i>et al.</i> (1998)	escala de campo ou pequenas bacias	Considera sulcos e canais; não considera ephemeral gullies	Usa uma simulação dinâmica e distribuída dos processos erosivos - como o KINEROS é composto por elementos de uma rede.
KINEROS	http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/	bacia	Não considera ephemeral gully; não separa explicitamente erosão por sulcos e inter-sulcos.	Composto por elementos de uma rede (planos, canais e lagos ou recipientes conectados aos demais).
WESP (Watershed Erosion Simulation Program)		pequenas bacias	Não considera sulcos. (Aksoy)	

(continua)

(continuação)

CASC2D-SED	http://www.usbr.gov/pmts/rivers/hmi/models/CASC2D.pdf	bacias (de 0.016 até 2300 km ²)	Não considera sulcos. (Aksoy)	2D: grades de superfície quadrada (desenvolvido p/ tamanhos de grade de 10 até 1000 m e utilizado normalmente com 30 até 125 m; 1D: canais.
ETC (Erosion des Torrents en Crue)	http://www.grenoble.cemagref.fr/etna/reultats/modeles_numeriques/etc.htm	pequenas bacias (maior que 50 ou 100 km ²)		Divide em unidades q podem ser sub- bacias ou canais.
EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model)	-		Somente gullies	
CM (Catchment Model)				
TVA (Tennessee Valley Authority)				
RORB (Runoff Routing Model)				
PSU-URM (Pennsylvania State University - Urban Runoff Model)				
TR-20 (Technical Report-20 Model)				
CLS (Constrained Linear Simulation)				
WBNM (Watershed Bounded Network Model)		bacia		
HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System)				

(continua)

(conclusão)

RUNOFF			Não considera sulcos. (Aksoy)	
--------	--	--	-------------------------------	--

Físico Contínuo

SEM	http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/redbooks/a167/167058.pdf	bacia	Não considera sulcos. (Aksoy)	A malha de erosão ou deposição é calculada como a diferença entre o sedimento carregado entrando e saindo de todos os blocos da grade na bacia; o SHE usa esquema de grade ou células.
SHESED		bacia	Sulcos não são considerados explicitamente no modelo; não considera gullies	
WEPP		encosta ou bacia	Considera canais permanentes, ephemeral gullies e sulcos.	
ARNO (Arno River model)				
IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model)				

Espacial Distribuído Fisicamente

TOPMODEL		bacia		
TOPOG	http://www.per.clw.csiro.au/topog/	encosta	Não inclui erosão por canais	Distribuído em células de 20 x 20 m
MEFIDIS (Modelo de Erosão Físico Distribuído)	NUNES (2007); NUNES (2005) http://gasa.dcea.fct.unl.pt/mefidis/	bacia de tamanho médio	Considera sulcos. Não simula explicitamente gullies, mas considera um índice para estimar a perda de solo por gullies.	Distribuído espacialmente em células de 5 x 5 m e temporalmente em espaços de 1 s.

Modelos semi-quantitativos são uma combinação de procedimentos descritivos e quantitativos para caracterizar uma bacia de drenagem e resulta em uma estimativa quantitativa ou, certas vezes, qualitativa de produção de sedimento em uma bacia. No Quadro 7 estão relacionados os modelos semi-quantitativos identificados até o momento e características como escala, se considera erosão linear e se é distribuído em células, de cada modelo. Dentre os modelos classificados como semi-quantitativos, os modelos PSIAC, FSM, VDS, GRAVILOVIC, CSSM e WSM consideram dados de erosão por ravinas efêmeras ou permanentes (*ephemeral or permanent gullies*).

Quadro 7: Relação dos modelos hidrológicos que podem incluir previsão de erosão linear e que constituem os modelos semi-quantitativos.

Modelo	Referência	Escala	Consideração de erosão linear	Distribuição em células
Semi-quantitativo				
PSIAC (Pacific Southwest Inter-Agency Committee)	GAVRILOVIC e outros	bacia (maior que 25 km ²)	Considera sulcos, gullies e ribeiras.	
FSM (Factorial Scoring Model)	GAVRILOVIC e outros		Considera sulcos, gullies e ribeiras.	
VSD (Vegetation–Surface material–Drainage density)	GAVRILOVIC e outros		Considera sulcos, gullies e ribeiras.	
GAVRILOVIC	http://www.sciencedirect.com/science?ob=ArticleURL&_udi=B6V62-4FR3NP5-1&_coverDate=06%2F30%2F2005&_ali_d=425903043&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_qd=1&_cdi=5802&_sort=d&view=c&_acct=C000049650&_version=1&_urlVersion=0&_userid=972067&md5=63abc3d6bd28b20273e0b41c2095cdf3#bib55		Considera sulcos, gullies e ribeiras.	
EHU (The Erosion Hazard Unit)	GAVRILOVIC e outros		Considera sulcos.	
CORINE (Coordination of Information on the Environment)	http://reports.eea.europa.eu/COR0-soil/en/soil_erosion.pdf		Considera sulcos.	
CSSM (Coleman and Scatena scoring model)	GAVRILOVIC e outros		Considera sulcos, gullies e ribeiras.	

(continua)

(conclusão)

FKSM (Fleming and Kadhimi scoring model)	GAVRILOVIC e outros		Considera sulcos.	
WSM (Wallingford Scoring Model)	GAVRILOVIC e outros		Considera sulcos, gullies e ribeiras.	

Avaliação Global de Degradação do Solo (*Global land degradation assessment*) é um conjunto de projetos que visa avaliar o solo de um modo geral, ao invés de simplesmente estimar a perda de solo, e operam em escala nacional ou mesmo global. Tem conceitos comparáveis aos modelos semi-quantitativos, porém abrangem muito mais que erosão, transporte e produção de sedimentos.

Os modernos modelos de evolução de *landform* (LEM) são espacialmente distribuídos e envolvem os processos de encostas, canais e tectônicas.

Dentre os modelos classificados como de Avaliação Global de Degradação do Solo ou de evolução de *landform* (LEM) não foi identificado nenhum que considere dados de erosão por ravinas efêmeras ou permanentes (*ephemeral or permanent gullies*), nem mesmo processos deste tipo de feição erosiva.

A distinção entre os modelos não é exata e pode ser subjetiva. Existem modelos compostos por vários módulos e, portanto, podem conter uma mistura de módulos cada um com uma dessas categorias. Um modelo pode ser, por exemplo, conceitual em sua estrutura, mas possuir processos descritos por algoritmos empíricos e/ou com base física.

1.4.2. Processos Erosivos Considerados nos Modelos

Os modelos levantados consideram processos hidrológicos (de precipitação e de escoamento) e processos erosivos (de destacamento e transporte de sedimento) com a finalidade de mensurar a quantidade de solo perdido, ou de prever essa quantidade. Estudos qualitativos da água (nutrientes e poluentes, principalmente) fazem parte de muitos dos modelos levantados.

Os modelos de previsão de erosão consideram a perda de solo por erosão laminar devido ao fluxo difuso, e por erosão linear nas formas de sulcos (*rills*), voçorocas (*gullies*) e

canais. Dentre os modelos levantados são poucos os que utilizam processos de sulcos (*rills*) (GUEST, MEDRUSH, ANSWERS, LISEM, CREAMS, EUROSEM, WEPP, MEFIDIS, PSIAC, FSM, VSD, GAVRILOVIC, EHU, CORINE, CSSM, FKSM e WSM) e menor ainda o número daqueles que utilizam processos ou efeitos de voçorocas (*gullies*) (AGNPS, SEDNET, MEDRUSH, ANSWERS e GLEAMS) para distinguir a quantidade de sedimento perdido. Isso se deve aos objetivos para os quais os modelos foram desenvolvidos e à complexidade no estudo e levantamento de dados de tais processos. Algumas características desses modelos são apresentadas nos Quadro 8 e Quadro 9, como os dados requeridos para alimentar o modelo (*input*), os dados fornecidos por ele (*output*) e os principais processos considerados por cada um. No Quadro 8 estão relacionados os modelos conceituais, enquanto no Quadro 9 estão os modelos com base física.

Na maioria dos modelos semi-quantitativos, porém, essa distinção da origem do sedimento produzido aparece com maior frequência. Todos distinguem o sedimento gerado por processos de sulcos (*rills*) e a maioria distingue a geração de sedimentos também por voçorocas (*gullies*) (PSIAC, FSM, VDS, GAVRILOVIC, CSSM, e WSM). É possível que esse fato se deva às características mais abrangentes e qualitativas dessa categoria de modelos.

No levantamento foi identificado um modelo desenvolvido para quantificar especificamente a geração de sedimentos por processos de *gully*, o EGEM (*Ephemeral Gully Erosion Model*). O modelo se propõe a prever a perda de solo por *ephemeral gully* e considera evento ou média anual de chuva. Tais dados são obtidos a partir de *gullies* existentes na área avaliada. O EGEM baseia-se nos mesmos parâmetros de outros modelos que consideram processos de *gully* na quantificação de sedimentos, como área de drenagem, comprimento e declividades da bacia, comprimento do fluxo concentrado, classificação do solo, fator de erodibilidade do canal, tensão de cisalhamento crítica, dados geométricos da feição, número de *Manning*, tipo de distribuição de chuva e práticas de cultivo. Alguns programas ambientais ou modelos que consideram a perda de solo por *gully* utilizam o EGEM para essa quantificação (ex. MEDALUS).

Modelos matemáticos de evolução de *landform* (SIBERIA, ARMOUR, DELIM, GOLEM, CHILD, CASCADE, ZSCAPE e CASEAR) envolvem processos erosivos de longo prazo, ou larga escala de tempo.

Quadro 8: Dados de entrada (*Input*), de saída (*output*) e processos constantes em modelos conceituais, que consideram erosão linear por gullies.

Modelo	Input	Output	Processos
Conceitual			
AGNPS (Agricultural NonPoint Source pollution)	<ul style="list-style-type: none"> - parâmetros de topografia; - parâmetros da morfologia; - precipitação; - fator de erodibilidade; - indicador de canal existente (dados da <i>gully</i> existente) para cada célula. 	<ul style="list-style-type: none"> - sedimento produzido; - qualidade do sedimento (análise química); - intensidade da chuva; - volume e pico de escoamento superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> - empírico + base física; - RUSLE p/ prever perda de solo; - escoamento superficial e processos de sedimento distribuídos em células; - utiliza método numérico de curva da SCS (Soil Conservation Service); - prever e analisar a qualidade da água do escoamento superficial.
SEDNET	<ul style="list-style-type: none"> - modelo de encosta: malha de precipitação média anual; erodibilidade do solo; fatores de administração da colheita; comprimento de declive e declividade e práticas de gerenciamento; - modelo de <i>gully</i>: uma malha de densidade de <i>gully</i> e uma descrição das características médias para cada ligação; - <i>in-stream</i> e transporte de sedimento: descrição de sedimentos <i>in situ</i>, vegetação e dimensões de borda de rio. 	<ul style="list-style-type: none"> - fornece dados espaciais amostrais de arraste (<i>entrainment</i>) de sedimento, carga de sedimento <i>in-stream</i> e deposição. 	<ul style="list-style-type: none"> - estima geração de sedimentos vindos de encostas, <i>gullies</i> e borda de rio em uma rede fluvial; - usa modelos simples conceituais e empíricos de destacamento de sedimentos, transporte e deposição p/ descrever cargas de sedimento em longo prazo em trechos retos individuais de rio; - capacidade de transporte de sedimento emitido; - emissão de ribeira completa (bankfull); - média de fluxo de ribeira (overbank streamflow) usado para modelar deposição por enchentes; - toda ligação de rios é conectada para uma bacia que contribui com a geração de sedimentos vindos da encosta ou de <i>gullies</i>; - o transporte e deposição de sedimentos de carga de leito e de suspensos são calculados separadamente.
MMF (Morgan, Morgan and Finney model)	<ul style="list-style-type: none"> - solo: destacamento; conteúdo de umidade para capacidade de campo da camada superficial de solo; massa específica dos sólidos (bulk density); profundidade de enraizamento; - chuva: precipitação anual; intensidade de chuva e número de dias chuvosos; - cobertura do solo: tipos de cultivo, floresta, pasto e práticas de manejo; - topografia: gradiente de declive. 		<ul style="list-style-type: none"> - geração de sedimentos; - considera eventos de chuva (intensidade).

Quadro 9: Dados de entrada (*Input*), de saída (*output*) e processos constantes em modelos com base física, que consideram erosão linear por gullies.

Modelo	Input	Output	Processos
Com Base Física			
GUEST	<ul style="list-style-type: none"> - escoamento ou precipitação: pico ou quantidade; - perda de solo; - características do local: comprimento, altura e declividade; - características da camada de solo que pode sofrer erosão. 	<ul style="list-style-type: none"> - concentração de sedimento no transporte limite; - pode determinar um parâmetro de erodibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - erosão, transporte e deposição de sedimentos; - equações com base física descrevem fluxo estacionário de sedimentos; - específico com a dinâmica de sedimentos de superfície; - evento único de chuva; - erosão: processos devido ao impacto da chuva e processos devido à superação da tensão de cisalhamento do solo por fluxo superficial; - tensão de cisalhamento e velocidade do fluxo são consideradas para estimar o poder do caudal.
MEDRUSH	<ul style="list-style-type: none"> - hidrológico: curva de infiltração; - topografia (DEM), - uso do solo, - litologia, - tipo do solo; - rugosidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - escoamento, umidade do perfil de solo, transporte de sedimento e rede de erosão/deposição para sub-bacias (de 1 a 20 km²), integrados a intervalos de tempo selecionado anteriormente; - vegetação e massa de solo orgânico, rugosidade da superfície e características de placa com o passar do tempo; - generalizado dentro das sub-bacias. 	<ul style="list-style-type: none"> - erosão: em lençol, sulcos, <i>gullies</i> e ribeira; - hidrológico: evapotranspiração, escoamento superficial, infiltração e fluxo de subsuperfície (vem do TOPOG).
Com Base em Evento Físico			
ANSWERS	<ul style="list-style-type: none"> - topografia; - morfologia; - uso do solo; - descrição de canal existente (dados da <i>gully</i> existente) para cada célula; - infiltração: capacidade de armazenagem e relação com umidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - perda de solo por erosão; - escoamento superficial; - nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> - divide a bacia em pequenos elementos; - Hidrológico é Conceitual; - Erosão: base física: processo de erosão e transporte de sedimentos equação da continuidade; - mais componentes empíricos: processo de escoamento; - considera rugosidade, intensidade chuva na capacidade de infiltração do solo, topografia;

(continua)

(continuação)

Modelo	Input	Output	Processos
ANSWERS (continuação)			<ul style="list-style-type: none"> - condições de superfície e altura de escoamento superficial, elementos considerados uniformes; - chuva e escoamento superficial destacam partículas, mas só escoamento transporta.
LISEM (baseado no EUROSEM)	<ul style="list-style-type: none"> - Aproximadamente 25 mapas de GIS: descrição da morfologia, índice de área de laminar (leaf), rugosidade aleatória de solo e a fração do solo com cobertura cultivada; - dados de precipitação a partir de múltiplas precipitações; - incorpora variabilidade espacial e temporal de precipitação. 	<ul style="list-style-type: none"> - inclui totais para variáveis como o escoamento, sedimentos, infiltração e depressões de armazenamento da superfície; - mapas mostrando a distribuição de fatores como erosão e deposição, e mapas de fluxo superficial para desejado intervalo de tempo durante a simulação; - pode produzir hidrográficos e gráficos de sedimentos para uma simulação de evento de chuva; - mapas de distribuição de intensidade de precipitação. 	<ul style="list-style-type: none"> - equação com base física de processos de água e produção de sedimentos; - SWATRE é usado para simular o movimento vertical da água no solo; - o modelo adiciona processos q descrevem fluxo de superfície, fluxo de canal, precipitação, interceptação, armazenamento superficial em micro-depressões e infiltração; - simula o destacamento por fluxo de áreas alagadas (algo entre erosão laminar e área de sulcos); - capacidade de transporte do fluxo: processos descrevendo destacamento por precipitação, fluxo superficial e throughfall.
CREAMS (GLEAMS)	<ul style="list-style-type: none"> - série de precipitação; - temperatura do ar e radiação solar mensais; - tipo de solo; - ocupação do solo (tipo de cultivo). 	<ul style="list-style-type: none"> - prevê erosão, deposição e transporte de sedimentos em um perfil da inclinação e em primeira e segunda ordem de canais; - volume e pico de fluxo; - infiltração e capacidade de armazenagem; - produção de sedimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Empírico: escoamento (principalmente) e aspectos de erosão; - base física: transporte e deposição de sedimentos (usa a equação da continuidade de sistema estacionário); - do MUSLE: destacamento de partículas para áreas de sulcos e entre sulcos; - eventos de chuva ou chuva contínua.
EUROSEM (composto por vários módulos)	<ul style="list-style-type: none"> - propriedades mecânicas e hidráulicas do solo; - precipitação; - vegetação; - topografia; - microtopografia. 	<ul style="list-style-type: none"> - concentração de sedimento; - escoamento superficial - interceptação; - rede de precipitação drenagem laminar; fluxo de caudal; 	<ul style="list-style-type: none"> - destacamento do solo por impacto das gotas de chuva depende da energia cinética da precipitação; - a erosão por <i>splash</i> ocorre antes que o escoamento comece e a concentração de sedimentos inicial pode ser considerada como diferente de zero; - considera 3 casos de eventos: sem sulcos, entre sulcos e encosta com grande densidade de sulcos;

(continua)

(continuação)

EUROSEM (composto por vários módulos)			<ul style="list-style-type: none">- erosão em canais é tratada de forma similar à de sulcos, mas considera somente o fluxo lateral de sedimentos, não por gotas de chuva e o colapso de paredes laterais não é simulado;- em aplicação do modelo os parâmetros hidrológicos, de destacamento e de coesão mostraram-se importantes, mas parâmetros de vegetação tiveram efeitos insignificantes. A aplicação do modelo foi no mesmo local q dos modelos LISEM e EROSION 2D/3D;- capacidade de transporte de fluxo.
KINEROS	<ul style="list-style-type: none">- descrição de cada elemento da rede;- precipitação;- parâmetros de evento de chuva;- temperatura.	<ul style="list-style-type: none">- transporte de sedimento;- sumário de balanço hídrico para cada elemento.	<ul style="list-style-type: none">- componente de sedimentos baseados na equação da continuidade unidimensional (equação cinemática unidimensional);- erosão/deposição estimada é a combinação de erosão por impacto das gotas de chuva e erosão/deposição hidráulica (escoamento) estimada;- a estimativa da erosão por impacto das gotas de chuva é obtida por uma equação empírica na qual a estimativa é proporcional à segunda potência da chuva;- a estimativa de erosão por escoamento é proporcional à deficiência na capacidade de transporte, como é a diferença entre a concentração de sedimento corrente no fluxo e a máxima concentração estacionária;- erosão hidráulica pode ser positiva ou negativa, dependendo da capacidade de transporte local;- erosão por canais é considerada da mesma forma que planalto exceto pela omissão da erosão por impacto das gotas de chuva.
EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model)	<ul style="list-style-type: none">- área de drenagem;- comprimento e declividades da bacia;- comprimento do fluxo concentrado;- número de curva;	<ul style="list-style-type: none">- volume de perda de solo de <i>ephemeral gullies</i>.	<ul style="list-style-type: none">- base em evento ou média anual de precipitação;- prevê perda de solo por <i>ephemeral gully</i>.

(continua)

(conclusão)

EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model)	<ul style="list-style-type: none">- classificação do solo;- fator de erodibilidade do canal;- tensão de cisalhamento crítica;- máxima espessura da <i>gully</i>;- n° de Manning;- tipo de distribuição de chuva;- quantidade de precipitação em 24 h;- práticas de cultivo.		
--	--	--	--

Físico Contínuo

WEPP	<ul style="list-style-type: none">- dados sobre cobertura vegetal (características e práticas de uso) para avaliar seu impacto nos processos de erosão do solo e hidrológicos;- hidrológico: forças cortantes exercidas pelo escoamento e dados do escoamento (volume, rugosidade hidráulica e aproximações da duração e pico);- erosão (solos): práticas de manejo, tempo (clima), precipitação nas variáveis do solo e superfície (rugosidade aleatória, densidade geral, condutividade hidráulica saturada e fator de erodibilidade em área de sulcos e entre-sulcos);- descrição da bacia;- canais: topografia, solo, controle e características hidráulicas.	<ul style="list-style-type: none">- estimativa de distribuição espacial e temporal de perda de solo;- produção e características de sedimentos;- volume de escoamento;- balanço hídrico do solo;- considera deposição de sedimentos e é aplicado desde o topo da encosta para um canal;- escoamento e erosão sumária em evento por evento, do mês, do ano e média anual básica.	<ul style="list-style-type: none">- erosão: processos resultantes de forças e energias desenvolvidas em processos hidrológicos: clima, infiltração, componente de inverno q conta para acumulação e fundição da neve;- na encosta o estado da água do solo é atualizado diariamente e solicitado a obter infiltração e volume de escoamento;- as forças conduzindo no destacamento pelo fluxo de água em sulcos e canais;- balanço hídrico: clima, crescimento de plantas e infiltração para estimativa diária da evapotranspiração potencial e evaporação do solo e das plantas;- pico de escoamento: rotina de onda cinética de fluxo superficial ou equação de regressão simplificada;- erosão: destacamento, transporte e deposição;- conceito de áreas de sulcos e intersulcos de descrição do destacamento do sedimento (eq. de Foster);- equação da continuidade para destacamento e deposição de sedimentos em canais permanentes e <i>ephemeral gullies</i>.
------	---	--	--

1.4.3. Modelos com base física

A maior parte dos modelos de erosão mais conhecidos foi desenvolvida com base física, apesar da primeira tentativa de modelo de erosão ter sido um modelo empírico, o modelo USLE (*Universal Soil Loss Erosion*) e de muitos outros terem sido desenvolvidos a partir deste (AKSOY e KAVVAS, 2005).

Modelos com base física são os que melhor se adaptam ao problema de predição de erosão. Um modelo com base física é também indicado para o planejador que pode utilizá-lo, por exemplo, para auxiliar na identificação das partes do sistema mais importantes para o processo erosivo global, para que possa atentar à pesquisa e desenvolvimento da previsão de erosão e seu controle tecnológico. O planejador de conservação do solo pode usar um modelo com base física como instrumento de projeto de conservação interativo, objetivando definir estações críticas ou meses, nos quais a ocorrência de eventos erosivos é maior, bem como posições críticas nas encostas onde pode ocorrer grande perda de solo (NEARING et al. 1994).

Apesar de todas as indicações de utilização de modelo com base física para predição de erosão, a viabilidade de transpor pequena escala física para a escala da grade espacial usada em muitos modelos físicos é questionável. As equações que regem os processos erosivos em modelos com base física são desenvolvidas para pequenas escalas e condições físicas específicas. Na prática, porém, essas equações são comumente aplicadas em escalas maiores e diferentes condições físicas. Os dados que normalmente alimentam tais modelos são originados de fonte pontual e utilizados para representar uma parcela inteira em uma bacia. As equações são aplicadas com dados espaciais e temporais contínuos (BEVEN, 1989).

A extrapolação de dados também é um dos problemas apresentados por Lal (1994) na coleta de dados quando se estuda a erosão. “Processos erosivos têm escala dependente. É difícil extrapolar dados medidos numa escala pontual (*plot-scale*) para uma microbacia. Extrapolações de dados limitados em bacias podem conduzir a erros grosseiros” (LAL, 1994, p. 4).

Como um caminho para solucionar o problema, Merritt et al. (2003) sugerem que “a acumulação de erros poderá ser controlada em modelos com a transferência de fluxos de saída de dados de um elemento espacial para o seguinte, como entrada” (MERRITT et al., 2003, p. 769).

De fato, alguns dos modelos levantados dividem a área analisada em elementos da bacia (LASCAM, SWRRB, SEDNET, HSPF, EUROSEM, ETC, SEDD e KINEROS). A

divisão pode ser em elementos como sub-bacias, planos, canais e lagos ou recipientes conectados aos demais. Outros modelos dividem a bacia em células (MEFIDIS, AGNPS, ANSWERS, LISEM, CASC2D-SED, SEM, SHE e TOPOG), que podem ser de tamanhos iguais ou irregulares.

O modelo de erosão MEFIDIS (Modelo de Erosão Físico e DIStribuído) (NUNES et al., 2005), por exemplo, divide a área simulada em células quadradas, de 5 x 5 metros, formando uma matriz ortogonal, suposta para representar áreas homogêneas. A geração de escoamento superficial e destacamento de solo são calculados para todas as células. O fluxo de superfície e os sedimentos em suspensão resultantes são encaminhados entre células que seguem a inclinação mais íngreme (NUNES et al., 2005, p. 213). As equações do modelo são resolvidas também em etapas discretas e sucessivas de tempo para assegurar a dinâmica temporal. As equações utilizadas no modelo são aplicadas para cada célula considerando seus elementos acrescidos dos elementos advindos das células circundantes.

Outro exemplo é o modelo ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Response Simulation*) que divide a bacia em unidades não regulares, ou, pequenos e independentes elementos. Dentro de cada elemento os processos de escoamento e erosão são tratados como independentes funções de parâmetros hidrológicos e erosivos desse elemento (AKSOY e KAVVAS, 2005, p. 254). Porém, esse modelo considera as condições de superfície e a altura da lâmina de escoamento superficial uniformes em todos os elementos.

1.5. Parâmetros de Entrada dos Modelos

Os parâmetros comumente necessários para alimentar os modelos de erosão são obtidos por meio de ensaios de campo e de laboratório, sistemas de medidas em campo, cartas topográficas e geológicas, interpretação de fotos aéreas e por observações no campo.

A maioria dos ensaios de campo e de laboratório é corriqueira em estudos geotécnicos e, portanto, de domínio comum desta comunidade, como aqueles que determinam os índices físicos, por exemplo. Alguns dos dados requeridos, porém, advêm de ensaios específicos para determinados fins, como o ensaio com simulador de chuva ou o ensaio de resistência do solo à penetração, ou ainda o ensaio de infiltração com duplo anel.

Do ensaio com simulador de chuvas é possível se extrair dados de geração de sedimentos, infiltração, momento de início de formação de poças (*pouding*), escoamento superficial (*runoff*) e momento de início de formação de sulcos, todos em função de chuvas

controladas. O ensaio de resistência do solo à penetração, por sua vez, é uma adaptação de um ensaio utilizado para diversos fins, como para fundações, perfuração de poços, etc., tendo como principal variante a escala dos perfis de resistência definidos. O ensaio de infiltração com duplo anel tem função específica, sendo menos utilizado. Assim, serão discutidos adiante somente esses ensaios específicos e comentados os demais parâmetros requeridos pelos modelos existentes.

1.5.1. Forma de Entrada de Dados

De maneira geral existem duas formas principais de entrada de dados nos modelos analisados: digitação dos atributos por meio de fichas que constituem um banco de dados, ou extração dos dados a partir de arquivos dos tipos *raster*, ou do sistema *CAD*. Nesse tipo de arquivo encontram-se as cartas topográficas, cartas de declividade, de materiais geológicos, de materiais inconsolidados, de uso do solo e quaisquer outros atributos que se queira.

1.5.2. Escala

Nos modelos existentes a área considerada varia desde uma única encosta até grandes bacias incluindo várias sub-bacias. A escala adotada varia de acordo com a área considerada e com o nível de detalhamento exigido por cada modelo. Modelos distribuídos em células, por exemplo, requerem escalas maiores.

A determinação da escala de trabalho em função de cada estudo específico é imprescindível para a definição do modelo a ser desenvolvido para os objetivos pré-definidos.

1.5.3. Pluviometria

Quase todos os modelos de previsão de erosão utilizam somente a quantidade de chuva como parâmetro de entrada, sem se preocupar com a intensidade. Isso porque o objetivo principal dos modelos de erosão existentes é a geração de sedimentos numa escala de tempo mensal ou, normalmente, anual (MERRITT et al., 2003; AKSOY e KAVVAS, 2005).

No caso de um modelo de previsão de ocorrência de erosão linear, porém, a intensidade de chuva torna-se um parâmetro indispensável.

Os dados de chuva podem ser medidos por pluviômetros ou pluviógrafos. Os pluviômetros medem a quantidade de chuva para determinada área e determinado tempo. Já os pluviógrafos fornecem quantidades e intensidades das chuvas, pois registram automaticamente a quantidade, duração e intensidade das chuvas. Existem os pluviógrafos que fornecem os dados em forma de gráficos, construídos durante as ocorrências das chuvas, e aqueles que armazenam os dados que são transportados para um computador, para serem trabalhados mais tarde.

1.5.4. Relevo

1.5.4.1. Declividade

O sentido e o valor da declividade estão diretamente ligados ao escoamento superficial e, portanto, à definição da formação de fluxo contínuo, daí a importância desse atributo no processo erosivo linear. A quantificação desse atributo pode ser por meio de levantamento local, quando se deseja um nível de detalhamento maior, ou por meio de modelo digital do terreno (MDT), gerado a partir de cartas topográficas. A declividade do terreno tem influência direta na capacidade de armazenamento de água da superfície (*maximum depressional storage* – MDS). A entrada desse atributo nos modelos pode ser direta, quando obtidas por uma das formas descritas, ou indireta, quando incluso nos índices de rugosidade.

1.5.4.2. Rugosidade e Capacidade de Armazenamento de Água da Superfície

A rugosidade que interessa ao estudo dos processos erosivos é a rugosidade micro, de detalhe, uma vez que sua influência está na micro-forma do relevo, a qual proporciona cavidades em que a água da chuva que não infiltra se acumula na superfície até exceder a capacidade de armazenamento e provocar o escoamento superficial. Nos modelos de escoamento superficial, por exemplo, o parâmetro de entrada que representa a máxima capacidade de armazenamento de água da superfície (*maximum depressional storage* – MDS) é a rugosidade, a qual é definida por um índice e normalmente expressa em milímetros.

O índice de rugosidade é obtido de diversas maneiras em modelos de escoamento superficial e outros. Kamphorst et al. (2000b) investigaram a habilidade que alguns desses índices possui de descrever a máxima capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS). Seis índices foram avaliados: a) Rugosidade randômica (*Random Roughness* – RR); b) Tortuosidade (T); c) Diferença de elevação limite (*Limiting Elevation Difference* – LD) e de declividade limite (*Limiting Slope* – LS); d) Depressão de declive esperado (*Mean Upslope Depressional* – MUD); e) Fractais; f) Micro-relevo e frequência de pico (*Microrelief Index and Peak Frequency* – MIF). Numa análise preliminar os autores selecionaram 4 dos 6 índices investigados. Os índices eliminados da análise foram o índice fractal e o MIF, pois concluíram que embora um índice fractal seja um indicador de resposta da rugosidade morfológica para chuva, não pode ser usado para quantificar MDS e que o índice de micro-relevo e frequência de pico (MIF) na prática não é um parâmetro útil.

Kamphorst et al. (2000b) relacionaram, portanto, os 4 primeiros índices citados com modelos de previsão de capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS) desenvolvidos em função de cada um deles (Tabela 1).

Tabela 1: Modelos de Previsão de Capacidade Máxima de Armazenamento de Água na Superfície (*Maximum Depressional Storage* – MDS).

Item	Modelo	Referência
1	$MDS = 0,112RR + 0,031RR^2 - 0,012RR * S$	ONSTAD (1984)
2	$MDS = \exp[-6,66 + 0,27(T_A)]$	MORGAN et al. (1998)
3	$MDS = 0,382\sqrt{LD * LS} + 0,017\sqrt{LD * LS} * S - 0,077$	LINDEN et al. (1988)
4	$MDS = 0,480MDU$	HANSEN et al. (1999)

Fonte: KAMPHORST et al. (2000)

Comparando valores observados de MDS com valores previstos por cada um dos quatro modelos (Figura 2) os autores concluíram que o modelo de Hansen et al. (1999) possui uma forma linear apropriada e descreve todos os dados. Dos quatro modelos, o de Hansen et al. (1999) claramente foi o que mais apresentou concordância dos dados, mas os autores sugerem que o de Onstad (1984) poderia funcionar ao menos como boa estimativa desse parâmetro.

O modelo de Onstad (1984) buscou determinar uma equação simplificada relacionando a capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS) com a Rugosidade randômica (RR) e com a declividade do terreno (S). A equação (Tabela 1) foi gerada a partir de mais de 1000 micro-relevos levantados e apresentou 82% de variação nos dados (ONSTAD, 1984). O índice RR foi determinado usando o método desenvolvido por Allmaras et al. (1966), o qual define a rugosidade randômica como o desvio padrão entre as alturas do micro-relevo. A rugosidade randômica descreve somente a distribuição das alturas, ou seja, a componente vertical da rugosidade e não leva em conta a componente espacial. Duas superfícies com mesmo RR podem ter morfologias e MDS totalmente diferentes (HUANG and BRADFORD, 1992).

Figura 2: Avaliação de modelo de previsão de capacidade máxima de armazenamento de água no solo (MDS).
d = espaçamento da amostra
RMSE = erro da raiz quadrada média (root mean square error)
Fonte: KAMPHORST et al. (2000)

Índices como o RR são puramente estatísticos, enquanto o modelo de Hansen et al. (1999) foi desenvolvido com base física. O modelo foi comparado com modelos que utilizam o índice RR e com o modelo de Linden and Van Doren (1986 e 1988) para 32 locais. O índice MUD pode ser calculado para 2 direções, longitudinal e transversal à direção de maior

declive. Os resultados de cálculo para a direção longitudinal mostraram uma eficiência de 80% na variação do MDS. Quando considerados no cálculo dados de ambas as direções, a variação do MDS chegou a 86%. Um diferencial do índice MUD para índices como o RR para a estimativa do MDS, enquanto índices como o RR fornecem leituras de altura somente na longitudinal à direção de maior declive, o índice MUD fornece dados em ambas as direções. Variações das distâncias entre os pontos da malha não puderam ser testadas, mas os valores de MUD calculados parecem quase independentes dessa distância, desde que não excedam uma dependente máxima na rugosidade da superfície e na declividade do terreno (HANSEN et al., 1999).

O micro-relevo é definido na prática medindo-se as elevações de superfícies determinadas, distribuídas em células, numa malha. Nos modelos, normalmente as medidas são consideradas como o centro de cada célula. Onstad (1984), por exemplo, considerou 8 interligações entre as células, 4 lados mais 4 arestas. Seja no campo ou em laboratório, o levantamento das elevações tem sido feito com equipamentos que fazem as medidas utilizando feixes de laser (JESTER and KLIK, 2005; BERTOLANI et al., 2000), pinos (ALLMARAS et al., 1966; BURWELL et al., 1963; MOORE and LARSON, 1979; JESTER and KLIK, 2005; BERTOL, 2007; BERTOLANI et al., 2000), rolos sucessivos (JESTER and KLIK, 2005; SALEH, 1993), ou fotogrametria (JESTER and KLIK, 2005).

A maioria dos modelos de erosão considera, porém, o índice de rugosidade randômica (RR) e o número de Manning como parâmetro de entrada para definir a capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS).

1.5.5. Infiltração da Água no Solo e Escoamento Superficial

O volume de água de uma chuva pode infiltrar todo no solo, ou, infiltrar uma parcela e gerar escoamento superficial com outra parcela. Isso depende da intensidade da chuva e da capacidade de infiltração do solo. A geração de escoamento superficial (*runoff*) depende também da capacidade de armazenamento de água na superfície, definida pela rugosidade do terreno. O escoamento superficial pode formar um fluxo difuso ou contínuo.

É possível medir-se a taxa de infiltração do solo por meio de ensaios variados, como o ensaio com duplo anel ou durante o ensaio com simulador de chuvas (ver item 1.5.9.2). Neste

caso a taxa é obtida simplesmente subtraindo-se o escoamento superficial (medido por vazão) da precipitação em uma determinada área, durante um período de tempo.

O escoamento, por sua vez, é medido como uma taxa de vazão, ou seja, dividindo-se um volume de água escoado de uma área determinada por um intervalo de tempo de coleta desse volume. Essa medida é transformada em altura de lâmina d'água, dado de entrada comumente utilizado nos modelos.

1.5.6. Tensão de Cisalhamento do Fluxo

Modelos de erosão linear que utilizam princípios físicos consideram que o destacamento das partículas acontece quando a tensão de cisalhamento do fluxo supera a tensão crítica do solo.

A tensão de cisalhamento do fluxo está diretamente ligada à densidade (ρ), velocidade (μ) e também ao poder do fluxo (Ω). A velocidade do fluxo, por sua vez, está ligada à quantidade e intensidade de chuva, à taxa de infiltração do solo e à rugosidade e declividade da superfície. Valores de velocidade do fluxo podem ser obtidos a partir de chuvas naturais ou de ensaios com simulador de chuva.

1.5.7. Relação entre Tensão Crítica de Cisalhamento do Solo e a Resistência do Solo à Penetração

No estudo de erosão interessa a tensão de cisalhamento nas camadas mais superficiais do solo, em uma ordem de grandeza que varia de alguns centímetros a poucos metros. Em modelos de erosão laminar a profundidade de atuação dos processos considerados é de poucos centímetros da superfície. Quando se trata de erosão linear, os processos considerados podem ocorrer desde poucos centímetros da superfície até profundidades maiores, com dezenas de metros. O início da incisão de uma feição linear (sulco), porém, ocorre também nas camadas superficiais, de poucos centímetros e a estabilização de uma feição linear maior (ravinas e voçorocas) em desenvolvimento é definida em poucos metros.

A tensão crítica de cisalhamento do solo é comumente obtida por ensaios realizados em laboratório, com amostras indeformadas. Os ensaios mais utilizados são o de

Cisalhamento Direto (ASTM D3080) e o Triaxial (ASTM D2850). Os dados gerados por esses ensaios são o ângulo de atrito, a coesão e, consequentemente, a tensão de cisalhamento.

Devido à dificuldade de obtenção de amostras indeformadas e ao tempo despendido com qualquer um dos ensaios mencionados, a distribuição da amostragem no campo e em perfil, costuma ser de pequena quantidade e representar profundidades também pequenas.

Como alternativa aos ensaios de laboratório, dois tipos de ensaio *in situ* são usados para determinação indireta da tensão de cisalhamento do solo. No Brasil os ensaios mais empregados são o de Palheta (Vane Test), e os de penetração, estática (Cone Penetration Test – CPT) e dinâmica (Standard Penetration Test – SPT). O ensaio de palheta é utilizado e indicado para solos argilosos. Entre os ensaios de penetração, o SPT é economicamente mais viável e possui maior facilidade de instalação do equipamento em locais diversos (como terrenos com grandes inclinações), em relação ao CPT. Os ensaios SPT e CPT são empregados em grandes profundidades. No estudo de erosão, porém, o interesse, como já citado, está em profundidades bem menores, em uma ordem de grandeza de poucos centímetros para erosão laminar e para incisão inicial de erosão linear. Nesse caso é utilizado o ensaio dinâmico de penetração do cone, descrito adiante.

A geração de resultados por meio dos ensaios de laboratório é custosa, uma vez que a retirada das amostras no campo é trabalhosa e a realização dos ensaios de muitas amostras indeformadas demandaria um tempo valioso. Isso se deve ao número de amostras indeformadas necessárias para caracterização de uma área extensa e das várias camadas que se deseja representar.

No ensaio com o penetrômetro pode-se obter a tensão de cisalhamento a cada centímetro, podendo chegar até alguns metros de profundidade e pode ser realizado diretamente no local de estudo, eliminando a etapa de retirada de amostras e possibilitando caracterizar áreas extensas. O equipamento é de fácil manuseio e requer somente 2 pessoas, o que torna o ensaio mais rápido, permitindo que seja realizado em maior quantidade e em menor espaço de tempo.

Além da maior dificuldade em se obter resultados com os ensaios em laboratório, é extremamente difícil obter amostras indeformadas de um solo arenoso, sem que a porosidade seja alterada, o que torna difícil medir ou estimar o ângulo de atrito de uma areia com base apenas em testes laboratoriais. Razões que levam a se utilizar, na prática, correlações entre o ângulo de atrito de uma areia e a resistência à penetração, com ensaios *in situ* (LAMBE and WHITMAN, 1969). Na agronomia o ensaio com penetrômetro é um dos métodos mais usados

para estimar a resistência ao crescimento das raízes no solo e para detectar camadas de solo com diferentes resistências (VANAGS *et al.*, 2006).

Conhecer a natureza e a forma das partículas que compoem uma areia não é suficiente para determinar seu ângulo de atrito *in situ*. É essencial, porém, para saber quanto agrupadas essas partículas se encontram em seu estado natural (LAMBE and WHITMAN, 1969), possibilitando se determinar a compactação do solo.

Vanags *et al.* (2006) apresentaram algumas formas de tirar informações dos resultados do ensaio com penetrômetro e relacionaram, por exemplo, a resistência à penetração com a umidade volumétrica e com a tensão de cisalhamento. Os autores observaram uma relação exponencial entre teor de umidade e resistência à penetração e atribuíram tal relação às moléculas de água, que podem diminuir a coesão entre as partículas, ou, no caso das argilas, agir como um lubrificante entre as partículas, reduzindo as forças de atrito que precisam ser superadas para cisalhar o solo (VANAGS *et al.*, 2006). Da correlação entre resistência à penetração (σ) e tensão de cisalhamento (τ) o resultado do coeficiente de determinação é de 0,65, para a Equação 1:

$$\tau = 0,041\sigma + 0,12 \quad (1)$$

Blum (1997) relaciona a tensão vertical (obtida com penetrômetro) com a resistência ao cisalhamento para materiais inconsolidados, não drenados e para compressão não confinada (*unconsolidated-undrained-unconfined compression UUU*). Define a relação como a diferença de tensão máxima principal, que é o mesmo que a força de compressão (não confinada) da amostra ($\sigma_1 - \sigma_3$). Assim, numa tensão qualquer, a resistência ao cisalhamento (τ_f) está relacionada com a resistência à compressão ($\Delta\sigma_f$) pela Equação 2:

$$\tau_f \sim \tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = \Delta\sigma_f / 2 \quad (2)$$

Ou seja, a tensão vertical deve ser dividida por 2 para obter a resistência ao cisalhamento (BLUM, 1997).

1.5.7.1. Ensaio in situ: com Penetrômetro Dinâmico

Com o objetivo geral de consolidar o uso agrícola de penetrômetros de impacto na física do solo, do ponto de vista teórico de seu princípio de funcionamento, Stolf (1991) avaliou três das equações de resistência à penetração do solo mais aceitas por pesquisadores, a equação de Sanders, a dos holandeses e a de Brix. Para tanto, realizou ensaios com duas técnicas, a do penetrômetro convencional (estático) e a do penetrômetro de impacto (dinâmico) e aplicou os dados gerados nas três equações. Seus objetivos diretos foram: a) realizar um estudo dedutivo das principais fórmulas para transformação dos resultados de penetrômetros de impacto em força por unidade de área e b) testá-las em solos de diferentes granulometrias (arenoso e argiloso), cada qual sob sua condição de resistência (fofo e compacto) (STOLF, 1991).

Os resultados reafirmaram a preferência pela equação dos holandeses, que já vinha sendo a mais utilizada na prática. A fórmula dos holandeses (Equação 3) foi considerada a melhor porque os resultados mantiveram maior independência em relação à geometria do aparelho, que varia conforme adoção de diferentes massas de impacto. Comparando os valores médios obtidos pelas 3 equações estudadas com o valor médio obtido com o penetrômetro convencional, o autor verificou que apenas a referida fórmula assumiu a mesma ordem de grandeza.

$$F = (M + m) \times g + \left(\frac{M}{M + m} \right) \times \frac{Mgh}{x} \quad (3)$$

Onde, F é a força de resistência do solo (kgf.), M é a massa que provoca o impacto (kg), m é a massa dos demais componentes do penetrômetro, excluída a de impacto (kg), g é a constante da aceleração da gravidade (igual a $9,81 \text{ m s}^{-2}$), h é a altura de queda da massa que provoca o impacto (cm) e x é a penetração unitária ocasionada por um impacto (cm/impacto).

Sanglerat (1967) e Vanags (2004) utilizam uma adaptação da equação dos holandeses simplificada (Equação 4), adotada também por Vaz e Hopmans (2001). Essa equação foi adotada pelo autor, por desconsiderar a parcela relativa à energia potencial do sistema de penetração depois da colisão. O autor verificou que essa parcela representa entre 3 e 8 % da resistência obtida com a equação simplificada até a profundidade onde os valores de resistência tornam-se constantes.

$$R = \frac{mgH}{A\Delta z} \frac{m}{m+m'} \quad (4)$$

Onde, R é a resistência à penetração (Pa), A é a área da base do cone (m^2), g é a constante da aceleração da gravidade (igual a $9,81 \text{ m s}^{-2}$), m é a massa do martelo (kg), m' a massa das hastes mais anéis (kg), H é a altura de queda do martelo (cm) e Δz a profundidade de penetração para um golpe do martelo (m).

Vanags et al. (2005) adota essa equação por considerar que se aproxima das equações propostas por Herrick and Jones (2002) e Vaz and Hopmans (2001) e porque a equação considera a área do cone.

Adicionalmente, Vanags et al. (2005) utilizam a equação de densidade de energia acumulada (E_d) para uma análise complementar (Equação 5).

$$E_d(z) = N \frac{mgH}{A} \frac{m}{m+m'} \quad (5)$$

Onde, E_d é a densidade de energia acumulada ($J \text{ m}^{-2}$ ou $N \text{ m}^{-1}$), N é o número de golpes necessários para se alcançar a profundidade z , dada em metros.

A equação proposta por Herrick and Jones (2002) e Vaz and Hopmans (2001) difere da proposta por Vanags et al. (2005) (Equação 6) apenas por somar o peso estático do equipamento no valor da resistência à penetração.

$$PR = \left(\frac{MgH}{Ax} \right) \left(\frac{M}{M+m} \right) + \left(\frac{M+m}{A} \right) g \quad (6)$$

Onde, PR é a resistência à penetração (Pa), A é a área da base do cone (m^2), g é a constante da aceleração da gravidade (igual a $9,81 \text{ m s}^{-2}$), M é a massa do martelo (kg), m a massa das hastes mais anéis (kg), H é a altura de queda do martelo (cm) e Δz a profundidade de penetração para um golpe do martelo (m).

Em princípio, penetrômetros cujo diâmetro da ponta é menor que o da haste apresentam dois inconvenientes: dificuldade de extração e o possível aparecimento de um atrito lateral (Cassan, 1982). Na aplicação pretendida para o ensaio considera-se que a possibilidade de algum desses inconvenientes acontecer é mínima, por se tratar de ensaio realizado em pequenas profundidades – até 2,00 metros – e, portanto, com pequenas massas

do martelo. As camadas superficiais (de poucos metros) possuem menor resistência à penetração, o que exige menor massa do martelo.

1.5.8. Resistência do Solo à Penetração

Uma das vantagens de se adotar ensaios com penetrômetro dinâmico é de se gerar um perfil de resistência do solo à penetração mais detalhado, com possibilidade de obter resultados a cada centímetro de profundidade, a partir da superfície.

Na Engenharia Civil a definição da resistência mecânica das camadas superficiais, menores que um metro de profundidade, é de interesse de pesquisadores da área de Estradas. A aplicação é no controle de compactação das fundações de obras de pavimentação (REIS et al., 2010; BELINCANTA et al., 2008). Aplica-se, portanto, para camadas construídas de solo.

Por outro lado, o interesse da Engenharia Agrícola para esse parâmetro está em camadas superficiais de aproximadamente 40 a 60 cm. O detalhamento dessa profundidade serve para definição dos equipamentos de preparo do solo e como auxílio na determinação do tipo de plantio, em função da raiz (JAKOBSEN et al., 1987; GENRO JUNIOR et al., 2004; VANAGS et al., 2006; SILVEIRA et al. 2010; VAZ et al., 2011). Para o estudo de feições erosivas lineares (desenvolvimento e estabilização do processo), porém, é necessário obter informações de profundidades intermediárias, na ordem de alguns metros.

Os estudos com penetrômetros dinâmicos mais detalhados, portanto, têm maior aplicação na Engenharia Agrícola. Nos estudos encontrados na literatura os ensaios atingem uma profundidade máxima de 80 cm.

Vanags et al. (2006) citam exemplos de perfis de resistência do solo à penetração com profundidade de 15 cm, para duas utilizações de solo, pasto e cultivo. Os autores comparam os resultados obtidos com o teor de umidade e com a resistência ao cisalhamento. Os resultados de resistência à penetração obtidos variaram entre 0,3 e 2,5 MPa, para solo cultivado e entre 0,8 e 5,0 MPa para solo sob pasto, em profundidades entre 0 e 15 cm. Os autores citam duas formas de apresentar os resultados de resistência do solo à penetração em função da profundidade: resistência à penetração (MPa) e densidade de energia acumulada (MJ/m^2).

Silveira et al. (2010) analisaram a resistência à penetração (RP) em função da umidade, de um solo com textura franco-arenosa (contendo no máximo 18% de argila). Utilizando um penetrômetro dinâmico modelo Stolf (1991), os autores obtiveram valores de

RP para faixas de profundidade entre 0-20 cm e 20-40 cm e testaram quatro modelos para cada profundidade, sendo 2 equações exponenciais e 2 equações potenciais. Os autores conseguiram bons ajustes para todos os modelos, obtendo os melhores índices de aferição com o modelo exponencial.

Os valores de RP analisados por Silveira et al. (2010) variaram entre 0,5 e 19 MPa em ambas as profundidades analisadas, enquanto os valores de umidade gravimétrica variaram entre 1,2 e 9,7% na faixa 0-20cm e entre 1 e 12% na faixa 20-40cm. A variação da umidade foi garantida através da variabilidade temporal dos ensaios, que foram realizados entre os meses de junho e dezembro, configurando meses secos e chuvosos.

Belincanta et al. (2008) propõem o uso de um penetrômetro dinâmico como alternativa para o controle de execução e avaliação de campo da capacidade de suporte das camadas de apoio de pavimentos. Tradicionalmente se utiliza a medida da massa específica de campo, através do frasco de areia ou, em alguns casos, o ensaio *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), para a obtenção do grau de compactação (GC), que é a razão entre a massa específica seca (ρ_d) e a massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$). A facilidade de realização dos ensaios com o penetrômetro dinâmico no campo é apontada pelos autores como uma das principais vantagens da adoção desse equipamento, podendo obter mais repetições e, portanto, um melhor controle da compactação no campo. Os autores propuseram uma equação matemática, calibrada com ensaios de laboratório e validada com ensaios com penetrômetro dinâmico, densidade e teor de umidade, realizados no campo. Os ensaios, feitos com solo compactado, foram realizados com 2 tipos diferentes de solo. Ambos os solos são constituídos de solo areno-argiloso (latossolos vermelho distrófico), com fração de areia variando entre 61 e 70%, sendo essencialmente areia fina, com pouca areia média, fração de argila variando entre 26 e 34% e silte com fração máxima de 5%. Foram feitas 5 repetições de ensaios para cada um dos 2 solos e para 2 condições de compactação, com energia normal e intermediária. A relação dos resultados de índice de penetração (IP), medido em número de golpes por centímetro, com a massa específica do solo seco (ρ_d) e com o teor de umidade (w) gerou equações exponenciais para cada tipo de solo e estado de compactação, variando somente valores de constantes de ajuste da função. As equações exponenciais obtidas nas 4 condições diferentes apresentaram R^2 maior que 0,95 para todos os casos. A comparação entre resultados medidos e calculados forneceu uma boa correlação, indicando a função com grande potencial para uso em controle de execução das camadas de base para pavimentação.

É sabido que a umidade influencia a resistência do solo à penetração. Estudos realizados buscam a melhor relação entre esses dois fatores, com o intuito de avaliar a compactação do solo, que pode ser em aterros, remexida no cultivo de plantas, compactada pelo peso das máquinas, compactada por pastagem de gado, etc. Outros parâmetros, porém, também influenciam na compactação do solo, como sua textura, densidade e índice de vazios. Em solos compactados os vazios tendem a porcentagens mínimas, diminuindo a influência dos índices relacionados na resistência do solo à penetração.

Vaz et al. (2011) obtiveram resultados de RP no campo para perfis de 4 latossolos, abrangendo valores de umidade e densidade do solo variados. Os autores identificaram 23 equações de regressão, mais comumente referidas na literatura, que relacionavam essas 3 variáveis e selecionaram as mais promissoras para aplicar os dados obtidos nos ensaios e ilustrar os efeitos do contraste da textura do solo com a RP. Os autores propuseram uma nova abordagem para correção de leituras de RP obtidas para diferentes teores de umidade. Os solos adotados no estudo tinham texturas entre argilosos e arenosos, variando entre 18 e 86% de areia e 8 e 66% de argila, com fração máxima de silte de 16%. Os valores de umidade volumétrica (θ_v) variaram entre 22 e 42% para os solos argilosos e entre 8,5 e 31% para os solos arenosos, enquanto a densidade do solo seco (ρ_d) variou entre 1,12 e 1,39 g/cm³ para os solos argilosos e entre 1,43 e 1,65 g/cm³ para os solos arenosos. Os valores de RP apresentados pelos autores variaram entre 1,7 e 9,4 MPa para os solos argilosos e entre 1,7 e 14,8 MPa para os solos arenosos. Os resultados não apresentaram uma relação direta entre os 3 parâmetros citados.

1.5.9. Geração de sedimentos

O dado de quantidade de sedimento gerado entra nos modelos por amostragem. Esse dado está presente tanto em modelos que tem como finalidade avaliar a quantidade de sedimento total gerado em uma determinada área (encosta ou bacia, por exemplo) como em modelos de previsão de geração de sedimento.

A obtenção desse dado depende da precipitação e da formação de escoamento superficial. A amostra pode ser coletada mediante precipitação natural ou simulada. A precipitação natural é medida com pluviômetros ou pluviógrafos (ver item 1.5.3), enquanto a simulada depende de um simulador de chuvas.

1.5.9.1. Tamanho dos Lotes para Coleta de Sedimentos

A área delimitada para coleta de sedimentos varia de acordo com a finalidade do dado gerado e com a quantidade e intensidade de precipitação adotada.

Pequenas áreas são comumente utilizadas no estudo de erosão entre sulcos, em ensaios de laboratório. Ensaios em pequenas áreas possibilitam isolar uma pequena parte dos processos erosivos para estudos intensivos em condições controladas. As fases básicas da erosão são estudadas nessa escala, devido à dificuldade de estudá-las detalhadamente em áreas extensas. Servem também para desenvolver ou verificar equações básicas que governam os processos físicos de erosão do solo. (MUTCHLER et al., 1994).

Áreas maiores são adotadas no campo para a coleta de sedimento em condições de chuvas naturais. Faixas de poucos metros de largura por, muitas vezes, dezenas de metros de comprimento são delimitadas e criados mecanismos de coleta do sedimento através de caixas instaladas na parte mais baixa do terreno.

Resultados conclusivos a partir de estudos com chuva natural, para se obter uma amostra representativa de eventos que incluam combinações típicas de eventos críticos, porém, requerem muitos anos. O uso do solo da área estudada pode variar apreciavelmente durante este período. Além disso, muitos estudos necessários nunca poderiam ser iniciados se confiassem em chuvas naturais porque os resultados não estariam disponíveis em tempo hábil. Por esses motivos, simuladores de chuva são um essencial componente em programas de pesquisa produtivos (MEYER, 1994).

1.5.9.2. Simulador de Chuva

A utilização de simuladores de chuva para determinação de sedimento gerado, no estudo de erosão, tem como vantagens a maior rapidez, eficiência, controle e adaptabilidade, que pesquisas com chuvas naturais. A duração e condições dos eventos de chuva simulados podem ser pré-definidas, e medições a partir de uns poucos eventos às vezes podem indicar conclusões ao menos de diferenças relativas entre as condições determinadas (MEYER, 1994).

Um simulador de chuva ideal, além de possuir características práticas, como de fácil manuseio e locomoção do equipamento, deveria simular uma chuva perfeita. Os pesquisadores conhecem as limitações de se conseguir tal perfeição. Pesquisas com

simuladores de chuva devem ter como objetivo coletar dados confiáveis e úteis, não de gerar uma chuva simulada perfeita (MEYER, 1994). De fato a justificativa dos pesquisadores que desenvolveram simuladores de chuva, gira em torno da busca pela facilidade de manuseio, por uma distribuição uniforme da chuva, tamanhos de gotas também uniformes, controle da intensidade de chuva gerada e precisão do equipamento.

Assim, Tossel et al. (1987) desenvolveram um simulador de chuvas com características que tornassem possível ser usado tanto em laboratório como no campo. Utilizando um bico do tipo *Fulljet* (*Spraing Systems Co.*) de baixa a média vazão, o simulador era capaz de reproduzir intensidades de chuva entre 17,5 mm/h e 200 mm/h. Os autores indicaram que a intensidade de chuva simulada variava de acordo com a dimensão do bico adotado, a pressão no bico e a altura do bico em relação à superfície que recebia a chuva. O *Guelph Rainfall Simulator II* (*GRS II*), como foi chamado, foi testado para várias dimensões de bico, pressões e altura do bico e para uma área teste de 1 por 1 m, obtendo uma uniformidade média da distribuição da chuva entre 88 e 90%. Foram utilizados 6 bicos variando entre os modelos 2.8W-GG e 30W-HH, as pressões variaram entre 48,3 e 69,0 kPa e a altura do bico entre 0,8 e 1,7 metros. O equipamento consistia de duas hastes verticais paralelas travadas por uma terceira que suportava o bico. Para delimitação da área foram utilizadas tiras de chapas metálicas galvanizadas. A uniformidade da chuva gerada foi definida a partir de 17 medidores espalhados pela área delimitada.

Um tipo diferente de simulador, utilizando 4 bicos *Floodjet SS3/8k-45* (*Spraing Systems Co.*) foi desenvolvido na *California Polytechnic State University*. Blanquies et al. (2003) apresentam o equipamento que consiste em 4 bicos alinhados e distantes entre si de 99 cm, para cobrirem uma área de 1 m de largura por 3,56 de comprimento. Abaixo de cada bico foi colocada uma caixa de 11x15 cm para criar um ângulo próprio para garantir a uniformidade da distribuição lateral. Existia uma abertura lateral para recolher a água não utilizada. Os autores indicam o simulador desenvolvido para chuvas menores que 50 mm/h e concluem que se trata de um equipamento de fácil manutenção, locação no campo e de alta precisão.

O simulador de chuva desenvolvido por MEYER and HARMON (1979) contém 2 bicos tipo *Veejet* (*Spraing Systems Co.*) fixados numa haste horizontal que desliza, com a ajuda de um motor, por um conjunto de hastes que formam uma estrutura de mesa, sustentada por 4 hastes verticais. Segundo os autores, o intervalo de tempo entre as passagens dos bicos, que é menor que 0,5 s, determina a intensidade da chuva. Esse intervalo de tempo pode ser

variado (entre 0 e 10 s), proporcionando diferentes intensidades de chuva, que podem variar entre 10 e 140 mm/h.

NAVAS et al. (1990) desenvolveram um simulador que consiste em uma estrutura tubular em forma de tronco de pirâmide, com base de 3,5 por 3,5 m e altura também de 3,5m, que sustenta uma placa metálica na qual o bico é afixado. Em condições horizontais a altura do bico chega a 3,45 m. O bico utilizado foi um *Fulljet 1/8 GG6SQ* (*Spraing Systems Co.*). A estrutura, em forma de tronco de pirâmide, recebia uma cobertura com tecido claro para evitar o efeito do vento no experimento. As intensidades de chuva geradas variaram entre 48 e 58 mm/h, utilizando-se para tanto pressões entre 29,4 e 58,8 kPa. A área adotada para os ensaios foi de 1,25 por 1,25 m e era delimitada por chapas galvanizadas, cravadas no solo.

Outros pesquisadores desenvolveram simuladores de chuva com características distintas, usando 1 ou vários bicos, com estruturas de sustentação do bico diversificadas, para ser utilizados no campo ou em laboratório, mas sempre utilizados para áreas delimitadas restritas, em torno de 1 m², ou pouco mais (MILLER, 1987; STRAUSS ET al., 2000, etc.).

1.5.10. Incisão no Solo: Início de formação de sulcos

O início da formação de sulcos está ligado às características da chuva, consequentemente, do escoamento superficial e do solo. Certamente, as características intrínsecas do solo, seus índices, influenciam o aparecimento dos primeiros sulcos, mas a área de contribuição de escoamento superficial (área de drenagem) e a declividade do terreno podem ser consideradas como os fatores que mais influenciam na ocorrência de feições erosivas lineares (VANDAELE et al., 1996).

Vandaele et al. (1996) revisaram diversos métodos de levantamento de dados para definição de ocorrência de erosão linear, ou ravinas (*gullies*), efêmeras ou permanentes, a partir de parâmetros geomorfológicos. Os métodos variaram entre levantamentos em campo, mapas topográficos e modelos digitais do terreno (MDT) gerados por um SIG. Todos os métodos visaram alimentar um modelo em função da área de drenagem e da declividade do terreno, o qual pode ser representado pela Equação (7).

$$S_{cr} = a * A^{-b} \quad (7)$$

Onde S_{cr} é o gradiente de declividade crítica (em m/m), A é a área de drenagem (em ha), a e b são coeficientes de regressão.

Cada estudo avaliado na revisão de Vandaele et al. (1996) definiu pares de valores para o coeficiente a e o expoente b de acordo com as condições de cada local e método utilizado no levantamento dos dados (Tabela 2). Os autores concluíram que para o expoente b os resultados obtidos nos estudos avaliados aproximaram-se de um mesmo valor: $-b = -0,40$. Enquanto o coeficiente a apresentou variação conforme condições específicas do local.

Tabela 2: Coeficientes na Equação (7) correspondentes para diferentes fontes de dados.

Referência	a	- b
Vandaele et al. (1995), Central Belgium	0,025	-0,40 a -0,35
Govers (1991)	0,0035	-0,40
Poesen et al. (1995)	0,08	-0,40 a -0,30
Boardman (1992)	0,09	-0,25
I. G. N. (1983)	0,06	-0,40
Vandaele et al. (1995), Portugal	0,02	-0,35
Montgomery and Dietrich (1988), Oregon	0,25	-0,40
Montgomery and Dietrich (1988), California	0,27	-0,40
Montgomery and Dietrich (1988), Sierra Nevada	0,35	-0,60
Patton and Schumm (1975)	0,16	-0,26

Fonte: Vandaele et al. (1996)

Assim, a relação entre a declividade crítica e a área de drenagem pode servir para identificar locais instáveis potenciais e como primeiro passo para avaliação da ocorrência de feições erosivas permanentes (*permanent gullies*).

Capítulo 2: CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Duas áreas foram escolhidas para estudo, devido à ocorrência de feições erosivas lineares em ambas e por apresentarem características geológicas diferentes. A primeira área localiza-se na região de Corumbataí e a segunda na região de Ibaté. A maioria dos ensaios concentrou-se na primeira área, enquanto a segunda área serviu como contra-ponto para os resultados obtidos na primeira.

A seguir, é feita uma breve descrição das áreas, do ponto de vista de localização, Geologia, Geomorfologia, Pedologia, drenagem, clima e vegetação.

2.1. Área de Estudo na Região de Corumbataí

A primeira área de estudo compreende parte da Bacia Hidrográfica do Córrego do Lajeado, localizada no Município de Corumbataí, porção centro-leste do Estado de São Paulo, a aproximadamente 200 km de São Paulo. A área está situada entre os meridianos 47° 37' 00" e 47° 45' 00" W, e paralelos 22° 15' 00" e 22° 20' 00" S, totalizando aproximadamente 40 km² (Figura 3).

2.1.1. Geomorfologia

A área estudada, localizada nas proximidades das Cuestas Basálticas, insere-se dentro da unidade geomorfológica da Depressão Periférica e apresenta um relevo suave, em forma de colinas. A altitude caracteriza-se por uma grande amplitude, com valores variando entre 560 e 865 m.

Figura 3: Localização da primeira área de estudo, na região de Corumbataí, SP.

2.1.2. Clima

A região tem clima subtropical do tipo Cwa, seguindo a classificação de Köppen, caracterizado por ser um clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno. No Município de Corumbataí, os valores médios aproximados de temperatura para o mês mais quente e para o mês mais frio são, respectivamente, 28 e 15°C.

2.1.3. Substrato Rochoso

A litologia do substrato rochoso da área de estudo é da Formação Pirambóia. Esta formação ocorre na forma de faixa irregular e descontínua com direção NE-SSE, aflorando próximo na porção mais inferior das Cuestas Basálticas e se estendendo para a unidade da Depressão periférica. Abrange toda a área de estudo.

É constituída por arenitos de granulometria variada, predominando a textura média a fina e muitas vezes com matriz silto-argilosa. Localmente observam-se quantidades significativas de finos (silte e argila), podendo chegar a teores de argila acima de 20%. Os grãos tendem a arredondados, com superfícies polidas. A coloração é variável exibindo tons de vermelho, alaranjado e marrom avermelhado.

Predomina a estratificação plano-paralela, destacada pela alternância de laminais mais ou menos ricas em argila e silte e as estratificações cruzadas planares de pequeno porte e mais raramente estratificações cruzadas acanaladas.

2.1.4. Pedologia

Quanto à classificação pedológica da área de estudo, foram identificadas seis classes de solo: Neossolos, Neossolos Quartzênicos ou Areias Quartzosas, Neossolos Litólicos, Podzólico com textura amarela, Latossolo vermelho-amarelo arenoso e Neossolos Aluviais, que estão descritas abaixo.

2.1.4.1. *Neossolos*

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, esta é a ordem de solos constituídos por material mineral, ou por material orgânico, com menos de 30 cm de espessura, com pequena expressão dos processos pedogenéticos, os quais não conduziram, ainda, a modificações expressivas do material de origem que permitam a ocorrência de um horizonte B diagnóstico. Em geral, são solos originados de depósitos arenosos, apresentando textura arenosa ou arenosa franca ao longo de pelo menos 2 m de profundidade. São constituídos essencialmente de grãos de quartzo, praticamente destituídos de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo.

2.1.4.2. *Neossolos Quartzênicos (Areias Quartzosas)*

Esse tipo de solo é caracterizado por ser muito profundo. A principal característica desses solos, no entanto, é ser completamente constituído por areia (na proporção de 85% ou mais), nesse caso por grãos de quartzo. O quartzo é o mineral mais resistente ao intemperismo e desprovido de nutrientes. Os poucos nutrientes que existem neste tipo de solo estão

concentrados na matéria orgânica, sendo que sua cor avermelhada é consequência da presença de hematita (Fe_2O_3).

Os neossolos quartzênicos são muito homogêneos, a única diferença entre os horizontes desses solos é devida à presença de matéria orgânica nos primeiros 10 ou 15 cm. O horizonte A é seguido diretamente pelo horizonte C, já que o alto teor de areia não permite formação de horizonte B.

2.1.4.3. Neossolos Litólicos

São solos minerais não hidromórficos, pouco desenvolvidos, muito rasos ou rasos, com textura variável, frequentemente arenosa ou média, podendo ocorrer textura argilosa e raramente siltosa. São também heterogêneos quanto às propriedades químicas e ocorrem sob vegetação Campestre, de Cerrado e Floresta, em locais com forte declividade, como encostas de morros e bordas de chapadas. Como limitações para esse tipo de solo pode-se citar: a pequena espessura do solo; a frequente ocorrência de cascalhos e fragmentos de rocha no seu perfil; a grande susceptibilidade à erosão; e a ocorrência, normalmente, em áreas de relevo acidentado.

2.1.4.4. Podzólico amarelo com textura arenosa

A classe podzólico amarelo com textura arenosa compreende solos minerais com horizonte B textural, não hidromórficos, com argila de atividade baixa, devido ao material do solo ser constituído por sesquióxidos, argilas do grupo 1:1 (caulinitas), quartzo e outros materiais resistentes ao intemperismo e de saturação de bases baixa, isto é, inferior a 50%. São solos, em geral, fortemente ácidos e de baixa fertilidade natural. Podem ser considerados como solos bem desenvolvidos, com exceção de rochas efusivas, como basalto e diabásio, podem ser derivados de inúmeros materiais geológicos.

2.1.4.5. Latossolo vermelho-amarelo arenoso

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, é a classe de solos constituída por material mineral profundo com horizonte B latossólico extremamente desenvolvido. São solos encontrados imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto hístico, dentro dos primeiros 2 m de profundidade ou dentro dos primeiros 3 m de profundidade caso

o horizonte A apresente espessura maior que 0,50 m. São, em geral, profundos, sempre ácidos, nunca hidromórficos. Podem ser eutróficos ou distróficos. Estão geralmente associados à laterização. Os Latossolos Vermelho-Amarelos são os latossolos que possuem cor laranjada, com matiz Munsell entre 2,5YR e 5YR.

2.1.4.6. Neossolos Aluviais

Os aluviões são solos minerais, pouco evoluídos, formados em depósitos aluviais recentes, nas margens de cursos d'água. Estes solos são constituídos por um horizonte superficial "A", sobrejacente a camadas de composição física e química distinta, transportada pelo rio e que não guardam entre si nenhuma relação pedogenética.

2.1.5. Hidrografia

A área estudada está localizada dentro da bacia do Córrego do Lajeado, e esta, inserida na Bacia do Corumbataí.

2.1.6. Vegetação

É possível verificar a existência de vegetação nativa nas margens e nas proximidades dos canais de drenagem. As faixas de vegetação em torno dos canais não ultrapassam 50 m e são constituídas por árvores de porte médio e por arbustos, com pouca presença de árvores de grande porte.

2.2. Área de Estudo na Região de Ibaté

A segunda área de estudo está localizada no Município de Ibaté, porção centro-leste do Estado de São Paulo, a aproximadamente 250 km de São Paulo. A área está situada entre os meridianos 47° 58' 00" e 48° 00' 00" W, e paralelos 21° 53' 00" e 21° 55' 00" S (Figura 4).

Figura 4: Localização da segunda área de estudo, na região de Ibaté, SP.

2.2.1. Geologia e Geomorfologia

As rochas da região são atribuídas às formações Itaqueri, Serra Geral e Botucatu. Recobrimo as rochas encontra-se material inconsolidado retrabalhado e residual, com espessuras que variam desde poucos centímetros até valores acima de 20 m (NISHIYAMA; ZUQUETTE, 1994; FAGUNDES, 2010).

A área estudada está inserida numa região constituída por 2 grupos de encostas predominantemente suaves, com declividades menores que 15°, separadas por escarpas com declividades variando entre 45 e 70° (FAGUNDES, 2010).

2.2.2. Clima

A região tem clima tropical a temperado, com uma estação seca no inverno, entre os meses de abril a setembro. Segundo a classificação de Köppen, o clima varia entre Cwa e Aw. Na região, os valores médios aproximados de temperatura para o mês mais quente e para o mês mais frio são, respectivamente, 25,9 e 7,5°C. E tem direção preferencial dos ventos NE-SW, com velocidade média anual de 1,8 m/s (ZUQUETTE et al., 2006).

2.2.3. Hidrografia

A área estudada está localizada dentro da bacia do rio Chibarro, que deságua no rio Jacaré-Guaçu, que é um dos grandes afluentes do rio Tietê.

2.2.4. Vegetação

Da mesma forma que na primeira área estudada, é possível verificar a existência de vegetação nativa nas margens e nas proximidades dos canais de drenagem. As faixas de vegetação em torno dos canais não ultrapassam 50 m e são constituídas por árvores de porte médio e por arbustos, com alguma presença de árvores de grande porte.

Capítulo 3: MÉTODOS E MATERIAIS

Para atingir os objetivos propostos foi necessário, inicialmente, identificar as variáveis envolvidas nas equações que descrevem o desenvolvimento de erosão linear e os fatores que levam ao surgimento desse tipo de feição, visando definir os ensaios necessários para responder a essas variáveis. Por outro lado, foram levantados os parâmetros comumente requeridos nos modelos de erosão, que consideram feições erosivas lineares.

De maneira geral, isso significa investigar as características do solo e condições de clima. As características do solo investigadas foram o tipo, resistência, capacidade de infiltração d'água, relevo e erodibilidade, enquanto as condições de clima investigadas foram, basicamente, a quantidade e intensidade de chuva e a umidade do solo.

As características do solo foram investigadas utilizando-se ensaios de campo e de laboratório e as condições de clima foram investigadas, por um lado, através da medição de chuvas naturais e, por outro, através de chuvas simuladas.

3.1. Processos Erosivos Lineares

Para definição das variáveis foram escolhidas equações de processos erosivos relacionando-as a uma sequência de evolução das feições lineares: incisão inicial, formação de *rill*, formação de *gully* em condição dinâmica e avaliação de condição estável de *gully*, que caracterizam as feições lineares permanentes.

Os seguintes fatores foram considerados como principais dados de entrada em um possível modelo de erosão linear: evento de chuva, características geomorfológicas do perfil de solo, características geométricas da área, características de rugosidade (micro e macro) da superfície (*Depression storage*) e características de resistência ao cisalhamento do solo e de tensão de cisalhamento provocadas pelo escoamento superficial (*runoff*).

Ainda considerando dados para alimentar um modelo de erosão linear, as características geomorfológicas do perfil do solo envolvem a porosidade, tamanho dos grãos, umidade, permeabilidade, capacidade de infiltração, capacidade de armazenamento de água, entre outras.

Fazem parte das características geométricas a declividade e a rugosidade da superfície, as quais podem ser obtidas através de um SIG.

Chu (1978) identifica e descreve os primeiros fatores ligados ao processo erosivo. Assim, a primeira condição necessária para iniciar o processo é a formação de escoamento superficial (*runoff*) para um determinado evento de chuva. Isso significa ser necessário que o evento de chuva, descontado da parcela interceptada pela vegetação, seja maior que a capacidade de infiltração do solo (Equação 8):

$$P > I_p \quad (8)$$

onde P é a intensidade da chuva (m/h) e I_p é a capacidade de infiltração ou infiltração potencial (m/h).

Se essa condição inicial não for satisfeita num primeiro momento, determina-se o tempo de início de formação de poças (*ponding time*), a partir do qual é iniciado o processo de *runoff*. O *ponding time* é o instante no qual a superfície começa a empoçar. Lembrando que o *runoff* é o excesso de água da chuva que escoar na superfície. O movimento da água no processo de *runoff* depende do preenchimento da rugosidade da superfície. Portanto, outra condição deve ser satisfeita para definir o processo de *runoff*, a de preenchimento das rugosidades da superfície (*depression storage*), dada pela Equação 9:

$$G = D \quad (9)$$

onde G é a quantidade de água empoçada (m) e D é a capacidade de retenção da superfície (m) (ENGMAN, 1986; LINSLEY et al., 1975; SALEH, 1993; KAMPHORST, 2000a).

O escoamento superficial tenta vencer a resistência ao cisalhamento do solo (τ_c), a qual deve ser definida tanto para o solo em estado natural (τ_s) (partículas), quanto para o solo saturado ($\tau_s f(\theta)$, função da umidade volumétrica) (total) e pode ser obtida por ensaios de campo ou de laboratório.

Os valores da tensão de cisalhamento do fluxo e da tensão resistente de cisalhamento do solo (ou tensão de cisalhamento crítica do solo) são fatores preponderantes na definição tanto da capacidade de transporte do fluxo (T_c), quanto da capacidade de descarga de sedimento do fluxo (q_s).

Um valor de capacidade de transporte muito maior que a capacidade de descarga do fluxo, define a condição de incisão inicial do solo.

A condição de incisão pode ser definida avaliando-se a propensão de ocorrência de feição erosiva linear em função da área de drenagem e da declividade do terreno, conforme a Equação 7, citada na Revisão Bibliográfica, de Vandaele et al. (1996):

$$S_{cr} = a * A^{-b} \quad (7)$$

onde S_{cr} é o gradiente de declividade crítica (em m/m), A é a área de drenagem (em ha), a é um coeficiente e b um expoente. Para cada célula será avaliada a possibilidade de ocorrência de feição erosiva linear. Comprovada a existência, segue-se para a avaliação de estabilidade da feição, inicialmente com a condição dinâmica e em seguida com a condição de permanência.

A evolução de uma incisão inicial para um sulco (*rill*) depende do poder do fluxo definido por Hairsine e Rose (1992a e 1992b). A habilidade do fluxo em sulcos (*rills*) de erodir o solo é definida por esses autores como o poder do fluxo (Ω) e dado pela Equação 10:

$$\Omega = \tau V \quad (10)$$

aqui τ é a tensão de cisalhamento média do fluxo por unidade de área molhada da superfície e V é a velocidade média do fluxo nos sulcos (*rills*).

A evolução natural de um sulco (*rill*) para uma voçoroca (*gully*) é considerada conforme equação de conservação de massa definida por Sidorchuk (1999), como na Equação 11:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} = C_w q_w + M_0 W + M_b D - C V_f W \quad (21)$$

onde: $Q_s = QC$ = vazão de sedimento (m^3/s); Q = vazão d'água (m^3/s); X = coordenada longitudinal (m); C = volume médio de concentração de sedimento; C_w = concentração de sedimento da entrada lateral da contribuição do *catchment*; q_w = vazão lateral específica (m^2/s); M_0 = taxa de destacamento das partículas do solo para o fundo da *gully* (m/s); M_b = taxa de destacamento do solo das paredes do canal (m/s); W = largura do fluxo (m);

D = profundidade do fluxo (m) e V_f = velocidade de queda das partículas num fluxo turbulento (m/s).

A taxa de destacamento das partículas do solo para o fundo da *gully* (M_0) e a taxa de destacamento do solo das paredes do canal (M_b) são definidas por Sidorchuk (1999), respectivamente, conforme as Equações 12 e 13:

$$M_0 = kV \frac{\tau}{\tau_{cr}} \quad (12)$$

$$M_b = M_0 \frac{V_L}{V} \quad (33)$$

onde V_L = velocidade lateral do fluxo; V = velocidade média do fluxo; k = coeficiente; τ = tensão de cisalhamento crítica de início de *gully* e τ_{cr} = tensão crítica de cisalhamento.

As equações acima definem a condição dinâmica de uma *gully*. O último passo do algoritmo define a condição estática de uma *gully*. Ainda conforme Sidorchuk (1999) a condição estática de modelo de *gully* é baseada na hipótese de equilíbrio morfológico final do leito e das paredes de uma *gully*. O autor afirma que a elevação do fundo da *gully* (Z) e a largura do fundo da *gully* (W_b) não alteram quando satisfeitas as condições das Equações 14 e 15 a seguir:

$$\frac{\delta Z}{\delta t} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\delta W_b}{\delta t} = 0 \quad (45)$$

e quando a descarga de sedimento ao longo do fundo da *gully* (X) também não altera, ou seja, satisfazendo também a Equação 16:

$$\frac{\delta q_s}{\delta X} = 0 \quad (56)$$

A Equação 17 apresenta a situação ideal de estabilidade de *gully*, quando a velocidade do fluxo (V) for menor que a velocidade limiar de início de erosão (V''_{cr}) e maior que a velocidade de sedimentação (V'_{cr}).

$$V'_{cr} < V < V''_{cr} \quad (67)$$

Em outras palavras, os sedimentos finos carregados por entre a *gully* passam direto por ela. Zorina (1979) foi o primeiro a usar esse critério de estabilidade, hoje largamente utilizado.

3.2. Dados de entrada dos modelos

Dos mais de 80 modelos levantados, alguns foram selecionados para melhor avaliar os dados de entrada comumente requeridos, como representação do todo. Optou-se por escolher modelos com base física, distribuídos espacialmente e que consideram sedimento gerado por feições lineares, sejam somente sulcos, ou ravinas e voçorocas. Assim, os modelos estudados foram: ANSWERS, LISEM, CREAMS, EUROSEM, KINEROS e MEFIDIS. Apesar de não apresentar as características do grupo selecionado, o modelo EGEM foi incluído na seleção por tratar exclusivamente de sedimento gerado por ravinas. O EGEM, portanto, considera somente a bacia de contribuição da ravina modelada (NACHTERGAELE et al., 2001).

O Quadro 10 apresenta os dados de entrada dos modelos selecionados (DE ROO et al., 1989; MORGAN et al., 1998a; MORGAN et al., 1998b; USDA, 2012; USDA, 1990; DURKIN, 2004; CAPRA et al., 2005; JETTEN, 2002; HESSEL, 2003; NUNES, 2007).

Alguns modelos requerem também dados sobre geração de sedimento e sobre o fluxo. Sobre a geração de sedimento, normalmente, é requerida sua quantidade e sobre o fluxo pode ser requerido o escoamento superficial; canais potenciais de fluxo; sua energia, largura, comprimento de rampa, declividade e resistência no leito.

Os modelos costumam fornecer tabelas (ou utilizar tabelas prontas) com valores de diversos parâmetros (ex. MORGAN et al., 1998a). Os parâmetros são tabelados devido à dificuldade de obtê-los no campo. Nas tabelas tais parâmetros são, normalmente, correlacionados com parâmetros de obtenção mais fácil, como o tipo de solo. As condições de desenvolvimento dos solos, porém, podem variar demasiadamente, inviabilizando a aplicação das tabelas em locais diversos. Fatores ligados ao clima e às propriedades do solo medidos nos Estados Unidos, por exemplo, não podem ser aplicados na mensuração da perda de solo na Europa, sem passar por modificações (DE ROO et al., 1989).

Alguns parâmetros podem ser requeridos por meio de diferentes variáveis, dependendo do algoritmo adotado por cada modelo. A tensão crítica de cisalhamento do solo, por exemplo, pode ser requerida diretamente por meio do seu valor em kPa, ou indiretamente por meio do valor da coesão (Quadro 10). Outro exemplo é a rugosidade que pode ser

requerido o índice de rugosidade randômica (RR), ou o número de Manning. O levantamento dos parâmetros citados permitiu direcionar os ensaios que deveriam ser realizados para obter dados para alimentar e validar um modelo de previsão erosão de erosão linear.

Quadro 10: Parâmetros de entrada de modelos com base física, distribuídos espacialmente e que consideram sedimento gerado por feições lineares, acrescidos de um modelo para previsão de sedimento gerado por ravinas.

Modelo	Parâmetro	Unidade
ANSWERS	Dados de chuva - Quantidade de chuva - Intensidade de chuva	
	Dados do meio físico - Altitude - Declividade - Aspecto - Concavidade/Convexividade - Canais potenciais de fluxo	
	Dados do solo - Porosidade - Capacidade de campo - Umidade do solo - Taxa de infiltração saturada - Taxa de infiltração inicial - Profundidade da frente de molhamento - Erodibilidade (fator K - USLE) - Interceptação potencial - Cobertura vegetal - Uso do solo (fator C - USLE: C*P) - Rugosidade (coeficiente e altura máx.) - Número de Manning	%
LISEM (baseado no EUROSEM - Interface com SWATRE)	Dados de chuva - Dados de pluviógrafo - Intensidade de chuva	mm
	Dados hidrológicos - Interceptação - Altura das plantas - Condutividade hidráulica saturada - Porosidade - Teor de umidade inicial do solo - Umidade volumétrica - Potencial mátrico - Capacidade de armazenamento de água pelo solo (MDS, ONSTAD, 1984)	
	Dados do solo - Rugosidade (ALLMARAS,1966) - Largura do fluxo - Concentração de sedimento no fluxo	m kg/m ³

(continua)

(continuação)

Modelo	Parâmetro	Unidade
LISEM (baseado no EUROSEM - Interface com SWATRE)	- Velocidade das partículas	m/s
	- Velocidade crítica de cisalhamento	cm/s
	- Coesão do solo úmido	
	- Coesão por raízes de plantas (dado secundário)	
	- Densidade do solo	kg/m ³
	- Energia do fluxo	cm/s
	- Textura média do solo (d ₅₀)	µm
	- Uso do solo	
	- Tipo de solo	
	- Cobertura vegetal	
	- Definição de áreas impermeáveis (estradas, afloramento de rochas e solo em crosta)	%
	- Mapa de localização dos canais	
	- Formato das seções dos canais	
	- Dimensões dos canais	
	- Declividade dos canais	
	- Número de Manning	
Ravinas	- Largura inicial	
	- Formato da seção	
	- Resistência do fluxo no leito, baseado no número de Manning	
	- Massa específica da primeira e segunda camadas	
	- Profundidade da segunda camada	
	- Coesão (da primeira e segunda camadas)	
CREAMS (GLEAMS)	Dados de chuva	- Precipitação
	Dados do solo	- Área superficial de partículas de argila
		- Área de drenagem
		- Comprimento de rampa do fluxo
		- Erodibilidade por classificação da textura do solo
		- Número de anos considerados
		- Quantidade de elementos considerados
		- Taxa de perda de solo (por fração de tamanho de partículas)
		- Declividade
		- Número de Manning
Dados hidrológicos	- Escoamento superficial	
	- Percolação	

(continua)

(continuação)

Modelo	Parâmetro	Unidade
CREAMS (GLEAMS)	<ul style="list-style-type: none"> - Evapotranspiração - Condutividade hidráulica saturada - Água disponível no solo no início da execução (umidade) - "Curve number" - Latitude - Elevação média - Porosidade - Capacidade de campo - Matéria orgânica, argila, silte e areia (em todas as camadas de solo) - Temperaturas mínima e máxima anuais - A média de radiação solar mensal para cada mês - Velocidade do vento 	pol./h % graus m °F MJ/cm ² km/dia
EUROSEM (composto por vários módulos - Interface com KINEROS e MIKE SHE)	Dados de chuva <ul style="list-style-type: none"> - Dados de pluviógrafo - Duração total da chuva Dados do meio físico <ul style="list-style-type: none"> - Comprimento de rampa ou de canal (maior) - Tempo de simulação (até o final do escoamento) - Temperatura do ar (para determinar a viscosidade cinemática da água) Elementos <ul style="list-style-type: none"> - Número de elementos que contribuem com o escoamento superficial e geração de sedimentos - Largura e Comprimento de cada elemento - Declividade média de todos os sulcos de um elemento - Dimensões das seções dos canais (consideradas trapezoidais) Dados do solo <ul style="list-style-type: none"> - Número de Manning (para encostas e canais) - Capilaridade - Porosidade - Teor de umidade volumétrica inicial - Teor de umidade máxima - Volume de fragmentos de rocha - Taxa de rugosidade - Interceptação máxima de água pela cobertura - Quantidade média de sulcos numa encosta - Dimensões médias da seção dos sulcos (consideradas trapezoidais) 	min m min °C qde m m/m m m ^{1/6} mm % % % % mm mm qde m

(continua)

(continuação)

Modelo	Parâmetro	Unidade
EUROSEM	- Cobertura vegetal	%
	- Altura da cobertura vegetal	m
	- A profundidade de camadas inferiores mais resistentes	m
	- Tamanho médio das partículas de solo	μm
	- Destacamento de partículas de solo pelas gotas de chuva (método da bandeja coletora de MORGAN, 1982)	g/cm^2
	- Energia da chuva	J/cm^2
	- Coesão do solo (destacamento de partículas pelo fluxo)	kPa
	- Condutividade hidráulica	mm/h
	- Capilaridade efetiva	mm
	- Perda de solo (peso específico das partículas)	g/cm^3
KINEROS	Dados de chuva	
	- Período de tempo do evento	min
	- Quantidade de chuva acumulada	mm ou pol.
	- Intensidade de chuva	mm/h ou pol/h
	Dados hidrológicos	
	- Comprimento e largura do plano considerado	m
	- Declividade	%
	- Coeficiente de Manning	
	- Rugosidade (altura média e espaçamento do microrrelevo)	mm
	- Interceptação	mm ou pol.
	- Cobertura vegetal	%
	- Grau de saturação do solo	%
	- Espessura da camada de solo (comporta somente 2 camadas)	mm ou pol.
	- Condutividade hidráulica	mm/h ou pol/h
	- Capilaridade média	mm ou pol.
	- Porosidade	%
	- Volume de fragmentos de rocha	%
	- Coeficiente de destacamento de partículas de solo por gotas de chuva	
	- Coesão do solo	
	- Tamanho das partículas, fração de cada classe	%
	Dados de canais	
	- Dimensões das seções dos canais	m
	- Declividade dos canais (longitudinal)	%
	- Declividade das paredes laterais dos canais	%

(continua)

(continuação)

Modelo	Parâmetro	Unidade
KINEROS	<ul style="list-style-type: none"> - Taxa de infiltração inicial - Vazão no final do canal - Volume inicial de armazenamento de água na superfície 	m^3/s m^3
EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model)	<p>Dados da chuva</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de distribuição de chuva - Quantidade de chuva em 24 h <p>Identificação</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dados de identificação da voçoroca <p>Dados do meio físico</p> <ul style="list-style-type: none"> - Área drenada da voçoroca - Comprimento da bacia - Comprimento de fluxo concentrado (representa o comprimento máximo que a voçoroca pode atingir) - Declividade da bacia - Declividade do fluxo concentrado - "Curve number", associado ao uso do solo - Cobertura do solo <p>Dados do solo</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe do solo - Erodibilidade (fator de erodibilidade do canal) - Tensão de cisalhamento crítica - Diâmetro das partículas - Massa específica do solo - Massa específica dos sólidos - Número de Manning (sugerido pelo programa com base no tipo de solo, teor de argila e práticas agrícolas ou determinado pelo usuário) - Profundidade máxima (com base na profundidade estimada para uma camada de solo limitada pela profundidade da voçoroca) - Largura da terra, adjacente à EG, a partir da qual o solo é usado para preencher o canal durante operações agrícolas 	
MEFIDIS (Modelo de Erosão Físico Distribuído)	<p>Dados da chuva</p> <ul style="list-style-type: none"> - Intensidade da chuva - Duração da chuva <p>Dados do local</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grau de saturação - Declividade 	mm/h min $\%$ m/m

(continua)

(conclusão)		
Modelo	Parâmetro	Unidade
MEFIDIS	Dados do solo	
	- Profundidade	m
	- Porosidade	%
	- Pressão de capilaridade	cm/s
	- Taxa de infiltração	cm/h
	- Diâmetro médio das partículas (D_{50})	mm
	- Tensão crítica de cisalhamento	kPa
	- Quantidade de argila	%
	Dados de uso do solo	
	- Rugosidade, por número de Manning	
	- Cobertura vegetal	%
	- Cobertura por pavimento	%
	- Capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS)	mm
	- Interceptação de água pelas plantas	mm
	Dados de canais	
	- Largura do canal	
	- Rugosidade, por número de Manning	

Por meio da amostra escolhida e apresentada no Quadro 10, constata-se que certos parâmetros são requeridos por todo modelo de erosão. Como exemplo pode-se citar dados geométricos do terreno (declividade, rugosidade); dados do solo (tipo de solo, granulometria, porosidade, condutividade hidráulica, teor de umidade e tensão crítica de cisalhamento); dados de chuva (quantidade, sempre e intensidade, muitas vezes), além de cobertura vegetal e uso do solo (em vários modelos).

3.3. Tipo de Solo

O tipo do solo pode ser definido com os ensaios de granulometria, massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica natural do solo (ρ) e massa específica do solo seco (ρ_d), além da definição de outros índices físicos: índice de vazios (e) e a porosidade (n), grau de saturação (S) e umidade volumétrica (θ).

Os ensaios de granulometria foram executados de acordo com as Normas Brasileiras: NBR 7181 (Solo: Análise granulométrica. Método de ensaio) e NBR 5734 (Peneiras para Ensaios com Tela Metálica. Especificações) e a classificação dos solos seguiu a norma brasileira NBR 6502 – Rochas e Solos: Terminologia. Os ensaios para obtenção da massa específica dos sólidos (ρ_s) foram executados de acordo com a Norma Brasileira NBR 6508 (Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica).

A massa específica natural do solo (ρ) e a massa específica do solo seco (ρ_d) foram obtidas por meio de retirada de amostras indeformadas em forma de cilindro, utilizando-se pedaços de tubos de PVC rígido como forma. No laboratório a amostra foi arrasada na forma (Figura 5), pesada em seu estado natural, depois desfeita num recipiente de alumínio e levada à estufa para secagem. O anel foi pesado e suas dimensões anotadas para o cálculo do seu volume. Assim, dividindo-se o peso da amostra natural, subtraído o peso do anel, pelo volume do anel obteve-se a massa específica natural do solo (ρ). De forma similar, dividindo-se o peso do solo seco pelo volume do anel obteve-se e a massa específica do solo seco (ρ_d).

Os demais índices físicos foram obtidos em função dos já citados e dos perfis de umidade cujo método de obtenção será descrito adiante.

Figura 5: Amostra indeformada preparada para definição da massa específica natural do solo (ρ): (a) vista superior da amostra; (b) vista lateral, mostrando a identificação da amostra e (c) vista inferior da amostra.

3.4. Resistência do Solo

3.4.1. Ensaio com Penetrômetro Dinâmico

A resistência do solo à penetração foi obtida por meio de ensaios com Penetrômetro Dinâmico (Vanags et al. 2005), adotando o desenho do equipamento conforme Herrick et al. (2002), ilustrado na Figura 6.

O equipamento utilizado é composto de uma base, uma haste maior (que penetra no solo), outra menor (que serve de guia para o martelo) um martelo, um cone de penetração e anéis (que funcionam como limites para o martelo). O peso do martelo utilizado nos ensaios aqui analisados foi de 5 kg, enquanto o conjunto hastes mais anéis pesava 5,50 kg. As dimensões do cone de penetração são: $\phi = 2,5$ cm e inclinação de 44° . O comprimento da haste maior é de 2,00 m e da menor aproximadamente 1,00 m, garantindo a altura de queda do martelo de 60 cm. Ambas as hastes tem diâmetro de 20,5 mm. O diâmetro da ponteira é maior que o da haste para neutralizar o efeito do atrito lateral (Cassan, 1982; Sanglerat, 1967).

A resistência à penetração do solo (R) (Equação 18) e a densidade de energia acumulada (E_d) (Equação 19) foram gerados utilizando-se as equações consideradas por Vanags et al. (2005).

$$R = \frac{mgH}{A\Delta z} \frac{m}{m + m'} \quad (18)$$

Onde, R é a resistência à penetração (Pa), A é a área da base do cone (m^2), g é a constante da aceleração da gravidade (igual a $9,81 \text{ m s}^{-2}$), m é a massa do martelo (kg), m' a massa das hastes mais anéis (kg), H é a altura de queda do martelo (cm) e Δz a profundidade de penetração para um golpe do martelo (m).

$$E_d(z) = N \frac{mgH}{A} \frac{m}{m + m'} \quad (19)$$

Onde, E_d é a densidade de energia acumulada (J m^{-2} ou N m^{-1}), N é o número de golpes necessários para se alcançar a profundidade z , dada em metros. A Equação 18, proposta por Vanags et al. (2005) foi adotada neste trabalho por dois fatores: por se aproximar das equações propostas por Herrick and Jones (2002) e Vaz and Hopmans (2001) e por considerar a área do cone.

Figura 6: Ensaio com penetrômetro dinâmico.

3.5. Taxa de Infiltração de Água No Solo

Das maneiras de obtenção da taxa de infiltração de água no solo conhecidas, optou-se por obtê-la com ensaios realizados *in situ*. Desta forma, trabalhou-se com o infiltrômetro de duplo anel e, em alguns casos, com o tubo de Guelph. Optou-se por tais tipos de ensaio por serem ambos, dos mais utilizados atualmente na medida de infiltração e por apresentarem vantagens como a de possibilitar o fluxo de água através de volumes grandes de materiais geológicos, representando melhor a geometria porosa, além da simplicidade e facilidade de execução.

3.5.1. Ensaio com Infiltrômetro de Duplo Anel (IAD) (ASTM-D 3385)

Para realização do ensaio são utilizados dois anéis metálicos com 60 e 30 centímetros de diâmetro, cravados no solo de forma concêntrica, um tambor graduado para alimentação de água, mangueiras e cronômetro.

O tambor graduado é ligado por mangueira ao anel menor (interno) que define a área de infiltração, considerada vertical (Figura 7B). A alimentação de água no anel maior

(externo) tem a função de saturar a área circundante ao anel menor para garantir que a infiltração aconteça na vertical.

A Figura 7 apresenta os equipamentos utilizados no ensaio (Figura 7A) e o processo de infiltração da água no solo (Figura 7B), demonstrando o comportamento ideal de infiltração. Como pode ser observado na Figura 7B o propósito do anel exterior foi promover um fluxo dimensional gravitacional do anel interno.

Figura 7: Infiltrômetro de Anel Duplo (IAD): A – Equipamento do Ensaio; B – Processo de Infiltração do Solo; Comportamento Ideal da Infiltração da Água pelo Anel Interno (B_1) e Externo (B_2)
Fonte: Modificado de Gomes (2002).

A Figura 8 mostra um ensaio com infiltrômetro de Duplo Anel em andamento, com os anéis cravados no solo e o tambor com marcador de nível d'água. Enquanto a Figura 9 mostra uma vista superior dos anéis concêntricos. Vale observar o nível d'água do anel externo mais baixo que do anel interno e a bóia neste anel que tem a função de manter o nível d'água constante. É importante manter o anel externo com água durante todo o ensaio.

Figura 8: Ensaio com Infiltrômetro de Duplo Anel (D.A.).

Figura 9: Vista superior do ensaio com Infiltrômetro de Duplo Anel (D.A.).

3.5.1.1. Procedimento do ensaio

Os anéis são cravados aproximadamente 5cm no solo e cheios d'água com uma lâmina conhecida e mantida a nível constante. A lâmina do anel externo deve ficar abaixo da lâmina do anel interno.

Iniciando-se o ensaio, leituras de volume infiltrado devem ser feitas nos primeiros minutos com pequenos intervalos de tempo, pois a tendência da infiltração é de iniciar com uma grande vazão, que diminui gradativamente até atingir valores aproximadamente constantes. Nas próximas leituras, portanto, os intervalos de tempo podem ser maiores. A vazão é calculada com o volume infiltrado em função do tempo.

O tempo de execução do ensaio depende das condições próprias do terreno, ou seja, do tipo de material onde será realizado o ensaio, suas características físicas e químicas, e sua espessura. Na prática, o término do ensaio é definido quando as leituras apresentam um comportamento constante do volume infiltrado.

O resultado do ensaio é uma curva de infiltração, da qual se obtém a taxa de infiltração como o valor constante de vazão.

3.6. Erodibilidade

A erodibilidade do solo foi medida por meio de ensaios de laboratório e por meio da coleta de sedimento gerado com a chuva simulada.

3.6.1. Ensaios de Erodibilidade em laboratório

A erodibilidade foi definida em laboratório a partir do ensaio de absorção d'água (Figura 10) e do ensaio de Perda de Massa por Imersão (Figura 11) (Nogami e Villibor, 1979).

O resultado da quantidade de massa perdida em função da capacidade de absorção do solo (E52) define o índice de erodibilidade do solo. Segundo Nogami e Villibor, (1979) se o E52 for maior que 1, o solo tem baixa erodibilidade e se for menor que 1, o solo tem alta erodibilidade. Pejon (1992) adaptou esse índice, criando o índice E40. Na análise dos resultados foram considerados ambos os índices.

Figura 10: Ensaio de absorção de água.

Figura 11: Quantificação da perda de massa do solo.

3.6.2. Coleta e Armazenamento de Escoamento Superficial e Sedimento Gerado

O ensaio com simulador de chuva foi realizado para fornecer dados de entrada em modelos de erosão, tais como: início de empoçamento, início do escoamento superficial (*runoff*) taxa de infiltração do solo, escoamento superficial e quantidade de sedimento gerado.

O início de empoçamento (*podang*) foi medido visualmente a partir do início do ensaio até começar a sobrar água empoçada na superfície.

O escoamento superficial e sedimento gerado eram coletados com um recipiente plástico, colocado na boca da área demarcada (Figura 12). O recipiente era colocado na posição por um período pequeno de tempo, variando entre 20 segundos e 2 minutos, de acordo com a vazão no momento da coleta, a fim de garantir medidas mais confiáveis. Assim, para vazões maiores a medida foi feita em tempo menor, enquanto para vazões menores a medida foi feita em tempo maior.

A amostra coletada era armazenada em potes plásticos (Figura 13) e levada ao laboratório para se medir o volume de escoamento superficial e a massa de sedimento gerada. Cada pote tem capacidade de aproximadamente 3 litros.

O volume de líquido mais sedimento de cada pote foi medido com auxílio de uma proveta. Em seguida esses volumes ficaram em descanso por uma semana para que a massa de solo sedimentasse. Assim, o excesso de água foi retirado com uma bomba de vácuo e o restante colocado em tigelas para serem levadas à estufa. As amostras foram pesadas depois de permanecerem por no mínimo 48 horas na estufa.

Figura 12: Recipiente de coleta do escoamento superficial e do sedimento gerado.

Figura 13: Pote de armazenamento do escoamento superficial e sedimento gerado.

3.7. Perfis de Umidade do Solo

Os perfis de umidade do solo foram gerados a partir de amostras deformadas retiradas no local e levadas ao laboratório no mesmo dia da coleta, ou no máximo no dia seguinte. Em laboratório coletaram-se quantidades em pequenas formas (do tipo usada para fazer salgadinhos) pesando-as e levando-as para a estufa. Vinte e quatro horas mais tarde a massa foi pesada seca, definindo-se o teor de umidade de cada profundidade do perfil como sendo a divisão da massa seca pela massa coletada no campo. A Figura 14 mostra, ao fundo, sacos plásticos contendo amostras vindas do campo e as pequenas formas com a massa que será levada à estufa. O exemplo apresentado é de um perfil do solo no estado úmido, ou seja, realizado após um ensaio com água, que pode ser o de infiltrômetro de duplo anel, ou com simulador de chuva.

Figura 14: Sacos plásticos contendo as amostras deformadas vindas do campo e pequenas formas pesadas, posteriormente levadas à estufa para secagem.

3.8. Simulador de Chuva e Coleta de Sedimento

Este item descreve a metodologia utilizada nos ensaios com simulador de chuva. Descreve, portanto, o equipamento desenvolvido, a área delimitada para o ensaio, a forma de coleta do escoamento superficial e de sedimento gerado e, finalmente, a especificação do equipamento. No próximo item será descrito a forma de medida de declividade e rugosidade.

3.8.1. Equipamento

O simulador de chuva é basicamente formado por um bico suspenso por um tripé e alimentado por uma bomba que conduz a água até a saída por meio de uma mangueira. Adicionalmente têm-se equipamentos que auxiliam no ensaio, como os medidores de chuva, os recipientes para coleta e armazenamento, tanto do escoamento superficial quanto do sedimento gerado, e placas que são cravadas para delimitar a área ensaiada (Figura 15 e Figura 16).

Figura 15: Vista geral do ensaio com Simulador de Chuva.

Figura 16: Vista da área do ensaio.

3.8.1.1. Bico

Foram testados 4 bicos *Fulljet* diferentes, fabricados por *Spraying Systems Co.*, modelos 30W-GG, 50W-GG, 16W-HH e 47W-H. A especificação dos bicos utilizados, segundo o fabricante, encontra-se na Tabela 3 e alguns detalhes do bico 50W-GG são apresentados na Figura 17 e na Figura 18.

Tabela 3 Descrição dos Bicos Utilizados no Simulador de Chuva.					
Modelo	Conexão de entrada do bico (pol)	Diâmetro máximo de passagem livre (mm)	Pressão (bar)	Capacidade (l/min)	Ângulo (graus)
30W-GG	½	2,8	1,0	13,4	108° - 120°
			2,0	18,1	
50W-GG	½	4,0	1,0	22,0	112° - 120°
			2,0	30,0	
16W-HH	1 ¼	6,3	1,0	83,0	116° - 121°
			2,0	113,0	
47W-H	2	11,1	1,0	245	119° - 124°
			2,0	335

Figura 17: Detalhe do bico 50W utilizado no simulador de chuva.

Figura 18: Detalhe do bico 50W utilizado no simulador de chuva.

O nivelamento do bico era feito com auxílio de um nível vertical, do tipo nível de pedreiro, preso ao alto do tripé (Figura 19 e Figura 20). A corda que sustenta o nível vertical era alinhada com o tubo de chegada do bico, em duas direções. Após a montagem e nivelamento do bico, o nível vertical era retirado.

Figura 19: Detalhe do nível vertical utilizado para nivelar o bico.

Figura 20: Detalhe da corda que sustenta o nível vertical, alinhada com o tubo de chegada do bico.

3.8.1.2. Tripé

O tripé tem todas as hastes móveis para uma boa adaptação em terrenos com diferentes declividades. Cada haste tem comprimento variável entre 4 e 7 m (Figura 21). Em volta do tripé acrescentou-se uma cortina de tela do tipo *sombrite* para diminuir a ação do vento na chuva simulada. Essa medida visou dificultar que o vento desviasse a chuva da área delimitada (Figura 15), pois a tela reduz o efeito do vento, mas não o impede totalmente. A tela utilizada tem eficiência de 50%.

A montagem do tripé era executada de forma que a projeção do bico ficasse no centro do quadrado de 3 por 3 metros formado pelo limite da área ensaiada, que já se encontrava montada. Esse ponto projetado é considerado o centro do ensaio, por ser o centro da área

molhada. Aparentemente o mais correto seria coincidir a projeção do bico, com o centro geométrico formado pelo limite da área ensaiada. Optou-se por coincidir com o centro do quadrado de 3 por 3 metros por ser esta a área principal ensaiada e por facilidade de locação do tripé. Duas linhas ortogonais foram cruzadas no quadrado para guiar essa locação.

Figura 21: Tripé montado para um teste no campo.

3.8.1.3. Determinação e Demarcação da Área de ensaio

A área delimitada para o ensaio foi definida como uma figura contendo um quadrado de 3 por 3 metros, mais um triângulo com base igual a 3 metros e altura de um metro, para direcionar o fluxo até a boca coletora (Figura 22).

Na Figura 23 estão esquematizadas as projeções do quadrado do ensaio, do bico, da área molhada e dos eixos horizontal e vertical em relação ao centro. A mesma figura apresenta esquema de distribuição dos pluviômetros, que será tratado no item 3.8.1.5.

Figura 22: Área delimitada para captação de escoamento superficial e sedimento.

Figura 23: Projeção da área ensaiada, da área molhada e dos eixos horizontal e vertical, em relação à projeção do bico (C) e, ainda, esquema da distribuição dos pluviômetros.

3.8.1.4. Elementos Utilizados na Delimitação da Área Ensaçada

Nos primeiros ensaios, para delimitar a área ensaiada e para evitar a fuga de escoamento, utilizaram-se chapas metálicas de alumínio, do tipo usado na fabricação de calhas para telhado, com altura de 20 cm e espessura de aproximadamente 0,5 mm. Alguns problemas foram observados, sendo o maior deles a quantidade de sedimento destacado com a cravação das chapas, acarretando em um efeito de borda acima do aceitável. Outro problema encontrado refere-se à cravação das chapas que era feita com uma marreta e, mesmo utilizando-se um pedaço de caibro para aliviar o impacto na chapa, esta sofria deformações que dificultavam sua reutilização. Assim, adotaram-se, como elemento de borda, segmentos de chapas mais resistentes, com aproximadamente um metro de comprimento, 20 cm de altura e 2 mm de espessura (Figura 24). Dividindo-se as chapas em pequenos segmentos garantiu-se um encaixe melhor com o terreno. A dificuldade era devida à rugosidade dos locais ensaiados. Utilizando-se uma chapa mais espessa pôde-se criar uma lâmina cortante no lado a ser cravado, fazendo com que a cravação provocasse menor destacamento de solo. Do outro lado a chapa foi dobrada, aumentando sua resistência aos golpes de cravação. Como medida de prevenção para que a água da chuva não saísse ou entrasse pelas intersecções dos segmentos, utilizou-se massa de calafetar entre as chapas.

Figura 24: Segmentos de chapa utilizados para delimitação da área ensaiada.

3.8.1.5. Pluviômetros

Para quantificar a chuva gerada, alguns pluviômetros eram distribuídos pela área ensaiada ou nas proximidades. Os pluviômetros foram construídos com provetas de capacidade de 1000 ml e funis plásticos de diâmetro igual a 18,90 cm (Figura 25).

Os pluviômetros eram dispostos sempre em relação ao centro do quadrado da área ensaiada, ou seja, da projeção do bico. Portanto, a posição do pluviômetro poderia ser à direita ou à esquerda do centro, acima ou abaixo do centro, ou ainda, ao centro, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 25: Pluviômetros.

3.8.1.6. Bombas, Mangueiras e Fonte de Água

Foram usadas nos testes de especificação e nos ensaios duas motobombas auto-escorvantes de 2 e 4 tempos (Figura 26 e Figura 27), com vazão máxima de 33 e 60 m³/h, respectivamente, que a seguir serão denominadas como bomba grande a de vazão 60 m³/h e bomba pequena a de 33 m³/h.

Figura 26: Detalhe da bomba pequena, de 2 tempos.

Figura 27: Detalhe da bomba grande, de 4 tempos.

A bomba grande é alimentada por uma mangueira de sucção de $\phi = 3,0''$ e tem como saída uma mangueira de $\phi = 2,0''$. Já a bomba pequena é alimentada e tem como saída mangueiras de $\phi = 1,5''$. Esses dados estão diretamente ligados à pressão medida na saída da bomba e à vazão que chega ao bico. A medida da pressão era feita na saída da bomba por facilidade de acesso, uma vez que um manômetro na saída do bico ficaria inviável de ser consultado, e também por considerar-se desprezível a perda de carga na mangueira para a definição da intensidade de chuva.

As mangueiras de sucção são curtas, com até 2 m de comprimento, enquanto as mangueiras que alimentavam o bico tinham comprimento variando entre 20 e 100 m, dependendo da distância da fonte de água até o local ensaiado.

Nos testes realizados no campus da EESC, utilizou-se como fonte, uma caixa d'água de 2.000 litros abastecida por água da torneira do prédio (Figura 28). Isso foi possível porque cada teste era feito em pequenos intervalos de tempo. Esse tempo variava de acordo com a vazão do bico. Em outros testes que foram realizados numa fazenda próximo a São Carlos, um lago serviu como fonte de água. A água era captada com a bomba maior, que abastecia a caixa d'água, que por sua vez alimentava o bico com a bomba pequena.

Já nos ensaios de fato (de geração de sedimento), utilizou-se como fonte de água, na grande maioria das vezes, tanques com capacidade entre 7.000 e 15.000 litros. Da mesma forma o tanque abastecia a caixa d'água que fornecia água para a bomba alimentar o bico (Figura 29).

Figura 28: Vista geral de um teste realizado no campus da EESC. Notar a caixa d'água e a bomba no canto direito da foto.

Figura 29: Tanque de 7.000 litros enchendo a caixa d'água que abastece o simulador de chuva.

3.8.2. Especificação do Simulador de Chuva

Especificar o simulador de chuva significa definir um método para escolha das condições do equipamento necessárias para se gerar determinados intervalos de intensidade de chuva.

As variáveis envolvidas na definição da quantidade de chuva gerada por um simulador são muitas: o tamanho do bico, a altura que fica o bico em relação ao terreno, a pressão e vazão da bomba, qualquer elemento que possa atrapalhar o bom funcionamento da bomba, como qualidade da gasolina, tempo de utilização do óleo, *etc.* e até a declividade do terreno. Nem todas, porém, podem ser controladas inteiramente. Portanto, a especificação foi feita com o intuito de se obter valores aproximados de chuvas que se desejava gerar nos ensaios. Assim, optou-se por realizar ensaios controlando-se o tamanho do bico, sua altura em relação ao terreno, a vazão e pressão da bomba e um mínimo de cuidados com a bomba a fim de evitar mudanças bruscas durante seu funcionamento. Por se trabalhar com diferentes declividades de terreno optou-se por desprezar essa variável na definição da chuva a ser simulada. Considerou-se desprezível, também, a perda de carga na mangueira, portanto a pressão era medida na saída da bomba.

A altura do bico influencia diretamente na intensidade da chuva, mas é ela também que define a área coberta pela chuva, a área molhada. Para uma mesma pressão, quanto mais alto o bico menor a intensidade de chuva e menor também a área molhada. Diminuindo-se demasiadamente a altura do bico, a área molhada também diminui.

Para cada um dos 4 bicos, foi realizada uma série de testes variando-se, principalmente, a altura do bico e a pressão da bomba. Com o intuito de avaliar a intensidade e distribuição da chuva simulada, foram espalhados pluviômetros pela área molhada. Tal distribuição respeitou o limite da área a ser cercada nos ensaios, de um quadrado de 3 por 3 metros, incluindo o triângulo (com base de 3,0 m e altura de 1,0 m) de convergência do fluxo (ver item 3.8.1.3, Figura 22). A área molhada deveria, portanto, ter um diâmetro mínimo de 5 m, de forma a garantir que toda a área cercada recebesse chuva. Desta forma, os pluviômetros foram dispostos no máximo a 2,0 m do centro da área molhada, ou da projeção do bico.

A maioria dos testes com o simulador de chuva foi realizada na Escola de Engenharia de São Carlos, campus da Universidade de São Paulo.

3.8.2.1. Medidas de Intensidade de Chuva

As intensidades de chuva foram calculadas a partir do volume coletado nos pluviômetros, já descritos anteriormente. Anotavam-se intervalos fixos de volume (V) no béquer e o tempo (t) corrido para atingir cada volume. Conhecendo-se o diâmetro do funil, tem-se a área de captação da chuva pelo pluviômetro. Assim, a intensidade de chuva medida foi calculada conforme a Equação 20.

$$I_{Pi} = \left(\frac{\left(\frac{dV}{A_f} \right) * 10}{dt} \right) * 3600 \quad (70)$$

Onde I_{Pi} é a intensidade de chuva medida no pluviômetro i , em mm/h; dV é a diferença entre os volumes medidos (em ml); A_f é a área do funil e dt é a diferença entre os tempos de cada medição (em segundos).

As intensidades médias de chuva de cada pluviômetro foram calculadas como a média simples de todas as medidas lidas nos pluviômetros em cada teste.

3.8.2.2. Intensidades de Chuva Simuladas Nos Ensaios

Os testes realizados com o simulador de chuvas orientaram a definição das chuvas que seriam simuladas nos ensaios. Nos testes adotou-se o valor da intensidade média do pluviômetro localizado mais próximo ao centro, para definir os valores sugeridos para os ensaios.

Como resultado dos ensaios, porém, procurou-se representar melhor a distribuição da chuva simulada na área ensaiada, para obter medidas condizentes com as dos demais dados, o escoamento superficial, a infiltração da água no solo e a geração de sedimentos, os quais foram medidos em função da área ensaiada. Desta forma optou-se por definir a intensidade média de chuva do ensaio como a média ponderada das intensidades médias de chuva medidas em cada pluviômetro. Considerou-se a intensidade medida em um pluviômetro com peso inversamente proporcional à distância que este se encontrava do centro do ensaio, ou seja, da projeção do bico.

O cálculo da média ponderada é descrito a seguir. Considerando-se a distância i (d_i) do pluviômetro i (P_i) correspondente, em função das projeções horizontal (x_i) e vertical (y_i) (Figura 30), chega-se à equação 21.

$$d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (21)$$

Para se calcular a média ponderada das intensidades médias de chuva dos pluviômetros de um ensaio é necessário se definir o peso da distância de cada um, que, como foi dito, é inversamente proporcional. Então, seja g_i o inverso da distância i (d_i) do pluviômetro i (P_i), conforme a Equação 22.

$$g_i = 1 - \left(\frac{d_i}{\sum d_i} \right) \quad (22)$$

Finalmente, a intensidade média do ensaio (I_{me}) é calculada pela média ponderada das intensidades médias dos pluviômetros (I_{mPi}), conforme Equação 23.

$$I_{me} = \frac{(I_{mP1} \times g_1) + (I_{mP2} \times g_2) + \dots + (I_{mPi} \times g_i)}{\sum g_i} \quad (23)$$

Um esquema da locação dos pluviômetros, com suas respectivas projeções horizontal e vertical, é apresentado na Figura 30. A Figura 31 ilustra a disposição dos pluviômetros num ensaio montado. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

Figura 30: Esquema da locação dos pluviômetros nos ensaios com simulador de chuva.

Figura 31: Montagem do ensaio 7.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

3.9. Declividade e Rugosidade do Terreno

3.9.1. Levantamento da Declividade e Rugosidade do Terreno

Inicialmente o contorno da área do ensaio foi demarcado com pontaletes de madeira e barbante. Em seguida, definiu-se um plano horizontal formado por uma malha de pontos com espaçamento de 25 cm na horizontal e 10 cm na vertical, em planta (Figura 32), considerando-se a vertical coincidindo com a declividade do terreno. A Figura 32 mostra a malha de pontos, que contou com 13 eixos verticais e 41 eixos horizontais. O levantamento da superfície possibilitou a definição da declividade, do índice de rugosidade e, conseqüentemente, da capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS), para cada área ensaiada.

Figura 32: Esquema da distribuição dos eixos para definição da malha de medidas de alturas para cálculo de RR.

O levantamento da superfície foi feito com o auxílio de uma mangueira de nível, pequenas estacas metálicas, trena flexível e régua (Figura 33 e Figura 34). As estacas metálicas foram cravadas em duas linhas horizontais, uma na face superior (Figura 35) e outra na face inferior (Figura 36) do contorno da área, inicialmente demarcada no terreno, e

seguiram o espaçamento de 25 cm. O plano horizontal foi definido com a ajuda da mangueira de nível e marcado em cada estaca metálica. A medição do terreno foi feita a partir desse plano, esticando-se uma trena flexível entre duas estacas e medindo-se com a régua pontos de 10 em 10 cm.

Figura 33: Medição da declividade e rugosidade do local demarcado para o ensaio.

Figura 34: Trena flexível nivelada no plano horizontal e régua medindo a diferença de altura em um ponto da malha da área ensaiada.

Figura 35: Linha superior de estacas metálicas, com marcadores (prendedores de madeira) definindo os níveis do plano horizontal.

Figura 36: Linha inferior de estacas metálicas, com marcadores (prendedores de madeira) definindo os níveis do plano horizontal e trena esticada em um dos eixos.

Desta forma foram obtidas medidas a partir dos pontos na superfície do terreno até o plano horizontal imaginário. Essas medidas subtraídas do plano inclinado, definido pela declividade do terreno, resultaram nos valores de altura da malha. A Figura 37 ilustram duas superfícies geradas a partir das alturas dos pontos da malha. O índice de rugosidade randômica (RR) foi calculado pelo método proposto por Allmaras et al. (1966), porém,

considerando algumas modificações (BERTOL et al., 2006). Utilizando-se o desvio-padrão das alturas ao invés do erro-padrão, conforme modificado por Currence & Lovely (1970) e também sem transformar os dados originais para logaritmo e sem eliminar os seus valores extremos conforme modificado por Kamphorst et al. (2000b). Com o valores de RR foram definidos os valores da máxima capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS), conforme Onstad (1984), para cada área ensaiada.

Nos primeiros ensaios (Local 1 a Local 4) o levantamento foi feito em 3 eixos verticais, com distância de 100 cm entre eles e com marcações a cada 10 cm, formando uma malha de 100x10 cm. A malha foi escolhida devido à dificuldade de levantamento dos dados. Mais tarde, porém, passou-se a utilizar a malha de 25x10 cm, com a finalidade de obter um valor de RR mais preciso. O RR é o valor do desvio padrão das alturas, portanto, quanto maior o número de dados, mais preciso será seu valor. Visto a dificuldade de levantamento dos dados e, na falta de equipamento de utilização mais fácil, optou-se por adotar a malha de 25x10 cm, considerando obter uma boa precisão dos valores de RR.

Figura 37: Superfície considerada no cálculo da rugosidade randômica (RR).

Capítulo 4: RESULTADOS DOS TESTES DE CALIBRAÇÃO DO SIMULADOR DE CHUVA (S.C.)

4.1. Resultados dos Testes

Nas tabelas a seguir (Tabela 4 a Tabela 7) é apresentado um resumo dos resultados dos testes de calibração do simulador de chuva. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com o bico 30W, a Tabela 5 os resultados do bico 50W, a Tabela 6 os resultados do bico 16W e a Tabela 7 os do bico 47W. Todas as tabelas estão ordenadas pela altura do bico. Os textos foram identificados com o número do bico utilizado, seguido de sequência ordinal cronológica em que cada intensidade média de chuva foi obtida (ex. 30.1; 30.2; etc.). Destaca-se que ora foram utilizados 2, ora 3, ora 4 pluviômetros nos ensaios. Em alguns testes fixou-se a altura do bico e a pressão da bomba, variando-se apenas a localização dos pluviômetros, em outros, variou-se apenas a pressão da bomba e em outros, ainda, fixou-se somente a altura do bico.

Para todos os bicos os testes revelaram que a distribuição da chuva simulada não é uniforme (Tabela 4 a Tabela 7). Pequenas variações no funcionamento da bomba e, principalmente, a ação do vento na chuva simulada são os fatores que influenciam na falta de uniformidade de sua intensidade.

Observa-se nos resultados que a distribuição da intensidade de chuva pode apresentar grande variação. Ver, por exemplo, o ensaio para o bico 30W com altura de 3,49 m e pressão de 3,5 bar, do dia 22/05/09 (teste nº 30.5 da Tabela 4), no qual a intensidade de chuva ao centro da área molhada foi mais que o dobro (247%) do valor medido no pluviômetro colocado à esquerda (a 1,10 m do centro) e 57% maior que a intensidade do pluviômetro da direita (a 110 m do centro).

Tabela 4: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 30W, por ordem de altura do bico.

Teste N°	Bomba	Altura do Bico (m)	Pressão da Bomba (bar)	Localização do Pluviômetro		Intensidade média da chuva (mm/h)	Desvio Padrão (D.P.)
				Lado	Dist. (m)		
30.1	Gde	2,40	1,0	AB	70	106,32	9,32
				D	100	62,22	20,76
30.2	Peq	3,47	0,8	E	20	79,56	12,27
				D	100	69,22	5,54
30.3	Peq	3,47	0,9	E	20	82,43	12,80
				D	100	65,48	9,88
30.4	Peq	3,47	1,0	E	20	84,90	10,71
				D	100	79,96	12,43
30.5	Peq	3,49	3,5	E	110	80,36	19,91
				C	0	198,63	26,22
				D	110	126,54	17,38
30.6	Gde	3,75	1,0	E	150	53,15	19,01
				E	70	72,18	12,04
30.7	Gde	3,75	1,0	E	100	68,48	9,09
				D	100	46,50	13,46
30.8	Peq	3,90	0,7	E	20	73,16	14,23
				D	100	60,30	5,57
30.9	Peq	3,90	1,0	E	20	80,01	6,19
				D	100	59,24	9,98
30.10	Peq	3,90	1,4	E	20	72,38	13,16
				D	100	62,13	21,13
30.11	Peq	3,90	1,9	E	20	92,64	14,98
				D	100	70,97	20,95
30.12	Peq	3,94	1,5	E	20	68,97	11,68
				D	80	53,89	7,13
				AB	80	38,51	7,93
30.13	Peq	3,94	3,5	E	20	80,67	13,77
				D	80	66,98	13,32
				AB	80	45,81	6,59
30.14	Peq	3,94	3,5	E	80	76,79	21,04
				E	20	85,05	24,92
				AB	80	60,23	16,65
30.15	Gde	4,06	1,0	AC	60	68,05	10,06
				E	110	71,01	11,69
				AB	45	68,29	7,19
				D	90	53,43	17,73
30.16	Peq	4,19	1,0	E	110	63,28	16,94
				C	0	99,31	23,19
				D	110	89,64	16,24

Legenda:

Gde = grande

D = à direita

AC = acima

C = ao centro

Peq = pequena

E = à esquerda

AB = abaixo

Pn = Pluviômetro n

Tabela 5: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 50W, por ordem de altura do bico.

Teste N°	Bomba	Altura do Bico (m)	Pressão da Bomba (bar)	Localização do Pluviômetro		Intensidade média da chuva (mm/h)	Desvio Padrão (D.P.)
				Lado	Dist. (m)		
50.1	Peq	2,56	1,5	E	20	93,91	10,18
				AB	80	92,41	8,67
				D	80	88,16	11,21
50.2	Peq	2,56	2,5	E	20	112,56	27,62
				AB	80	145,89	11,26
				D	80	132,98	23,94
50.3	Peq	2,56	2,5	E	20	124,28	15,67
				AB	80	147,47	17,02
				D	80	138,10	14,46
50.4	Peq	2,56	2,6	E	20	121,13	14,40
				AB	80	146,48	20,46
				D	80	128,49	18,23
50.5	Peq	2,56	2,9	E	20	173,90	37,30
				AB	80	203,91	22,14
				D	80	196,79	30,53
50.6	Peq	3,08	1,0	E	80	65,59	5,25
				AC	50	69,68	7,76
				D	20	73,89	12,22
50.7	Peq	3,08	2,5	E	80	108,78	18,82
				AC	50	133,59	19,19
				D	20	120,23	16,12
50.8	Peq	3,08	2,0	E	80	100,72	12,53
				AC	50	100,69	15,91
				D	20	99,55	10,74
50.9	Peq	3,94	1,0	E	20	50,45	-
				D	80	44,55	-
				AB	80	41,13	-
50.10	Peq	3,94	2,0	E	20	54,77	6,57
				D	80	54,34	10,10
				AB	80	48,60	5,24
50.11	Peq	3,94	2,0	AC	80	60,76	10,93
				E	80	57,00	5,25
				E	20	58,40	5,07
50.12	Peq	3,94	3,0	E	20	62,28	8,48
				D	80	63,57	5,84
				AB	80	52,75	5,49
50.13	Peq	3,94	3,0	AC	80	68,45	3,46
				E	80	61,75	23,65
				E	20	59,97	23,94
50.14	Peq	3,94	4,0	E	20	65,58	10,22
				D	80	57,01	13,78
				AB	80	51,03	9,91

Legenda:

Gde = grande

D = à direita

AC = acima

C = ao centro

Peq = pequena

E = à esquerda

AB = abaixo

Pn = Pluviômetro n

Tabela 6: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 16W, por ordem de altura do bico.

Teste Nº	Bomba	Altura do Bico (m)	Pressão da Bomba (bar)	Localização do Pluviômetro		Intensidade média da chuva (mm/h)	Desvio Padrão (D.P.)
				Lado	Dist. (m)		
16.1	Gde	2,42	1,0	AC	150	439,77	65,38
				D	150	289,66	24,35
				AB	50	418,77	64,73
				E	200	365,77	117,58
16.2	Gde	2,42	1,0	AC	175	433,64	91,97
				D	150	226,96	33,63
				AB	25	325,59	34,28
				E	200	296,36	74,98
16.3	Gde	2,42	1,0	AC	70	392,70	22,62
				D	170	265,63	21,59
				AB	150	261,57	30,13
				E	100	239,55	12,54
16.4	Gde	2,42	1,5	AC	150	583,75	75,50
				D	150	371,15	47,45
				AB	50	420,46	54,80
				E	200	256,75	67,94
16.5	Gde	2,73	1,0	AB	70	344,49	22,62
				D	150	171,88	8,68
16.6	Gde	2,73	1,0	AB	70	371,29	29,93
				D	150	253,62	28,75
16.7	Gde	2,73	2,0	AB	70	435,10	45,73
				D	150	200,50	11,97
16.8	Peq	4,28	0,5	E	50	181,20	32,33
				D	150	164,08	28,35
16.9	Peq	4,28	1,4	E	50	256,91	19,71
				D	150	164,62	32,96

Legenda:

Gde = grande

D = à direita

AC = acima

C = ao centro

Peq = pequena

E = à esquerda

AB = abaixo

Pn = Pluviômetro n

Tabela 7: Definições e resultados dos testes realizados para o bico 47W, por ordem de altura do bico.

Teste Nº	Bomba	Altura do Bico (m)	Pressão da Bomba (bar)	Localização do Pluviômetro		Intensidade média da chuva (mm/h)	Desvio Padrão (D.P.)
				Lado	Dist. (m)		
47.1	Gde	4,10	1,0	AB	45	550,86	73,72
				D	130	550,86	73,72
				AC	130	421,38	43,39
				E	170	372,03	58,81

Legenda:

Gde = grande

D = à direita

AC = acima

C = ao centro

Peq = pequena

E = à esquerda

AB = abaixo

Pn = Pluviômetro n

Os testes realizados com o bico 16W, para uma pressão da bomba de 1,0 bar (testes nº 16.1; 16.2 e 16.3 da Tabela 6), revelaram que na direção vertical (acima e abaixo do centro da área molhada) as intensidades de chuva foram maiores que na direção horizontal (à direita e à esquerda do centro da área molhada). Nesses testes variou-se apenas a localização dos pluviômetros. Na direção vertical, pode-se observar que não houve grande variação da intensidade de chuva nas diversas localizações dos pluviômetros acima do centro da área molhada. O mesmo não aconteceu, porém, abaixo do centro, onde houve grande variação entre as intensidades nas diversas localizações. Na direção horizontal houve menor variação das intensidades de chuva, quando diversificadas as localizações dos pluviômetros.

Como foram mantidas as mesmas condições de funcionamento nos três testes, observa-se a influência do vento na distribuição da chuva. Durante esses três testes o vento variou em direção e sentido. Quase todos os testes com o simulador de chuva foram realizados em área urbana, enquanto os ensaios de fato foram realizados na área rural, em áreas de pastagem e, portanto, com menor proteção ao vento. Observou-se que a variação na direção e sentido do vento na área urbana ocorre com maior frequência, dentro de intervalo de tempo de algumas horas, enquanto no campo essa variação demora mais a acontecer. Por outro lado, os resultados mostraram que pequenas variações na pressão da bomba não têm influência significativa na intensidade da chuva simulada, como pode ser observado nos testes nº 30.1 a 30.5 da Tabela 4, para o bico 30W com altura de 3,47 m, pressões da bomba de 0,8, 0,9 e 1,0 bar e com a mesma disposição dos pluviômetros.

Quanto à escolha da bomba, a grande foi utilizada inicialmente com os bicos 30W, 16W e 47W e a pequena com os bicos 30W, 50W e 16W. Para os bicos 30W e 16W (Tabela 4 e Tabela 6), com os quais foram realizados testes com as duas bombas, observa-se que a utilização da bomba pequena ou da grande não tem influência aparente na definição da intensidade da chuva.

Tabela 8: Resultados de todos os bicos, para os pluviômetros localizados num raio de 75 cm, por ordem de intensidade de chuva simulada.

Teste Nº	Bomba	Altura do Bico (m)	Pressão da Bomba (bar)	Localização do Pluviômetro		Intensidade média da chuva (mm/h)	Desvio Padrão
				Lado	Dist. (m)		
50.9	Peq	3,94	1,0	E	20	50,45	-
50.10	Peq	3,94	2,0	E	20	54,77	6,57
50.11	Peq	3,94	2,0	E	20	58,40	5,07
50.13	Peq	3,94	3,0	E	20	59,97	23,94
50.12	Peq	3,94	3,0	E	20	62,28	8,48
50.14	Peq	3,94	4,0	E	20	65,58	10,22
30.15	Gde	4,06	1,0	AC	60	68,05	10,06
30.15	Gde	4,06	1,0	AB	45	68,29	7,19
30.12	Peq	3,94	1,5	E	20	68,97	11,68
50.6	Peq	3,08	1,0	AC	50	69,68	7,76
30.6	Gde	3,75	1,0	E	70	72,18	12,04
30.10	Peq	3,90	1,4	E	20	72,38	13,16
30.8	Peq	3,90	0,7	E	20	73,16	14,23
50.6	Peq	3,08	1,0	D	20	73,89	12,22
30.2	Peq	3,47	0,8	E	20	79,56	12,27
30.9	Peq	3,90	1,0	E	20	80,01	6,19
30.13	Peq	3,94	3,5	E	20	80,67	13,77
30.3	Peq	3,47	0,9	E	20	82,43	12,80
30.4	Peq	3,47	1,0	E	20	84,90	10,71
30.14	Peq	3,94	3,5	E	20	85,05	24,92
30.11	Peq	3,90	1,9	E	20	92,64	14,98
50.1	Peq	2,56	1,5	E	20	93,91	10,18
30.16	Peq	4,19	1,0	C	0	99,31	23,19
50.8	Peq	3,08	2,0	D	20	99,55	10,74
50.8	Peq	3,08	2,0	AC	50	100,69	15,91
30.1	Gde	2,40	1,0	AB	70	106,32	9,32
50.2	Peq	2,56	2,5	E	20	112,56	27,62
50.7	Peq	3,08	2,5	D	20	120,23	16,12
50.4	Peq	2,56	2,6	E	20	121,13	14,40
50.3	Peq	2,56	2,5	E	20	124,28	15,67
50.7	Peq	3,08	2,5	AC	50	133,59	19,19
50.5	Peq	2,56	2,9	E	20	173,90	37,30
16.8	Peq	4,28	0,5	E	50	181,20	32,33
30.5	Peq	3,49	3,5	C	0	198,63	26,22
16.9	Peq	4,28	1,4	E	50	256,91	19,71
16.2	Gde	2,42	1,0	AB	25	325,59	34,28
16.5	Gde	2,73	1,0	AB	70	344,49	22,62
16.6	Gde	2,73	1,0	AB	70	371,29	29,93
16.3	Gde	2,42	1,0	AC	70	392,70	22,62
16.1	Gde	2,42	1,0	AB	50	418,77	64,73
16.4	Gde	2,42	1,5	AB	50	420,46	54,80
16.7	Gde	2,73	2,0	AB	70	435,10	45,73
47.1	Gde	4,10	1,0	AB	45	550,86	73,72

Legenda:

Gde = grande

D = à direita

AC = acima

C = ao centro

Peq = pequena

E = à esquerda

AB = abaixo

Pn = Pluviômetro n

4.2. Conclusão dos Testes com Simulador de Chuva

Para definir a especificação do equipamento, optou-se por considerar a intensidade de chuva simulada próximo ao centro da área molhada, uma vez concluído a falta de uniformidade na distribuição da chuva. Assim, a Tabela 8, apresenta, para todos os bicos, os resultados de intensidade de chuva obtidos com os pluviômetros localizados no máximo num raio de 75 cm do centro da área molhada, ou seja, num raio com a metade da distância do centro da área molhada até o limite da área ensaiada.

A partir da Tabela 8 foram definidos tipos de bicos, sua altura, a pressão e tipo de bomba a utilizar para obter diversos intervalos de intensidade média de chuva simulada.

Finalmente, a Tabela 9 apresenta um resumo dos testes, como sugestão de tipo e forma de utilização do equipamento para se simular cada intervalo de intensidade média de chuva. Convém explicar que tal resumo trata-se de sugestão, assim, certas especificações foram ignoradas por se entender que ultrapassavam um limite de coerência com as demais.

Tabela 9: Sugestão de tipo e forma de utilização de equipamento para simular diversas intensidades médias de chuva.

Intensidade média da chuva (mm/h)	Bico	Altura do Bico (m)	Pressão da Bomba (bar)	Bomba
50 a 70	50W	4,00	1,0 a 3,0	Peq
	30W	4,00	1,0 a 1,5	Gde
70 a 90	50W	3,00	1,0	Peq
	30W	3,50	1,0 a 3,0	Peq
90 a 110	50W	3,00	2,0 a 3,0	Peq
	30W	4,00	1,0 a 2,0	Peq
110 a 130	50W	2,50	2,5	Peq
170 a 200	50W	2,50	3,0	Peq
	16W	4,30	0,5	Peq
220 a 250	16W	4,30	1,4	Peq
320 a 350	16W	2,55	1,0	Gde
370 a 400	16W	2,55	1,0	Gde
400 a 440	16W	2,40	1,0 a 2,0	Gde
aprox. 550	47W	4,10	1,0	Gde

Legenda: Gde = grande
Peq = pequena

Capítulo 5: RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PRIMEIRA ETAPA

Os resultados obtidos foram de dois grupos de ensaios, ou seja, realizados em duas etapas. Considera-se a primeira etapa, no ano de 2006, ensaios de caracterização da primeira área de estudo, na região de Corumbataí. Mais tarde a área sofreu modificações do uso do solo, inviabilizando a continuidade dos estudos, com a realização dos ensaios complementares, que consistiram de ensaios com Simulador de Chuva. Somente em 2 locais todos os ensaios puderam ser concluídos mais tarde, considerados da segunda etapa.

Neste capítulo serão apresentados os resultados da primeira etapa, com breve análise por local ensaiado. Em outro capítulo serão apresentados os resultados da segunda etapa, também com breve análise por local ensaiado. E em capítulo próprio será feita análise da totalidade dos ensaios do mesmo tipo das duas etapas consideradas, com o objetivo de avaliar a variabilidade de tais resultados.

5.1. Resultados dos Ensaios de Caracterização da Área de Estudos

Foram realizados ensaios em 23 locais, com o objetivo de caracterizar a área de estudo de maneira detalhada. Em cada local foi realizada uma série de ensaios, incluindo o ensaio de infiltração da água no solo (com o infiltrômetro de duplo anel), 3 ou 4 ensaios de resistência do solo à penetração (com penetrômetro dinâmico) e retirada de amostras deformadas e indeformadas para ensaios de laboratório. Amostras para obtenção do teor de umidade foram coletadas com o solo em estado natural (seco) e logo após o ensaio com duplo anel, em estado próximo à saturação (úmido). Foi realizado um número maior de ensaios de resistência do solo à penetração devido à facilidade de execução desse tipo de ensaio e para avaliar a variabilidade desse parâmetro em uma escala pontual.

Os ensaios de resistência do solo à penetração foram realizados com o solo em estado natural (seco). Imediatamente após o ensaio com duplo anel, mais um ensaio com penetrômetro era realizado no local, com o solo em estado próximo à saturação (úmido).

Nos ensaios de laboratório, as amostras deformadas geraram resultados de granulometria, massa específica dos sólidos (ρ_s) e índices físicos, como o teor de umidade (w), o índice de vazios (e), a porosidade (n) e o grau de saturação (S). Já as amostras

indeformadas de solo geraram resultados de massa específica natural do solo (ρ), massa específica do solo seco (ρ_d), a umidade volumétrica (θ) e índice de erodibilidade.

5.1.1. Denominação e Localização dos Ensaio

Inicialmente é necessário denominar os ensaios realizados nos 23 locais diferentes, distribuídos em 6 encostas. Os ensaios foram realizados na bacia do córrego do Lajeado em Corumbataí, no ano de 2006. A Tabela 1 apresenta a denominação das encostas e dos locais das séries de ensaios e a localização geográfica, o tipo de uso do solo e características de cada local. Os ensaios foram numerados de acordo com a ordem cronológica que foi realizada.

A identificação das encostas é ilustrada na Figura 38 e a distribuição dos locais ensaiados nas encostas é apresentada na Figura 39.

Tabela 10: Denominação e localização dos ensaios de caracterização da área de estudos.

Encosta	Local	Coordenadas geográficas			Uso do solo	Características do Local
		x (m)	y (m)	Altitude (m)		
E1	1	224 234 E	7 534 191 S	637	pasto	Entre cordões em nível
E1	2	224 239 E	7 534 213 S	636	pasto	Sobre cordão em nível
E1	3	224 391 E	7 534 085 S	628	pasto	Entre cordões em nível
E1	4	224 320 E	7 533 906 S	632	terra arada	-
E2	5	223 394 E	7 533 503 S	656	pasto	Entre cordões em nível
E2	6	223 421 E	7 533 480 S	660	pasto	Sobre cordão em nível
E2	7	223 428 E	7 533 521 S	664	pasto	Entre cordões em nível
E2	8	223 543 E	7 533 487 S	676	pomar	-
E2	9	223 703 E	7 533 293 S	671	pasto	Entre cordões em nível
E2	10	223 751 E	7 533 276 S	675	pasto	Entre cordões em nível
E3	11	223 902 E	7 532 923 S	668	pasto	Entre cordões em nível
E3	12	223 815 E	7 532 923 S	664	pasto	Entre cordões em nível
E3	13	223 637 E	7 532 873 S	636	pasto	Entre cordões em nível
E4	14	224 184 E	7 533 167 S	652	pasto	Entre cordões em nível
E4	15	224 230 E	7 532 974 S	640	pasto	Próximo à voçoroca
E4	16	224 242 E	7 532 950 S	639	pasto	Sobre cordão em nível
E6	17	224 315 E	7 532 855 S	642	pasto	Entre cordões em nível
E6	18	224 464 E	7 532 858 S	634	eucalipto	-
E4	19	224 428 E	7 533 433 S	640	pasto	Entre cordões em nível
E4	20	224 440 E	7 533 531 S	633	pasto	Entre cordões em nível
E4	21	224 315 E	7 533 465 S	644	pasto	Sobre caminho
E5	22	225 708 E	7 534 212 S	703	terra arada	-
E5	23	225 546 E	7 534 102 S	691	pasto	Entre cordões em nível

Figura 38: Identificação das encostas na área de estudo da região de Corumbataí.

Figura 39: Distribuição dos locais ensaiados nas encostas da área de estudo da região de Corumbataí.

Como pode ser observado na Tabela 1, a maioria dos ensaios foi realizada em solo coberto por pasto. Apenas 2 ensaios foram realizados em solo em fase de preparação para plantação de cana ou mandioca (terra arada), um foi no meio do eucalipto e um no meio de pequeno pomar localizado próximo às edificações. Na Figura 40 é apresentado um croqui demonstrando as possíveis localizações das séries de ensaios em solo coberto por pasto.

Corte A-A

Figura 40: Croqui com exemplos de localização das séries de ensaios de caracterização (planta e corte).

Das séries de ensaios realizadas em pasto, a maioria foi localizada entre cordões em nível, mas 3 localizaram-se sobre cordão em nível e uma localizou-se sobre caminho do gado.

A cavidade anterior ao cordão em nível, que aparece na planta e corte do croqui apresentados na Figura 40, formou-se com a execução do próprio cordão. Essa cavidade é formada pela retirada do solo para sua construção (Figura 41). O pasto dos locais ensaiados havia sido formado num período entre 10 e 20 anos atrás. Os cordões em nível, incluindo aqueles sobre os quais se realizou alguns ensaios, foram construídos no mesmo período da formação do pasto.

Observou-se que, na região da cava anterior ao cordão em nível, normalmente a cobertura com grama é mais rala, ou apresenta falha (Figura 41) e a água da chuva e principalmente a parcela vinda do escoamento superficial se acumulam na superfície dessa região (Figura 42). Também é uma região onde é possível encontrar sedimento acumulado, vindo da área entre cordões em nível (Figura 43). E, apesar de ter poucos metros, é uma faixa na qual a declividade aumenta em relação à declividade entre cordões. Nenhuma série de ensaios, porém, foi realizada nessa região. A situação é descrita por sua especificidade.

Figura 41: Área de pasto mostrando a faixa em cavidade anterior ao cordão em nível formada por sua construção. Observar a diferença de declividade da faixa em relação à área entre cordões em nível.

Figura 42: Área de pasto mostrando a faixa em cavidade, anterior ao cordão em nível (marcados por tracejado). Observar a água acumulada na superfície.

Figura 43: Área de pasto mostrando a faixa em cavidade, anterior ao cordão em nível (marcado por tracejado). Observar a água acumulada na superfície e o sedimento acumuladão na faixa.

5.1.2. Resultados do Local 1

Os ensaios do Local 1 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 44. A mesma figura mostra a distribuição dos ensaios do Local 2, que será apresentado adiante. Tais ensaios foram dispostos sobre o cordão em nível, próximo ao Local 1.

Figura 44: Distribuição dos ensaios no Local 1 e Local 2.

A granulometria do Local 1 apresenta um solo superficial arenoso (58% de areia fina e 32% de areia média), com 8% de argila e 2% de silte (Figura 45). Nas profundidades de 150 e 250 cm o solo é praticamente o mesmo da superfície, somente com variação nas porcentagens de areia fina (52%) e de argila (14%) (Figura 45). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 1, com o solo no estado seco, revelaram valores baixos de resistência (entre 2 e 4 MPa) nos primeiros 20 cm, aumentando para resistências máximas entre 12 e 16 MPa na profundidade entre 20 e 40 cm e, com a profundidade, tendendo para uma resistência constante de aproximadamente 4 Mpa, a partir de 80 cm (Figura 46: ensaios 1A e 1B). Na Figura 46 os valores do ensaio 1C apresentam comportamento diferente dos demais ensaios, sem motivo identificado. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 1 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície uma resistência de aproximadamente 2 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco. A melhor

comparação entre ensaios com solos em estados de umidade diferentes é do ensaio 1 (ú) com o ensaio 1A, por sua proximidade.

Figura 45: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 1, para as profundidades: 20, 150 e 250 cm.

Figura 46: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 1.

As curvas de energia acumulada (Figura 47) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para o ensaio 1B a curva de energia acumulada chega a valores de 6 MJ/m^2 , em profundidades entre 70 cm e 80 cm, enquanto a curva 1A demonstra a mesma tendência, até a profundidade de 40 cm que foi realizado o ensaio. Para o ensaio 1C a curva de energia acumulada atinge um valor máximo de $2,5 \text{ MJ/m}^2$ para a mesma profundidade. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 1 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 1 MJ/m^2 .

A taxa de infiltração do solo no Local 1 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 48), como 15 cm/h . O ensaio teve duração de 2 horas e 20 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 105 cm. Na Figura 46, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Abaixo dessa profundidade os valores de resistência do ensaio 1 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco.

Figura 47: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 1, para o solo seco e úmido.

Figura 48: Curva de Infiltração da água no solo do Local 1.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 1 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 49). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 49: Curvas de absorção d'água do Local 1, para as profundidades: 10, 30, 40, 50 e 60 cm.

5.1.3. Resultados do Local 2

A série de ensaios do Local 2 foi realizada sobre cordão em nível a aproximadamente 20 m do Local 1 (Figura 44). Como o cordão foi construído com solo do próprio local, pode-se considerar a granulometria do Local 2, igual à do Local 1.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 2, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2 e 3 MPa nos primeiros 20 cm, aumentando para resistências máximas entre 7 e 9 MPa na profundidade entre 50 e 80 cm, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 2 Mpa, a partir de 180 cm (Figura 50: ensaios 2A e 2B). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 2 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 0,5 e 2 MPa. A melhor comparação entre ensaios com solos em estados de umidade diferentes é do ensaio 2 (ú) com o ensaio 2A, por sua proximidade. No Local 2 a frente de molhamento atingiu a profundidade de 115 cm, enquanto o ensaio com penetrômetro no solo úmido chegou a apenas 83 cm.

Figura 50: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 2.

As curvas de energia acumulada (Figura 51) corroboram os resultados das curvas de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 2A e 2B as curvas de energia acumulada atingem os valores de 5 e 3,5 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 83 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 2 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 0,7 MJ/m² na profundidade de 83 cm.

A taxa de infiltração do solo no Local 2 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 52), como 10 cm/h. O ensaio teve duração de 1 hora e 50 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 115 cm.

Figura 51: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 2, para o solo seco e úmido.

Figura 52: Curva de Infiltração da água no solo do Local 2.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 2, conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 53). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 53: Curvas de absorção d'água do Local 2, para as profundidades: 30, 40, 50 e 60 cm.

Resultados do Local 3

Os ensaios do Local 3 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme Figura 54. O Local 3 pertence à mesma encosta dos Locais 1 e 2, numa cota de nível pouco abaixo dos primeiros. Desta forma, considerou-se a granulometria do Local 3, também igual à do Local 1.

Figura 54: Distribuição dos ensaios no Local 3.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 3, com o solo no estado seco, revelaram valores baixos de resistência (entre 3 e 6 MPa) nos primeiros 20 cm, aumentando para resistências máximas entre 6 e 8 MPa na profundidade entre 20 e 40 cm e, com a profundidade, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 2 MPa, a partir de 100 cm (Figura 55: ensaios 3A, 3B e 3C). Somente o ensaio 3A apresentou diminuição nos valores de resistência do solo entre 10 e 40 cm, causado provavelmente por alguma anomalia localizada, como algum ninho de insetos (formigas, cupins, etc.). O ensaio 3A mostra valores de resistência menores que os demais ensaios na profundidade entre 10 e 40 cm, aproximando-se dos demais a partir dessa profundidade. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 3 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície uma resistência de aproximadamente 2 MPa, até 40 cm, diminuindo para aproximadamente 0,5 MPa até 80 cm. A partir desta profundidade os valores do ensaio 3 (ú) tendem aos mesmos valores dos ensaios com o solo seco

As curvas de energia acumulada (Figura 56) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para o ensaio 3B a curva de energia acumulada chega a valores de $6,8 \text{ MJ/m}^2$, enquanto a curva 3A chega a $5,0 \text{ MJ/m}^2$ e a curva 3C chega a $4,7 \text{ MJ/m}^2$. Todas na profundidade de 180 cm. Já o ensaio 3 (ú), com o solo úmido, a curva atinge um valor máximo de energia acumulada de $2,7 \text{ MJ/m}^2$. A melhor comparação entre ensaios com solos em estados de umidade diferentes é do ensaio 3 (ú) com o ensaio 3A, por sua proximidade.

Figura 55: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 3.

A taxa de infiltração do solo no Local 3 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 57), como 8 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 80 cm. Na Figura 55, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Abaixo dessa profundidade os valores de resistência do ensaio 3 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco.

Figura 56: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 3, para o solo seco e úmido.

Figura 57: Curva de Infiltração da água no solo do Local 3.

5.1.4. Resultados do Local 4

Os ensaios do Local 4 foram dispostos numa terra arada, preparada para plantação de cana, distribuídos conforme Figura 58.

Figura 58: Distribuição dos ensaios no Local 4.

A granulometria do Local 4 apresenta um solo superficial arenoso (56% de areia fina e 31% de areia média), com 9% de argila e 4% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com variação nas porcentagens de areia fina (52%) e de argila (14%) (Figura 59). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 59: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 4, para as profundidades: 20 e 200 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 4, com o solo no estado seco, revelam valores baixos de resistência (entre 2 e 4 MPa) nos primeiros 20 cm, aumentando para resistências máximas entre 4 e 7 MPa na profundidade de 40 cm e, com a profundidade, tendendo para uma faixa de valores de resistência aproximadamente constantes entre 1 e 1,5 Mpa, a partir de 120 cm (Figura 60: ensaios 4A, 4B e 4C). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 4 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície um valor médio de resistência de 1 MPa, até 60 cm, aumentando para aproximadamente 2 MPa até 100 cm. Nesta profundidade os valores do ensaio 4 (ú) tornam-se próximos aos dos ensaios com o solo seco, tendendo à mesma faixa constante de valores de resistência. A frente de molhamento atingiu 100 cm, portanto a mesma profundidade a partir da qual os valores de resistência do ensaio 1 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco.

Figura 60: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 4.

As curvas de energia acumulada (Figura 61) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para o ensaio 4A a curva de energia acumulada chega a valores de 5 MJ/m^2 , enquanto a curva 4C chega a 4 MJ/m^2 . Ambas na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 4 (ú) atingiu um valor máximo de energia

acumulada de $2,3 \text{ MJ/m}^2$, para a mesma profundidade. O ensaio 4B acumulou uma energia de aproximadamente 4 MJ/m^2 em 120 cm de profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 4 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 62), como 10 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 100 cm. Na Figura 60, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Abaixo dessa profundidade os valores de resistência do ensaio 4 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco.

Figura 61: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 4, para o solo seco e úmido.

Figura 62: Curva de Infiltração da água no solo do Local 4.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 4 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 30, 40 e 50 cm (Figura 63). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 63: Curvas de absorção d'água do Local 4, para as profundidades: 30, 40 e 50 cm.

5.1.5. Resultados do Local 5

Os ensaios do Local 5 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 64. A mesma figura mostra a distribuição dos ensaios do Local 6 e Local 7, que serão apresentados adiante. Os ensaios do Local 6 foram dispostos sobre o cordão em nível, enquanto os do Local 7 foram dispostos entre cordões em nível.

Figura 64: Distribuição dos ensaios no Local 5, Local 6 e Local 7.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 5 (Tabela 11) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), não apresentou variação com a profundidade, enquanto a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram pequena variação (Tabela 11). O índice de vazios (e) e a porosidade (n) seguiram a mesma variação, diminuindo com a profundidade. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) não apresentaram variação significativa com a profundidade. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 40 cm, uma vez que em 60 cm a umidade volta a ser próxima a do perfil do solo seco (Tabela 11).

Tabela 11: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 60 cm, do Local 5.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
5.1	20	2,60	1,43	1,42	0,96	48,91	7,65	10,87	20,78	24,75	35,14	67,22
5.2	40	2,60	1,43	1,42	0,99	49,63	9,18	13,04	24,24	15,67	22,25	41,36
5.3	60	2,60	1,65	1,58	0,69	40,81	7,22	11,41	27,22	9,44	14,91	35,59

A granulometria do Local 5 foi considerada igual à do Local 7, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 5, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência crescente desde a superfície até 20 cm de profundidade onde atinge uma resistência máxima de aproximadamente 6 MPa (Figura 65: ensaios 5A e 5B). Somente os valores do ensaio 5C são diferentes dos demais ensaios, apresentando queda na resistência após 10 cm de profundidade. Provavelmente causado por anomalia localizada (formigueiro, cupinzeiro, etc.). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 5 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada

por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície um valor de resistência de 1 MPa, até 20 cm, aumentando para aproximadamente 3 MPa até 40 cm. A partir desta profundidade os valores do ensaio 5 (ú) tornam-se próximos aos dos ensaios com o solo seco, tendendo aos mesmos valores constantes de resistência. Os valores de resistências muito superiores na profundidade entre 40 e 60 cm revelaram a existência de rocha. Fato confirmado posteriormente, com a retirada de amostras indeformadas.

As curvas de energia acumulada (Figura 66) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 5A e 5B ambas as curvas de energia acumulada atingiram valores de 3 MJ/m^2 , em 60 cm de profundidade, enquanto a curva 5C chegou a $1,5 \text{ MJ/m}^2$, em 40 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 5 (ú) atingiu um valor máximo de energia acumulada de $1,2 \text{ MJ/m}^2$, em 50 cm.

Figura 65: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 5.

A taxa de infiltração do solo no Local 5 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 67), como 9 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 40 cm. Na Figura 65, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Abaixo dessa profundidade os

valores de resistência do ensaio 5 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco.

Figura 66: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 5, para o solo seco e úmido.

Figura 67: Curva de Infiltração da água no solo do Local 5.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 5 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 68). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 68: Curvas de absorção d'água do Local 5, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm.

5.1.6. Resultados do Local 6

Os ensaios do Local 6 foram dispostos sobre o cordão em nível e distribuídos conforme mostrado na Figura 64 (ver item 5.1.5).

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 6 (Tabela 12) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 12). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores constantes até a profundidade amostrada de 80 cm. A frente de molhamento atingiu a profundidade de 190 cm, por isso os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido apresentados na Tabela 12 têm grande variação em relação ao solo em estado seco.

Tabela 12: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 80 cm, do Local 6.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
6.1	20	2,60	1,54	1,50	0,72	41,99	2,10	3,15	7,55	22,94	34,41	82,40
6.2	40	2,60	1,53	1,50	0,74	42,61	2,53	3,80	8,86	16,12	24,18	56,46
6.3	60	2,60	1,66	1,63	0,60	37,61	2,33	3,80	10,05	18,95	30,89	81,75
6.4	80	2,60	1,66	1,63	0,62	38,19	3,29	5,36	13,85	14,30	23,31	60,18

A granulometria do Local 6 foi considerada igual à do Local 7, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles. A série de ensaios do Local 6 foi realizada sobre cordão em nível a aproximadamente 40 m do Local 7. O cordão em nível foi construído com solo do próprio local, mais um motivo para a granulometria do Local 6 ser considerada igual à do Local 7.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 6, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2 e 3,5 MPa nos primeiros 20 cm, aumentando para resistências máximas entre 5 e 8 MPa na profundidade entre 30 e 100 cm e, diminuindo para aproximadamente 2 Mpa, a partir de 120 cm e tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1 Mpa (Figura 69: ensaios 6A e 6B).

No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 6 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 1 e 2 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco, a partir da profundidade de 100 cm. A frente de molhamento atingiu 190 cm de profundidade. Observa-se nos valores desse ensaio que o solo perdeu resistência com a umidade até a profundidade em que os ensaios com solo seco tendem a resistências menores e constantes, ao invés da profundidade atingida pela frente de molhamento.

As curvas de energia acumulada (Figura 70) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 6A e 6B as curvas de energia acumulada chegam a valores de 5,5 e 7 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 6 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 2,3 MJ/m² na mesma profundidade.

Figura 69: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 6.

A taxa de infiltração do solo no Local 6 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 71), como 25 cm/h. O ensaio teve duração de 2 hora e 15 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 190 cm.

Figura 70: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 6, para o solo seco e úmido.

Figura 71: Curva de Infiltração da água no solo do Local 6.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 6 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 30, 40 e 50 cm (Figura 72). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 72: Curvas de absorção d'água do Local 6, para as profundidades: 30, 40 e 50 cm.

5.1.7. Resultados do Local 7

Os ensaios do Local 7 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme mostrado na Figura 64 (ver item 5.1.5).

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 7 (Tabela 13) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 13). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) tiveram um aumento após a faixa de 40 cm de profundidade, não apresentando variação significativa abaixo dessa faixa. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 60 cm, uma vez que em 80 cm a umidade volta a ser a mesma que no perfil do solo seco (Tabela 13).

Tabela 13: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 180 cm.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
7.1	20	2,60	1,58	1,54	0,69	40,78	2,61	4,02	9,85	21,24	32,71	80,20
7.2	40	2,60	1,60	1,58	0,67	40,00	2,56	4,04	9,98	14,28	22,56	55,68
7.3	60	2,60	1,63	1,58	0,72	41,93	7,96	12,57	28,65	11,55	18,25	41,59
7.4	80	2,60	1,63	1,58	0,72	41,77	7,66	12,11	27,78	7,84	12,38	28,40
7.5	100	2,60	1,63	1,58	0,73	42,12	8,32	13,14	29,71	-	-	-
7.6	180	2,61	1,63	1,58	0,73	42,26	8,15	12,88	29,08	-	-	-

A granulometria do Local 7 apresenta um solo superficial arenoso (70% de areia fina e 24% de areia média), com 5% de argila e 1% de silte. Na profundidade de 180 cm o solo contém uma porcentagem maior de argila (13%), e menor de areia fina (63%). A porcentagem

de silte (2%) e de areia média (22%) não variam (Figura 73). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 73: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 7, para as profundidades: 40 e 180 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 7, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2 e 7 MPa nos primeiros 20 cm, aumentando para resistências máximas entre 10 e 12 MPa na profundidade entre 30 e 40 cm e, com a profundidade diminui para a faixa entre 4 e 7 MPa, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 2 Mpa, a partir de 120 cm (Figura 74: ensaios 7A e 7B). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 7 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 2 e 3 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco, a partir da profundidade de 60 cm, atingida pela frente de molhamento.

Figura 74: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 7.

As curvas de energia acumulada (Figura 75) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 7A e 7B as curvas de energia acumulada chegam a valores de 10 e 8 MJ/m², respectivamente, em profundidades entre 120 cm e 140 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 7 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 4 MJ/m² a partir de 140 cm de profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 7 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 76), como 19 cm/h. O ensaio teve duração de 1 hora e 40 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 60 cm. Na Figura 74, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 7 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 75: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 7, para o solo seco e úmido.

Figura 76: Curva de Infiltração da água no solo do Local 7.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 7 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 20, 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 77).

No Local 7, os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 14) revelaram um solo de baixa erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentam valores de E40 e E52 maiores que 1. Somente na profundidade de 60 cm (ensaio 7.6) o solo poderia ser classificado como de alta erodibilidade, considerando-se o E40.

Figura 77: Curvas de absorção d'água do Local 7, para as profundidades: 20, 30, 40, 50 e 60 cm.

Tabela 14: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local 7.

Local	Curva	Prof.	s	P	E40	E52
				(%)		
7	7.1	10	-	-	-	-
	7.2	20	1,7319	-	-	-
	7.3	30	1,2582	6,86	7,3364	9,5374
	7.4	40	1,6606	9,35	7,1042	9,2354
	7.5	50	0,7169	17,51	1,6377	2,1290
	7.6	60	1,7055	79,11	0,8623	1,1210

Legenda:

s = coeficiente angular da reta

P = Perda de Massa por Imersão

E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)

E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

5.1.8. Resultados do Local 8

Os ensaios do Local 8 foram realizados em um pomar e distribuídos conforme a Figura 78.

Figura 78: Distribuição dos ensaios no Local 8.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 8 (Tabela 15) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, considerando-se a cobertura por pomar, que devido à sombra das árvores tende a manter o solo com umidade mais elevada que no pasto. Obteveram-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Os ensaios foram realizados com o mesmo tempo sem chuva que os demais locais, assim, considera-se

que para esse tipo de cobertura, com essas umidades obtém-se um espectro máximo de umidade possível.

A massa específica dos sólidos (ρ_s) e a massa específica do solo seco (ρ_d) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 15). A massa específica natural do solo (ρ) apresentou variação na superfície, entre 20 e 40 cm, tornando-se constante com a profundidade. O índice de vazios (e) diminui com a profundidade, mas também apresentou variação superficial, em 40 cm. A porosidade (n) não apresentou variação significativa. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) mostraram uma superfície mais seca, com uma faixa, entre 40 e 80 cm com umidade elevada, indicando uma frente de molhamento natural do solo, causada por chuvas recentes. O perfil do solo úmido não apresenta redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, a mesma profundidade atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel.

Tabela 15: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 180 cm para o Local 8.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
8.1	20	2,61	1,63	1,56	0,75	42,84	9,25	14,44	32,23	23,15	36,11	80,62
8.2	40	2,61	1,78	1,56	0,65	39,29	12,34	19,25	49,76	18,28	28,52	73,73
8.3	60	2,61	1,73	1,58	0,73	42,14	14,56	23,01	52,18	16,47	26,03	59,03
8.4	80	2,61	1,73	1,58	0,71	41,65	13,59	21,47	49,70	15,96	25,22	58,39
8.5	100	2,61	1,73	1,58	0,69	40,90	12,15	19,19	45,82	-	-	-
8.6	200	2,59	1,73	1,58	0,62	38,44	8,51	13,44	35,29	-	-	-
8.7	250	2,59	1,73	1,58	0,63	38,58	8,75	13,83	36,09	-	-	-

A granulometria do Local 8 foi considerada igual à do Local 10, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena diferença de nível entre eles.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 8, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 1 e 4 MPa nos primeiros 40 cm, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1 MPa a partir dessa profundidade (Figura 79: ensaios 8A, 8B e 8C). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 8 (ú). Pode-se observar que não há diminuição considerável de resistência do

solo, devido ao aumento na umidade do solo. Isso pode ser atribuído à umidade inicial do solo mais elevada, característica comum nesse tipo de uso do solo.

As curvas de energia acumulada (Figura 80) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 8A e 8C as curvas de energia acumulada chegam a valores de $1,8 \text{ MJ/m}^2$, na profundidade de 180 cm. A curva 8B e a curva 8 (ú), para o solo úmido, atingem um valor máximo de energia acumulada de $1,3 \text{ MJ/m}^2$, na mesma profundidade.

Figura 79: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 8.

A taxa de infiltração do solo no Local 8 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 81), como 4 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 80 cm. Na Figura 79, pode-se observar que os valores de resistência do ensaio com o solo úmido comportaram-se da mesma forma que os valores dos demais ensaios com o solo seco, independentemente da profundidade atingida pela frente de molhamento.

Figura 80: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 8, para o solo seco e úmido.

Figura 81: Curva de Infiltração da água no solo do Local 8.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 8 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 82).

No Local 8, os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 16) revelaram um solo de alta erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentam valores de E40 e E52 menores que 1.

Figura 82: Curvas de absorção d'água do Local 8, para as profundidades: 30, 40, 50 e 60 cm.

Tabela 16: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local 7.

Local	Curva	Prof.	s	P	E40	E52
				(%)		
8	8.1	10	-	-	-	-
	8.2	20	-	-	-	-
	8.3	30	0,6469	56,38	0,4590	0,5966
	8.4	40	0,5916	80,38	0,2944	0,3827
	8.5	50	0,7779	82,37	0,3778	0,4911
	8.6	60	0,3858	88,56	0,1743	0,2265

Legenda:

s = coeficiente angular da reta

P = Perda de Massa por Imersão

E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)

E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

5.1.9. Resultados do Local 9

Os ensaios do Local 9 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 83. A mesma figura mostra a distribuição dos ensaios do Local 10, que será apresentado adiante. Tais ensaios foram dispostos acima do primeiro cordão em nível, no topo da colina, próximos ao Local 9.

Figura 83: Distribuição dos ensaios no Local 9 e Local 10.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 9 (Tabela 17) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma

umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram variação somente na superfície (em 20 cm), tornando-se constante com a profundidade, enquanto a massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação significativa com a profundidade (Tabela 17). O índice de vazios (e) também apresentou certa variação superficial (em 20 cm) e a porosidade (n) não teve variação significativa. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores praticamente constantes com a profundidade. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 70 cm, uma vez que em 80 cm a umidade volta a ser próxima a do perfil do solo seco (Tabela 17).

A granulometria do Local 9 foi considerada igual à do Local 10, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles.

Tabela 17: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 9.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
9.1	20	2,61	1,61	1,57	0,75	42,77	7,79	12,22	27,19	19,42	30,49	67,83
9.2	40	2,61	1,70	1,62	0,66	39,83	8,25	13,36	32,51	15,43	25,00	60,85
9.3	60	2,61	1,75	1,64	0,63	38,68	9,34	15,31	38,64	17,13	28,09	70,87
9.4	80	2,61	1,75	1,64	0,62	38,33	8,73	14,31	36,64	9,62	15,78	40,40
9.5	100	2,61	1,75	1,64	0,61	37,88	7,94	13,02	33,97	-	-	-
9.6	200	2,59	1,75	1,64	0,60	37,53	8,17	13,39	35,20	-	-	-
9.7	250	2,59	1,75	1,64	0,60	37,47	8,06	13,21	34,82	-	-	-

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 9, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência à penetração entre 1 e 5 MPa até 80 cm de profundidade (Figura 84: ensaios 9A e 9C). Os valores de resistência do ensaio 9B, diferentemente, variam de 2 a 7 MPa até 20 cm de profundidade, mantendo esse valor máximo até 30 cm e diminuindo para aproximadamente 2 MPa a partir de 80 cm. Os valores de resistência do ensaio 9C são diferentes dos demais ensaios, pois apresentaram um aumento de resistência para 6 MPa, aos

80 cm e nova diminuição para um valor aproximadamente constante de 4 MPa, a partir dessa profundidade. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 9 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, comparando-se com os resultados dos ensaios 9B e 9C. O ensaio 9 (ú) apresentou desde a superfície valores de resistência de aproximadamente 1 MPa, com aumento para a mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco, a partir da profundidade de 70 cm, atingida pela frente de molhamento.

As curvas de energia acumulada (Figura 85) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 9B e 9C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 4,5 e 5,5 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 170 cm, enquanto o ensaio 9A acumulou 1,8 MJ/m². Já para o ensaio com o solo úmido a curva 9 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 1,7 MJ/m² em 170 cm de profundidade.

Figura 84: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 9.

A taxa de infiltração do solo no Local 9 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 86), como 4 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e 5 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 70 cm. Na Figura 84, pode-se observar que a resistência do solo

úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 9 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 85: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 9, para o solo seco e úmido.

Figura 86: Curva de Infiltração da água no solo do Local 9.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 9 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 20, 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 87). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 87: Curvas de absorção d'água do Local 9, para as profundidades: 20, 30, 40, 50 e 60 cm.

5.1.10. Resultados do Local 10

Os ensaios do Local 10 foram dispostos acima do primeiro cordão em nível, no alto da colina, e distribuídos conforme mostrado na Figura 83 (ver item 5.1.9).

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 10 (Tabela 18) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram variação somente na superfície (em 40 cm), tornando-se constante com a profundidade, enquanto a massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação com a profundidade (Tabela 18). O índice de vazios (e) e a porosidade (n) também apresentaram certa variação superficial, até 40 cm. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores praticamente constantes com a profundidade. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 70 cm, uma vez que em 80 cm a umidade volta a ser a mesma do perfil do solo seco (Tabela 18).

Tabela 18: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 10.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
10.1	20	2,61	1,67	1,60	0,66	39,65	6,03	9,64	23,94	17,81	28,49	70,73
10.2	40	2,61	1,68	1,63	0,66	39,63	6,62	10,79	26,32	17,90	29,17	71,16
10.3	60	2,61	1,61	1,53	0,73	42,13	6,59	10,08	23,63	17,25	26,40	61,87
10.4	80	2,61	1,61	1,53	0,74	42,50	7,28	11,14	25,72	7,88	12,06	27,83
10.5	100	2,61	1,61	1,53	0,74	42,57	7,40	11,33	26,08	-	-	-
10.6	200	2,59	1,61	1,53	0,73	42,36	7,85	12,01	27,66	-	-	-
10.7	250	2,59	1,61	1,53	0,73	42,29	7,71	11,80	27,25	-	-	-

A granulometria do Local 10 apresenta um solo superficial arenoso (58% de areia fina e 26% de areia média), com 12% de argila e 4% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com variação nas porcentagens de argila (14%) e de silte (2%) (Figura 88). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 88: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 10, para as profundidades: 40 e 200 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 10, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2 e 4 MPa nos primeiros 10 cm, aumentando para resistências máximas entre 4 e 6 MPa na profundidade entre 10 e 50 cm e, com a profundidade diminui para 2 MPa, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1 MPa, a partir de 120 cm (Figura 89: ensaios 10A e 10B). Já o ensaio 10C apresentou valores baixos de resistência, entre 0,5 e 4 MPa, até 30 cm, apresentando valores aproximados aos dos demais ensaios a partir dessa profundidade. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 10 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 1 e 2 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco, a partir da profundidade de 70 cm, atingida pela frente de molhamento.

As curvas de energia acumulada (Figura 90) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 10A, 10B e 10C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 3,5 e 5,8 e 3,2 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 170 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 10 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 2,5 MJ/m² em 170 cm de profundidade.

Figura 89: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 10.

A taxa de infiltração do solo no Local 10 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 91), como 5 cm/h. O ensaio teve duração de 1 hora e 50 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 70 cm. Na Figura 89, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 10 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 90: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 10, para o solo seco e úmido.

Figura 91: Curva de Infiltração da água no solo do Local 10.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 10 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 92). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade

mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 92: Curvas de absorção d'água do Local 10, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm.

5.1.11. Resultados do Local 11

Os ensaios do Local 11 foram dispostos acima do primeiro cordão em nível, no topo da colina, e distribuídos conforme ilustrado na Figura 93.

Figura 93: Distribuição dos ensaios no Local 11.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 11 (Tabela 19) indicam que o solo foi caracterizado em estado de umidade mínima, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma

umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram variação somente na superfície (em 40 cm), tornando-se constante com a profundidade, enquanto a massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação com a profundidade (Tabela 19). O índice de vazios (e) também apresentou certa variação superficial (em 20 cm) e a porosidade (n) não teve variação significativa. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação. No perfil do solo úmido não aparece a redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 100 cm (Tabela 19).

A granulometria do Local 11 apresenta um solo superficial arenoso (57% de areia fina, 30% de areia média e 1% de areia grossa), com 9% de argila e 3% de silte. Na profundidade de 180 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com variação nas porcentagens de areia média (27%) e de argila (12%) (Figura 94). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Tabela 19: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 11.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
11.1	20	2,61	1,56	1,53	0,72	41,76	2,62	4,01	9,54	21,53	32,94	78,38
11.2	40	2,61	1,66	1,61	0,64	38,92	4,12	6,64	16,89	-	-	-
11.3	60	2,61	1,66	1,61	0,65	39,25	4,69	7,56	18,96	18,33	29,51	74,03
11.4	80	2,61	1,66	1,61	0,66	39,67	5,43	8,74	21,53	17,75	28,57	70,44
11.5	180	2,59	1,66	1,61	0,67	40,16	7,11	11,44	27,42	-	-	-
11.6	250	2,59	1,66	1,61	0,67	40,11	7,01	11,28	27,11	-	-	-

Figura 94: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 11, para as profundidades: 40 e 180 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 11, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 3 e 13 MPa até 120 cm de profundidade (Figura 95: ensaios 11A, 11B e 11C). A partir de 120 cm os valores dos ensaios 11B e 11C, que sofreram diminuição até essa profundidade, têm novo aumento na resistência, voltando a diminuir com a profundidade. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 11 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 0,5 e 1 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que o ensaio 11A, com o solo seco, a partir de 140 cm de profundidade, apesar da frente de molhamento ter atingido 100 cm.

Figura 95: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 11.

As curvas de energia acumulada (Figura 96) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 11A e 11C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 8 e 9 MJ/m², respectivamente, em 180 cm, enquanto o ensaio 11B atingiu 15 MJ/m², na mesma profundidade. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 11 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 1,2 MJ/m² para os mesmos 180 cm de profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 11 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 97), como 13 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 100 cm.

Figura 96: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 11, para o solo seco e úmido.

Figura 97: Curva de Infiltração da água no solo do Local 11.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 11 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 30, 40 e 50 cm (Figura 98). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 98: Curvas de absorção d'água do Local 11, para as profundidades: 30, 40 e 50 cm.

5.1.12. Resultados do Local 12

Os ensaios do Local 12 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 99.

Figura 99: Distribuição dos ensaios no Local 12.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 12 (Tabela 20) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não variaram com a profundidade (Tabela 20). O mesmo ocorreu com a porosidade (n), que não apresentou variação significativa. O índice de vazios (e) apresentou pequeno aumento com a profundidade. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) tiveram um aumento até a profundidade de 80 cm, seguido de pequena redução, porém, não apresentando variação significativa no perfil. O perfil do solo úmido não apresenta redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 100 cm (Tabela 20).

A granulometria do Local 12 foi considerada igual à do Local 11, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles.

Tabela 20: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 12.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
12.1	20	2,61	1,59	1,55	0,73	42,17	5,33	8,27	19,09	22,15	34,33	79,29
12.2	40	2,61	1,63	1,54	0,70	41,30	6,39	9,84	23,69	17,11	26,36	63,49
12.3	60	2,61	1,60	1,53	0,76	43,19	7,91	12,10	27,15	18,39	28,13	63,13
12.4	80	2,61	1,60	1,53	0,80	44,36	10,18	15,57	33,32	18,09	27,67	59,20
12.5	180	2,59	1,60	1,53	0,76	43,23	8,82	13,50	30,00	-	-	-
12.6	250	2,59	1,60	1,53	0,78	43,79	9,90	15,14	32,91	-	-	-

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 12, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2 e 6 MPa nos primeiros 20 cm, aumentando para resistências máximas entre 4 e 10 MPa na profundidade entre 30 e 40 cm e, com a profundidade diminui para a faixa entre 2 e 4 MPa, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1,3 Mpa, a partir de 120 cm (Figura 100: ensaios 12A, 12B e 12C). Somente os valores do ensaio 12C apresentaram diminuição na resistência do solo entre 20 e 40 cm, causado provavelmente por alguma anomalia localizada, como algum ninho de insetos (formigas, cupins, etc.). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 12 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 0,6 e 2 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco, a partir da profundidade de 100 cm, atingida pela frente de molhamento.

As curvas de energia acumulada (Figura 101) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 12A, 12B e 12C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 5,5 e 3,8 e 3 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 12 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 1,8 MJ/m² na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 12 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 102), como 11 cm/h. O ensaio teve duração de 2 hora e 30 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 100 cm. Na Figura 100, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 12 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 100: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 12.

Figura 101: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 12, para o solo seco e úmido.

Figura 102: Curva de Infiltração da água no solo do Local 12.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 12 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 103). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 103: Curvas de absorção d'água do Local 12, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.13. Resultados do Local 13

Os ensaios do Local 13 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 104.

Figura 104: Distribuição dos ensaios no Local 13.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 13 (Tabela 21) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram variação somente na superfície (em 20 cm), tornando-se constante com a profundidade, enquanto a massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação com a profundidade (Tabela 21). O índice de vazios (e) e a porosidade (n) não apresentaram variação significativa. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação. No perfil do solo úmido não aparece a redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 90 cm (Tabela 21).

Tabela 21: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 250 cm, do Local 13.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
13.1	20	2,62	1,59	1,54	0,72	41,85	4,36	6,71	15,87	16,23	25,00	59,11
13.2	40	2,62	1,69	1,59	0,69	40,68	8,75	13,90	33,41	19,28	30,66	73,67
13.3	60	2,62	1,68	1,58	0,71	41,47	9,56	15,11	35,35	17,39	27,47	64,28
13.4	80	2,62	1,68	1,58	0,74	42,49	11,50	18,17	40,77	17,51	27,66	62,08
13.5	180	2,80	1,68	1,58	0,87	46,44	12,02	18,99	38,81	-	-	-
13.6	250	2,80	1,68	1,58	0,87	46,46	12,07	19,07	38,94	-	-	-

A granulometria do Local 13 apresenta um solo superficial arenoso (56% de areia fina e 30% de areia média), com 11% de argila e 3% de silte. Na profundidade de 180 cm o solo é praticamente o mesmo, com variação nas porcentagens de areia fina (52%), areia média (28%) e de argila (17%) (Figura 105). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 13, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2 e 9 MPa até 60 cm de profundidade, com valores máximos nos primeiros 40 cm. Com a profundidade, diminui para a faixa entre 1 e 2 MPa, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1 Mpa, a partir de 100 cm (Figura 106: ensaios 13A, 13B e 13C). Somente os resultados do ensaio 13C apresentaram valores diferentes com a profundidade, aumentando a resistência a partir de 60 cm de profundidade, porém também diminuindo com a profundidade e tendendo a se aproximar da resistência dos demais ensaios com o solo seco. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 13 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo,

causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 1 e 4 MPa, nos primeiros 20 cm, diminuindo para a faixa entre 1 e 2 MPa até 60 cm, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco, apesar da profundidade atingida pela frente de molhamento ter sido de 90 cm.

Figura 105: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 13, para as profundidades: 40 e 180 cm.

Figura 106: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 13.

As curvas de energia acumulada (Figura 107) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 13A, 13B e 13C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 5 e 7,4 e 4,5 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 13 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 2 MJ/m² na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 13 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 108), como 10 cm/h. O ensaio teve duração de 1 hora e 50 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 90 cm.

Figura 107: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 13, para o solo seco e úmido.

Figura 108: Curva de Infiltração da água no solo do Local 13.

Figura 109: Curvas de absorção d'água do Local 13, para as profundidades: 10, 30, 40 e 50 cm.

5.1.14. Resultados do Local 14

Diagrama de uma área de ensaio com dimensões e locais de amostragem:

- Dimensões: 10 m (largura) e 9 m (profundidade).
- Locais de amostragem: 14.a, 14.b, 14.c.
- Tipos de amostragem: D.A. (Duplo Anel), A.I. (Amostras Indeformadas), Ensaio de Resistência do solo à penetração.
- Legenda:
 - Cordão em nível
 - D.A. = Duplo Anel
 - A.I. = Amostras Indeformadas
 - Ensaio de Resistência do solo à penetração

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 14 (Tabela 22) indicam que o solo foi caracterizado em estado de umidade mínima, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

193

com a profundidade, porém com pouca variação. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 70 cm, uma vez que em 80 cm a umidade volta a ser a mesma que no perfil do solo seco (Tabela 22).

Tabela 22: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 14.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
14.1	20	2,78	1,61	1,56	0,79	44,20	3,78	5,90	13,27	19,67	30,68	69,04
14.2	40	2,78	1,77	1,69	0,66	39,59	5,39	9,11	22,86	17,25	29,16	73,20
14.3	60	2,78	1,65	1,57	0,79	43,98	5,95	9,35	21,08	15,04	23,61	53,24
14.4	80	2,78	1,65	1,57	0,79	44,14	6,25	9,82	22,00	6,68	10,49	23,51
14.5	120	2,78	1,65	1,57	0,80	44,30	6,55	10,29	22,90	-	-	-
14.6	200	2,78	1,65	1,57	0,82	45,08	8,07	12,67	27,33	-	-	-

A granulometria do Local 14 foi considerada igual à do Local 20, pois ambos pertencem à mesma encosta, com distância e diferença de nível relativamente pequena entre eles.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 14, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência alta, em relação aos demais locais analisados até aqui. Inicia com valores de resistência entre 4 e 16 MPa nos primeiros 20 cm de profundidade, aumentando até 40 cm, com o ensaio 14B chegando a resistências de 24 MPa. Enquanto os ensaios 14A e 14C atingiram 13 MPa até essa profundidade (Figura 111: ensaios 14A, 14B e 14C). A partir dos valores de resistência máximos descritos, as resistências dos 3 ensaios diminuem até a profundidade de 90 cm, ponto em que os ensaios 14A e 14C apresentaram novo aumento até 120 cm. A partir desse ponto, os valores diminuem para um valor de resistência aparentemente constante de 3 MPa. Somente os valores do ensaio 14B tendem para uma resistência ainda menor, próxima de 2 MPa, em 180 cm. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 14 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície valores de resistência entre 1 e 2 MPa, com pico pontual em 15 cm, até a profundidade de 70 cm, atingida pela frente de molhamento. Nesse ponto os valores apresentaram um acréscimo de resistência para 3 MPa, diminuindo novamente com a

profundidade para resistências menores que as dos ensaios com o solo seco, tendendo para uma resistência constante de 1 MPa. Em 180 cm somente os valores do ensaio 14B chegaram à mesma resistência que o ensaio 14 (ú).

Figura 111: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 14.

As curvas de energia acumulada (Figura 112) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 14A, 14B e 14C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 8 e 11 e 11,7 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 14 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 2 MJ/m² na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 14 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 113), como 4 cm/h. O ensaio teve duração de 3 horas e atingiu uma frente de molhamento de 70 cm. Na Figura 111, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Nesse caso os valores do ensaio 14 (ú) formaram, com a profundidade, um traçado paralelo aos valores dos demais ensaios com o solo seco, porém com resistências menores.

Figura 112: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 14, para o solo seco e úmido.

Figura 113: Curva de Infiltração da água no solo do Local 14.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 14 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 114). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 114: Curvas de absorção d'água do Local 14, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.15. Resultados do Local 15

Os ensaios do Local 15 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 115. A mesma figura mostra a distribuição dos ensaios do Local

16, que será apresentado adiante. Tais ensaios foram dispostos sobre o cordão em nível, próximo ao Local 15. Vale observar que o Local 15 situa-se na projeção da cabeceira de uma voçoroca.

Figura 115: Distribuição dos ensaios no Local 15 e Local 16.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 15 (Tabela 23) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 23). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 70 cm, uma vez que em 80 cm a umidade passa a ser menor até que no perfil do solo seco (Tabela 23).

Tabela 23: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 15.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
15.1	20	2,78	1,65	1,62	0,73	42,10	2,51	4,06	9,59	18,46	29,91	70,59
15.2	40	2,78	1,65	1,60	0,76	43,08	4,27	6,84	15,70	16,76	26,81	61,56
15.3	60	2,78	1,67	1,61	0,75	42,77	4,97	7,99	18,47	15,74	25,34	58,54
15.4	80	2,78	1,67	1,61	0,77	43,55	6,42	10,34	23,13	5,46	8,79	19,68
15.5	120	2,78	1,67	1,61	0,79	43,99	7,25	11,66	25,65	-	-	-
15.6	200	2,78	1,67	1,61	0,78	43,66	6,63	10,68	23,78	-	-	-

A granulometria do Local 15 apresenta um solo superficial arenoso (57% de areia fina, 32% de areia média e 1% de areia grossa), com 9% de argila e 1% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com variação nas porcentagens de areia fina (54%) e de argila (11%) (Figura 116). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 116: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 15, para as profundidades: 40 e 200 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 15, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2,5 e 9 MPa nos primeiros 40 cm, diminuindo com a profundidade para a faixa entre 2 e 4,5 MPa, até 80 cm, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1,5 Mpa, a partir de 120 cm (Figura 117: ensaios 15A, 15B e 15C). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 15 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresentou desde a superfície resistências entre 1 e 2,5 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco, a partir da profundidade de 80 cm, atingida pela frente de molhamento.

Figura 117: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 15.

As curvas de energia acumulada (Figura 118) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 15A, 15B e 15C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 6,7 e 3,5 e 5,7 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 15 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 2,8 MJ/m² na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 15 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 119), como 12 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e 5 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 80 cm. Na Figura 117, pode-se observar que a resistência do

solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 15 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 118: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 15, para o solo seco e úmido.

Figura 119: Curva de Infiltração da água no solo do Local 15.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 15 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 120). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 120: Curvas de absorção d'água do Local 15, para as profundidades: 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.16. Resultados do Local 16

Os ensaios do Local 16 foram dispostos sobre o cordão em nível e distribuídos conforme mostrado na Figura 115 (ver item 5.1.15).

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 16 (Tabela 24) indicam que o solo foi caracterizado em estado de umidade mínima, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram variação somente na superfície (em 20 cm), tornando-se constante com a profundidade, enquanto a massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação com a profundidade (Tabela 24). O índice de vazios (e) teve valor diferente apenas há 20 cm, sem variação significativa com a profundidade. A porosidade (n) não teve variação significativa. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação. No perfil do solo úmido não aparece a redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 90 cm (Tabela 24).

Tabela 24: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 16.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
16.1	20	2,78	1,58	1,53	0,84	45,55	4,37	6,69	14,53	19,63	30,04	65,25
16.2	40	2,78	1,50	1,45	0,93	48,21	4,18	6,06	12,48	17,80	25,80	53,15
16.3	60	2,78	1,51	1,45	0,93	48,23	4,92	7,14	14,69	18,95	27,47	56,53
16.4	80	2,78	1,51	1,45	0,94	48,39	5,24	7,60	15,55	18,29	26,53	54,24
16.5	120	2,78	1,51	1,45	0,99	49,85	8,30	12,03	23,21	-	-	-
16.6	200	2,78	1,51	1,45	1,00	50,03	8,69	12,60	24,14	-	-	-

A granulometria do Local 16 foi considerada igual à do Local 15, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles. A série de

ensaios do Local 16 foi realizada sobre cordão em nível a aproximadamente 25 m do Local 15. O cordão em nível foi construído com solo do próprio local, mais um motivo para a granulometria do Local 16 ser considerada igual à do Local 15.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 16, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 3 e 7 MPa nos primeiros 40 cm, aumentando com a profundidade para a faixa entre 2,5 e 10 MPa, até 60 cm, depois entre 1,5 e 6 MPa, até 80 cm (Figura 121: ensaios 16A e 16B). Nesse ponto a resistência do ensaio 16A passa a um valor de aproximadamente 2 MPa até 140 cm, tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1 MPa, a partir dessa profundidade. No ensaio 16B a resistência sofre um aumento a partir de 80 cm de profundidade, até 6,5 MPa, diminuindo com a profundidade até a tendência da mesma resistência constante de 1 MPa a partir de 160 cm. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 16 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 0,5 e 1 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que o ensaio 16A com o solo seco, a partir da profundidade de 90 cm, atingida pela frente de molhamento.

Figura 121: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A e B) e úmido (ú), realizados no Local 16.

As curvas de energia acumulada (Figura 122) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 16A e 16B as curvas de energia acumulada chegam a valores de 4,1 e 8,3 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 16 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 1,8 MJ/m² na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 16 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 123), como 20 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 90 cm. Na Figura 121, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 16 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 122: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 16, para o solo seco e úmido.

Figura 123: Curva de Infiltração da água no solo do Local 16.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 16 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 124). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 124: Curvas de absorção d'água do Local 16, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.17. Resultados do Local 17

Os ensaios do Local 17 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 125.

Figura 125: Distribuição dos ensaios no Local 13.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 17 (Tabela 25) indicam que o solo foi caracterizado em estado de umidade mínima, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma

umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram valores praticamente constantes com a profundidade (Tabela 25). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) houve um pequeno aumento após a profundidade de 80 cm, não apresentando variação significativa em todo o perfil. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 50 cm, uma vez que em 60 cm a umidade volta a ser próxima a do perfil do solo seco (Tabela 25).

A granulometria do Local 17 apresenta um solo superficial arenoso (48% de areia fina e 36% de areia média), com 12% de argila e 4% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, com variação nas porcentagens de areia fina (44%) e de argila (15%) (Figura 126). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Tabela 25: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 17.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
17.1	20	2,76	1,62	1,58	0,78	43,71	4,27	6,74	15,16	15,96	25,22	56,74
17.2	40	2,76	1,67	1,59	0,73	42,17	4,64	7,37	17,55	11,13	17,70	42,13
17.3	60	2,76	1,63	1,55	0,77	43,53	4,58	7,10	16,40	6,78	10,51	24,27
17.4	80	2,76	1,63	1,55	0,80	44,52	6,44	9,99	22,16	7,52	11,66	25,87
17.5	120	2,78	1,63	1,55	0,83	45,47	7,53	11,68	25,11	-	-	-
17.6	200	2,78	1,63	1,55	0,86	46,37	9,33	14,46	29,99	-	-	-

Figura 126: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 17, para as profundidades: 20 e 200 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 17, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência iniciando em 3 MPa até um pico de 20 MPa nos primeiros 20 cm, diminuindo com a profundidade para a faixa entre 6 e 13,5 MPa, até 60 cm, diminuindo para uma faixa entre 5 e 4 MPa até 70 cm (Figura 127: ensaios 17A, 17B e 17C), ponto em que os valores do ensaio 17 C apresentaram um pico de 13 MPa. A partir dessa profundidade os valores ficam entre 2,5 e 10 MPa até 100 cm, entre 2 e 8 MPa até 120 cm, diminuindo para uma faixa aproximadamente constante entre 0,5 e 1,5 Mpa. Somente os valores do ensaio 17C apresentaram novo pico a partir de 150 cm, tendendo a se aproximar dos valores dos demais ensaios com a profundidade. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 17 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 1 e 1,5 MPa, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que o ensaio 17A (ensaio com o solo seco mais próximo), a partir da profundidade de 50 cm, atingida pela frente de molhamento.

As curvas de energia acumulada (Figura 128) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 17A, 17B e 17C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 8,3 e 9 e 11,4 MJ/m², respectivamente, na profundidade de

180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 17 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de $3,3 \text{ MJ/m}^2$ na mesma profundidade.

Figura 127: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 17.

A taxa de infiltração do solo no Local 17 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 129), como 6 cm/h . O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 50 cm . Na Figura 127, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 17 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 128: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 17, para o solo seco e úmido.

Figura 129: Curva de Infiltração da água no solo do Local 17.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 17 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 130). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 130: Curvas de absorção d'água do Local 17, para as profundidades: 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.18. Resultados do Local 18

Os ensaios do Local 18 foram dispostos entre eucaliptos e distribuídos conforme ilustrado na Figura 131. Observou-se no meio do eucalipto a formação de canais de fluxo concentrado, identificados pela ausência de folhas e galhos e pelo tipo de solo aparentemente mais fino e compactado.

Figura 131: Distribuição dos ensaios no Local 18.

A análise tátil-visual das amostras do perfil apontou para uma variação maior com a profundidade, a partir de 280 cm. Variação confirmada no gráfico da Figura 132.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram valores praticamente constantes com a profundidade (Tabela 26). Mesmo abaixo da profundidade em que a análise tátil-visual indicou uma diferença no tipo de solo, a variação desses índices foi pequena. O índice de vazios (e) e a porosidade (n) apresentaram somente um pico na profundidade de 310 cm, permanecendo constantes no restante do perfil. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) também houve um pequeno aumento na profundidade de 310 cm, não apresentando variação significativa no restante do perfil. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 40 cm, uma vez que em 60 cm a umidade volta a ser próxima a do perfil do solo seco (Tabela 26).

A granulometria do Local 18 apresenta um solo superficial arenoso (61% de areia fina e 21% de areia média), com 13% de argila e 5% de silte. Na profundidade de 310 cm o solo passa a ser um silte argiloso, com 50% de silte, 34% de argila e 16% de areia fina (Figura 132). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Tabela 26: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 330 cm, do Local 18.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
18.1	20	2,77	1,62	1,57	0,82	44,92	6,18	9,70	20,99	16,65	26,13	56,54
18.2	40	2,77	1,55	1,46	0,92	48,00	7,62	11,12	22,85	14,65	21,40	43,97
18.3	60	2,77	1,61	1,50	0,86	46,16	7,95	11,93	25,70	7,80	11,69	25,19
18.4	80	2,77	1,61	1,50	0,87	46,46	8,57	12,85	27,34	7,21	10,82	23,03
18.5	120	2,77	1,61	1,50	0,86	46,30	8,24	12,35	26,46	-	-	-
18.6	200	2,77	1,61	1,50	0,89	47,01	9,68	14,52	30,22	-	-	-
18.7	310	2,81	-	-	1,06	51,41	17,91	26,86	47,57	-	-	-
18.8	330	2,81	-	-	0,85	46,06	6,23	9,34	20,49	-	-	-

Figura 132: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 18, para as profundidades: 20 e 310 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 18, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência iniciando entre 2 e 9 MPa nos primeiros 20 cm, diminuindo para uma faixa entre 2,3 e 7 MPa até 80 cm, diminuindo para valores aproximados de 3 MPa até 140 cm, apresentando um novo aumento a partir dessa profundidade para valores entre 3 e 6 MPa, até 180 cm (Figura 133: ensaios 18A, 18B e 18C). No mesmo gráfico o ensaio realizado com

o solo em estado úmido é denominado por 18 (ú). A frente de molhamento nesse local atingiu apenas 20 cm e não se observou diminuição significativa da resistência do solo nessa profundidade. Os resultados do ensaio 18 (ú) apresentaram-se diversos dos demais ensaios, com queda na resistência após 20 cm de profundidade para até 0,4 MPa, aumentando para valores maiores que os demais ensaios, atingindo resistências máximas de 8 MPa, com tendência aparente de se comportar como os valores dos demais ensaios abaixo de 180 cm de profundidade.

Figura 133: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 18.

As curvas de energia acumulada (Figura 134) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 18A e 18B as curvas de energia acumulada chegam ao valor de $7,8 \text{ MJ/m}^2$, na profundidade de 180 cm, enquanto para o ensaio 18C a curva alcança o valor de $6,3 \text{ MJ/m}^2$ na mesma profundidade. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 18 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de $8,9 \text{ MJ/m}^2$ na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 18 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 135), como 1 cm/h. O ensaio teve duração de 3 horas e 20 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 40 cm.

Figura 134: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 18, para o solo seco e úmido.

Figura 135: Curva de Infiltração da água no solo do Local 18.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 18 conseguiram-se resultados de curva de absorção d'água para a profundidade de 30 cm (Figura 136). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, essa amostra não apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 136: Curva de absorção d'água do Local 18, para a profundidade de 30 cm.

5.1.19. Resultados do Local 19

Os ensaios do Local 19 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 137. A mesma figura mostra que a série de ensaios do Local 19 situava-se próxima à série do Local S1, que será descrita em capítulo próprio.

Figura 137: Distribuição dos ensaios no Local 19.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 19 (Tabela 27) indicam que o solo foi caracterizado em estado de umidade mínima, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram variação somente na superfície (até 40 cm), tornando-se constante com a profundidade, enquanto a massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação com a profundidade (Tabela 27). O índice de vazios (e) e a porosidade (n) não apresentaram variação significativa. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação. No perfil do solo úmido não aparece a redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor

que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 100 cm (Tabela 27).

Tabela 27: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 19.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
19.1	20	2,78	1,56	1,54	0,86	46,12	4,16	6,40	13,49	22,35	34,42	72,58
19.2	40	2,78	1,55	1,52	0,89	47,14	5,49	8,34	17,10	21,33	32,42	66,49
19.3	60	2,78	1,66	1,61	0,80	44,49	7,58	12,20	26,27	20,46	32,94	70,95
19.4	80	2,78	1,66	1,61	0,80	44,34	7,28	11,72	25,40	20,08	32,33	70,08
19.5	120	2,78	1,66	1,61	0,81	44,72	8,02	12,92	27,57	-	-	-
19.6	200	2,78	1,66	1,61	0,82	44,95	8,46	13,63	28,82	-	-	-

A granulometria do Local 19 foi considerada igual à do Local 20, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 19, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência iniciando em 2 MPa na superfície, porém já aumentando para uma faixa entre 6 e 10 MPa nos primeiros 20 cm, passando para uma faixa que varia entre 5,5 e 13 MPa até 40 cm, diminuindo com a profundidade e tendendo para uma faixa aproximadamente constante entre 0,8 e 2 MPa, a partir de 120 cm (Figura 138: ensaios 19A, 19B e 19C). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 19 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresentou desde a superfície resistências entre 2,2 e 4,4 MPa, até 50 cm, passando para uma faixa entre 1,2 e 1,5 MPa até 100 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento, e então tendendo à uma faixa aproximadamente constante entre 2,3 e 4,5 MPa a partir dessa profundidade. Nota-se que com a profundidade o ensaio 19 (ú) apresentou valores de resistência pouco mais altos que os ensaios com o solo seco.

As curvas de energia acumulada (Figura 139) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 19A e 19B as curvas de energia acumulada chegam ao valor de 6 MJ/m², na profundidade de 180 cm, enquanto para o ensaio 19C a curva alcança o valor de 9 MJ/m² na mesma profundidade. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 19 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 4,5 MJ/m² na mesma profundidade.

Figura 138: Resultados de ensaios de do Solo à Penetração em estado seco (19A, 19B e 19C) e úmido 19 (ú), realizados no Local 19.

A taxa de infiltração do solo no Local 19 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 140), como 19 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e 20 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 100 cm. Na Figura 138, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 19 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 139: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 19, para o solo seco e úmido.

Figura 140: Curva de Infiltração da água no solo do Local 19.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 19 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 141). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 141: Curvas de absorção d'água do Local 19, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.20. Resultados do Local 20

Os ensaios do Local 20 foram dispostos entre cordões em nível e distribuídos conforme ilustrado na Figura 142.

Figura 142: Distribuição dos ensaios no Local 20.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 20 (Tabela 28) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 28). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade. No perfil do solo úmido não aparece a redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 135 cm (Tabela 28).

Tabela 28: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 20.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
20.1	20	2,78	1,61	1,60	0,79	44,04	3,49	5,58	12,32	18,96	30,34	66,99
20.2	40	2,78	1,59	1,57	0,81	44,83	3,66	5,75	12,53	16,90	26,54	57,83
20.3	60	2,78	1,69	1,64	0,77	43,45	7,51	12,32	27,16	18,19	29,83	65,80
20.4	80	2,78	1,69	1,64	0,82	45,03	10,59	17,36	35,93	17,96	29,45	60,94
20.5	120	2,78	1,69	1,64	0,86	46,20	12,99	21,30	42,05	-	-	-
20.6	200	2,78	1,69	1,64	0,83	45,42	11,38	18,67	38,03	-	-	-

A granulometria do Local 20 apresenta um solo superficial arenoso (57% de areia fina e 32% de areia média), com 8% de argila e 3% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo varia pouco, mas ainda é arenoso, com variação nas porcentagens de areia fina (62%), areia média (20%), de argila (16%) e silte (2%) (Figura 143). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 143: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 20, para as profundidades: 40 e 200 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 20, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência iniciando entre 3 e 5 MPa na superfície, porém já aumentando para uma faixa entre 6 e 14 MPa nos primeiros 20 cm, passando para uma faixa que varia entre 3,5 e 13 MPa até 40 cm, diminuindo com a profundidade e tendendo para uma faixa entre 2 e 9 MPa até 80 cm, diminuindo ainda com a profundidade e tendendo para um valor de resistência aproximadamente constante de 1 MPa, a partir de 140 cm (Figura 144: ensaios 20A, 20B e 20C). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 20 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 0,8 e 1,3 MPa, até 40 cm, diminuindo para resistências mínimas de 0,1 MPa em aproximadamente 100 cm. A partir desse ponto aumenta até a profundidade de 135 cm, atingida pela frente de molhamento. A partir dessa profundidade tende ao valor de resistência aproximadamente constante de 1 MPa, como nos ensaios com o solo seco.

Figura 144: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 20.

As curvas de energia acumulada (Figura 145) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 20A, 20B e 20C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 9,3 e 4,8 e 7,2 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 20 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 1,1 MJ/m² na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 20 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 146), como 20 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 135 cm. Na Figura 144, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 20 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 20 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 147). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 145: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 20, para o solo seco e úmido.

Figura 146: Curva de Infiltração da água no solo do Local 20.

Figura 147: Curvas de absorção d'água do Local 20, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.21. Resultados do Local 21

Os ensaios do Local 21 foram dispostos entre cordões em nível, sobre passagem de veículos, e distribuídos conforme ilustrado na Figura 148.

Figura 148: Distribuição dos ensaios no Local 21.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 21 (Tabela 29) indicam que o solo foi caracterizado em estado de umidade mínima, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 29). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação. Os resultados relacionados à umidade com o solo no estado úmido mostram que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 60 cm, uma vez que em 80 cm a umidade volta a ser próxima a do perfil do solo seco (Tabela 29).

Tabela 29: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 21.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
21.1	20	2,78	1,60	1,58	0,82	44,91	4,47	7,06	15,25	18,61	29,41	63,48
21.2	40	2,78	1,66	1,63	0,77	43,65	5,97	9,73	21,42	8,03	13,09	28,82
21.3	60	2,78	1,65	1,60	0,80	44,51	6,95	11,12	24,10	15,05	24,07	52,16
21.4	80	2,78	1,65	1,60	0,80	44,50	6,94	11,10	24,06	8,76	14,01	30,37
21.5	120	2,78	1,65	1,60	0,83	45,32	8,54	13,66	28,65	-	-	-
21.6	200	2,78	1,65	1,60	0,85	45,83	9,58	15,32	31,46	-	-	-

A granulometria do Local 21 foi considerada igual à do Local 20, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 21, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência iniciando em 4 MPa na superfície, porém já aumentando para uma faixa entre 9,6 e 14 MPa até aproximadamente 40 cm (Figura 149: ensaios 21A, 21B e 21C). Com a profundidade os resultados de resistência dos 3 ensaios apresentaram valores aproximados, diminuindo até a profundidade de 140 cm e tendendo para uma faixa aproximadamente constante entre 0,9 e 1,4 MPa. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 21 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 1,5 e 3 MPa, até 50 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento. A partir dessa profundidade tende à mesma faixa aproximadamente constante dos demais resultados dos ensaios com o solo seco.

Figura 149: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 21.

As curvas de energia acumulada (Figura 150) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 21A, 21B e 21C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 10 e 8,8 e 8,3 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 21 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 3,5 MJ/m² na profundidade de 120 cm.

A taxa de infiltração do solo no Local 21 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 151), como 4 cm/h. O ensaio teve duração de 4 horas e atingiu uma frente de molhamento de 50 cm. Na Figura 149, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 21 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 150: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 21, para o solo seco e úmido.

Figura 151: Curva de Infiltração da água no solo do Local 21.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 21 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 30, 40 e 50 cm (Figura 152). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 152: Curvas de absorção d'água do Local 21, para as profundidades: 10, 30, 40 e 50 cm.

5.1.22. Resultados do Local 22

Os ensaios do Local 22 foram dispostos numa terra arada, preparada para plantação de cana, distribuídos conforme Figura 153.

Figura 153: Distribuição dos ensaios no Local 22.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 22 (Tabela 30) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 30). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação. O perfil do solo úmido não apresenta redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 110 cm (Tabela 30).

Tabela 30: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 22.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
22.1	20	2,76	1,60	1,54	0,82	45,19	5,77	8,89	19,33	26,19	40,34	87,67
22.2	40	2,76	1,64	1,56	0,85	45,80	9,64	15,03	31,47	20,86	32,54	68,12
22.3	60	2,76	1,62	1,55	0,84	45,78	8,26	12,80	26,99	18,38	28,48	60,07
22.4	80	2,76	1,62	1,55	0,82	44,97	6,67	10,34	22,52	17,59	27,27	59,41
22.5	120	2,77	1,62	1,55	0,82	45,17	6,66	10,32	22,39	-	-	-
22.6	200	2,77	1,62	1,55	0,83	45,34	6,99	10,83	23,33	-	-	-

A granulometria do Local 22 apresenta um solo superficial arenoso (49% de areia fina e 44% de areia média), com 5% de argila e 2% de silte. Na profundidade de 120 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com variação nas porcentagens de areia média (34%) e de argila (14%) (Figura 154). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 154: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local 22, para as profundidades: 20 e 120 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 22, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 0,5 e 3 MPa até 40 cm, diminuindo para 2 MPa até 110 cm de profundidade e depois para um valor aproximadamente constante de 1,5 MPa (Figura 155: ensaios 22A, 22B e 22C). O ensaio 22B, porém, apresenta um aumento na resistência abaixo de 120 cm. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 22 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo. Essa diminuição, porém, acontece somente depois de 30 cm de profundidade, chegando a valores de 0,4 MPa, e volta a aumentar em 110 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento. A partir dessa profundidade tende à mesma resistência aproximadamente constante dos demais ensaios com o solo no estado seco.

As curvas de energia acumulada (Figura 156) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 22A, a curva de energia acumulada chega ao valor de $1,7 \text{ MJ/m}^2$, na profundidade de 90 cm enquanto para os ensaios 22B e 22C as curvas de energia acumulada chegam a valores de $3,2$ e $2,6 \text{ MJ/m}^2$, respectivamente, na profundidade de 170 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 22 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de $1,5 \text{ MJ/m}^2$ na mesma profundidade.

Figura 155: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 22.

A taxa de infiltração do solo no Local 22 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 157), como 25 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e 10 minutos e atingiu uma frente de molhamento de 110 cm. Na Figura 155, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 22 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 156: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 22, para o solo seco e úmido.

Figura 157: Curva de Infiltração da água no solo do Local 22.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 22 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm (Figura 158). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 158: Curvas de absorção d'água do Local 22, para as profundidades: 10, 20, 30, 40 e 50 cm.

5.1.23. Resultados do Local 23

Os ensaios do Local 23 foram dispostos num pasto próximo a pequeno bosque, no alto de uma colina e distribuídos conforme Figura 159.

Figura 159: Distribuição dos ensaios no Local 23.

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local 21 (Tabela 31) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade, obtendo-se também valores de umidade para o solo em estado úmido. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 31). O mesmo ocorreu com o índice de vazios (e) e a porosidade (n). Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram os valores praticamente iguais, com valor pouco menor na superfície (em 20 cm), apenas. O perfil do solo úmido não apresenta redução da umidade para a umidade natural, pois a amostragem foi feita até 80 cm, profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento do ensaio com duplo anel, que foi de 130 cm (Tabela 31).

A granulometria do Local 23 foi considerada igual à do Local 22, pois ambos pertencem à mesma encosta, com pequena distância e diferença de nível entre eles.

Tabela 31: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 200 cm, do Local 23.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
23.1	20	2,76	1,57	1,55	0,82	45,00	3,42	5,30	11,53	21,57	33,44	72,78
23.2	40	2,76	1,50	1,46	0,94	48,34	5,20	7,59	15,33	23,77	34,70	70,11
23.3	60	2,76	1,58	1,55	0,84	45,51	5,06	7,84	16,72	20,80	32,24	68,74
23.4	80	2,76	1,58	1,55	0,84	45,53	5,10	7,90	16,84	17,80	27,59	58,78
23.5	120	2,77	1,58	1,55	0,84	45,76	5,16	8,00	16,95	-	-	-
23.6	200	2,77	1,58	1,55	0,84	45,77	5,18	8,02	16,99	-	-	-

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local 23, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 2 e 5 MPa até 90 cm, diminuindo para uma faixa aproximadamente constante entre 1 e 2 MPa, a partir de 140 cm (Figura 160: ensaios 23A, 23B e 23C). O ensaio 23C, porém, apresenta um aumento na resistência para até 3,2 MPa entre 140 e 160 cm. No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por 23 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície resistências entre 0,3 e 0,7 MPa, até 130 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento. A partir dessa profundidade tende à mesma faixa aproximadamente constante dos demais ensaios com o solo no estado seco.

Figura 160: Resultados de ensaios de Resistência do Solo à Penetração em estado seco (A, B e C) e úmido (ú), realizados no Local 23.

As curvas de energia acumulada (Figura 161) corroboram os resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração. Para os ensaios 23A, 23B e 23C as curvas de energia acumulada chegam a valores de 3,3 e 5,5 e 6,2 MJ/m², respectivamente, na profundidade de 180 cm. Já para o ensaio com o solo úmido a curva 23 (ú) atinge um valor máximo de energia acumulada de 1,6 MJ/m² na mesma profundidade.

A taxa de infiltração do solo no Local 23 é definida pela curva de Infiltração da água no solo (Figura 162), como 18 cm/h. O ensaio teve duração de 2 horas e atingiu uma frente de molhamento de 130 cm. Na Figura 160, pode-se observar que a resistência do solo úmido diminui até o limite alcançado pela frente de molhamento. Os valores de resistência do ensaio 23 (ú) tendem aos mesmos valores obtidos nos ensaios com o solo seco, abaixo desse limite.

Figura 161: Densidade de Energia Acumulada em profundidade, do Local 23, para o solo seco e úmido.

Figura 162: Curva de Infiltração da água no solo do Local 23.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local 23 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20 e 40 cm (Figura 163). No ensaio de Perda de Massa por Imersão, porém, nenhuma amostra apresentou quantidade mensurável. Dessa forma, segundo Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), o solo caracteriza-se como de baixa erodibilidade.

Figura 163: Curvas de absorção d'água do Local 23, para as profundidades: 10, 20 e 40 cm.

Capítulo 6: DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS

Um pluviôgrafo eletrônico foi instalado dentro da área de estudo, na região de Corumbataí e registrou dados de chuva por um período de 4 anos. Depois, o mesmo aparelho foi deslocado para a área de estudo, localizada na região de Ibaté, onde permaneceu por um período de 2 meses.

6.1. Região de Corumbataí

As precipitações de chuva diárias, divididas por ano na região de Corumbataí, são apresentadas nos gráficos da Figura 164 a Figura 167. Pode-se observar que no período de registro as chuvas mais frequentes são as de pequena quantidade. Destaca-se somente a chuva do dia 29 de dezembro de 2009 (Figura 166), que atingiu 100 mm em um dia. Além desta, em todo período as máximas chuvas diárias atingiram aproximadamente 45 mm, sendo uma frequência baixa, de apenas 3 eventos.

Figura 164: Chuvas diárias de janeiro a dezembro de 2007, na área de estudos em Corumbataí.

Figura 165: Chuvas diárias de janeiro a dezembro de 2008, na área de estudos em Corumbataí.

Figura 166: Chuvas diárias de janeiro a dezembro de 2009, na área de estudos em Corumbataí.

Figura 167: Chuvas diárias de janeiro a novembro de 2010, na área de estudos em Corumbataí.

A análise de chuvas máximas originou-se do cálculo da precipitação (P) que atinge uma determinada área (A), com certa duração (D) e uma dada probabilidade de ocorrência em um ano qualquer. A forma de relacionar essas variáveis é a curva de Intensidade – Duração – Frequência (curva IDF). A curva IDF é obtida a partir da análise estatística de séries longas de dados de um pluviôgrafo, no mínimo de 15 anos (COLLISCHONN e TASSI, 2012).

Como os registros obtidos foram num período máximo de 4 anos, obter a curva IDF torna-se inaplicável. Os dados de chuva registrados neste período serviram como base de comparação com as chuvas simuladas e seu efeito.

Da metodologia da curva IDF, utilizou-se a obtenção das intensidades máximas de chuva para um evento determinado (considerados eventos de aproximadamente 5 min). Foram selecionadas intensidades médias acima de 65 mm/h. Devido à inaplicabilidade da metodologia citada, a frequência foi desconsiderada.

Na Tabela 32 são apresentadas as intensidades médias das chuvas acima de 65 mm/h, ocorridas no período registrado no pluviôgrafo, para eventos de aproximadamente 5 min. São apresentados também a duração real do evento considerado de 5 min, a duração total do evento a que pertence o evento considerado, a chuva acumulada deste evento e a chuva acumulada no dia do evento considerado. Observa-se que, considerando-se eventos de 5 min, as maiores intensidades de chuva concentram-se num único evento de chuva acumulada igual

a 31,8 mm, do dia 25 de dezembro de 2009. Foram chuvas de 102,86 e 120,00 mm/h. Ainda para eventos de 5 min, em outros 7 houve intensidades entre 80 e 90 mm/h e em 5 dias houve chuvas com intensidades entre 65 e 72 mm/h.

O gráfico da Figura 168 mostra a distribuição desses eventos com intensidades máximas de chuva distribuídas pelo período em que houve registro. Vale observar que se concentram em dois blocos, entre os meses de novembro de 2008 a março de 2009 e entre dezembro de 2009 e março de 2010.

Tabela 32: Maiores intensidades de chuva para eventos considerados de aprox. 5 min; Chuva acumulada do evento total; e Chuva acumulada no dia, para a área de estudos em Corumbataí.

Data (dd/mm/aa)	Duração de evento aprox. de 5 min (min)	Intensidade média: evento aprox. de 5 min (mm/h)	Duração total do evento (min)	Chuva acumulada do evento (mm)	Chuva acumulada no dia do evento (mm)
22/11/08	5,35	85,00	21	13,0	13,0
25/12/08	5,07	90,00	227	26,2	27,2
27/02/09	4,85	80,00	101	12,8	12,8
09/03/09	4,42	65,45	79	8,0	23,2
22/03/09	6,92	65,45	98	24,4	24,4
25/12/09	5,05	72,00	49	31,8	31,8
25/12/09	4,92	120,00	49	31,8	31,8
25/12/09	4,92	102,86	49	31,8	31,8
02/01/10	4,15	90,00	62	13,2	15,4
08/01/10	4,00	80,00	12	8,8	22,2
26/01/10	5,12	80,00	56	35,4	36,2
26/01/10	4,77	90,00	56	35,4	37,2
10/02/10	4,60	80,00	36	10,0	24,6
16/02/10	5,22	72,00	29	14,4	15,6
23/02/10	4,48	72,00	18	12,6	19,6

Figura 168: Intensidades de chuvas para eventos de aproximadamente 5 min, de janeiro de 2007 a novembro de 2010, na área de estudos em Corumbataí.

6.2. Região de Ibaté

As precipitações de chuva diárias, divididas por ano na região de Ibaté, são apresentadas nos gráficos da Figura 169 e na Figura 170. Pode-se observar que no período de registro as chuvas mais frequentes são as de pequena quantidade. Apresentando uma única chuva de 35 mm e as demais, menores que 25 mm diários.

Na Tabela 33 são apresentadas as intensidades médias das chuvas acima de 65 mm/h, ocorridas no período registrado no pluviógrafo, para eventos de aproximadamente 5 min na região de Ibaté. É apresentado também a duração real do evento considerado de 5 min, a duração total do evento a que pertence o evento considerado, a chuva acumulada deste evento e a chuva acumulada no dia do evento considerado. Apesar do pequeno período considerado, observa-se nessa região que, a maioria dos eventos de 5 min considerados, está entre 80 e 90 mm/h, tendo somente um evento de 68,73 mm/h.

Figura 169: Chuvas diárias de janeiro a novembro de 2010, na área de estudos em Ibaté.

Figura 170: Chuvas diárias de janeiro a novembro de 2011, na área de estudos em Ibaté.

Tabela 33: Maiores intensidades de chuva para eventos considerados de aprox. 5 min; Chuva acumulada do evento total; e Chuva acumulada no dia, para a área de estudos em Ibaté.

Data (dd/mm/aa)	Duração de evento aprox. de 5 min (min)	Intensidade média: evento aprox. de 5 min (mm/h)	Duração total do evento (min)	Chuva acumulada do evento (mm)	Chuva acumulada no dia do evento (mm)
16/12/10	2,70	90,00	19	4,8	9,0
21/12/10	2,82	68,73	26	13,8	13,8
24/12/10	5,07	80,00	48	21,4	21,4
24/12/10	5,17	82,00	48	21,4	21,4
05/01/11	5,48	85,00	58	12,2	12,2

O gráfico da Figura 171 mostra a distribuição dos eventos de 5 min, com intensidades máximas de chuva distribuídas pelo período em que houve registro. Vale observar que se concentram em dois blocos, entre os meses de novembro de 2008 a março de 2009 e entre dezembro de 2009 e março de 2010.

Figura 171: Intensidades de chuvas para eventos de aproximadamente 5 min, de outubro de 2010 a março de 2011, na área de estudos em Ibaté.

Capítulo 7: RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA

Nesta segunda etapa foram realizados ensaios com simulador de chuva e de caracterização do solo, de infiltração e de resistência do solo à penetração.

Os ensaios com simulador de chuva geraram dados sobre escoamento superficial, quantidade de sedimento e capacidade de infiltração do solo, para intensidades de chuva e características de solo e de relevo diversificadas.

Os ensaios de resistência do solo à penetração, com o solo seco, foram distribuídos de forma a melhor caracterizar as áreas ensaiadas com simulador de chuva. A distribuição desses ensaios e dos demais ensaios de campo em cada local será apresentada nas descrições dos locais, a seguir. Os ensaios com penetrômetro em solo úmido foram realizados nos limites das áreas ensaiadas com simulador de chuva, ou em cada ponto dos ensaios com duplo anel.

7.1. Denominação e Localização dos Ensaios

Inicialmente é necessário denominar os ensaios realizados em 9 locais diferentes, variando entre 1 e 4 em cada local, distribuídos em 5 encostas. Os ensaios dos 4 primeiros locais foram realizados na bacia do córrego do Lajeado em Corumbataí, no ano de 2007. Os ensaios dos 2 próximos locais foram realizados na mesma bacia, porém no ano de 2009 e os 3 últimos foram realizados na região de Ibaté/SP, sendo o sétimo também no ano de 2009 e os 2 últimos no ano de 2010. A Tabela 34 apresenta a denominação das encostas e dos ensaios feitos em cada local, com sua localização geográfica. Os ensaios recebem a letra “S” de “Simulador” como inicial do nome, para diferenciá-los daqueles realizados na primeira etapa.

A identificação das encostas dos ensaios realizados na região de Corumbataí é ilustrada na Figura 172 e a distribuição dos locais ensaiados nas encostas é apresentada na Figura 173. A Figura 174 mostra a identificação das encostas e a distribuição dos Locais ensaiados da região de Ibaté. Como podem ser observados nas figuras citadas, alguns locais estão contidos em encostas que também contém as séries de ensaios da primeira etapa.

Tabela 34: Denominação e localização dos ensaios com simulador de chuva.

Encosta	Número	Número	Data	Região	Coordenadas geográficas		
	do	do			x	y	Altitude
	Local	Ensaio	(ano)		(m)	(m)	(m)
E4	S1	S1.1	2007	Corumbataí-SP	224 428 E	7 533 433 S	637
		S1.2					
		S1.3					
E7	S2	S2.1	2007	Corumbataí-SP	226 197 E	7 533 889 S	694
		S2.2					
E7	S3	S3.1	2007	Corumbataí-SP	226 195 E	7 533 251 S	687
E8	S4	S4.1	2007	Corumbataí-SP	224 825 E	7 532 457 S	614
E7	S5	S5.1	2009	Corumbataí-SP	226 316 E	7 533 342 S	702
		S5.2					
		S5.3					
E7	S6	S6.1	2009	Corumbataí-SP	226 195 E	7 533 251 S	687
E9	S7	S7.1	2009	Ibaté-SP	190 695 E	7 575 292 S	730
E10	S8	S8.1	2010	Ibaté-SP	192635 E	7 572 946 S	789
E10	S9	S9.1	2010	Ibaté-SP	192785 E	7 574 743 S	733

Figura 172: Identificação das encostas na área de estudo da região de Corumbataí.

Figura 173: Distribuição dos Locais ensaiados nas encostas da área de estudo da região de Corumbataí.

Figura 174: Identificação das encostas e distribuição dos Locais ensaiados nas encostas da área de estudo da região de Ibaté.

A intenção de realizar mais de um ensaio num mesmo local foi de obter dados para diferentes intensidades de chuva ou diferentes inclinações de terreno, para solos com características geotécnicas semelhantes. Ou seja, solo com índices físicos, taxa de infiltração, índice de erodibilidade e resistência à penetração do cone, semelhantes. Em alguns locais variou-se também a rugosidade, ora mantendo a cobertura por pasto, ora retirando essa cobertura (Figura 175 e Figura 176). A retirada da grama do pasto foi feita com enxada de forma a eliminar essa parcela da rugosidade, deixando o terreno descoberto.

Figura 175: Rugosidade do terreno preparado para o ensaio 5.2, mantendo-se a cobertura por pasto.

Figura 176: Rugosidade do terreno preparado para o ensaio 5.3, com a cobertura por pasto retirada.

7.2. Ensaios do Local S1

No Local S1 foram feitos 3 ensaios com o simulador de chuva (o S1.1 com pasto e os S1.2 e S1.3 sem grama) e 2 ensaios com penetrômetro (S1.a e S1.b) (Figura 177). Os ensaios com simulador S1.1 e S1.2 foram situados entre cordões em nível, enquanto o ensaio S1.3 foi situado sobre cordão em nível. No primeiro foi mantida a grama do pasto e nos dois últimos a grama foi retirada (Figura 177).

Figura 177: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S1.

A Figura 178 mostra uma vista geral da localização dos ensaios, durante a realização do ensaio S1.2, que se situa entre cordões em nível.

Figura 178: Vista geral da localização dos ensaios, durante a realização do ensaio S1.2.

7.2.1. Ensaios de Caracterização

Os ensaios do Local 19, do primeiro grupo, foram considerados como caracterização do solo e complemento dos ensaios de resistência do solo à penetração, com o solo seco, devido à sua proximidade aos ensaios do Local S1 (Figura 177).

Os ensaios com penetrômetro feitos próximos ao Local S1.1, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência iniciando em aproximadamente 3 MPa, aumentando para um máximo entre 8 e 11 MPa até 40 cm de profundidade (Figura 179: ensaios 19.c e S1.a). Os valores de resistência diminuem com a profundidade a partir desse ponto até valores aproximadamente constantes de 1 MPa, a partir de 140 cm.

No mesmo gráfico os ensaios realizados com o solo em estado úmido são denominados por S1.1A (ú), S1.1B (ú) e S1.2 (ú). Os dois primeiros realizados após o ensaio com simulador S1.1 e o último após o ensaio com simulador S1.2. Pode-se observar a brusca

diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície uma resistência de aproximadamente 2 MPa, chegando à máxima de 6 MPa, em 10 cm e mínimas de 0,5 MPa entre 30 e 70 cm, tendendo à mesma resistência constante com a profundidade que os ensaios com o solo seco.

Na coleta de amostra de solo para definição do perfil de umidade, observou-se que a frente de molhamento havia atingido diferentes profundidades nos limites da área ensaiada com simulador S1.1. No ponto de cota mais alta, a frente de molhamento atingiu a profundidade de 70 cm, enquanto no ponto de cota mais baixa, ou seja, mais próximo da boca de captação, atingiu 50 cm. Desta forma, optou-se por fazer 2 ensaios com penetrômetros nos pontos indicados na Figura 180, o S1.1A (ú), na cota mais alta e o S1.1B (ú) na cota mais baixa. O resultado para o ensaio S1.1A (ú), apresentado na Figura 179, é de uma diminuição da resistência do solo até a profundidade de 35 cm, enquanto para o ensaio S1.1B (ú) a diminuição se dá até a profundidade de 60 cm. No segundo caso, a resistência diminui até uma profundidade pouco maior que a atingida pela frente de molhamento, situação observada na maioria dos ensaios realizados em tais condições. No primeiro caso, porém, a diminuição da resistência se deu até uma profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento. Por outro lado, no ensaio S1.2 (ú), do mesmo gráfico, em que a frente de molhamento atingiu a profundidade de 20 cm, a resistência diminuiu até a profundidade de 70 cm.

Figura 179: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração, com o solo seco (19.c e S1.a), mais ensaios com o solo úmido (S1.1A (ú), S1.1B (ú) e S1.2 (ú)), que representam os ensaios com simulador de chuva: S1.1 e S1.2.

Figura 180: Croqui com detalhe da distribuição dos ensaios com penetrômetro que representam os ensaios com simulador: S1.1 e S1.2, do Local S1.

Ao redor do Local S1.3 foram realizados um ensaio de resistência à penetração do solo no estado seco (S1.b) e um ensaio com o solo úmido (S1.3 (ú)), após a chuva simulada. Os valores de resistência do solo S1.b iniciam com resistência de 3 MPa aumentando para uma resistência máxima de 7 MPa em 10 cm de profundidade, diminuindo para 2 MPa em 30 cm, variando com a profundidade entre 2 e 5 MPa até 140 cm, ponto em que tende a uma resistência constante de aproximadamente 1,5 MPa (Figura 181). Os valores de resistência com o solo úmido S1.3 (ú) iniciam mais baixos que o ensaio com solo seco, de 1,7 MPa, aumentando, porém para resistências maiores entre 10 e 13 MPa entre 10 e 40 cm de profundidade, diminuindo para 4 MPa em 75 cm e voltando a aumentar para 14 MPa em 100 cm. Os valores tendem à mesma resistência constante de 1,5 MPa a partir de 150 cm. A frente de molhamento atingiu a profundidade de 10 cm (Tabela 35), justificando a diminuição de resistência em relação aos valores do ensaio com solo seco. A diferença entre os valores dos dois ensaios, a partir desse ponto, deve-se ao fato de terem sido realizados sobre cordão em nível, elemento construído sem controle de compactação.

Tabela 35: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S1.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S1	S1.1A (ú)	80	44
	S1.1B (ú)	50	
	S1.2 (ú)	20	37
	S1.3 (ú)	10	23
	19 (D.A.)	100	140

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

Figura 181: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S1.b), mais ensaio com o solo úmido (S1.3 (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S1.3.

No Local S1 coletaram-se amostras para definição de perfis de umidade com o solo no estado seco e após cada ensaio com simulador de chuva ou com o Duplo Anel, no estado úmido. Este último foi considerado o ensaio feito no Local 19, do primeiro grupo de ensaios. Os perfis com o solo seco (S1.1 e S1.2 (s), S1.3 (s)), apresentaram umidades baixas, entre 2,5 e 6%, por todo o perfil (Figura 182). Após o ensaio com simulador de chuva S1.1 (ú) o perfil

de umidade gerado variou entre 12 e 18%, até 70 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento (Tabela 35). Já após o ensaio S1.2 (ú) o perfil de umidade variou entre 8 e 12% nos primeiros 20 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento. O perfil do solo seco (19 D.A. (s)), feito junto com o ensaio com duplo anel, apresentou umidades entre 4 e 8%, enquanto o perfil feito com o solo úmido (19 D.A. (ú)) apresentou umidades entre 20 e 22,5% (Tabela 35).

Figura 182: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S1 e Local 19, para o solo seco (s) e úmido (ú).

7.2.2. Ensaios com Simulador de Chuva

7.2.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) em cada ensaio realizado e para as diversas pressões de bomba adotadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 36, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para cada ensaio do Local S1. Estes foram os primeiros ensaios com simulador de chuva realizados, vale notar que a intensidade média de chuva gerada em todos foi alta, entre 164 e 230 mm/h.

Uma vista geral do ensaio S1.1 e a distribuição dos pluviômetros é apresentada na Figura 183, do ensaio S1.3 na Figura 184 e do ensaio S1.2 na Figura 185.

Tabela 36: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S1.

Nº Do	Nº do	Pluviômetro Nº	Intensidade média de chuva						
			Pressão A			Pressão B			
			x_i (m)	y_i (m)	d_i (m)	I_{mpi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)	I_{mpi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)
S1	S1.1	P1	50	20	53,85	214,09	206,35	232,46	229,87
		P2	170	20	171,17	232,56		228,75	
		P3	180	40	184,39	166,36		226,98	
	S1.2	P1	170	50	177,20	239,90	227,07		
		P2	35	35	49,50	216,23			
		P3	170	0	170,00	231,24			
	S1.3	P1	170	30	172,63	170,28	164,70		
		P2	0	50	50,00	164,09			
		P3	180	80	196,98	159,53			

Legenda:

P_i = Pluviômetro i

x_i = projeção do P_i no eixo horizontal

y_i = projeção do P_i no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao P_i

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mpi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Figura 183: Montagem do ensaio S1.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

Figura 184: Montagem do ensaio S1.3, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

Figura 185: Montagem do ensaio S1.2, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.

7.2.2.2. *Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios*

A Tabela 37 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para os ensaios do Local S1, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o ensaio S1.1, por exemplo, teve duração de 26 minutos, com medidas dos pluviômetros obtidas por 20 minutos.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 37: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para os ensaios S1.1 e S1.2, do Local S1.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Bico	Altura do bico (m)	Chuva simulada		Duração	
							Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	medidas (min)	ensaio (min)
S1.1	Pasto	10.45	1.81	0.30	16W	4	1	206.35	20	26
							1.5	229.87	9	18
S1.2	Pasto sem grama	10.68	2.46	0.46	16W	3.96	1	227.07	23	37
S1.3	Pasto sem grama	27.78	5.58	1.56	16W	4.10	1.0	164.70	11	23

7.2.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 38 encontra-se um resumo dos processos observados durante os ensaios do Local S1. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, de início de empoçamento (Figura 186) e do escoamento superficial (Figura 187 e Figura 189) e chegada do escoamento superficial na boca da área (Figura 188). Na maioria dos casos foi possível observar o instante de início do escoamento superficial nos limites da área ensaiada e o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Em alguns casos, porém, conseguia-se apenas observar o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Esse fato deve-se à dificuldade em observar o instante em que a água começava a escoar sob a grama do pasto.

Tabela 38: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S1.

Ensaio N°	Início	Ocorrências Diversas	Início de Empoçamento	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
				Início	Boca		
S1.1	0:00:00	Mudança da I_{me}	0:03:18	0:09:00	0:09:52	0:26:00	50
	0:27:00					0:44:00	
S1.2	0:00:00		0:01:10	0:02:20	0:03:50	0:37:00	20
S1.3	0:01:00		0:01:56	0:02:20	-	0:24:00	10

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_e = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

Figura 186: Início de empocamento do ensaio S1.1.

Figura 187: Escoamento superficial do ensaio S1.3.

Figura 188: Escoamento superficial do ensaio S1.2.

Figura 189: Escoamento superficial chegando à boca (ensaio S1.3).

7.2.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S1.1 teve duração total de 44 min, com duas intensidades médias de chuva diferentes. A primeira durante 26 min e a segunda durante 18 min, sem parar a chuva. Foram feitas medidas por 20 e por 9 min, respectivamente para cada etapa (Tabela 38). O gráfico da Figura 190 mostra que o escoamento superficial foi proporcional à intensidade de chuva e ao tempo de ensaio. Em outras palavras, ao aumentar a intensidade de chuva, o escoamento também aumentou e quanto mais tempo de chuva, maior foi o escoamento superficial.

O ensaio S1.2 teve duração total de 37 min, com medição da chuva por 23 min (Tabela 38). O gráfico da Figura 191 mostra que o escoamento superficial também foi proporcional à intensidade de chuva e ao tempo de ensaio.

O ensaio S1.3 teve duração total de 23 min, com medição da chuva por 11 min (Tabela 38). O gráfico da Figura 192 mostra que o escoamento superficial, mais uma vez, foi proporcional à intensidade de chuva e ao tempo de ensaio.

Figura 190: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S1.1.

Figura 191: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S1.2.

Figura 192: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S1.3.

7.2.2.5. Sedimento Gerado

O ensaio S1.1 não gerou quantidade mensurável de sedimento. O sedimento gerado no ensaio S1.2 é apresentado no gráfico da Figura 193. Foram realizadas 3 coletas no tempo de 37 min do ensaio. Observa-se que a quantidade coletada de sedimento diminuiu levemente em função do tempo.

Figura 193: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S1.2.

O sedimento gerado no ensaio S1.3 é apresentado no gráfico da Figura 194. Foram realizadas 3 coletas no tempo de 23 min do ensaio. Da primeira para a segunda coleta a quantidade diminuiu, enquanto na terceira houve um pequeno aumento, sugerindo uma tendência dos valores tornarem-se constantes.

Figura 194: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S1.3.

A Figura 195 mostra uma coleta de sedimento feita durante o ensaio S1.3. Na Figura 196 pode-se observar o sedimento carregado pela chuva e acumulado na boca de captação. Na Figura 197 o sedimento acumulado anteriormente já aparece sulcado e na Figura 198 já foi praticamente todo removido. Essa sequência de fotos foi tirada com intervalo de 1 minuto entre a primeira e a segunda e de 5 minutos entre a segunda e a terceira.

Figura 195: Detalhe de sedimento coletado no ensaio S1.3.

Figura 196: Sedimento carregado para a boca de captação no ensaio S1.3 (1º detalhe).

Figura 197: Sedimento carregado para a boca de captação no ensaio S1.3 (2º detalhe).

Figura 198: Sedimento carregado para a boca de captação no ensaio S1.3 (3º detalhe).

7.2.3. Considerações Gerais Sobre os Ensaios do Local S1

As chuvas simuladas nos ensaios do Local S1 foram de intensidade maior que chuvas naturais da região. Nos 3 ensaios (S1.1, S1.2 e S1.3) a intensidade variou entre 164 e 230 mm/h (Tabela 37), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio de duplo anel, neste local foi 19 cm/h. No ensaio S1.1 foram adotadas 2 intensidades médias de chuva, 206,35 e 229,87 mm/h, gerando taxas de infiltração máximas de 14,9 e 9,2 cm/h, respectivamente (Figura 190). Lembrando que essa taxa foi calculada em função da medida do escoamento superficial, subtraído da intensidade de chuva, observa-se que com intensidades de chuva menores, ou reais, a tendência é de que toda a água infiltre, não gerando escoamento superficial algum.

O ensaio S1.2 comprova essa observação, uma vez que com intensidade de chuva muito próxima da máxima do ensaio S1.1 (227,07 mm/h), gerou infiltração máxima de 10,4 cm/h (Figura 191), também próxima à do ensaio anterior. Essa comparação mostra que a retirada da grama pouco influenciou na geração do escoamento superficial e, consequente, na infiltração da água no solo.

Já o ensaio S1.3 foi feito sobre cordão em nível, no qual a principal diferença está na declividade média do terreno: 27,78%, contra declividades de aproximadamente 10% nos 2 primeiros ensaios. Tal dado justifica a inexistência de infiltração da água no solo, mesmo com intensidade de chuva menor, 164,70 mm/h. Os resultados de infiltração negativos apresentados no gráfico da Figura 192 (-13,24 mm/h, por ex.), justificam-se por valores de escoamentos maiores que as intensidades médias de chuva. Tal fato, por sua vez, pode ser devido a uma velocidade de escoamento maior que a intensidade de chuva, ou a um problema matemático, por serem consideradas as médias dos parâmetros. De qualquer forma, fisicamente considera-se que toda a chuva simulada escoou na superfície.

Nos ensaios S1.1 e S1.2 o escoamento superficial aumentou com o tempo, enquanto no ensaio S1.3 houve uma leve queda na medida deste parâmetro. Mais uma vez, tal fato pode ser devido à consideração de médias de intensidade de chuva.

7.3. Ensaaios do Local S2

No Local S2 foram feitos 2 ensaios com o simulador de chuva (o S2.1 com pasto e o S2.2 sem grama) e 1 ensaio com penetrômetro (2.a) (Figura 199). Os dois ensaios foram situados entre cordões em nível.

Figura 199: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S2.

A Figura 200 mostra uma vista geral dos ensaios durante a realização do ensaio S2.1. O ensaio S2.2 aparece marcado e com a grama retirada. Na Figura 201 é mostrado o ensaio S2.2 em andamento, com vista de cima para baixo no terreno. Notar a feição erosiva que aparece no alto da foto, atrás do veículo, a mesma indicada na Figura 199.

Figura 200: Vista geral dos ensaios S2.1 (em andamento) e S2.2 (marcado).

Figura 201: Vista geral do ensaios S2.2 em andamento, olhando de cima para baixo no terreno. Notar a feição erosiva que aparece destacada no alto da foto, atrás do veículo.

7.3.1. Ensaios de Caracterização

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica natural do solo (ρ) e a massa específica do solo seco (ρ_d) não apresentaram variação significativa com a profundidade (Tabela 39). Da mesma forma, o índice de vazios (e) e a porosidade (n) também não apresentaram variação significativa com a profundidade. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém, sem variação significativa a partir de 30 cm.

Tabela 39: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica natural do solo (ρ), massa específica do solo seco (ρ_d), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S2.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido (D.A.)		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
S2.1.1	10	3,20	1,64	1,59	1,01	50,30	2,98	4,74	9,44	22,83	36,30	52,26
S2.1.2	20	3,20	1,64	1,59	1,06	51,48	5,49	8,73	16,59	18,50	29,42	45,08
S2.1.3	30	3,20	1,64	1,59	1,13	53,13	9,22	14,66	26,05	22,11	35,16	51,13
S2.1.4	40	3,20	1,63	1,57	1,19	54,25	11,20	17,59	30,27	21,52	33,78	49,65
S2.1.5	50	3,20	1,63	1,57	1,18	54,04	10,68	16,77	29,11	21,75	34,15	50,02
S2.1.6	75	3,20	1,56	1,47	1,27	56,04	10,75	15,81	27,03	18,56	27,28	41,44
S2.1.7	100	3,21	1,60	1,5	1,22	54,88	10,51	15,77	27,73	-	-	-
S2.1.8	150	3,21	1,57	1,47	1,21	54,85	8,35	12,28	22,06	-	-	-
S2.1.9	200	3,21	1,57	1,47	1,21	54,85	8,37	12,30	22,10	-	-	-

A granulometria do Local S2 apresenta um solo superficial arenoso (57% de areia fina e 34% de areia média), com 6% de argila e 3% de silte. Na profundidade de 100 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com variação nas porcentagens de areia fina (48%), de areia média (38%) e de argila (11%) (Figura 202). Classificação segundo a NBR 6502/95.

No Local S2 foram coletadas amostras para definição de perfis de umidade com o solo no estado seco e no estado úmido, após cada ensaio com simulador de chuva e após o ensaio com duplo anel. Como os ensaios com simulador de chuva e o com duplo anel foram feitos em datas diferentes, foram coletadas amostras com o solo seco para gerar um perfil para cada tipo de ensaio.

O perfil com o solo seco do ensaio com simulador de chuva (S2.1 e S2.2 (s)), apresentou umidades baixas na superfície, aumentando levemente com a profundidade. Iniciou com uma umidade de 3,5%, chegando a um valor máximo de 10% em 70 cm e

diminuindo para 6% em 100 cm (Figura 203). Os perfis de umidade gerados após os ensaios com simulador de chuva S2.1 (ú) e S2.2 (ú) tiveram comportamento parecidos, variando na profundidade entre 30 e 50 cm. Ambos iniciaram entre 13 e 16% e terminaram entre 9 e 10% em 100 cm. Na faixa em que diferenciam, o primeiro apresentou uma diminuição na umidade para valores próximos de 8%, ou seja, aproximando-se do perfil com o solo seco, em 30 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento do ensaio. O segundo manteve a faixa inicial até 45 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento do ensaio (Tabela 40).

Figura 202: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S2, para as profundidades: 20 e 200 cm.

O perfil com o solo seco do ensaio com duplo anel (S2 D.A. (s)), apresentou umidades baixas na superfície, aumentando levemente com a profundidade. Iniciou com uma umidade de 3,5%, chegando a um valor máximo de 11% em 40 cm e diminuindo para 10,5% em 50 cm e para um valor constante de 8% a partir de 150 cm (Figura 203). O perfil de umidade gerado após o ensaio com duplo anel (S2 D.A. (ú)) apresentou valores altos de umidade, variando entre 18 e 23%, até a profundidade amostrada de 70 cm. O perfil de umidade gerado não revela a profundidade atingida pela frente de molhamento.

Figura 203: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva do Local S2, para o solo seco (s) e úmido (ú).

Tabela 40: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S2.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S2	S2.1 (ú)	30	43
	S2.2 (ú)	45	70

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

Os ensaios com simulador de chuva e com duplo anel foram realizados em datas diferentes, portanto realizaram-se ensaios com o penetrômetro para o solo no estado seco, em ambas as datas.

Para os ensaios com simulador de chuva do Local S2 (S2.1 e S2.2), foi feito apenas um ensaio com penetrômetro, o S2a que revela valores de resistência do solo iniciando com 2MPa e chegando ao valor máximo de 8 MPa em 10 cm de profundidade, diminuindo para resistências aproximadamente constantes com a profundidade, variando de 0,2 a 1 MPa a partir de 50 cm (Figura 204: ensaio 2.a). Os ensaios S2.1 (ú) e S2.2 (ú) do mesmo gráfico

representam os ensaios realizados com o solo em estado úmido, após os respectivos ensaios com simulador de chuva. Em ambos os resultados pode-se observar a diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresentam desde a superfície uma resistência de aproximadamente 1,7 MPa, chegando à máxima de 2,5 MPa, em 20 cm e passando a se comportar exatamente como o ensaio S2.a, com o solo seco, a partir de 30 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento do ensaio S2.1 (ú) e próxima da atingida pelo ensaio S2.2 (ú), que foi de 45 cm (Tabela 40).

Comparando-se os ensaios realizados na data do ensaio com duplo anel, no estado seco e úmido, observa-se uma proximidade de valores de resistência, entre 0,5 e 2 MPa, até 40 cm de profundidade (Figura 204: ensaios 2.b e 2 D.A. (ú)). Ambos igualando-se aos resultados dos outros ensaios feitos no local a partir desta profundidade. A menor resistência acusada pelo ensaio com o solo no estado seco pode ser explicada devido à maior umidade em que o solo natural se encontrava na data de realização do ensaio, como pode ser observado no gráfico da Figura 203, citado anteriormente.

Para definição da taxa de infiltração do Local S2 foi feito ensaio com Duplo Anel, que gerou a curva de Infiltração da água no solo, definindo uma taxa de infiltração de 5,5 cm/h (Figura 205).

Figura 204: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S2.a e S2.b), mais ensaios com o solo úmido (S2.1 (ú), S2.2 (ú) e S2 D.A. (ú)), que representa o ensaio com simulador de chuva: S2.

Figura 205: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S2.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local S2 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 cm (Figura 206). No Local S2 os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 41) revelaram um solo de baixa erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentam valores de E40 e E52 maiores que 1.

Figura 206: Curvas absorção d'água do Local S2, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 cm.

Tabela 41: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S2.

Local	Curva	Prof.	s	P	E40	E52
(%)						
S2	S2.1	10	0,53	0,04	588,09	764,51
	S2.2	20	0,58	0,08	304,13	395,37
	S2.3	30	0,57	0,20	111,58	145,05
	S2.4	40	0,66	0,12	213,73	277,85
	S2.5	50	0,72	2,21	12,92	16,80
	S2.6	60	1,07	1,37	30,98	40,28
	S2.7	80	0,75	2,74	11,00	14,29
	S2.8	100	1,31	65,51	0,80	1,04

Legenda:

s = coeficiente angular da reta

P = Perda de Massa por Imersão

E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)

E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

7.3.2. Ensaio com Simulador de Chuva

7.3.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) em cada ensaio realizado e para as diversas pressões de bomba adotadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 42, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para cada ensaio do Local S2. Nestes ensaios com simulador de chuva adotaram-se intensidades médias de chuva entre 150 e 201 mm/h.

Tabela 42: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S2.

Local	Ensaio	Nº do	Pluviômetro			Intensidade média de chuva			
						Pressão A		Pressão B	
			x_i	y_i	d_i	I_{mPi}	I_{me}	I_{mPi}	I_{me}
		Nº	(m)	(m)	(m)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
S2	S2.1	P1	170	50	177,20	126,36	153,94	128,97	167,26
		P2	35	35	49,50	178,01		195,06	
		P3	170	100	197,23	144,19		163,03	
	S2.2	P1	170	30	172,63	188,65	201,10		
		P2	75	30	80,78	210,81			
		P3	170	100	197,23	200,58			

Legenda:

 Pi = Pluviômetro i x_i = projeção do Pi no eixo horizontal y_i = projeção do Pi no eixo vertical d_i = distância do centro do ensaio ao Pi Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio I_{mpi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Uma vista geral do ensaio S2.1 e a distribuição dos pluviômetros é apresentada na Figura 207 e do ensaio S2.2 na Figura 208. Notar que a vista do primeiro ensaio é da parte mais baixa do terreno para a parte mais alta e do segundo o inverso.

Figura 207: Montagem do ensaio S2.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

Figura 208: Montagem do ensaio S2.2, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

7.3.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaio

A Tabela 43 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para os ensaios do Local S2, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o ensaio S2.1, por exemplo, teve duração de 27 minutos, com medidas dos pluviômetros obtidas por 17 minutos.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 43: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para os ensaios S2.1 e S2.2, do Local S2.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Bico	Altura do bico (m)	Chuva simulada		Duração	
							Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	medidas (min)	ensaio (min)
S2.1	Pasto	19.74	3.55	0.77	16W	4.50	1.0	153.94	17	27
							1.5	167.26	7	16
S2.2	Pasto sem grama	15.92	3.54	0.77	16W	4.00	1.0	201.10	19	70

7.3.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 44 encontra-se um resumo dos processos observados durante os ensaios do Local S2. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial. Na maioria dos casos foi possível observar o instante de início do escoamento superficial nos limites da área ensaiada e o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Em alguns casos, porém, conseguia-se apenas observar o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Esse fato deve-se à dificuldade em observar o instante em que a água começava a escoar sob a grama do pasto.

A Figura 209 ilustra o início do empoçamento do ensaio S2.1. Nessa foto é possível notar a dificuldade em identificar o início de empoçamento e do escoamento superficial em terrenos com pasto, como uso do solo.

Tabela 44: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S2.

Ensaio Nº	Início	Ocorrências Diversas		Início de Empoçamento	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
					Início	Boca		
S2.1	0:00:00	0:04:30	Interrupção	0:07:10	8:40:00	-	0:27:00	30
		0:12:15	Interrupção					
		0:15:43	Interrupção					
		0:17:32	Interrupção					
		0:28:00	Mudança da I_{me}					
		0:31:30	Interrupção					
S2.2	0:00:00			0:02:27	0:03:15		0:43:00	45
		0:05:10	Formação Sulcos					
						00:05:50	1:10:00	

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

Figura 209: Início de empoçamento do ensaio S2.1.

7.3.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S2.1 teve duração total de 43 min, com duas intensidades médias de chuva diferentes. A primeira durante 27 min e a segunda durante 16 min, sem parar a chuva. Foram feitas medidas por 17 e por 7 min, respectivamente para cada etapa (Tabela 44). O gráfico da

Figura 210 mostra que, apesar da pequena variação na intensidade média de chuva, o escoamento superficial não teve variação significativa.

Figura 210: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S2.1.

O ensaio S2.2 teve duração total de 70 min, com medição da chuva por 19 min (Tabela 44). O gráfico da Figura 211 mostra que o escoamento superficial foi crescente em função do tempo de ensaio, sem variação da intensidade de chuva.

A Figura 212 ilustra o ensaio S2.2 em andamento no início, quando ainda não havia escoamento superficial. O início deste pode ser observado na Figura 213. Notar a água sobrando na superfície e iniciando o escoamento. A Figura 214 mostra o momento em que o escoamento superficial do ensaio S2.2 chegou à boca de captação (ver Tabela 44) e a Figura 215 mostra o escoamento superficial do ensaio S2.1 durante o ensaio.

Figura 211: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio S2.2.

Figura 212: Ensaio S2.2 em andamento, ainda sem empocamento.

Figura 213: Início do escoamento superficial no ensaio S2.2. Notar a água sobrando na superfície e formando o escoamento.

Figura 214: Chegada do escoamento superficial na boca de captação do ensaio S2.2.

Figura 215: Escoamento superficial do ensaio S2.1.

7.3.2.5. *Sedimento Gerado*

O gráfico da Figura 216 apresenta o sedimento gerado no ensaio S2.1, realizado num tempo total de 43 min, com 2 intensidades de chuva diferentes (Tabela 44). Somente com a segunda I_{me} houve pequena geração de sedimento, que foi coletado 2 vezes e teve quantidades aproximadamente iguais.

Dos 3 ensaios apresentados até aqui, que geraram sedimento, somente o S2.1 foi realizado em pasto, uma das possíveis explicações da menor quantidade de sedimento gerado nesse ensaio.

O sedimento gerado no ensaio S2.2 é apresentado no gráfico da Figura 217. Foram realizadas 6 coletas durante os 70 min de ensaio. Excluindo-se a primeira coleta, nota-se uma tendência à diminuição da quantidade de sedimento gerado em função do tempo. As condições em que foi realizado esse ensaio permitiram que fosse gerada maior quantidade de sedimento que os ensaios anteriores.

Figura 216: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S2.1.

Figura 217: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio S2.2.

7.3.3. Considerações Gerais dos Ensaios do Local 2

As chuvas simuladas nos ensaios do Local S2 também foram de intensidade maior que chuvas naturais da região. Nos ensaios S2.1 e S2.2 as intensidades médias de chuva variaram entre 154 e 201 mm/h (Tabela 43), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio de duplo

anel, neste local foi 5,5 cm/h (Figura 205). No ensaio S2.1 foram adotadas 2 intensidades médias de chuva, 153,94 e 167,26 mm/h (Tabela 43), gerando taxas de infiltração máximas de 6,3 e 7,9 cm/h (Figura 210), respectivamente. Lembrando que essa taxa foi calculada em função da medida do escoamento superficial, subtraído da intensidade de chuva, observa-se que com intensidades de chuva menores, ou reais, a tendência é de que toda a água infiltre, não gerando escoamento superficial algum. Neste primeiro ensaio o escoamento superficial manteve-se praticamente constante.

O ensaio S2.2 comprova essa observação, uma vez que com intensidade de chuva maior (201,10 mm/h - Tabela 43), gerou infiltração máxima de 15,5 cm/h, decrescendo com o tempo de ensaio para 5,9 cm/h (Figura 211). Nesse caso, tanto a elevada intensidade de chuva, quanto a retirada da grama podem ter influenciado na geração crescente de escoamento superficial, com o tempo de ensaio.

7.4. Ensaios do Local S3

A Figura 218 apresenta um croqui com a distribuição dos ensaios do Local S3 e Local S6. O Local 3 contém um ensaio com o simulador de chuva (S3.1) e 1 ensaio com penetrômetro (S3.a), enquanto o Local S6 contém um ensaio realizado (S6.1) com o simulador de chuva, 6 ensaios com penetrômetro (S6.a à S6.f) e um ponto de retirada de amostras indeformadas (A.I.).

A Figura 219 mostra uma vista geral do ensaio S3.1 em andamento.

Figura 218: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S3 e Local S6.

Figura 219: Vista geral dos ensaios S3.1 em andamento.

7.4.1. Ensaaios de Caracterização

Os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) massa específica do solo seco (ρ_d) e massa específica natural do solo (ρ) do Local 3, apresentados na Tabela 45, foram considerados os mesmos do Local 6, apresentado à frente, devido à proximidade física entre ambos os locais. Os demais índices apresentados na Tabela 45 variaram em função da condição diferente da umidade na execução de cada série de ensaios.

Assim, a massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação com a profundidade, enquanto a massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ) apresentaram diminuição com a profundidade. O índice de vazios (e) e a porosidade (n) apresentaram aumento nos valores, com a profundidade. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) apresentaram valores crescentes com a profundidade, porém com pouca variação (Tabela 45).

Tabela 45: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco e úmido, em profundidade até 102 cm, do Local S3.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido (S.C.)		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
S3.1.1	18	2,53	2,00	1,92	0,30	24,11	2,74	5,26	23,15	15,01	28,83	83,50
S3.1.2	33	2,53	1,95	1,85	0,35	26,88	3,76	6,95	27,46	14,97	27,69	77,02
S3.1.3	44	2,53	1,95	1,85	0,35	26,88	4,07	7,53	29,41	13,54	25,05	72,41
S3.1.4	55	2,53	1,87	1,77	0,41	30,04	4,58	8,11	27,95	14,86	26,31	67,87
S3.1.5	77	2,53	1,89	1,78	0,40	29,64	4,73	8,41	29,76	15,09	26,86	70,62
S3.1.6	102	2,53	1,89	1,78	0,41	29,64	4,98	8,87	31,10	7,44	13,25	42,97

A granulometria do Local S3 foi considerada igual à do Local S6 (item 7.7), devido à proximidade entre ambos (Figura 218). Os ensaios de resistência do solo à penetração, com o solo seco, do Local S6 foram considerados como complemento aos ensaios do Local S3, também devido à sua proximidade aos ensaios do Local S3.

Os resultados de resistência S3.a, com o solo seco, iniciam com 4 MPa, chegando ao valor de 11 MPa em 20 cm, diminuindo com a profundidade para uma resistência aproximadamente constante de 1,2 MPa, a partir de 80 cm (Figura 220). Lembrando que os ensaios do Local 3 e do Local 6 foram realizados em anos diferentes, observamos que os ensaios do Local 6 com o solo seco (S6.c e S6.d), considerados neste local, apresentam resistências superficiais bem menores que o ensaio do Local 3 descrito (S3.a). A diferença está relacionada à variação na umidade do solo em cada momento de execução dos ensaios (Figura 221), lembrando que foram realizados em datas diferentes, portanto em condições de umidade diferentes. Os valores de resistência desses ensaios (S6.c e S6.d) iniciam entre 1,8 e 4,0 MPa até 30 cm de profundidade e diminuem para a mesma resistência aproximadamente constante de 1,2 MPa, a partir de 80 cm, que o ensaio S3.a (Figura 220). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado por S3.1 (ú). Pode-se observar a brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, que nesse estado apresenta desde a superfície uma resistência iniciando em 1 MPa e variando entre 2 e 0,7 MPa até 80 cm. Nesta profundidade os valores S3.1 (ú) tendem aos mesmos valores dos ensaios com o solo seco, tendendo à mesma resistência constante, com a profundidade. A diminuição é brusca, comparando-se com o ensaio S3.1, realizado em condições de umidade mais baixas que os ensaios S6.c e S6.d (Figura 221). Observa-se também que a resistência do

solo úmido diminuiu até a profundidade atingida pela frente de molhamento que foi de 85 cm (Tabela 46).

No Local S3 coletaram-se amostras para definição de perfis de umidade com o solo no estado seco e após cada ensaio com simulador de chuva, no estado úmido. O perfil com o solo seco S3.1 (s), apresentou umidades mínimas na superfície, aumentando levemente com a profundidade. Iniciou com uma umidade de 1%, chegando a um valor máximo de 5% em 100 cm (Figura 221). O perfil de umidade gerado após o ensaio com simulador de chuva S3.1 (ú) apresentou valores altos, variando entre 13,5 e 15% até 85 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento (Tabela 46). Os dados de umidade do Local S6, apresentados no gráfico da Figura 221 e na Tabela 46 serão descritos no item 7.7.

Figura 220: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S3.a, S6.c e S6.d), mais ensaio com o solo úmido (S3.1 (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S3.1.

Figura 221: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva do Local S3 e do Local S6, para o solo seco (s) e úmido (ú).

Tabela 46: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S3 e do Local S6.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S3	S3.1 (ú)	85	112
S6	S6.1 (ú)	200	251

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

7.4.2. Ensaios com Simulador de Chuva

7.4.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) no ensaio realizado e para a pressão de bomba adotada no ensaio são apresentadas na Tabela 47, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e

localização dos pluviômetros para o ensaio do Local S3. Nesse ensaio com simulador de chuva adotaram-se intensidades médias de chuva entre 170 e 185 mm/h.

Tabela 47: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S3.

Nº do Local	Nº do Ensaio	Nº	Pluviômetro			Intensidade média de chuva Pressão A	
			x_i (m)	y_i (m)	d_i (m)	I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)
S3	S3.1	P1	180	100	205,91	171,45	179,07
		P2	20	75	77,62	185,10	

Legenda:

P_i = Pluviômetro i

x_i = projeção do P_i no eixo horizontal

y_i = projeção do P_i no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao P_i

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mpi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

7.4.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaio

A Tabela 48 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para os ensaios do Local S3, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 48: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S3.1, do Local S3.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice de Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Chuva simulada					
					Bico	Altura do bico (m)	Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	Duração medidas (min)	Duração ensaio (min)
S3.1	Pasto	16.97	2.11	0.37	16W	4.50	1.0	179.07	20	112

7.4.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 49 encontra-se um resumo dos processos observados durante o ensaio do Local S3. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial. A Figura 222 ilustra o momento de início de empoçamento do ensaio S3.1. Notar no canto inferior direito que nessa região não sobra água no solo. Na Figura 223 quase a área toda já tem água sobrando na superfície, porém o escoamento ainda não se iniciou no momento da foto, o que é possível observar no canto inferior direito que não tem água sobrando na superfície.

Tabela 49: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S3.

Ensaio Nº	Início	Ocorrências Diversas	Início de Empoçamento	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
				Início	Boca		
S3.1	0:00:00		0:05:43	0:08:01	0:13:27	1:52:00	85

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

Figura 222: Início de empoçamento do ensaio S3.1.

Figura 223: Empoçamento do ensaio S3.1.

7.4.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S3.1 teve duração total de 112 min, com medição da chuva por 20 min (Tabela 49). O gráfico da Figura 224 mostra que o escoamento superficial foi crescente em função do tempo de ensaio, sem variação da intensidade de chuva. A Figura 225 ilustra o escoamento superficial do ensaio S3.1 na boca de captação, onde era coletado para medição.

Figura 224: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 3.1.

Figura 225: Escoamento superficial do ensaio S3.1, na boca de captação.

7.4.2.5. Sedimento Gerado

O sedimento gerado no ensaio S3.1 é apresentado no gráfico da Figura 226. Foram realizadas 3 coletas durante os 112 min de ensaio. As coletas foram distribuídas durante o ensaio e o sedimento gerado apesar de pouco, foi igual em todas as coletas.

Figura 226: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1.

7.4.3. Considerações Gerais dos Ensaios do Local 3

A chuva simulada no ensaio do Local S3 também foi de intensidade maior que chuvas naturais da região. A intensidade média de chuva do Local S3.1 foi de 179,07 mm/h (Tabela 47), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio de Guelph, neste local foi 2,6 cm/h. No ensaio S3.1 foi adotada somente uma intensidade média de chuva, que gerou taxas de infiltração máxima de 12,0 cm/h e mínima de 9,2 cm/h (Figura 224). Lembrando que essa taxa foi calculada em função da medida do escoamento superficial, subtraído da intensidade de chuva, observa-se que com intensidades de chuva menores, ou reais, a tendência é de que toda a água infiltre, não gerando escoamento superficial algum. Neste ensaio o escoamento superficial também aumentou com o tempo.

A Figura 227 e a Figura 228, a seguir, ilustram a área ensaiada após o ensaio S3.1. Pode-se observar nas 2 figuras o sedimento deslocado e depositado. Essa é uma mostra da erosão laminar que se pretende mensurar por meio dos ensaios com simulador de chuva. Nessas figuras observamos qualitativamente que a erosão laminar acontece de forma visível. Outra comprovação desse processo é mostrada na Figura 229, num sulco formado para escoamento da área ensaiada observa-se a quantidade considerável de sedimento que foi arrastada e depositada nesse local, que estava há aproximadamente 2 m da boca de captação.

É importante observar que, se existe evidência de geração de sedimento, mas a quantidade de sedimento coletado foi pequena, existe alguma falha no procedimento adotado para o ensaio. Talvez devido ao curto tempo de ensaio, quando comparado a ensaios de coleta de sedimentos, realizados durante todos os meses chuvosos, ou mesmo anuais. Ou devido à escala em que foi realizado, numa área de 3,0 por 3,50 m, enquanto os ensaios para determinação de sedimento gerado realizados para alimentar a Equação Revisada Universal da Perda de Solo (RUSLE), a superfície de erosão padrão pra medição do efeito da chuva é um lote baldio cultivado continuamente, com 22,1 m de comprimento por 4,1 m de largura, que permite o desenvolvimento de tipo de erosão em sulcos e inter-sulcos (MUTCHLER et al. 1994).

Figura 227: Detalhe 1 da área ensaiada após o ensaio S3.1, mostrando o deslocamento e deposição do sedimento.

Figura 228: Detalhe 1 da área ensaiada após o ensaio S3.1, mostrando o deslocamento e deposição do sedimento.

Figura 229: Escoamento superficial concentrado fora da área ensaiada, mostrando o deslocamento e deposição do sedimento (ensaio S3.1).

Convém lembrar que os ensaios citados são realizados com chuvas naturais, enquanto a proposta seria de obter dados de geração de sedimento com simulação de chuvas. Ensaios realizados com simuladores, porém, consideram áreas menores, da ordem de 1,0 por 1,0 m. Áreas tão pequenas impossibilitariam o desenvolvimento de erosão em sulcos. Entretanto, nos ensaios realizados com a área de 3,0 por 3,5 m também não ocorreu o desenvolvimento de sulcos.

7.5. Ensaios do Local S4

No Local S4 foram feitos 1 ensaio com o simulador de chuva (S4.1) e 2 ensaios com penetrômetro (S4.a e S4.b) (Figura 230). O ensaio S4.1 e o ensaio S4.a foram realizados sobre cordão em nível recém-formado em um terreno utilizado anteriormente para pasto, mas no momento do ensaio estava sendo preparado para plantação de cana. A Figura 231 ilustra a situação do ensaio. Já o ensaio S4.b foi feito em pasto, conforme indicado na Figura 230.

Figura 230: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S4.

Figura 231: Vista geral da localização do ensaio S4.1 em andamento, mostrando que o ensaio foi feito sobre um cordão em nível formado recentemente.

7.5.1. Ensaios de Caracterização

Os ensaios do Local 4 foram feitos em terreno recém-preparado para plantação de cana, apresentando o solo superficial remexido. O ensaio com penetrômetro S4.b com o solo seco, porém, foi feito sobre pasto próximo ao Local 4, distante aproximadamente 150 m, a título de comparação entre os ensaios de resistência à penetração, principalmente. Assim, os resultados do ensaio S4.b apresentaram valores aproximados aos da maioria dos ensaios de resistência à penetração do solo em pasto, ou seja, com valores mais altos na superfície, iniciando em 4 MPa até valores máximos de 10 MPa até 20 cm de profundidade (Figura 232). A partir desse ponto diminui até uma resistência aproximadamente constante com a profundidade, de 1,2 MPa a partir de 80 cm. Enquanto os resultados do ensaio S4.a, feito sobre o solo remexido seco, apresentaram resistências mais baixas desde a superfície entre 0,5 e 2 MPa até 80 cm, ponto a partir do qual apresenta um ganho de resistência em relação ao primeiro ensaio descrito, chegando a valores máximos de 8,8 MPa entre 80 e 100 cm de profundidade. Nota-se que são valores parecidos com aqueles atingidos pelo ensaio S4.b na superfície. A diminuição dos valores de resistência até 80 cm no solo remexido explica-se pela alteração da sua estrutura e compactação causada pelos equipamentos de preparo do solo. O peso desses equipamentos pode ter causado nova compactação abaixo da camada remexida,

causando esse aumento de resistência na profundidade de 80 cm, ou, essa profundidade coincide com a compactação inicial encontrada no ensaio S4.b, pois recebeu o volume do cordão e não sofreu alteração em sua compactação.

No gráfico da Figura 232 os ensaios realizados com o solo em estado úmido são denominados S4.1A (ú) e S4.1B (ú). Pode-se observar comportamento igual em ambos os resultados, que apresentaram brusca diminuição de resistência do solo, causada por aumento na umidade do solo, com resistência iniciando em 0,2 MPa e variando entre 0,2 e 1,2 MPa até 80 cm. Nesta profundidade os valores de resistência dos ensaios S4.1A (ú) e S4.1B (ú) tornam-se próximos aos do ensaio S4.b, com o solo seco, tendendo à mesma resistência constante. Observa-se que a resistência do solo úmido diminuiu até profundidade pouco maior que a atingida pela frente de molhamento que foi de 60 cm (Tabela 50).

Figura 232: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S4.a e S4.b), mais ensaios com o solo úmido (S4.1A (ú) e S4.1B (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S4.1.

Os ensaios com penetrômetro do Local S4 são ilustrados na Figura 233 e na Figura 234. A primeira mostra o ensaio S4.a sendo executado com o solo ainda seco e a segunda mostra o ensaio S4.1A (ú), após o ensaio com simulador de chuva.

Figura 233: Realização do ensaio com penetrômetro S4.a, com o solo seco.

Figura 234: Realização do ensaio com penetrômetro S4.1A (ú), com o solo úmido.

No Local S4 coletaram-se amostras para definição de perfis de umidade com o solo no estado seco e após cada ensaio com simulador de chuva, no estado úmido. O perfil com o solo seco S4.1 (s), apresentou umidades baixas entre 3 e 6% até 100 cm (Figura 235). O perfil de umidade gerado após o ensaio com simulador de chuva S4.1 (ú) apresentou valores altos, variando entre 17 e 21,7% até 60 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento (Tabela 50). A partir dessa profundidade os valores diminuíram para uma faixa entre 6 e 10%.

Tabela 50: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S4.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S4	S4.1A (ú)	60	58
	S4.1B (ú)	60	

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

Figura 235: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva do local 4, para o solo seco (s) e úmido (ú).

7.5.2. Ensaio com Simulador de Chuva

7.5.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) no ensaio realizado e para a pressão de bomba adotada no ensaio são apresentadas na Tabela 51, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para o ensaio do Local S4. Neste ensaio com simulador de chuva adotaram-se intensidades médias de chuva de 174 mm/h.

A distribuição dos pluviômetros do ensaio S4.1 é ilustrada na Figura 236. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

Tabela 51: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S4.

Nº Do	Nº do	Pluviômetro	Intensidade média de chuva						
			Pressão A				Pressão B		
Local	Ensaio	Nº	x_i (m)	y_i (m)	d_i (m)	I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)	I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)
S4	S4.1	P1	30	50	58,31	176,20	173,47	200,56	214,00
		P2	180	50	186,82	171,53		230,29	
		P3	170	100	197,23	171,21		218,08	

Legenda:

P_i = Pluviômetro i

x_i = projeção do P_i no eixo horizontal

y_i = projeção do P_i no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao P_i

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mpi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Figura 236: Montagem do ensaio S4.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

7.5.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaio

A Tabela 52 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para o ensaio do Local S4, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o ensaio S4.1 teve duração de 6 minutos, com medidas dos pluviômetros obtidas por 5 minutos.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 52: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S4.1, do Local S4.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice de Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Bico	Altura do bico (m)	Chuva simulada			
							Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	Duração medidas (min)	Duração ensaio (min)
S4.1	Solo arado	21.44	2.38	0.43	16W	4.00	1.0	173.47	5	6
							1.5	214.00	29	52

7.5.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 53 encontra-se um resumo dos processos observados durante o ensaio do Local S4. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial.

Tabela 53: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S4.

Ensaio Nº	Início	Ocorrências Diversas	Início de Empoçamento	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
				Início	Boca		
S4.1	0:00:00					0:06:00	60
	0:06:01	0:10:40	Formação Sulcos	0:06:35	0:08:55	0:12:30	
		0:13:20	Escoamento concentrado				
		0:43:10	Escoamento concentrado			0:58:00	

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

As ocorrências diversas do ensaio S4.1 são ilustradas na Figura 237, na Figura 238 e na Figura 239. A primeira mostra o início do empoçamento, a segunda o início do escoamento superficial e a última mostra o início da formação de sulcos. Na Figura 240 nota-se a quantidade de sulcos formados pelo ensaio.

Figura 237: Início de empoçamento do ensaio S4.1.

Figura 238: Início do escoamento superficial do ensaio S4.1.

Figura 239: Início de formação de sulcos, no ensaio S4.1.

Figura 240: Sulcos formados na área ensaiada, após o término do ensaio S4.1.

7.5.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S4.1 teve duração total de 58 min, com duas intensidades médias de chuva diferentes. A primeira durante 6 min e a segunda durante 52 min, sem parar a chuva. Foram feitas medidas por 6 e 29 min, respectivamente para cada etapa (Tabela 53). Foram feitas coletas somente no segundo intervalo, portanto, o gráfico da Figura 241 mostra que o escoamento superficial aumenta em função do tempo, sem variação da intensidade de chuva.

Figura 241: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 4.1.

7.5.2.5. Sedimento Gerado

O gráfico da Figura 242 apresenta o sedimento gerado no ensaio S4.1, realizado num tempo total de 58 min, com 2 intensidades de chuva diferentes. A primeira I_{me} durou poucos minutos, sendo praticamente o ensaio todo com a segunda I_{me} , período em que foram coletadas as 4 amostras de sedimento gerado. O gráfico mostra que as quantidades coletadas de sedimento foram bem maiores que as dos demais ensaios. A maioria das variáveis deste ensaio (declividade e rugosidade do terreno, chuva simulada, *etc.*) foi favorável à grande geração de sedimento, mas o fator determinante foi o tipo de cobertura, ou seja, a terra arada. A terra trabalhada fica solta, deixando o solo mais propício aos processos erosivos. Observa-se no gráfico que, desconsiderando a segunda coleta, as quantidades geradas de sedimento também mantém certa constância.

A coleta de amostras para medição do escoamento superficial e do sedimento gerado é ilustrada na Figura 243 e na Figura 244. A primeira mostra a coleta da amostra na boca da área ensaiada e a segunda mostra o armazenamento da amostra coletada em potes plásticos.

Figura 242: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1.

Figura 243: Coleta de amostra na boca de captação para medir o escoamento superficial e sedimento gerado, durante o ensaio S4.1.

Figura 244: Armazenamento de uma amostra coletada durante o ensaio S4.1.

7.5.3. Considerações Gerais do Ensaio do Local 4

As chuvas simuladas no ensaio do Local S4 também foram de intensidade maior que chuvas naturais da região. No ensaio S4.1 foram adotadas 2 intensidades médias de chuva, 173,47 e 214,00 mm/h (Tabela 51), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. As taxas de infiltração geradas foram máxima de 20,4 cm/h e mínima de 15,4 cm/h. Lembrando que essas taxas foram calculadas em função da medida do escoamento superficial, subtraído da intensidade de chuva.

Apesar de não ter sido realizado outro tipo de ensaio para gerar taxa de infiltração neste local, observa-se que a infiltração de água é elevada, pois durante o ensaio foram obtidas taxas de escoamento superficial, relativamente baixas (mínima de 1,0 cm/h e máxima de 6,0 cm/h - Figura 241), quando comparadas com os ensaios dos locais anteriores. Nesse ensaio o escoamento superficial também aumentou com o tempo.

O ensaio S4.1 foi o único a apresentar ocorrência de sulcos durante sua realização. Isso apesar de apresentar uma alta infiltração e, conseqüentemente, baixo escoamento superficial. Tal fato pode ser explicado devido ao uso do solo na data da realização do ensaio e a intervenções locais feitas pela esteira do trator. Tratava-se de um antigo pasto, que foi retirado, e o solo remexido para receber plantação de cana.

Embora tenham sido utilizadas intensidades de chuvas maiores que as registradas na região, poucos dias depois se observou a ocorrência de sulcos em toda a área preparada para receber a cana, causados por chuva de intensidade média de 36 mm/h, num evento com 41,8 min de duração. A sequência de fotos a seguir mostra a ocorrência e evolução de sulcos na área. Assim, a Figura 245 mostra uma vista geral da área preparada para receber plantação de cana. A foto foi tirada depois do preparo do solo e antes de ocorrerem as primeiras chuvas. No mesmo período da realização do ensaio S4.1. A Figura 246 mostra um detalhe de cordão em nível recém-construído na área preparada para receber a cana.

Figura 245: Vista geral da área preparada para receber plantação de cana, antes da primeira chuva.

Figura 246: Detalhe de cordão em nível recém-construído na área preparada para receber plantação de cana, antes da primeira chuva.

As fotos da Figura 247 (a) e (b) foram tiradas durante a primeira chuva depois do preparo do solo e mostra a ocorrência dos primeiros sulcos. Enquanto a foto da Figura 248 foi feita logo após o término da primeira chuva (com 23 mm acumulados) e mostra o resultado dos sulcos gerados.

A Figura 249 e a Figura 250 (a) e (b) mostram, respectivamente, uma vista mais geral da área e detalhes dos sulcos formados depois de um período de 15 dias de chuva, acumulando 126 mm. Pode-se observar nessas 3 fotos que os sulcos ocorreram, preferencialmente, nas marcas da esteira do trator utilizado no preparo do solo. As incisões dos sulcos se deram em pontos, ou linhas, em que houve alguma modificação tornando-os caminhos preferenciais de concentração do fluxo.

(a)

(b)

Figura 247: Detalhes de sulcos ocorridos na área preparada para receber plantação de cana, durante uma das primeiras chuvas.

Figura 248: Vista geral da área preparada para receber plantação de cana, após as primeiras chuvas.

Figura 249: Vista geral da área preparada para receber plantação de cana, após 15 dias da primeira chuva.

(a)

(b)

Figura 250: Detalhes de sulcos ocorridos na área preparada para receber plantação de cana, após 15 dias da primeira chuva.

7.6. Ensaio do Local S5

No Local S5 foram feitos 3 ensaios (os S5.1 e S5.2 com pasto e o S5.3 sem grama) com o simulador de chuva, 7 ensaios com penetrômetro (S5.a à S5.g), um ensaio com duplo anel e um ponto de retirada de amostras indeformadas (A.I.) (Figura 251).

Figura 251: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S5.

7.6.1. Ensaio de Caracterização

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local S5 (Tabela 54) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), não apresentou variação com a profundidade, enquanto a massa específica natural do solo (ρ) e a massa específica do solo seco (ρ_d) apresentaram pequeno aumento na profundidade de 40 cm (Tabela 54). O índice de vazios (e) e a porosidade (n) seguiram a mesma variação, apresentando valores menores na profundidade de 40 cm. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) somente apresentaram leve aumento na profundidade de 40 cm.

Tabela 54: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 200 cm, do Local S5.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido (D.A.)		
							w (%)	q (%)	S (%)	w (%)	q (%)	S (%)
S5.2.1	10	2,61	1,66	1,55	0,66	39,71	5,49	8,51	21,76	21,56	33,41	61,74
S5.2.2	20	2,61	1,66	1,55	0,66	39,65	5,39	8,35	21,41	20,91	32,42	60,57
S5.2.3	30	2,61	1,80	1,70	0,53	34,53	5,34	9,08	26,42	21,30	36,21	73,26
S5.2.4	40	2,61	1,80	1,70	0,55	35,59	7,07	12,01	33,38	21,05	35,78	72,75
S5.2.5	50	2,61	1,76	1,59	0,59	36,91	6,89	10,95	30,73	21,40	34,02	69,79
S5.2.6	75	2,61	1,68	1,54	0,64	39,08	5,66	8,71	23,02	19,89	30,63	60,19
S5.2.7	110	2,61	1,68	1,54	0,63	38,82	5,22	8,03	21,45	18,70	28,80	57,82
S5.2.8	150	2,61	1,68	1,54	0,63	38,73	5,06	7,79	20,89	16,60	25,56	53,39
S5.2.9	200	2,61	1,68	1,54	0,63	38,76	5,11	7,87	21,08	-	-	-

Na coleta de amostra de solo para definição do perfil de umidade, observou-se que a frente de molhamento havia atingido diferentes profundidades nos limites da área do ensaio com simulador S5.2. No ponto de cota mais alta, a frente de molhamento atingiu a profundidade de 137 cm, enquanto que no ponto de cota mais baixa, ou seja, mais próximo da boca de captação, atingiu 160 cm. Desta forma, optou-se por fazer 2 perfis de umidade e 2 ensaios com penetrômetros nos pontos indicados na Figura 252, o S5.2A (ú), na cota mais alta e o S5.2B (ú) na cota mais baixa. As amostras para esses 2 perfis de umidade foram coletadas simultaneamente, mas apresentaram curvas de umidade com valores diferentes. Enquanto no perfil S5.2A (ú) a umidade varia entre 12 e 17%, até 130 cm de profundidade, no perfil S5.2B (ú) varia entre 18 e 20% até 160 cm (Figura 253). O perfil de umidade do ensaio S5.3 (ú) apresentou umidades entre 14 e 17% até a profundidade de 105 cm, atingida pela frente de molhamento (Tabela 55), com valor tendendo à mesma umidade medida com o solo seco (S5.2 (s)). O perfil de umidade do ensaio com Duplo Anel S5D.A. (ú) apresentou umidades entre 19 e 22% até a profundidade de 155 cm, atingida pela frente de molhamento (Tabela 55), com valor tendendo à mesma umidade medida com o solo seco (S5.2 (s)) (Figura 253).

Figura 252: Croqui com detalhe da distribuição dos ensaios com penetrômetro que representam o ensaio com simulador: S5.2 do Local S5.

Figura 253: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S5, para o solo seco (s) e úmido (ú).

Tabela 55: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S5.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S5	S5.2A (ú)	137	260
	S5.2B (ú)	160	
	S5.3 (ú)	105	206
	S5 (D.A.)	155	120

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

A granulometria do Local S5 apresenta um solo superficial arenoso (60% de areia fina e 30% de areia média), com 8% de argila e 2% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com variação nas porcentagens de areia fina (45%) e de areia média (45%) (Figura 254). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 254: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.

Os ensaios com penetrômetro feitos ao redor do ensaio S5.1, com o solo no estado seco, revelaram valores baixos de resistência (entre 1 e 3 MPa) nos primeiros 60 cm, diminuindo para resistência aproximadamente constante com a profundidade de 0,8 MPa

(Figura 255: ensaios S5.c, S5.d, S5.e e S5.g). Após o ensaio com simulador de chuva S5.1 não foram feitos ensaios com penetrômetro.

Figura 255: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S5.c, S5.d, S5.e e S5.g), que representam o ensaio com simulador de chuva: S5.1.

Os ensaios com penetrômetro feitos ao redor do ensaio S5.2, com o solo no estado seco, revelaram valores baixos de resistência (entre 0,8 e 2,5 MPa) nos primeiros 60 cm, diminuindo para resistência aproximadamente constante com a profundidade de 0,7 MPa (Figura 256: ensaios S5.a e S5.c). Os valores de resistência dos ensaios com o solo úmido S5.2A (ú) e S5.2B (ú) têm comportamento igual, apesar da pequena diferença nos perfis de umidade comentados acima. Como os valores de resistência do solo seco mostraram-se baixos, não houve diminuição significativa da resistência com o solo úmido em ambos os ensaios (Figura 256).

Os ensaios com penetrômetro feitos ao redor do ensaio S5.3, com o solo no estado seco, revelaram valores baixos de resistência (entre 0,9 e 2,2 MPa) nos primeiros 80 cm, diminuindo para resistência aproximadamente constante com a profundidade de 0,7 MPa (Figura 257: ensaios 5.a, 5.b e 5.d). No mesmo gráfico o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado S5.3 (ú). Como os valores de resistência do solo seco mostraram-se baixos, não houve diminuição significativa de resistência com o solo úmido (Figura 257).

Uma vez que o espectro de umidade, entre o solo seco e o solo úmido, foi amplo (Figura 253), nota-se que a resistência inicial do solo seco do Local S5 é muito baixa.

Figura 256: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S5.a e S5.c), mais ensaios com o solo úmido (S5.2A (ú) e S5.2B (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S5.2.

Figura 257: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S5.a, S5.b e S5.d), mais ensaio com o solo úmido (S5.3 (ú)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S5.3.

Para definição da taxa de infiltração do Local S5 foram feitos ensaios com Duplo Anel e com o tubo de Guelph. O primeiro gerou a curva de Infiltração da água no solo, definindo uma taxa de infiltração de 23 cm/h (Figura 258), enquanto o segundo gerou uma taxa de infiltração de 9,39 cm/h.

Figura 258: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S5.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local S5 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 cm (Figura 259).

No Local S5 os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 56) revelaram um solo de baixa erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentam valores de E40 e E52 maiores que 1.

Tabela 56: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S5.

Local	Curva	Prof.	s	P (%)	E40	E52
S5	S5.1	10	0,7369	0,86	34,3395	44,6414
	S5.2	20	0,9827	0,66	59,8650	77,8245
	S5.3	30	1,3735	2,53	21,7526	28,2784
	S5.4	40	0,6392	0,71	35,9259	46,7036
	S5.5	50	0,4498	8,85	2,0323	2,6420
	S5.6	60	4,3569	72,09	2,4175	3,1428
	S5.7	80	3,7765	65,41	2,3094	3,0023
	S5.8	100	3,7805	74,14	2,0397	2,6517

Legenda:

s = coeficiente angular da reta

P = Perda de Massa por Imersão

E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)

E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

Figura 259: Curvas absorção d'água do Local S5, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 cm.

7.6.2. Ensaios com Simulador de Chuva

7.6.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) em cada ensaio realizado e para as diversas pressões de bomba adotadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 57, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para cada ensaio do Local S5. Nestes ensaios com simulador de chuva adotaram-se intensidades médias de chuva entre 55 e 92 mm/h. Nota-se que nos ensaios desse local adotaram-se I_{me} menores que as dos locais anteriores. O ensaio do Local S5, assim como os do Local S7 e parte do Local 6, foi realizado com I_{me} menores com a intenção de aproximá-las aos valores reais medidos por pluviógrafo instalado na região estudada, com histórico de 3 anos.

A distribuição dos pluviômetros dos ensaios S5.1, S5.2 e S5.3 são ilustradas na Figura 260, na Figura 261 e na Figura 262, respectivamente.

Tabela 57: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S5.

Nº do Local	Nº do Ensaio	Nº	Pluviômetro			Intensidade média de chuva			
			x_i (m)	y_i (m)	d_i (m)	Pressão A		Pressão B	
						I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)	I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)
S5	S5.1	P1	160	30	162,79	141,49	92,21		
		P2	15	20	25,00	84,64			
	S5.2	P1	170	15	170,66	55,25	55,01	111,33	92,18
		P2	60	0	60,00	54,93		85,45	
	S5.3	P1	160	20	161,25	59,65	55,60	54,28	73,27
		P2	45	20	49,24	54,36		79,07	

Legenda:

Pi = Pluviômetro i

x_i = projeção do Pi no eixo horizontal

y_i = projeção do Pi no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao Pi

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mpi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Figura 260: Montagem do ensaio S5.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.

Figura 261: Montagem do ensaio S5.2, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.

Figura 262: Montagem do ensaio S5.3, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.

7.6.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaios

A Tabela 58 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para os ensaios do Local S5, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depression storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o ensaio S5.1 teve duração de 47 min, com medidas dos pluviômetros obtidas por 47 min, o ensaio S5.2 teve duração de 240 min, com medidas dos pluviômetros obtidas por 171 min e o ensaio S5.3 teve duração de 180 min, com medidas dos pluviômetros obtidas por 88 min.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 58: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para os ensaios S5.1, S5.2 e S5.3, do Local S5.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Bico	Altura do bico (m)	Chuva simulada		Duração	
							Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	medidas (min)	ensaio (min)
S5.1	Pasto	10.38	6.88	2.22	50W	2.72	2.0	92.21	47	47
S5.2	Pasto	7.75	3.45	0.75	50W	3.78	1.5	55.01	171	240
							3.0	92.18	20	20
S5.3	Pasto sem grama	9.4	2.52	0.47	50W	3.66	1.8	55.60	88	180
							2.8	73.27	16	26

7.6.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 59 encontra-se um resumo dos processos observados durante os ensaios do Local S5. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial. Na maioria dos casos foi possível observar o instante de início do escoamento superficial nos limites da área ensaiada e o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Em alguns casos, porém, conseguia-se apenas observar o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Esse fato se deve à dificuldade em observar o instante em que a água começava a escoar sob a grama do pasto.

Tabela 59: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S5.

Ensaio N°	Início	Ocorrências Diversas		Início de Empoçamento	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
					Início	Boca		
S5.1	0:00:00	0:09:40	Poças fora da A _c	0:16:15	-	-	0:47:00	SM
		0:12:00	ES fora da Ac					
S5.2	0:00:00	vários	Poças efêmeras	-	-	-	3:40:00	150
		3:40:01	Mudança da I _{me}				4:00:00	
S5.3	0:00:00			0:03:07	0:03:09	-	3:00:00	105
		3:00:01	Mudança da I _{me}				3:26:00	

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

7.6.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

Nos ensaios S5.1, S5.2 e S5.3 não houve escoamento superficial mensurável, sendo que nos 2 primeiros sequer houve escoamento superficial, toda a água da chuva simulada infiltrou no solo. Como exemplo, a Figura 261 mostra um detalhe da área do ensaio S5.1 em andamento. Nota-se nessa figura que não há água sobrando na superfície, pois toda água infiltrava. O mesmo ocorreu com o ensaio S5.2. Nesses dois ensaios somente poças efêmeras apareciam durante os ensaios. Na primeira parte do ensaio S5.3 também não sobrou água na superfície (Figura 264), porém na segunda parte, quando se aumentou a I_{me} , houve escoamento superficial intermitente, mas não mensurável (Figura 265).

Figura 263: Detalhe mostrando que toda a água era absorvida pelo solo durante o ensaio S5.1.

Figura 264: Detalhe mostrando que toda a água foi absorvida pelo solo durante a primeira parte do o ensaio S5.3.

Figura 265: Detalhe mostrando que houve escoamento superficial, mesmo que irrisório, durante a segunda parte do ensaio S5.3, com o aumento da intensidade de chuva.

7.6.2.5. *Sedimento Gerado*

Os ensaios S5.1, S5.2 e S5.3 não geraram qualquer quantidade de sedimento. De todos esses ensaios somente o ensaio S5.3 foi feito em pasto sem grama, todos os outros foram em pasto. Outra conclusão possível é que para as condições desses ensaios as chuvas simuladas não foram suficientemente intensas a ponto de carregar sedimento, ou mesmo de gerar escoamento superficial, em alguns casos.

7.6.3. Considerações Gerais dos Ensaios do Local 5

As chuvas simuladas nos ensaios do Local S5 foram de intensidades menores que as máximas chuvas naturais registradas na região. Nos 3 ensaios (S5.1, S5.2 e S5.3) a intensidade variou entre 55 e 92 mm/h (Tabela 58), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio de duplo anel, neste local foi 23 cm/h (Figura 258), ou seja, maior que a intensidade do maior evento de chuva natural registrado.

No ensaio S5.1 foi adotada uma intensidade média de chuva de 92,21 mm/h. No ensaio S5.2 foram 2 intensidades médias de chuva, 55,01 e 91,18 mm/h. Ambos os ensaios realizados sobre o pasto. Já o ensaio S5.3 foi realizado no pasto sem grama, com 2 intensidades médias de chuva, 55,6 e 73,3 mm/h (Tabela 58).

Em nenhum ensaio, porém, houve geração de escoamento superficial. Fato que pode ser explicado por o local revelar elevada taxa de infiltração, obtida com ensaio de duplo anel e por se ter adotado intensidades de chuva menores.

7.7. Ensaios do Local S6

Os ensaios do Local S6 foram distribuídos conforme mostrado na Figura 218 (ver item 7.4). Na Figura 266 é mostrado uma vista geral do ensaio S6.1. Observa-se que este ensaio situou-se em local de maior declividade que a maioria dos ensaios com simulador anteriores.

Figura 266: Vista geral do ensaio S6.1.

7.7.1. Ensaaios de Caracterização

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local S6 (Tabela 60) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s) apresentou aumento com a profundidade, enquanto a massa específica natural do solo (ρ) e a massa específica do solo seco (ρ_d) apresentaram diminuição com a profundidade (Tabela 54). O índice de vazios (e) e a porosidade (n) seguiram a mesma variação, apresentando aumento gradativo com a profundidade. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) não apresentaram variação significativa com a profundidade, salvo na superfície, que teve umidade mínima, de 1,18%.

Tabela 60: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 200 cm, do Local S6.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido (Simulador)		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
S6.1.1	10	2,53	2,00	1,92	0,28	21,87	1,18	2,27	10,70	18,86	36,21	94,76
S6.1.2	20	2,53	2,00	1,92	0,32	24,06	4,09	7,86	32,68	17,17	32,97	90,10
S6.1.3	30	2,53	1,95	1,85	0,38	27,53	6,35	11,74	42,28	17,89	33,10	85,48
S6.1.4	40	2,53	1,95	1,85	0,38	27,40	6,17	11,42	41,36	21,31	39,42	93,93
S6.1.5	50	2,53	1,87	1,77	0,45	30,95	7,04	12,46	39,74	18,66	33,03	77,98
S6.1.6	75	2,53	1,89	1,78	0,44	30,55	7,56	13,46	43,49	18,89	33,62	80,79
S6.1.7	100	2,53	1,89	1,78	0,44	30,52	7,51	13,37	43,27	16,87	30,03	75,61
S6.1.8	150	2,61	1,89	1,78	0,47	31,95	6,41	11,41	35,64	15,33	27,29	67,52
S6.1.9	200	2,61	1,89	1,78	0,45	31,11	5,11	9,09	29,53	16,35	29,10	70,33

No Local S6 coletaram-se amostras para definição de perfis de umidade com o solo no estado seco e após cada ensaio com simulador de chuva, no estado úmido. O perfil com o solo seco S6.1 (s), apresentou umidades mínimas na superfície, aumentando levemente com a profundidade. Iniciou com uma umidade de 1%, chegando a valores máximos entre 5 e 7,5% até 200 cm (Figura 221 – item 7.4.1). O perfil de umidade gerado após o ensaio com simulador de chuva S6.1 (ú) apresentou valores altos, variando entre 17 e 21,7% até 100 cm, diminuindo para outra faixa entre 15 e 18% até 210 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento (Tabela 46 – item 7.4.1).

A granulometria do Local S6 apresenta um solo superficial arenoso (35% de areia fina, 50% de areia média e 8% de areia grossa), com 6% de argila e 1% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, com variação nas porcentagens de areia fina (32%), de areia média (52%) e de argila (8%) (Figura 267). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Os ensaios com penetrômetro feitos no Local S6, com o solo no estado seco, revelaram valores baixos de resistência (entre 1,4 e 3,4 MPa) nos primeiros 50 cm, diminuindo com a profundidade para uma resistência aproximadamente constante de 0,8 Mpa, a partir de 110 cm (Figura 268: ensaios S6.a e S6.b). No gráfico da Figura 268 o ensaio realizado com o solo em estado úmido é denominado S6.1 (ú). Pode-se observar uma pequena diminuição de resistência do solo, causada por aumento da umidade, nos primeiros 30 cm, para aproximadamente 1 MPa. Ponto a partir do qual os valores de resistência voltaram a se aproximar dos valores dos ensaios com o solo seco. Como a resistência do solo seco mostrou-

se baixa, a diminuição de resistência com o solo úmido foi mínima e numa profundidade menor que a atingida pela frente de molhamento, que foi de 224 cm.

Figura 267: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.

Figura 268: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S6.b, S6.d, S6.e e S6.f), do ensaio com simulador de chuva: S6.1.

Para definição da taxa de infiltração do Local S6 foi feito o ensaio com o tubo de Guelph, que gerou uma taxa de infiltração de 2,55 cm/h.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local S6 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm (Figura 269).

No Local S6 os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 61) revelaram um solo de baixa erodibilidade na superfície e em profundidades maiores que 50 cm, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentam valores de E40 e E52 maiores que 1. Na faixa entre 20 e 40 cm, porém, o solo se apresenta com alta erodibilidade, principalmente considerando o E40, segundo Pejon (1992). Considerando o E52 de Nogami e Villibor (1979), o solo seria considerado erodível somente na profundidade de 30 cm, mas os resultados para as profundidades de 20 e de 40 cm são bastante próximos de 1 (Tabela 61).

Tabela 61: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S6.

Local	Curva	Prof.	s	P	E40	E52
				(%)		
S6	S6.1	10	0,3802	0,54	27,9257	36,3034
	S6.2	20	0,4144	21,11	0,7851	1,0206
	S6.3	30	0,5735	46,49	0,4934	0,6414
	S6.4	40	1,0465	45,39	0,9222	1,1988
	S6.5	50	2,5553	44,28	2,3085	3,0011
	S6.6	60	1,1991	40,02	1,1986	1,5581

Legenda:

s = coeficiente angular da reta
P = Perda de Massa por Imersão

E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)
E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

Figura 269: Curvas de absorção d'água do Local S6, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm.

7.7.2. Ensaio com Simulador de Chuva

7.7.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) no ensaio realizado e para as diversas pressões de bomba adotadas no ensaio são apresentadas na Tabela 62, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para o ensaio do Local S6. Neste ensaio com simulador de chuva adotaram-se intensidades médias de chuva entre 100 e 365 mm/h. No ensaio do Local S6 optou-se por variar a I_{me} durante o ensaio, aumentando-a gradativamente. Isso porque se percebeu que com I_{me} próximas aos valores reais medidos por pluviógrafo sequer escoamento superficial foi gerado. Com os valores maiores de I_{me} adotados ao menos escoamento superficial foi gerado. A Figura 270 ilustra a distribuição dos pluviômetros no ensaio S6.1

Tabela 62: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S6.

Nº do Local	Nº do Ensaio	Nº Pluviômetro	Intensidade média de chuva								
			Pluviômetro			Pressão A		Pressão B		Pressão C	
			x_i	y_i	d_i	I_{mPi}	I_{me}	I_{mPi}	I_{me}	I_{mPi}	I_{me}
			(m)	(m)	(m)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
S6	S6.1	P1	160	20	161,25	76,20	100,82	95,32	164,55	170,02	364,82
		P2	30	0	30,00	105,40		177,43		401,06	

Legenda:

P_i = Pluviômetro i

x_i = projeção do P_i no eixo horizontal

y_i = projeção do P_i no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao P_i

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mPi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Figura 270: Montagem do ensaio S6.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.

7.7.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaio

A Tabela 63 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para os

ensaios do Local S6, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o ensaio S6.1, por exemplo, teve duração de 60 minutos, com medidas dos pluviômetros obtidas por 36 minutos.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 63: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S6.1, do Local S6.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice de Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Bico	Altura do bico (m)	Chuva simulada		Duração	
							Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	medidas (min)	ensaio (min)
S6.1	Pasto	19.58	2.00	0.34	50W	2.92	2.0	100.82	36	60
							2.8	164.55	41	180
							2.0	364.82	5	11

7.7.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 64 encontra-se um resumo dos processos observados durante o ensaio do Local S6. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial. Na maioria dos casos foi possível observar o instante de início do escoamento superficial nos limites da área ensaiada e o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Em alguns casos, porém, conseguia-se apenas observar o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Esse fato deve-se à dificuldade em observar o instante em que a água começava a escoar sob a grama do pasto. A Figura 271 ilustra o início de empoçamento do ensaio S6.1.

Tabela 64: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S6.

Ensaio Nº	Início	Ocorrências Diversas	Início de Empoçamento	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
				Início	Boca		
S6.1	0:00:00	0:09:11 Poças efêmeras	-	-	-	1:00:00	224
	1:00:01	Mudança da I_{me}	1:01:40	1:02:20	-		
		1:17:00 Interrupção					
		1:31:00 Retorno	1:33:20	-	1:35:02		
		2:05:00 Interrupção					
		2:06:00 Retorno				4:00:00	
	4:00:01	Mudança da I_{me}		-	4:11:20	4:12:00	

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

Figura 271: Início de empoçamento do ensaio S6.1.

7.7.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S6.1 teve duração total de 251 min, com três intensidades médias de chuva diferentes. A primeira durante 60 min, a segunda durante 180 min e a última com 11 min. Entre a primeira e a segunda intensidade de chuva não houve interrupção no ensaio. Já na

terceira houve interrupção para troca do bico. Foram feitas medidas por 36, 41 e 5 min, respectivamente para cada etapa (Tabela 64). O gráfico da Figura 272 mostra os resultados para as duas primeiras etapas. Na terceira etapa não houve coleta de escoamento superficial. Esta terceira etapa foi realizada somente para observação do momento de início do escoamento superficial, confirmando que foi de pouco mais de um minuto e para ver se uma chuva de intensidade muito maior geraria sedimento. A etapa durou poucos minutos, pois a água já havia sido toda utilizada e nesse pequeno intervalo de tempo não houve geração de sedimento. O gráfico mostra constância nos resultados de escoamento superficial apresentando um valor maior para a primeira intensidade de chuva, que foi aproximadamente 60% menor que a segunda.

Figura 272: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 6.1.

A Figura 273 ilustra o escoamento superficial gerado na primeira parte do ensaio S6.1, enquanto a Figura 274 ilustra o aumento de escoamento superficial gerado na segunda parte, quando se aumentou a I_{me} .

Figura 273: Escoamento superficial gerado na boca de captação durante a primeira parte do ensaio S6.1.

Figura 274: Escoamento superficial gerado na boca de captação durante a segunda parte do ensaio S6.1, com o aumento da intensidade de chuva.

7.7.2.5. Sedimento Gerado

O ensaio S6.1 não gerou quantidade mensurável de sedimento.

7.7.3. Considerações Gerais do Local 6

No Local S6 foi realizado somente um ensaio, o S6.1, com pasto. A chuva simulada no ensaio S6.1 teve 3 intensidades médias, 100,82; 164,55 e 364,82 mm/h (Tabela 63), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio de Guelph, neste local foi 2,6 cm/h. Com a primeira intensidade média de chuva, o ensaio gerou uma taxa de infiltração máxima de 8,5 cm/h. Já com a segunda intensidade média de chuva, foi gerada uma taxa de infiltração máxima de 15,6 cm/h, praticamente constante durante todo o tempo (Figura 272). Conforme citado anteriormente, para a terceira intensidade média de chuva não houve coleta de escoamento superficial. Esta etapa durou poucos minutos e serviu para observar se uma intensidade muito maior geraria sedimento, o que não ocorreu.

7.8. Ensaio do Local S7

No Local S7 foram feitos 1 ensaio (S7.1) com o simulador de chuva, 5 ensaios com penetrômetro (S7.a à S7.e), um ensaio com duplo anel e um ponto de retirada de amostras indeformadas (A.I.) (Figura 275).

Figura 275: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S7.

7.8.1. Ensaios de Caracterização

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local S7 (Tabela 65) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s), a massa específica natural do solo (ρ) e a massa específica do solo seco (ρ_d), em geral, apresentaram diminuição dos valores com a profundidade (Tabela 65). Por outro lado, o índice de vazios (e) e a porosidade (n) apresentaram valores aumentando com a profundidade até 100 cm, a partir da qual os valores diminuíram. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) não apresentaram variação significativa com a profundidade.

Tabela 65: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d), massa específica natural do solo (ρ), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S5.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido (D.A.)		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
S7.1.1	10	2,72	1,72	1,64	0,65	39,32	4,22	6,92	17,71	22,75	37,32	65,75
S7.1.2	20	2,72	1,75	1,64	0,64	39,16	5,74	9,42	24,28	21,01	34,45	64,87
S7.1.3	30	2,72	1,67	1,60	0,72	41,75	5,39	8,63	20,47	20,60	32,96	58,11
S7.1.4	40	2,72	1,67	1,60	0,72	41,70	5,32	8,50	20,21	21,45	34,31	59,64
S7.1.5	50	2,72	1,66	1,57	0,74	42,38	5,92	9,29	21,89	21,64	33,98	59,27
S7.1.6	75	2,72	1,68	1,59	0,73	42,06	6,59	10,48	24,71	19,54	31,07	56,82
S7.1.7	100	2,72	1,68	1,59	0,74	42,52	7,45	11,85	27,40	18,03	28,66	53,83
S7.1.8	150	2,64	1,68	1,59	0,68	40,37	6,73	10,69	26,22	15,31	24,35	49,78
S7.1.9	200	2,64	1,68	1,59	0,67	40,26	6,52	10,37	25,55	11,79	18,74	41,12
S7.1.10	250	2,64	1,68	1,59	0,68	40,32	6,62	10,53	25,88	-	-	-
S7.1.11	290	2,64	1,68	1,59	0,68	40,45	6,86	10,90	26,66	-	-	-

A granulometria do Local S7 apresenta um solo superficial arenoso (36% de areia fina, 57% de areia média e 1% de areia grossa), com 5% de argila e 1% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, com variação nas porcentagens de areia fina (38%), de areia média (53%) e de argila (6%) (Figura 276). Classificação segundo a NBR 6502/95.

Figura 276: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.

A curva S7 D.A. (s) do gráfico da Figura 277 representa o solo no estado seco que apresentou um perfil de umidade baixa, conforme já observado. A curva S7.1 (s), também um perfil representando o solo seco, tem comportamento igual ao anterior. O perfil S7.1 (ú) foi gerado com amostras coletadas após o ensaio com simulador de chuva e apresentou umidades entre 16 e 18% até 130 cm de profundidade, diminuindo para 15% em 180 cm, que foi a profundidade atingida pela frente de molhamento (Tabela 66). O perfil S7 D.A. (ú) foi gerado com amostras coletadas após o ensaio com Duplo Anel e apresentou umidades entre 20 e 23% até 50 cm de profundidade, diminuindo para a faixa entre 18 e 20% até 130 cm, diminuindo, ainda, para 15,5% em 150 cm e para 12% em 200 cm, profundidade pouco maior que a atingida pela frente de molhamento, que foi de 163 cm (Tabela 66).

Figura 277: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S7, para o solo seco (s) e úmido (ú).

Tabela 66: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S7.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S7	S7.1 (ú)	180	206
	S7 (D.A.)	163	120

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

Os ensaios com penetrômetro feitos ao redor do ensaio S7.1, com o solo no estado seco, revelaram valores baixos de resistência, entre 1 e 2 MPa, que se mostraram aproximadamente constantes por todo o perfil (Figura 278: ensaios S7.a, S7.b, S7.c, S7.d e S7.e). No mesmo gráfico os ensaios realizados com o solo em estado úmido são denominados: S7.1 (ú) e S7 D.A. (ú), respectivamente realizados após o ensaio com Simulador de chuva e após o ensaio de Infiltração com duplo anel. Como a resistência do solo seco mostrou-se baixa, a diminuição de resistência com o solo úmido foi mínima, mas ocorreu (Figura 278).

Figura 278: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S7.a, S7.b, S7.c, S7.d, e S7.e), mais os ensaios com o solo úmido (S7.1 (ú) e S7 (D.A.)), que representam o ensaio com simulador de chuva: S7.1.

Para definição da taxa de infiltração do Local S7 foram feitos ensaios com Duplo Anel e com o tubo de Guelph. O primeiro gerou a curva de Infiltração da água no solo, definindo uma taxa de infiltração de 27 cm/h (Figura 279), enquanto o segundo gerou uma taxa de infiltração de 6,89 cm/h.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local S7 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm (Figura 280).

No Local S7 os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 67) revelaram um solo de baixíssima erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentam valores de E40 e E52 muito maiores que 1.

Figura 279: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S7.

Figura 280: Curvas de absorção d'água do Local S7, para as profundidades: 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm.

Tabela 67: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S7.

Local	Curva	Prof.	s	P (%)	E40	E52
S7	S7.2	20	0,6719	0,07	396,9585	516,0461
	S7.3	30	0,6820	0,93	29,1791	37,9328
	S7.4	40	0,6444	0,11	226,1292	293,9679
	S7.5	50	0,8099	1,12	28,7986	37,4382
	S7.6	60	0,7083	2,42	11,7206	15,2368
	S7.7	80	0,4527	1,79	10,1183	13,1538

Legenda:

s = coeficiente angular da reta

P = Perda de Massa por Imersão

E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)

E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

7.8.2. Ensaaios com Simulador de Chuva

7.8.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) no ensaio realizado e para as diversas pressões de bomba adotadas são apresentadas na Tabela 68, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para o ensaio do Local S7. Neste ensaio com simulador de chuva adotaram-se intensidades médias de chuva entre 96 e 115 mm/h.

A distribuição dos pluviômetros do ensaio S7.1 é ilustrada na Figura 281. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

Tabela 68: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S7.

Nº do Local	Nº do Ensaio	Nº	Pluviômetro			Intensidade média de chuva			
			x_i	y_i	d_i	Pressão A		Pressão B	
			(m)	(m)	(m)	I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)	I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)
S7	S7.1	P1	170	80	187,88	54,21	96,39	50,07	115,21
		P2	40	20	44,72	97,81		129,30	
		P3	170	75	185,81	135,91		157,29	

Legenda:

P_i = Pluviômetro i

x_i = projeção do P_i no eixo horizontal

y_i = projeção do P_i no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao P_i

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mPi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Figura 281: Montagem do ensaio S7.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros. Observar os barbantes esticados, marcando o centro do ensaio, ou seja, a projeção do bico.

7.8.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaio

A Tabela 69 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para os ensaios do Local S7, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o

ensaio S7.1, por exemplo, teve duração de 110 minutos, com medidas dos pluviômetros obtidas por 109 minutos.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 69: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S7.1, do Local S7.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Bico 50W	Altura do bico (m)	Chuva simulada			
							Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	Duração medidas (min)	Duração ensaio (min)
S7.1	Pasto	12.1	1.63	0.26		2.67	2.0	96.39	109	110
							2.8	115.21	94	96

7.8.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 70 encontra-se um resumo dos processos observados durante o ensaio do Local S7. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial. Na maioria dos casos foi possível observar o instante de início do escoamento superficial nos limites da área ensaiada e o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Em alguns casos, porém, conseguia-se apenas observar o instante em que o escoamento superficial chegava à boca de captação. Esse fato deve-se à dificuldade em observar o instante em que a água começava a escoar sob a grama do pasto.

A Figura 282 ilustra o início de empoçamento do ensaio S7.1. A foto revela a dificuldade em se definir esse momento em ensaios realizados sobre pastos.

Tabela 70: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S7.

Ensaio N°	Início	Ocorrências Diversas		Início de Empoçamento	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
					Início	Boca		
S7.1	0:00:00			0:06:50	-	0:14:00		180
		1:03:00	Interrupção					
		1:04:40	Retorno				1:50:00	
	0:00:00	Reinício com mudança da I _{me}					1:36:00	

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

Figura 282: Início de empocamento do ensaio S7.1.

7.8.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S7.1 teve duração total de 206 min, com duas intensidades médias de chuva diferentes. A primeira durante 110 min e a segunda durante 96 min, com interrupção no ensaio entre uma etapa e outra. Foram feitas medidas por 109 e 94 min, respectivamente para cada etapa (Tabela 70). O gráfico da Figura 283 mostra que para uma I_{me} menor, o escoamento gerado foi pequeno, mas aproximadamente constante. Depois que a I_{me} foi elevada os volumes coletados variaram demasiadamente, gerando uma curva não linear. Uma possível explicação para isso é que no solo em questão, muito poroso e com taxa de infiltração alta, o vento influenciou na distribuição da chuva de forma que em alguns momentos a I_{me} próximo à boca ficava pequena e parte do escoamento superficial que vinha do restante da área ensaiada era absorvida antes de chegar à boca.

A Figura 284 ilustra a intensidade do escoamento superficial gerado na boca de captação do ensaio S7.1.

Figura 283: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 7.1.

Figura 284: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S7.1.

7.8.2.5. Sedimento Gerado

O ensaio S7.1 não gerou quantidade mensurável de sedimento.

7.8.3. Considerações Gerais do Local 7

No Local S7 foi realizado somente um ensaio, o S7.1, com pasto. A chuva simulada no ensaio S7.1 teve 2 intensidades médias, 96,39 e 115,21 mm/h (Tabela 68), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio do duplo anel, neste local foi 27 cm/h (Figura 279). Com a primeira intensidade média de chuva, o ensaio gerou uma taxa de infiltração máxima de 5,2 cm/h e mínima de 4,8 cm/h, ou seja, praticamente constante. Já com a segunda intensidade média de chuva, foi gerada uma taxa de infiltração máxima de 6,8 cm/h e mínima de 1,1 cm/h (Figura 283). Houve, porém, medição de valor negativo (-2,4 cm/h) da I_{me} . Lembrando que essa taxa foi calculada em função da medida do escoamento superficial, subtraído da intensidade de chuva, explica-se a possibilidade do valor matemático negativo. Fisicamente uma explicação provável pode ser que no solo em questão, muito poroso e com taxa de infiltração alta, o vento influenciou na distribuição da chuva de forma que em alguns momentos a I_{me} próximo à boca ficava pequena e parte do escoamento superficial que vinha do restante da área ensaiada era absorvida antes de chegar à boca.

7.9. Ensaio do Local S8

No Local S8 foi feito um ensaio (S8.1) com o simulador de chuva, 3 ensaios com penetrômetro (S8.a, S8.b e S8.c), um ensaio com duplo anel e um ponto de retirada de amostras indeformadas (A.I.) (Figura 285).

Figura 285: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S8.

7.9.1. Ensaios de Caracterização

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local S8 (Tabela 71) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s) apresentou aumento considerável com a profundidade, enquanto a massa específica natural do solo (ρ) e a massa específica do solo seco (ρ_d) apresentaram diminuição em seus valores, com a profundidade (Tabela 71). Proporcionalmente, o índice de vazios (e) e a porosidade (n) apresentaram aumento significativo com a profundidade. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) a variação foi pequena, na faixa entre 0 e 40 cm, passando a valores sem variação significativa, com a profundidade.

Tabela 71: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica natural do solo (ρ), massa específica do solo seco (ρ_d), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S8.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido (D.A.)		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
S8.1.1	10	2,76	1,65	1,58	0,79	44,23	7,32	11,56	25,44	16,80	26,54	48,67
S8.1.2	20	2,76	1,65	1,58	0,80	44,60	8,02	12,68	27,48	19,58	30,93	54,08
S8.1.3	30	2,76	1,65	1,58	0,86	46,10	11,04	17,45	35,59	19,64	31,03	54,20
S8.1.4	40	2,76	1,60	1,55	0,86	46,38	8,23	12,75	26,23	20,51	31,79	52,52
S8.1.5	50	2,76	1,60	1,55	0,95	48,78	13,30	20,61	38,50	19,98	30,97	51,61
S8.1.6	75	2,76	1,60	1,49	0,94	48,45	12,58	18,75	36,91	-	-	-
S8.1.7	100	2,76	1,52	1,41	1,06	51,49	13,64	19,23	35,44	-	-	-
S8.1.8	125	2,76	1,52	1,41	1,03	50,80	12,05	17,00	32,19	-	-	-
S8.1.9	150	2,76	1,52	1,41	1,07	51,69	14,13	19,93	36,41	-	-	-
S8.1.10	175	2,76	1,52	1,41	1,08	51,91	14,65	20,66	37,42	-	-	-
S8.1.11	200	2,76	1,52	1,41	1,08	51,90	14,63	20,63	37,38	-	-	-

A granulometria do Local S8 apresenta um solo superficial areno-argiloso (23% de areia fina, 43% de areia média e 7% de areia grossa), com 24% de argila e 3% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, com variação nas porcentagens de areia fina (21%), de areia média (39%) e de argila (30%) (Figura 286). Classificação segundo a NBR 6502/95.

A curva S8.1 (s) do gráfico da Figura 287 representa o solo no estado seco que apresentou um perfil de umidade baixa nos primeiros 40 cm, aumentando a umidade a partir dessa profundidade. O perfil S8.1 (ú) foi gerado com amostras coletadas após o ensaio com simulador de chuva e apresentou umidades entre 13,5 e 18% até 30 cm de profundidade, diminuindo para 11,5% em 40 cm, que foi a profundidade atingida pela frente de molhamento (Tabela 72). O perfil S8 D.A. (ú) foi gerado com amostras coletadas após o ensaio com Duplo Anel e apresentou umidades entre 17 e 21% até 50 cm, profundidade limite das amostras coletadas.

Figura 286: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S5, para as profundidades: 20 e 200 cm.

Figura 287: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S8, para o solo seco (s) e úmido (ú).

Tabela 72: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S8.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S8	S8.1 (ú)	40	107
	S8 (D.A.)	70	115

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

Os ensaios com penetrômetro feitos ao redor do ensaio S8.1, com o solo no estado seco, revelaram valores de resistência entre 3 e 8 MPa, nos primeiros 20 cm, diminuindo para uma faixa entre 2 e 4 MPa, em 40 cm, tendendo para uma resistência constante de aproximadamente 1,5 MPa a partir de 60 cm de profundidade (Figura 288: ensaios S8.a, S8.b, S8.c). No mesmo gráfico os ensaios realizados com o solo em estado úmido são denominados por S8.1 (ú) e S8 D.A. (ú) e foram gerados a partir de ensaios realizados imediatamente após o ensaio com Simulador de chuva e com Infiltrômetro de duplo anel, respectivamente. Observa-se a diminuição de resistência do solo na profundidade que corresponde à frente de molhamento de cada ensaio, com os valores dos dois ensaios tendendo a igualarem-se aos valores dos demais ensaios, realizados com o solo seco.

Figura 288: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S8.a, S8.b, S8.c), mais os ensaios com o solo úmido (S8.1 (ú) e S8 (D.A.)), que representam o Local S8.1.

Para definição da taxa de infiltração do Local S8 foi feito ensaio com Duplo Anel, que gerou a curva de Infiltração da água no solo, definindo uma taxa de infiltração de 5 cm/h (Figura 289).

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local S8 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm (Figura 290).

No Local S8 os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 73) revelaram um solo erodível somente na profundidade de 30 cm, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentou valores de E40 e E52 menores que 1. Enquanto nas demais profundidades os valores de E40 e E52 foram maiores que 1, caracterizando baixa erodibilidade segundo os autores citados.

Figura 289: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S8.

Tabela 73: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S8.

Local	Curva	Prof.	s	P	E40	E52
				(%)		
S8	S8.1	10	1,07	17,78	2,41	3,13
	S8.2	20	0,81	13,77	2,35	3,05
	S8.3	30	0,89	54,41	0,65	0,85
	S8.4	40	2,07	57,66	1,44	1,87
	S8.5	50	1,27	43,28	1,17	1,52
	S8.6	60	1,91	58,02	1,32	1,71
	S8.7	80	2,25	57,20	1,57	2,04

Legenda:

s = coeficiente angular da reta
P = Perda de Massa por Imersão

E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)
E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

Figura 290: Curvas de absorção d'água do Local S8, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm.

7.9.2. Ensaio com Simulador de Chuva

7.9.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva, medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) no ensaio realizado e para a pressão de bomba adotada no ensaio, são apresentadas na Tabela 74, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para o ensaio do Local S8. Neste ensaio com simulador de chuva adotaram-se intensidades médias de chuva entre 81 e 111 mm/h.

A distribuição dos pluviômetros do ensaio S8.1 está ilustrada na Figura 291.

Tabela 74: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S8.

Nº Do	Nº do	Nº	Pluviômetro		d_i	Intensidade média de chuva			
						Pressão A		Pressão B	
Local	Ensaio	Nº	x_i	y_i	d_i	I_{mPi}	I_{me}	I_{mPi}	I_{me}
			(m)	(m)	(m)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
S8	S8.1	P1	170	0	170.00	101.63	81.97	128.41	110.47
		P2	20	30	36.06	111.39		142.91	
		P3	170	120	208.09	71.93		27.51	
		P4	130	170	214.01	28.34		17.93	

Legenda:

P_i = Pluviômetro i

x_i = projeção do P_i no eixo horizontal

y_i = projeção do P_i no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao P_i

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mpi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Figura 291: Montagem do ensaio S8.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.

7.9.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaio

A Tabela 75 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para o ensaio do Local S8, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o ensaio S8.1, por exemplo, teve duração de 75 minutos, com medidas dos pluviômetros obtidas por 73 minutos.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 75: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S8.1, do Local S8.

Número do Local/Ensaio	Tipo de Cobertura Vegetal	Declividade média do terreno (%)	Índice de Rugosidade (RR)	Cap. Máx. de Armaz. de Água na Sup. (MDS)	Bico	Altura do bico (m)	Chuva simulada			
							Pressão bomba (bar)	Intensidade média (mm/h)	Duração medidas (min)	ensaio (min)
S8.1	Sem cobertura	20.13	3.68	0.82	50W	2.65	2.0	81.97	73	75
							3.0	110.47	32	32

7.9.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do Escoamento Superficial

Na Tabela 76 encontra-se um resumo dos processos observados durante o ensaio do Local S8. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial. A partir da tabela pode-se observar que os inícios de formação de poças e do escoamento superficial coincidem e que o momento

em que o escoamento chegou à boca não pode ser observado, devido à rapidez em que ocorreu. Tal fato deve-se ao tipo de uso do solo. Tratando-se de um solo sem cobertura vegetal, é criada uma película impermeável em sua superfície.

A Figura 292 ilustra o início de empoçamento e de escoamento superficial do ensaio S8.1. A foto ilustra a simultaneidade dos dois fatores, junto com a chegada do escoamento na boca.

Tabela 76: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S8.

Ensaio Nº	Início	Ocorrências Diversas	Início de Formação de Poças	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
				Início	Boca		
S8.1	0:00:00	0:01:12 Poças efêmeras	0:01:12	0:01:37	-	1:15:00	40
	1:15:00	Mudança da I_{me}				1:47:20	

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

Figura 292: Início de empoçamento do ensaio S8.1.

7.9.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S8.1 teve duração total de 107 min, com duas intensidades médias de chuva diferentes. A primeira durante 75 min e a segunda durante 32 min, sem interrupção no ensaio entre uma etapa e outra. As coletas de sedimento foram feitas somente durante a primeira etapa, portanto, o gráfico da Figura 293 mostra o escoamento superficial (ES) e a infiltração no solo (I_s) referentes à primeira I_{me} adotada. Observa-se que o escoamento medido iniciou mais baixo, mas passou a um valor constante.

A Figura 294 ilustra a intensidade do escoamento superficial gerado na boca de captação do ensaio S8.1, logo no início do ensaio. O escoamento chegou à boca de captação, instantes depois da formação das primeiras poças e início do escoamento superficial (Tabela 76). A foto da Figura 294 foi tirada bem no início do ensaio e é possível observar que existem partes do solo ainda secas.

A Figura 295 ilustra a intensidade do escoamento superficial gerado na boca de captação do ensaio S8.1, quando este se tornou constante. Pode-se observar a diferença de intensidade do escoamento superficial em relação ao do início do ensaio ilustrado na Figura 294.

Figura 293: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 8.1.

Figura 294: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S8.1.

Figura 295: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S8.1.

7.9.2.5. Sedimento Gerado

O gráfico da Figura 296 apresenta o sedimento gerado no ensaio S8.1, realizado num tempo total de 107 min, com 2 intensidades de chuva diferentes (I_{me}). A primeira I_{me} permaneceu 75 minutos, sendo praticamente o ensaio todo, enquanto a segunda I_{me} permaneceu por 32 minutos. Na primeira fase foram coletadas as 4 amostras de sedimento gerado. A segunda fase, com I_{me} maior, foi realizada para observar a evolução dos pequenos sulcos gerados, fato que mostrou não ter relevância (Figura 297). O gráfico da Figura 296 mostra que as quantidades de sedimento coletadas diminuiriam com o tempo de ensaio.

Figura 296: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1.

Figura 297: Sulcos gerados durante o ensaio S8.1.

7.9.3. Considerações Gerais do Local S8

No Local S8 foi realizado somente um ensaio, o S8.1, em terreno sem cobertura vegetal. A chuva simulada no ensaio S8.1 teve 2 intensidades médias, 81,97 e 110,47 mm/h (Tabela 74), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio do duplo anel, neste local foi 5,0 cm/h (Figura 289). A infiltração máxima, obtida da subtração do escoamento superficial da quantidade de chuva, foi de 6,0 cm/h, enquanto a mínima foi de 4,5 cm/h (Figura 293). Neste local as taxas de infiltração geradas com ensaio do duplo anel e com o simulador de chuvas foi praticamente a mesma. Observa-se que aqui com chuvas aproximadamente iguais às máximas chuvas naturais registradas, houve geração de escoamento superficial. Isso porque o terreno tem uma taxa de infiltração baixa, que provavelmente deve-se à crosta formada na superfície do solo descoberto.

Apesar dos sulcos gerados não apresentarem evolução durante o período que a área recebeu chuva simulada, o local apresentou uma tendência ao desenvolvimento de sulcos a partir de incisões no solo provocadas por algum fator externo. Nesse ensaio, o vão criado na boca da área ensaiada para se coletar as amostras caracterizou uma incisão externa. Assim pode-se observar na Figura 295, já citada, a evolução da erosão nesse ponto.

A região onde foram realizados os ensaios do Local S8 e do Local S9 foi escolhida por apresentar incidência de sulcos (Figura 298) e ravinas (Figura 299 e Figura 300) logo após um período de chuva.

Figura 298: Sulcos gerados em período de chuva na região onde foram realizados os ensaios dos locais 8 e 9 (foto tirada em janeiro de 2011).

Figura 299: Ravinas geradas em período de chuva na região onde foram realizados os ensaios dos locais 8 e 9 (foto tirada em janeiro de 2011).

Figura 300: Ravina gerada em período de chuva na região onde foram realizados os ensaios dos locais 8 e 9 (foto tirada em janeiro de 2011).

7.10. Ensaaios do Local S9

No Local S9 foi feito um ensaio (S9.1) com o simulador de chuva, 3 ensaios com penetrômetro (S9.a, S9.b e S9.c), um ensaio com duplo anel e um ponto de retirada de amostras indeformadas (A.I.) (Figura 301).

Figura 301: Croqui com a distribuição dos ensaios de campo no Local S9.

7.10.1. Ensaios de Caracterização

Os índices físicos do solo e as medidas de umidade do Local S9 (Tabela 77) indicam que o solo foi caracterizado em estado de baixa umidade. Obter dados desde uma umidade mínima até uma umidade próxima da saturação permite avaliar o comportamento do solo num espectro máximo.

A massa específica dos sólidos (ρ_s) não apresentou variação significativa com a profundidade, enquanto a massa específica natural do solo (ρ) e a massa específica do solo seco (ρ_d) diminuíram com a profundidade (Tabela 77). O índice de vazios (e) e a porosidade (n) apresentaram aumento dos valores com a profundidade. Para o solo no estado seco, a umidade (w) e, portanto, os valores de umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S) não apresentaram variação significativa com a profundidade.

Tabela 77: Resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica natural do solo (ρ), massa específica do solo seco (ρ_d), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S), para o solo no estado seco, em profundidade até 102 cm, do Local S9.

Local	Profund. (cm)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Solo seco			Solo úmido (D.A.)		
							w (%)	θ (%)	S (%)	w (%)	θ (%)	S (%)
S9.1.1	10	3,18	1,79	1,74	0,85	45,81	4,00	6,96	15,04	12,32	21,44	39,42
S9.1.2	20	3,18	1,79	1,74	0,86	46,18	4,72	8,22	17,48	12,54	21,81	39,94
S9.1.3	30	3,18	1,79	1,74	0,87	46,38	5,11	8,89	18,77	13,87	24,13	43,16
S9.1.4	40	3,18	1,69	1,63	0,99	49,86	6,13	10,00	19,58	14,13	23,04	39,20
S9.1.5	50	3,18	1,69	1,63	0,99	49,77	5,93	9,66	19,00	12,97	21,13	36,67
S9.1.6	75	3,18	1,67	1,59	1,02	50,39	6,00	9,53	18,74	7,08	11,26	21,71
S9.1.7	100	3,18	1,61	1,53	1,09	52,25	6,16	9,42	17,88	-	-	-
S9.1.8	125	3,18	1,61	1,53	1,10	52,27	6,21	9,51	18,02	-	-	-
S9.1.9	150	3,18	1,61	1,53	1,07	51,65	4,85	7,42	14,41	-	-	-

A granulometria do Local S9 apresenta um solo superficial areno-argiloso (38% de areia fina, 46% de areia média e 2% de areia grossa), com 10% de argila e 4% de silte. Na profundidade de 200 cm o solo é praticamente o mesmo, somente com pequena variação nas porcentagens de areia fina (36%) e de areia média (48%) (Figura 302). Classificação segundo a NBR 6502/95.

A curva S9.1 (s) do gráfico da Figura 303 representa o solo no estado seco que apresentou um perfil de umidade constante, variando entre 4 e 6%. O perfil S9.1 (ú) foi gerado com amostras coletadas após o ensaio com simulador de chuva e apresentou umidade diferente do perfil com o solo seco somente na superfície, a 10 cm de profundidade, coincidindo com a frente de molhamento, que atingiu 15 cm (Tabela 78). O perfil S9 D.A. (ú) foi gerado com amostras coletadas após o ensaio com Duplo Anel e apresentou umidades entre 12 e 14% até 50 cm, diminuindo para 7% em 60 cm, profundidade atingida pela frente de molhamento.

Tabela 78: Profundidade da frente de molhamento atingida após os ensaios com simulador de chuva e com Duplo Anel e respectivo tempo total de ensaio para os ensaios do Local S9.

Local do Ensaio Simulador Nº	Ensaio com Penetrômetro Nº	Profundidade da frente de molhamento (cm)	Tempo total de ensaio (min)
S9	S9.1 (ú)	15	20
	S9 (D.A.)	60	165

Legenda:

(ú) = solo úmido depois de ensaio com simulador de chuva

(D.A.) = Ensaio com Duplo Anel

Figura 302: Curvas de Distribuição Granulométrica, do Local S9, para as profundidades: 20 e 150 cm.

Figura 303: Resultados de umidade dos ensaios com simulador de chuva e com duplo anel (D.A.) do Local S9, para o solo seco (s) e úmido (ú).

Os ensaios com penetrômetro feitos ao redor do ensaio S9.1, com o solo no estado seco, apresentaram valores de resistência entre 2,5 e 7 MPa, nos primeiros 30 cm, diminuindo para uma faixa entre 2 e 3 MPa, em 40 cm, tendendo para uma constante de aproximadamente

1 MPa a partir de 60 cm de profundidade (Figura 304: ensaios S9.a, S9.b, S9.c). No mesmo gráfico os ensaios realizados com o solo em estado úmido são denominados por S9.1 (ú) e S9 D.A. (ú) e foram realizados imediatamente após o ensaio com Simulador de chuva e Infiltrômetro de duplo anel, respectivamente. Observa-se a diminuição de resistência do solo na profundidade que corresponde à frente de molhamento de cada ensaio, com os valores de resistência tendendo a aproximarem-se dos demais, gerados com ensaios realizados com o solo seco. Assim, os valores do ensaio S9.1 (ú) iniciam com resistência de 2 MPa, mas em 10 cm passam para uma resistência máxima de 9,5 MPa, maior que as demais com o solo seco, mas tem comportamento idêntico aos outros a partir de 20 cm de profundidade. E os valores do ensaio S9.1 (D.A.) iniciam com resistência de 1 MPa, chegando até 1,9 MPa em 10 cm de profundidade, mas depois passam para uma faixa aproximadamente constante entre 0,9 e 1,2 MPa até 60 cm de profundidade, a partir da qual tornam-se iguais aos valores dos demais ensaios.

Para definição da taxa de infiltração do Local S9 foi feito ensaio com Duplo Anel, que gerou a curva de Infiltração da água no solo, definindo uma taxa de infiltração de 2,8 cm/h (Figura 305).

Figura 304: Resultados dos ensaios de resistência do solo à penetração do cone, com o solo seco (S9.a, S9.b, S9.c), mais os ensaios com o solo úmido (S9.1 (ú) e S9 (D.A.)), que representam o Local S9.1.

Figura 305: Resultado do ensaio com duplo anel do Local S9.

Para o cálculo do índice de erodibilidade do Local S9 conseguiram-se resultados de curvas de absorção d'água para as profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm (Figura 306). No Local S9 os ensaios de Perda de Massa por Imersão geraram resultados com quantidades mensuráveis e os índices de erodibilidade obtidos (Tabela 79) revelaram um solo bastante erodível, com grau elevado de erodibilidade nos primeiros 20 cm de profundidade, segundo Nogami e Villibor (1979) e também segundo Pejon (1992), pois apresentou valores de E40 e E52 menores que 1. Considerando-se somente o E40, os valores de erodibilidade também sem mostram altos nas profundidades de 30 e de 50 cm.

Tabela 79: Resultados do ensaio de Perda de Massa por Imersão para o Local S9.

Local	Curva	Prof.	s	P	E40	E52
(%)						
S9	S9.1	10	0.98	76.07	0.52	0.67
	S9.2	20	1.16	84.97	0.55	0.71
	S9.3	30	1.76	72.34	0.97	1.27
	S9.4	40	2.16	81.67	1.06	1.37
	S9.5	50	1.62	70.28	0.92	1.20
	S9.6	60	2.18	79.06	1.11	1.44
	S9.7	80	1.92	69.11	1.11	1.44

Legenda:

s = coeficiente angular da reta

P = Perda de Massa por Imersão
 E40 = erodibilidade, segundo Pejon (1992)
 E52 = erodibilidade, segundo Nogami e Villibor (1979)

Figura 306: Curvas de absorção d'água do Local S9, para as profundidades: 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 cm.

7.10.2. Ensaios com Simulador de Chuva

7.10.2.1. Intensidade de Chuva

As intensidades médias de chuva, medidas para cada pluviômetro (I_{mPi}) no ensaio realizado e para as diversas pressões de bomba adotadas no ensaio, são apresentadas na Tabela 80, que inclui os resultados dos cálculos das intensidades médias de chuva adotadas (I_{me}) e o número e localização dos pluviômetros para o ensaio do Local S9. Neste ensaio com simulador de chuva adotaram-se intensidade média de chuva de 87 mm/h.

A distribuição dos pluviômetros do ensaio S9.1 é ilustrada na Figura 307.

Tabela 80: Intensidades médias de chuva geradas em cada ensaio e cálculo e definição de uma intensidade média para os ensaios do Local S9.

Nº do Local	Nº do Ensaio	Nº	Pluviômetro			Intensidade média de chuva Pressão A	
			x_i (m)	y_i (m)	d_i (m)	I_{mPi} (mm/h)	I_{me} (mm/h)
S9	S9.1	P1	170	70	183.85	95.55	86.99
		P2	10	45	46.10	161.23	
		P3	170	100	197.23	34.46	
		P4	170	110	202.48	29.80	

Legenda:

P_i = Pluviômetro i

x_i = projeção do P_i no eixo horizontal

y_i = projeção do P_i no eixo vertical

d_i = distância do centro do ensaio ao P_i

Pressão N = cada pressão da bomba adotada em um mesmo ensaio

I_{mPi} = Intensidade média de chuva medida, por pluviômetro

I_{me} = Intensidade média de chuva calculada para cada ensaio, por pressão de bomba adotada

Figura 307: Montagem do ensaio S9.1, ilustrando a distribuição dos pluviômetros.

7.10.2.2. Condições do Terreno, Resumo da Intensidade de Chuva e Tempo de Duração dos Ensaio

A Tabela 81 apresenta as condições do terreno, as condições do equipamento (tipo e altura do bico e pressão da bomba) e as intensidades médias de chuva adotadas para os ensaios do Local S9, além do tempo de duração das medidas com os pluviômetros e do tempo do ensaio.

As condições do terreno consideradas foram o tipo de cobertura vegetal, a declividade média do terreno, o índice de rugosidade (*random roughness* – RR) e a capacidade máxima de armazenamento de água na superfície (*maximum depressional storage* – MDS). Os dois últimos calculados conforme Allmaras et al. (1966) e Onstad (1984), respectivamente.

A coluna de *duração* separa o ensaio para cada condição de pressão de bomba e tipo de bico utilizado. Visando a geração de dados para alimentar um modelo de erosão, devem ser considerados somente os tempos de duração das primeiras condições de ensaio. Assim, o ensaio S9.1 teve duração de 20 minutos, com medidas dos pluviômetros obtidas por 18 minutos.

As condições do equipamento, tipo e altura do bico e pressão da bomba, são apresentadas para embasar as intensidades de chuva adotadas.

Tabela 81: Condições do terreno, resumo da intensidade de chuva simulada e tempo de duração para o ensaio S9.1, do Local S9.

Número	Tipo de	Declividade	Índice	S9.1, do Local S9.1						
				Cap. Máx.	Chuva simulada					
Do	Cobertura	média do	Rugosi-	de Armaz. de	Bico	Altura	Pressão	Intensidade	Duração	
Local/	Vegetal	terreno	dade	Água na Sup.		do bico	Bomba	média	medidas	ensaio
Ensaio		(%)	RR	(MDS)		(m)	(bar)	(mm/h)	(min)	(min)
S9.1	Sem cobertura	14.75	3.12	0.64	50W	2.27	2.5	86.99	18	20

7.10.2.3. Momento de Início de Empoçamento e do escoamento Superficial

Na Tabela 82 encontra-se um resumo dos processos observados durante o ensaio do Local S9. A tabela apresenta os momentos de início e fim do ensaio, de ocorrências diversas, e de início de empoçamento e do escoamento superficial. A partir da tabela pode-se observar que os inícios de formação de poças e do escoamento superficial coincidem e que o momento em que o escoamento chegou à boca não pode ser observado, devido à rapidez em que ocorreu. Tal fato deve-se ao tipo de uso do solo. Tratando-se de um solo sem cobertura vegetal, é criada uma película impermeável em sua superfície.

A Figura 308 ilustra o início de empoçamento e de escoamento superficial do ensaio S9.1. A foto ilustra a simultaneidade dos dois fatores, início de empoçamento e do escoamento superficial.

Tabela 82: Descrição dos momentos de início de empoçamento, do escoamento superficial e de ocorrências diversas, além da profundidade do solo atingida pela água, para os ensaios do Local S9.

Ensaio Nº	Início	Ocorrências Diversas	Início de Formação de Poças	Escoamento Superficial		Fim	Profund. Molhada (cm)
				Início	Boca		
S9.1	0:00:00		0:00:18	0:00:18	-		
	0:20:00	Parada da bomba				0:20:00	15

Legenda:

I_{me} = Intensidade média de chuva

A_c = Área ensaiada

SM = Sem Medição

- = sem possibilidade de ser observado

Figura 308: Início de empoçamento e do escoamento superficial do ensaio S9.1.

7.10.2.4. Escoamento Superficial e Infiltração de Água no Solo

O ensaio S9.1 teve duração total de 20 min, devido à interrupção causada por problemas na bomba (Tabela 82). Foram feitas medidas de intensidade de chuva (I_{me}) por 18 min. Durante o período que durou o ensaio foram feitas somente 2 medições de escoamento superficial e amostras de sedimento gerado.

O gráfico da Figura 309 mostra que em poucos minutos houve um aumento significativo de escoamento superficial.

A Figura 310 ilustra a intensidade do escoamento superficial gerado na boca de captação do ensaio S9.1.

Figura 309: Ensaio com simulador de chuva: Intensidade média de chuva (I_{me}), Escoamento Superficial (ES) e Infiltração no Solo (I_s) em função do tempo (t), para o ensaio 7.1.

Figura 310: Escoamento superficial gerado na boca de captação o ensaio S9.1.

7.10.2.5. Sedimento Gerado

O gráfico da Figura 311 apresenta o sedimento gerado no ensaio S9.1, realizado num tempo total de 20 min. Foram coletadas 2 amostras de sedimento gerado (Figura 312). O gráfico citado mostra que as quantidades de sedimento coletadas aumentaram com o tempo de ensaio.

Figura 311: Ensaio com simulador de chuva: Sedimento Gerado (SG) em função do tempo (t) do ensaio 3.1.

7.10.3. Considerações Gerais do Local S9

Conforme mencionado na descrição dos ensaios do Local S8, a região onde foram realizados os ensaios do Local S8 e do Local S9 foi escolhida por apresentar incidência de sulcos e ravinas em períodos de chuva recentes. Apesar do pouco tempo de ensaio, pode-se observar a rápida evolução de uma feição erosiva a partir de uma incisão externa. Mais uma vez o vão criado na boca da área ensaiada para se coletar as amostras caracterizou uma incisão externa (Figura 312 à Figura 315).

Figura 312: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 1 minuto de ensaio.

Figura 313: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 9 minutos de ensaio.

Figura 314: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 11 minutos de ensaio.

Figura 315: Situação da boca de captação do ensaio S9.1, com 14 minutos de ensaio.

No Local S9 foi realizado somente um ensaio, o S9.1, em terreno sem cobertura vegetal. A chuva simulada no ensaio S9.1 teve intensidade média de chuva de 86,99 mm/h (Tabela 81), enquanto o maior evento de chuva natural teve intensidade média de 120 mm/h, para evento de 5 min. A taxa de infiltração, gerada com ensaio do duplo anel, neste local foi 2,8 cm/h (Figura 305). A infiltração máxima, obtida da subtração do escoamento superficial da quantidade de chuva, foi de 3,6 cm/h, enquanto a mínima foi de 0,0 (zero) cm/h (Figura 309). Observa-se que aqui com chuvas aproximadamente iguais às máximas chuvas naturais registradas, houve geração de escoamento superficial. Isso porque o terreno tem uma taxa de infiltração baixa, que provavelmente deve-se à crosta formada na superfície do solo descoberto.

Capítulo 8: ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS

A realização dos ensaios teve como objetivo principal analisar a variabilidade dos resultados de ensaios que geram parâmetros envolvidos nos processos erosivos lineares e também parâmetros normalmente requeridos por modelos de erosão, encontrados na literatura. Tais modelos não preveem a ocorrência de erosão linear.

Neste capítulo, os ensaios realizados serão confrontados com a intenção de se compreender melhor as diferenças de resultados obtidos em cada local, em cada encosta e entre encostas.

Desta forma serão analisados primeiro os resultados dos ensaios dos locais onde houve ensaios com Simulador de Chuva (da segunda etapa). Em seguida serão confrontados os resultados de cada tipo de ensaio agrupando-se as duas etapas, com o intuito de observar a quantidade de ensaios necessária para alimentar um modelo de previsão de erosão linear.

8.1. Análise dos Resultados dos Ensaios com Simulador de Chuva

As observações e peculiaridades de cada ensaio e comparações entre os ensaios de cada Local foram feitas nos itens respectivos do capítulo anterior.

Neste capítulo as observações de cada Local, feitas anteriormente, serão confrontadas e os resultados comparados. Assim, a Tabela 83 apresenta um resumo contendo os principais fatores de influência no processo erosivo: as intensidades médias de chuva adotadas nos ensaios, os valores de escoamento superficial e de taxa de infiltração de água no solo, além de dados complementares (declividade média do terreno e uso do solo).

O resumo apresentado na Tabela 83 permite observar que, na área de estudo da região de Corumbataí (Locais S1 a S6), a maior quantidade de sedimento registrada (ensaio S4.1) coincide com a maior taxa de infiltração (medida do ensaio com Simulador de Chuva), com uma das maiores intensidades médias de chuva, com a segunda maior declividade do terreno e, principalmente, com o uso do solo. Enquanto nos ensaios do Local 5 (S5.1, S5.2 e S5.3) não foi registrado escoamento superficial por se tratar de local com a maior taxa de infiltração

registrada no ensaio com duplo anel, menores I_{me} adotadas e menores declividade do terreno, apesar do uso do solo ser o padrão da maioria dos Locais ensaiados.

Tabela 83: Resumo dos resultados do ensaio com simulador de chuva, em todos os Locais ensaiados.

Local	Ensaio	Declividade média (%)	Uso do solo	Taxa infiltração (D.A.) (cm/h)	Intensidade média de chuva (mm/h)	Escoamento superficial máx. (mm/h)	Taxa infiltração mín. (S.C.) (cm/h)	Taxa infiltração máx. (S.C.) (cm/h)	Sedimento gerado máx. (g/m ² /h)
S1	S1.1	10,45	pasto	19,0	206,35 229,87	87,00	12,0 5,8	14,9 9,2	0,00
	S1.2	10,68	pasto sem grama		227,07	180,00	4,5	10,4	7,75E-05
	S1.3	27,78	pasto sem grama	-	164,70	160,00	0,5	0,5	4,40E-04
S2	S2.1	19,74	pasto	5,5	153,94 167,26	87,00	6,3	7,9	1,10E-05
	S2.2	15,92	pasto sem grama		201,10	145,00	5,9	15,5	4,10E-04
S3	S3.1	16,97	pasto	2,6 (Guelph)	179,07	87,00	9,2	12,0	4,00E-05
S4	S4.1	21,44	terra arada	-	173,47 214,00	87,00	15,4	20,4	1,20E-03
S5	S5.1	10,38	pasto	23,0	92,21	0,00	9,2	9,2	0,00
	S5.2	7,75	pasto		55,01 91,18	0,00	5,5	5,5	0,00
	S5.3	9,4	pasto sem grama		55,6 73,3	0,00	5,6	5,6	0,00
S6	S6.1	19,58	pasto	2,6 (Guelph)	100,82 164,55 364,82	25,00	7,1 14,0 -	8,5 15,6 -	0,00
S7	S7.1	12,1	pasto	27,0	96,39 115,21	5,30	4,8 1,1	5,2 6,8	0,00
S8	S8.1	20,13	sem cobertura	5,0	81,97 110,47	40,70	4,5	6,0	2,43E-04
S9	S9.1	14,75	sem cobertura	2,8	86,99	87,90	0,0	3,6	3,26E-04

Legenda:

"-" = Dado não obtido para o Local

"S.C." = Simulador de Chuva

"D.A." = Duplo Anel

Ainda considerando a área de estudo da região de Corumbataí, o ensaio S4.1 foi o único a apresentar ocorrência de sulcos durante sua realização, apesar de apresentar uma alta infiltração e, conseqüentemente, baixo escoamento superficial. Conforme já comentado, tal

fato pode ser explicado devido ao uso do solo na data da realização do ensaio e a intervenções locais feitas pela esteira do trator.

Já na área de estudo da região de Ibaté (Locais S7 a S9) o resumo apresentado na Tabela 83 permite observar que no Local 7 não houve geração de sedimento e apresentou valor de escoamento superficial mais baixo, enquanto teve a maior taxa de infiltração registrada com o ensaio com duplo anel, dentre todos os ensaios realizados. Devido às dificuldades com o procedimento do ensaio e com a tendência a formação de feições lineares dos Locais 8 e 9, estes ensaios tiveram os menores tempos de realização. Foi possível observar, porém, que apesar de adotadas chuvas menores que as naturais os dois ensaios apresentaram geração de sedimento, comprovando a tendência à erosão da encosta em que se encontravam. As taxas de infiltração baixas registradas tanto com ensaios de duplo anel quanto com ensaio com simulador de chuvas, provavelmente estão relacionadas à crosta formada na superfície do solo descoberto.

No Local 7, conforme já comentado, observou-se que para uma I_{me} menor, o escoamento gerado foi pequeno, mas aproximadamente constante. Depois que a I_{me} foi elevada os volumes coletados variaram demasiadamente, gerando uma curva não linear. Uma possível explicação para isso é que no solo em questão, muito poroso e com taxa de infiltração alta, o vento influenciou na distribuição da chuva de forma que em alguns momentos a I_{me} próximo à boca ficava pequena e parte do escoamento superficial que vinha do restante da área ensaiada era absorvida antes de chegar à boca.

A região onde foram realizados os ensaios do Local S8 e do Local S9 foi escolhida por apresentar incidência de sulcos e ravinas logo após um período de chuva. Apesar dos sulcos gerados não apresentarem evolução durante o período que a área recebeu chuva simulada, o local apresentou uma tendência ao desenvolvimento de sulcos a partir de incisões no solo provocadas por algum fator externo. Nesse ensaio, o vão criado na boca da área ensaiada para se coletar as amostras caracterizou uma incisão externa.

De forma geral, o escoamento superficial aumentou com o tempo na maioria dos ensaios, enquanto, conseqüentemente, a infiltração diminuiu. A infiltração medida com o ensaio com Simulador de Chuva, calculada como a diferença entre a chuva simulada e o escoamento medido, tende a diminuir e igualar-se à taxa de infiltração medida com o ensaio de duplo anel, a partir do alcance da mesma frente de molhamento e geração de infiltração constante, o que caracteriza uma taxa de infiltração.

Os resultados da Rugosidade e, conseqüentemente, da Capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS) são apresentados na Tabela 84. Lembrando que este último foi calculado em função da Rugosidade, será analisado o MDS apenas.

É possível observar na tabela citada que não há um padrão entre os resultados de MDS, nem tampouco em relação aos parâmetros declividade e uso do solo, características de geometria da superfície do terreno. Nota-se, por exemplo, que o maior valor de MDS é do ensaio S5.1, o qual tem uma das menores declividades e cobertura de pasto, enquanto os menores valores (S1.1, S6.1 e S7.1) também possuem cobertura de pasto e tem as menores declividades. De todos os valores de MDS, dois se destacam por serem muito maiores que os demais, o já citado ensaio S5.1 e o S1.3. Assim, o segundo maior valor (S1.3) foi realizado em pasto sem grama e tem a maior declividade registrada nos ensaios.

Tabela 84: Resumo dos resultados de Rugosidade e Capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS).

Local	Cidade	Uso do Solo	Declividade média (%)	Rugosidade	MDS (mm)
S1.1	Corumbataí	pasto	10,45	1,81	0,30
S1.2		pasto sem grama	10,68	2,46	0,46
S1.3		pasto sem grama	27,78	5,58	1,57
S2.1	Corumbataí	pasto	19,74	3,55	0,78
S2.2		pasto sem grama	15,92	3,54	0,78
S3.1	Corumbataí	pasto	16,97	2,11	0,37
S4.1	Corumbataí	terra arada	21,44	2,38	0,44
S5.1	Corumbataí	pasto	10,38	6,88	2,23
S5.2		pasto	7,75	3,45	0,75
S5.3		pasto sem grama	9,4	2,52	0,48
S6.1	Corumbataí	pasto	19,58	2,00	0,34
S7.1	Ibaté	pasto	12,1	1,63	0,26
S8.1	Ibaté	sem cobertura	20,13	3,68	0,82
S9.1	Ibaté	sem cobertura	14,75	3,12	0,65

8.1.1. Dificuldades e incertezas na realização dos ensaios

A dificuldade de mobilização e montagem do equipamento envolvido no ensaio com simulador de chuva é o primeiro entrave do processo de obtenção de dados. Mesmo tendo sido desenvolvido para facilitar o transporte de um local para outro, o tempo despendido na montagem do equipamento e preparação da área a ser ensaiada é de, no mínimo, 3 horas,

impossibilitando a realização de dois ensaios em um mesmo dia. Também são necessárias 4 ou 5 pessoas, no mínimo, para a realização de um ensaio.

Intencionava-se, inicialmente, realizar vários ensaios em um mesmo local, variando a cobertura vegetal, a intensidade de chuva e, em alguns casos, a declividade do terreno, conforme descrito nos ensaios de cada Local, no capítulo anterior.

O tempo gasto e as dificuldades de realização de múltiplos ensaios, somada aos resultados dos primeiros ensaios em alguns lugares, levaram à mudança de planos, optando por procurar solos mais erodíveis, em busca da determinação do início da formação de sulcos.

Outro item de dificuldade refere-se ao desenrolar do ensaio, no controle dos equipamentos envolvidos, por exemplo, a bomba, o bico, as mangueiras. A quantidade de água deve ser controlada também.

Ainda no desenrolar do ensaio, a velocidade e direção do vento têm influência direta na distribuição da chuva pela área delimitada. O fator vento pode ter influenciado na variabilidade e falta de padrão dos resultados de escoamento superficial durante o ensaio do Local 7, por exemplo.

A observação do momento de início de armazenamento de água na superfície e de escoamento superficial gera incertezas, devido à dificuldade de visualização por baixo da grama, por exemplo.

A coleta de escoamento superficial e, conseqüentemente, de sedimento gerado, pode ser comprometida em terrenos com propensão à geração de sulcos. Caso ocorrido nos ensaios do Local S8 e Local S9, nos quais não foi possível encontrar solução para estruturar a boca da área delimitada (local da coleta), em tempo hábil. A experiência mostrou que a técnica adotada para a coleta de sedimento é inadequada para terrenos com propensão à geração de sulcos.

8.2. Análise das Séries de Ensaios por Encostas

Em cada local foram realizadas séries de ensaios que envolveram ensaios de caracterização do solo, de resistência do solo à penetração, de infiltração d'água (Duplo Anel e Tubo de Guelph) e com o Simulador de Chuva. Neste item serão analisados os resultados dos ensaios em cada encosta.

8.2.1. Séries de Ensaios dos Locais da Encosta E1

As séries de ensaios da encosta E1 (Locais 1 ao 4) estão distribuídas na meia encosta (Figura 316 e Figura 317), sendo os Locais 1 e 2 em uma elevação de aproximadamente 636 m, com o Local 2 sobre cordão em nível, e os Locais 3 e 4 em elevações de 628 e 632 m, respectivamente. A série de ensaios do Local 4 foi realizada em terra arada, enquanto as dos demais locais foram realizadas em pasto.

Figura 316: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E1, Corumbataí.

Figura 317: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E1, Corumbataí.

Na encosta E1 o resultado de resistência à penetração (RP) com o solo seco variou entre os locais ensaiados, apresentando relação mais próxima entre os Locais 3 e 4. Em cada local os ensaios apresentaram variação entre si, com diferenças máximas entre ensaios de 6 MPa no Local 1; e de 4 MPa nos demais locais. A faixa de profundidade mais compactada, ou seja, com maiores valores de RP, foi entre 20 e 60 nos Locais 1, 3 e 4; e entre 20 e 100 no Local 2, realizado sobre cordão em nível. Os picos de valores de RP nessas faixas foram entre 6 e 13 MPa nos Locais 1 e 2; e entre 3 e 7 MPa nos Locais 3 e 4.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência à penetração com o solo úmido, o comportamento dos valores de RP com a profundidade mostrou-se mais próximo, variando entre 0,5 e 2,0 MPa até a profundidade atingida pela frente de molhamento em cada local, garantindo o estado próximo da saturação do solo. Exceção ocorreu no resultado do Local 2, em que os valores de RP foram entre 0,2 e 0,8 MPa. Tal diferença no resultado, em relação

aos ensaios dos demais locais, pode ser explicada por tratar-se de ensaio sobre cordão em nível.

As taxas de infiltração nos Locais 2, 3 e 4 foram praticamente iguais, entre 8 e 10 cm/h, enquanto do Local 1 foi de 15 cm/h. O Local 3 atingiu 80 cm de frente de molhamento, enquanto as demais profundidades variaram entre 105 e 115 cm.

Quanto à textura do solo, a granulometria é praticamente igual nos locais da E1, com porcentagem de argila entre 8 e 9% na faixa superficial e entre 13 e 14% à uma profundidade média de 180 cm.

8.2.2. Séries de Ensaios dos Locais da Encosta E2

As séries de ensaios da encosta E2 (Locais 5 ao 10) estão distribuídas no alto e no meio da encosta (Figura 318 e Figura 319), sendo os Locais 8 e 10 em uma elevação de aproximadamente 675 m, o Local 9 em 671 m, o Local 7 em 664, o Local 6 em 660 (sobre cordão em nível) e o Local 5 em 656 m, a elevação mais baixa nessa encosta. Este último local apresentou camada menos espessa de solo, de aproximadamente 50 cm.

Figura 318: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E2, Corumbataí.

Figura 319: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E2, Corumbataí.

A resistência à penetração (RP) com o solo seco variou entre os locais ensaiados, porém, as séries de ensaios realizadas em cada local apresentaram resultados bastante semelhantes, salvo no Local 9, no qual houve diferença de comportamento dos valores em

profundidade, chegando a diferenças de 4 MPa entre um ensaio e outro, no mesmo local. Apesar disso, a partir de 100 cm de profundidade, 2 ensaios com o solo seco e o ensaio com o solo úmido, abaixo da frente de molhamento apresentaram valores iguais, enquanto o ensaio 9c apresentou comportamento muito diferente dos demais. Ainda com o solo seco, o Local 7 apresentou os maiores valores de RP, enquanto o Local 8 apresentou os menores valores, visto que os valores de umidade iniciais (considerado com o solo seco) neste local, foram altos, devido aos ensaios terem sido localizados em um pomar, onde o próprio uso justifica tal umidade diferenciada. Outro caso específico é do Local 6, o qual foi realizado sobre cordão em nível, apresentando valores de RP mais altos na faixa entre 80 e 100 cm, que na superfície, diferentemente dos demais ensaios que apresentaram valores mais altos desde 10 cm até aproximadamente 60 cm.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência à penetração com o solo úmido, o comportamento dos valores de RP com a profundidade mostrou-se mais próximo, variando entre 0,5 e 3,0 MPa nos primeiros 60 cm. Profundidade esta atingida por todas as frentes de molhamento, garantindo o estado próximo da saturação do solo. Os valores do grau de saturação do solo (S), até a profundidade de 60 cm, por sua vez, variaram entre 41 (Local 7) e 82% (Local 6), enquanto a umidade volumétrica (θ) variou entre 18 (Local 7) e 36% (Local 8). A variação dos índices relativos à umidade pode explicar, em parte, a variação dos valores de RP.

As taxas de infiltração nos Locais 8, 9 e 10 foram praticamente iguais, entre 4 e 5 cm/h, enquanto do Local 5 foi de 9 cm/h, do Local 7 foi de 19 cm/h e do Local 6 foi de 25 cm/h. Este último atingiu 190 cm de frente de molhamento, contra uma faixa entre 40 e 80 cm dos demais.

Os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) de todos os locais podem ser considerados iguais, pois variaram entre 2,59 e 2,61 g/cm³, inclusive em profundidade. Quanto à textura do solo, nos Locais 5, 6 e 7 o solo superficial apresentou uma quantidade menor de argila de 5%, contra 12% dos demais. Abaixo de 180 cm, porém, os valores praticamente se igualam, entre 13 e 14%.

Desconsiderando-se os valores até 40 cm do Local 5, que apresentou valores de massa específica natural do solo (ρ) e massa específica do solo seco (ρ_d) mais baixos (ρ de 1,43 g/cm³ e ρ_d de 1,42 g/cm³), os valores de ρ dos demais ensaios variaram entre 1,54 e 1,67 g/cm³ em 20 cm; 1,53 e 1,78 g/cm³ em 40 cm; e 1,61 e 1,75 g/cm³ em 60 cm. Enquanto os

valores de ρ_d variaram entre 1,50 e 1,60 g/cm³ em 20 cm; 1,50 e 1,63 g/cm³ em 40 cm; e 1,58 e 1,64 g/cm³ em 60 cm.

Desconsiderando-se valores extremos do Local 5, na encosta E2 o índice de vazios (e) variou pouco, entre 0,6 e 0,75 (Figura 320), e, do mesmo modo, a porosidade (n) variou entre 37 e 43% (Figura 321).

Figura 320: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E2, Corumbataí.

Figura 321: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E2, Corumbataí.

8.2.3. Séries de Ensaios dos Locais da Encosta E3

As séries de ensaios da encosta E3 (Locais 11 ao 13) estão distribuídas em uma linha transversal da encosta em três altitudes, no alto da encosta (Local 11, em 668 m), no meio (Local 12, em 664 m) e na parte mais baixa da encosta (Local 13, em 636 m) (Figura 322 e Figura 323). As séries de ensaios dos 3 locais foram realizadas no pasto, entre cordões em nível.

Figura 322: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E3, Corumbataí.

Figura 323: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E3, Corumbataí.

Entre os ensaios de cada uma das três séries da encosta E3, os resultados de resistência à penetração (RP) com o solo seco apresentaram pouca semelhança. Enquanto os valores de RP do Local 11 ficaram em uma faixa mais compactada entre 6 e 8 MPa, até 100 cm de profundidade, os valores de RP dos Locais 12 e 13 ficaram em uma faixa mais compactada entre 4 e 9 MPa, até 40 cm. Um dos ensaios do Local 13, porém, apresentou nova faixa compactada a partir de 80 cm. Salvo essa irregularidade em um ensaio, a partir de 80 cm de profundidade, esse foi o local no qual os ensaios apresentaram valores mais próximos. No Local 11 as diferenças entre valores de RP chegaram a 8 MPa e no Local 12, chegaram a 5 MPa.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência à penetração com o solo úmido, o comportamento dos valores de RP com a profundidade mostrou-se mais próximo, variando entre 0,2 (Local 11) e 2,2 MPa (Local 13) até a profundidade atingida pela frente de molhamento em cada local, garantindo o estado próximo da saturação do solo. Chama a atenção o resultado do ensaio Local 11 com o solo úmido que chegou a valores de RP próximos de zero, na profundidade 60 cm. A frente de molhamento em todos os Locais mostrou valores próximos, entre 90 e 100 cm, o mesmo ocorrendo com a taxa de infiltração do solo que foi de 13; 11 e 13 cm/h, para os Locais 11, 12 e 13, respectivamente.

Os valores do grau de saturação (S), com o solo úmido, até as profundidades atingidas pela frente de molhamento, por sua vez, variaram entre 59 e 79%, enquanto a umidade volumétrica (θ) variou entre 25 e 34%. A variação dos índices relativos à umidade pode explicar, em parte, a variação dos valores de RP.

Os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) de todos os Locais foram praticamente iguais, na superfície, variando entre de 2,61 e 2,62 g/cm³, enquanto a partir da profundidade de 180 cm, os valores foram de 2,59 g/cm³ nos Locais 11 e 12 e de 2,80 g/cm³ no Local 13. Quanto à textura do solo, na camada mais superficial dos locais ensaiados a quantidade de argila encontrada foi bem próxima, entre 9 e 11%, enquanto em profundidades maiores nos Locais 11 e 12 foi encontrado 12% de argila, contra 17% no ensaio 13. A diferença entre os 2 locais com elevações superiores e com o Local 13 mais abaixo na encosta, explica-se pela diferença de camadas de materiais inconsolidados encontradas no perfil da encosta.

Os valores de massa específica natural do solo (ρ) dos locais da encosta E3 variaram entre 1,56 e 1,59 g/cm³ em 20 cm; 1,63 e 1,69 g/cm³ em 40 cm; e 1,60 e 1,68 g/cm³ em 60 cm. Enquanto os valores de ρ_d variaram entre 1,53 e 1,55 g/cm³ em 20 cm; 1,54 e 1,61 g/cm³ em 40 cm; e 1,53 e 1,61 g/cm³ em 60 cm.

A diferença das camadas de materiais inconsolidados encontradas parece não ter influenciado nos valores dos índices físicos, os quais se aproximaram mais que em outras encostas estudadas.

Na encosta E3 o índice de vazios (e) variou entre 0,6 e 0,9 (Figura 324), e a porosidade (n) variou entre 38,5 e 46,5% (Figura 325).

Figura 324: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E3, Corumbataí.

Figura 325: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E3, Corumbataí.

8.2.4. Séries de Ensaios dos Locais da Encosta E4

As séries de ensaios da encosta E4 (Locais 14 ao 16, 19 ao 21 e S1) estão distribuídas aleatoriamente no alto e no meio da encosta (Figura 326 e Figura 327), sendo os Locais 15, 16, 19 e 21 em uma elevação de aproximadamente 640 m, o Local 14 em 652 m e o Local 20 em 633 m.

Figura 326: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E4, Corumbataí.

Figura 327: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E4, Corumbataí.

Nessa encosta as séries de ensaios foram localizadas entre cordões em nível, somente a série do Local 16 foi realizada sobre cordão em nível. Chama-se a atenção para a série de ensaios do Local 15 que foi realizada próximo à uma voçoroca ativa. A Figura 328 e a Figura 329 mostram detalhe do posicionamento dos Locais 15 e 16, entre si e em relação à voçoroca. O acompanhamento do desenvolvimento da voçoroca citada, por 6 anos, mostrou que este se deu no sentido do braço lateral formado, estabilizando no sentido em que foi realizada a série de ensaios do Local 15.

Figura 328: Localização da série de ensaios do Local 15, na encosta E4, Corumbataí.

Figura 329: Localização das séries de ensaios dos Locais 15 e 16, na encosta E4, Corumbataí.

Os resultados dos ensaios de resistência à penetração (RP) com o solo seco das séries de ensaios da encosta E4, em geral, apresentaram valores altos (entre 8 e 12 MPa), com picos entre 0 e 40 cm de profundidade. As exceções foram no Local 14 que chegou a valores de 14 MPa, no Local 15, onde os valores máximos foram entre 6 e 8 MPa, ainda assim, valores altos comparados com séries de ensaios em outras encostas e no Local 16, o qual resultou em valores máximos pouco mais baixos, entre 3 e 7 MPa. Este último resultado explica-se pelo fato dos ensaios do Local 16 terem sido feitos sobre cordão em nível, enquanto os menores valores obtidos no Local 15 podem ser explicados devido à sua localização, próximo à voçoroca ativa. A partir de 40 cm, os valores diminuíram gradativamente, até valores aproximadamente constantes com a profundidade. Os valores constantes foram obtidos entre 120 e 140 cm de profundidade.

Nessa encosta a regra foi dos ensaios apresentarem valores diferentes em uma série do mesmo local, somente nos Locais 19 e 21 os resultados apresentaram valores aproximados com a profundidade. No Local 14 apareceram as maiores diferenças entre resultados, chegando a 8 MPa entre valores na mesma profundidade. Neste local os valores de RP

variaram muito com a profundidade, em cada ensaio. No Local 15, nos primeiros 20 cm de profundidade os valores de RP se aproximaram, abaixo dessa profundidade, porém, a diferença entre ensaios chegou a 4 MPa. No Local 16 os resultados dos 2 ensaios realizados foram distintos, chegando à 4 MPa de diferença entre eles. No Local 20, dois ensaios apresentaram valores próximos até 40 cm de profundidade e a diferença entre resultados chegou a 6 MPa.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência à penetração com o solo úmido, o comportamento dos valores de RP com a profundidade mostrou-se mais próximo, variando entre 0,5 (Locais 16 e 20) e 4,0 MPa (Local 19) até a profundidade atingida pela frente de molhamento em cada local, garantindo o estado próximo da saturação do solo. Chama a atenção o resultado do ensaio do Local 20 com o solo úmido que chegou a valores de RP próximos de zero, na profundidade 95 cm. Neste local a frente de molhamento atingiu a maior profundidade, de 135 cm. Os valores do grau de saturação do solo (S), até as profundidades atingidas pela frente de molhamento, por sua vez, variaram entre 53 (Locais 14 e 16) e 73% (Locais 14 e 19), enquanto a umidade volumétrica (θ) variou entre 23 (Local 14) e 34,5% (Local 19). A variação dos índices relativos à umidade pode explicar, em parte, a variação dos valores de RP.

As taxas de infiltração nos Locais 16, 19 e 20 foram praticamente iguais, entre 19 e 20 cm/h, enquanto do Local 15 foi de 12 cm/h e dos Locais 14 e 21 foi de 4 cm/h. O Local 21 atingiu 40 cm de frente de molhamento, enquanto as demais variaram entre 70 e 135 cm.

Os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) de todos os Locais foram iguais, de 2,78 g/cm³, inclusive em profundidade. Quanto à textura do solo, a camada mais superficial dos locais ensaiados apresentou quantidades de argila muito próximas, entre 7,5 e 9%, enquanto na profundidade de 200 cm houve variação nessa quantidade, entre 11 e 16%.

Os valores de massa específica natural do solo (ρ) dos locais da encosta E4 variaram entre 1,56 e 1,65 g/cm³ em 20 cm; 1,50 e 1,77 g/cm³ em 40 cm; e 1,51 e 1,69 g/cm³ em 60 cm. Enquanto os valores de ρ_d variaram entre 1,53 e 1,62 g/cm³ em 20 cm; 1,45 e 1,69 g/cm³ em 40 cm; e 1,45 e 1,64 g/cm³ em 60 cm.

Desconsiderando-se um valor extremo do Local 14, na encosta E4 o índice de vazios (e) variou pouco, entre 0,7 e 1,0 (Figura 330), e, do mesmo modo, a porosidade (n) variou entre 42 e 50% (Figura 331).

Figura 330: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E4, Corumbataí.

Figura 331: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E4, Corumbataí.

8.2.5. Séries de Ensaios dos Locais da Encosta E5

As séries de ensaios da encosta E5 foram localizadas em usos de solo diferentes. Os ensaios do Local 17 foram sobre pasto, enquanto os do Local 18 foram em plantação de eucaliptos, com elevações de 642 e 634 m, respectivamente.

Figura 332: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E5, Corumbataí.

Figura 333: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E5, Corumbataí.

O uso do solo variado indica a grande diferença nos valores de resistência à penetração do solo (RP), ou seja, na compactação do solo. Os valores de RP, com o solo seco, dos ensaios da série do Local 17 foram aproximados até a profundidade de 60 cm, a partir da qual

2 ensaios apresentaram valores diferentes, chegando a 9 MPa de diferença, em 80 cm de profundidade. O ensaio com o solo úmido apresentou os mesmos valores do terceiro ensaio, abaixo da profundidade de 60 cm. Assim, foram 2 resultados com um comportamento, demonstrando solo compactado até uma faixa de 40 cm, com valores máximos entre 10 e 13 MPa, diminuindo para valores aproximadamente constantes com a profundidade; e 2 resultados com o mesmo comportamento até 60 cm de profundidade, porém, com mais um pico de RP entre 60 e 110 cm e valores entre 6 e 12 MPa.

No Local 18 a camada compactada é superior à 180 cm, limite do ensaio, e apresentou valores de RP entre 2 e 8 MPa, nos primeiros 20 cm, passando a uma faixa entre 2 e 5 MPa até a profundidade ensaiada, de 180 cm. O comportamento da resistência à penetração do solo no Local 18, apresentando uma camada compactada superior à 180 cm, se diferencia de todos os outros ensaios realizados neste estudo, indicando a intensa influência do uso do solo.

Os resultados de RP com o solo úmido apresentaram valores iguais aos demais ensaios até a profundidade de 20 cm, porém, diminuindo até 0,5 MPa, em 50 cm, profundidade pouco abaixo da atingida pela frente de molhamento que foi de 40 cm. Por outro lado, abaixo de 50 cm, os valores foram superiores aos demais ensaios com o solo seco, com diferenças de até 2,0 MPa. Essa diferença pode indicar um perfil de solo de maior resistência à penetração, apesar de localizado próximo aos demais, fato que explicaria a falta de diminuição nos valores de RP na faixa mais superficial, em relação aos ensaios com o solo seco.

As taxas de infiltração nos Locais 17 e 18 foram baixas, porém, diferentes: 6 cm/h no Local 17 e 1 cm/h no Local 18. Apesar da diferença, a frente de molhamento atingiu valores aproximados, de 50 e 40 cm, respectivamente para os Locais 17 e 18.

Os valores do grau de saturação (S), com o solo úmido, até as profundidades atingidas pela frente de molhamento, foram muito próximos, sendo na profundidade 20 cm aproximadamente de 56,5% em ambos os locais e em 40 cm entre 42 e 44%. A umidade volumétrica (θ) variou pouco, entre 25 e 26,5 % em 20 cm e entre 17,5 e 21,5% em 40 cm.

Os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) dos dois locais apresentaram valores muito próximos, inclusive em profundidade, entre 2,76 e 2,78 g/cm³. No Local 18 identificou-se mudança na camada de materiais inconsolidados, a partir da profundidade de 250 cm. Apesar de tratar-se de camada de solo residual, o valor da massa específica dos sólidos (ρ_s) foi de 2,81 g/cm³, pouco maior que os demais. Quanto à textura do solo, a camada mais superficial dos dois locais ensaiados apresentou quantidades de argila praticamente iguais, entre 12 e 13%, enquanto na profundidade de 200 cm a quantidade de argila foi de 15%. Na

camada inferior, abaixo de 300 cm, porém, a quantidade de argila foi de 34%, diferente de todos os outros locais estudados.

Os valores de massa específica natural do solo (ρ) dos locais da encosta E5 foram de 1,62 g/cm³ nos dois locais, em 20 cm; em 40 cm foi de 1,67 g/cm³ no Local 17 contra 1,55 g/cm³ no Local 18; e 1,61 e 1,63 g/cm³ em 60 cm, nos Locais 17 e 18, respectivamente. Enquanto os valores de ρ_d foram praticamente iguais em 20 cm: 1,57 e 1,68 g/cm³; em 40 cm foram de 1,46 e 1,59 g/cm³, e em 60 cm de 1,55 e 1,50 g/cm³, respectivamente para os Locais 17 e 18. Nota-se uma diferença marcante em 40 cm de profundidade, na qual os valores, tanto de ρ quanto de ρ_d , diminuem, mas tornam a aumentar em 60 cm.

Na encosta E5 o índice de vazios (e) variou pouco, entre 0,7 e 0,95 (Figura 334), e, do mesmo modo, a porosidade (n) variou entre 42 e 47% (Figura 335).

Figura 334: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E5, Corumbataí.

Figura 335: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E5, Corumbataí.

8.2.6. Séries de Ensaio dos Locais da Encosta E6

As séries de ensaios da encosta E6 também foram localizadas em usos de solo diferentes. Os ensaios do Local 22 foram em terra arada, enquanto os do Local 18 foram sobre pasto, com elevações de 703 e 691 m, respectivamente (Figura 336 e Figura 337). Os ensaios dos Locais 22 e 23 foram realizados em elevações mais altas que os locais analisados até aqui.

Figura 336: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E6, Corumbataí.

Figura 337: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E6, Corumbataí.

Na encosta E6 os resultados de resistência à penetração (RP) do solo seco, apresentaram valores mais baixos que as demais, mesmo no Local 23, que apresentou índices de umidade tão baixas quanto à maioria dos ensaios realizados até agora. Fato que evidencia a dependência de outros parâmetros do solo, além da umidade, para definição da RP. Iniciando, portanto, pelo Local 23, os valores de RP obtidos variaram entre os ensaios realizados entre 2 e 5 MPa, enquanto no Local 22 a variação foi entre 0,6 e 3,8 MPa. O Local 22 foi realizado em terra arada, por isso valores de umidade mais altos, provocaram valores de RP mais baixos, com o solo seco.

Com o solo no estado úmido, os valores de RP do Local 22 foram entre 0,6 e 1,8 MPa, com diferenças entre este ensaio e os ensaios com o solo seco, chegando a 1,5 MPa. Já no Local 23 os valores de RP com o solo úmido variaram entre 0,2 e 0,8 MPa. Nota-se que locais com resultados baixos de RP com o solo seco, geram resultados ainda menores com o solo úmido, comprovando a influência da umidade nos valores de RP.

As taxas de infiltração nos Locais 22 e 23 foram respectivamente de 25 e 18 cm/h. A frente de molhamento atingiu valores próximos, de 110 e 130 cm, respectivamente, nos Locais 22 e 23.

Os valores do grau de saturação (S), com o solo úmido, até as profundidades atingidas pela frente de molhamento, variaram entre 58 e 88%, inclusive em profundidade, com variação máxima em uma mesma profundidade de 15% em 20 cm e de 8% nas demais. A umidade volumétrica (θ) variou entre 27 e 41 % entre os ensaios, inclusive em profundidade, com variação máxima em uma mesma profundidade de 7%.

Os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s), em profundidade, foram praticamente iguais, entre 2,76 e 2,77 g/cm³. Quanto à textura do solo, os locais apresentaram quantidades de argila de 5%, na camada mais superficial e 14% de argila em 120 cm.

Os valores de massa específica natural do solo (ρ) dos locais da encosta E6 foram entre 1,60 e 1,64 g/cm³ no Local 22, e entre 1,50 e 1,58 g/cm³ no Local 23. Enquanto os valores de ρ_d foram entre 1,54 e 1,56 g/cm³ no Local 22 e entre 1,46 e 1,55 g/cm³ no Local 23. A diferença nos dois índices ocorreu na profundidade de 40 cm.

Desconsiderando-se um valor extremo do Local 23, na encosta E6 o índice de vazios (e) variou pouco, entre 0,80 e 0,85 (Figura 338), e, do mesmo modo, a porosidade (n) variou entre 45 e 46% (Figura 339). Os valores de e e de n da E6 apresentaram a menor variação entre locais e entre profundidade, dentre todas as encostas analisadas.

Figura 338: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E6, Corumbataí.

Figura 339: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E6, Corumbataí.

8.2.7. Séries de Ensaio dos Locais da Encosta E7

As séries de ensaios da encosta E7 tiveram como foco os ensaios com simulador de chuva. Os ensaios dessa encosta foram localizados no limite entre o alto e a meia encosta, sendo os Locais S2 e S5 em elevações mais altas, respectivamente, 694 e 702 m, enquanto os ensaios S3 e S6 na mesma elevação de 687 m. Os ensaios S2, S3 e S6 foram realizados próximos às feições erosivas lineares estabilizadas (Figura 340 e Figura 341).

Figura 340: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E7, Corumbataí.

Figura 341: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E7, Corumbataí.

Na encosta E7 os resultados de resistência à penetração (RP), com o solo seco, apresentaram valores mais baixos que as encostas analisadas até aqui. Os valores de RP, em uma mesma série, variaram entre 0,7 (Local S2) e 4 MPa (Local S3), salvo o ensaio do Local S3 que apresentou um pico de mais de 10 MPa. A maior diferença entre locais, em profundidade, dos valores de θ , foi de 6%. Entre os ensaios de cada local houve variação dos valores de RP, porém, a maior diferença foi de 2 MPa. Fato justificado pelos baixos valores de RP apresentados na encosta E7. Em todos os Locais a faixa mais compactada foi em torno de 40 cm de profundidade.

Os valores de RP com o solo no estado úmido variaram pouco, entre 0,6 e 2,0 MPa, até a profundidade atingida pela frente de molhamento dos locais, que variou entre 30 e 85 cm nos Locais S2 e S3, enquanto no Local S6 atingiu 224 cm e no Local S5 passou de 150 cm, que foi a profundidade limite da amostragem para determinação da umidade. O ensaio com o solo úmido no Local S6, porém, apresentou diminuição acentuada nos valores de RP somente até 30 cm de profundidade, a partir da qual os valores se igualaram aos ensaios com o solo seco. Indicativo da influência de outros fatores na resistência à penetração do solo. Os valores de RP de todos os ensaios da encosta foram praticamente iguais abaixo de 80 cm de profundidade.

Os valores de umidade volumétrica (θ), com o solo úmido, variaram entre 25 e 40%, enquanto os valores de grau de saturação (S) variaram entre 45 e 95%. Dentre as encostas analisadas até aqui, a E7 foi a que apresentou perfis de solo mais próximos da saturação, após os ensaios.

Quanto à textura, a granulometria dos locais da E7 apresentou quantidades aproximadas de argila em 20 cm de profundidade, entre 6 e 8%. Na profundidade de 200 cm,

essa quantidade foi entre 8 e 11%, sendo que no Local S5, as quantidades em profundidade foram iguais.

Entre os Locais S3, S5 e S6 houve variação nos valores de massa específica dos sólidos (ρ_s), de 2,53 até 2,61 g/cm³, enquanto o Local S2 o valor foi de 3,20 g/cm³, diferenciado dos locais da E7 e também dos locais das demais encostas.

Os valores de massa específica natural do solo (ρ) dos locais da encosta E7 variaram entre 1,6 e 2,0 g/cm³ em 20 cm; 1,63 e 1,95 g/cm³ em 40 cm; 1,56 e 1,87 g/cm³ em 60 cm; e 1,60 e 1,89 g/cm³ em 80 cm.

Os valores de massa específica do solo seco (ρ_d) dos Locais S3 e S6 (considerados iguais devido à proximidade física) diferem dos demais locais da E7. Em 20 cm, enquanto nos Locais S2 e S5 os valores de ρ_d variaram entre 1,55 e 1,59 g/cm³, nos Locais S3 e S6 o valor foi de 1,92 g/cm³; em 40 cm, os valores dos primeiros locais variaram entre 1,57 e 1,70 g/cm³, enquanto nos Locais S3 e S6 o valor foi de 1,85 g/cm³; e abaixo dessa profundidade, enquanto nos primeiros locais os valores variaram entre 1,47 e 1,54 g/cm³, nos Locais S3 e S6 o valor foi de 1,78 g/cm³.

Na encosta E7 o índice de vazios (e) variou bastante, entre 0,25 e 1,30 (Figura 342), e, do mesmo modo, a porosidade (n) variou entre 20,5 e 56% (Figura 343). Dentre as encostas analisadas, a E7 foi a que apresentou maior variação entre valores de e e de n , entre locais, pois em profundidade a variação ocorreu até 40 cm, abaixo disso os valores se mostraram constantes em cada local.

Figura 342: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E7, Corumbataí.

Figura 343: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E7, Corumbataí.

A taxa de infiltração nos locais da encosta E7 foi obtida por diversos ensaios, o Duplo Anel (D.A.), o Tubo de Guelph e o Simulador de Chuva (S.C.). Os dois primeiros geram taxas de infiltração com carga constante, enquanto no terceiro, a taxa de infiltração é gerada subtraindo-se o escoamento superficial (ES) da Intensidade média de chuva (I_{me}), portanto, a

partir de carga variável. Os resultados dos ensaios com carga constante variaram entre 2,6 e 5,5 cm/h nos Locais S2, S3 e S6, os quais se encontravam próximo à feições erosivas. O Local S5, no meio da encosta, foi o que apresentou maior taxa de infiltração, de 23 cm/h.

Dentre os locais ensaiados com S.C., o Local S5 foi o único que não gerou escoamento superficial. A alta taxa de infiltração neste local, inclusive várias vezes maior que as I_{me} adotadas, pode explicar o ocorrido.

As diferenças entre valores obtidos nos ensaios de infiltração com carga constante (D.A. e Tubo de Guelph), e nos ensaio com carga variável (S.C.), foram entre 0,2 e 6%. As maiores diferenças, porém, foram dos valores gerados pelo Tubo de Guelph, em relação ao S.C. A maior diferença entre os valores de taxa de infiltração do D.A. e do S.C. foram de 3,4%. Indica-se, portanto, a utilização do ensaio com Duplo Anel (D.A.) para determinação da quantidade de chuva necessária para gerar escoamento superficial.

8.2.8. Séries de Ensaios dos Locais da Encosta E8

Na encosta E8 foi realizada uma série de ensaios, incluindo o ensaio com simulador de chuva, no Local S4. Essa encosta foi escolhida por encontrar-se em fase de transformação de pasto para plantação de cana. Portanto, os ensaios foram realizados em terra arada, remexida. Em pouco tempo, porém, a área voltou a ser usada como pasto, inviabilizando a realização de novos ensaios nesta encosta. A Figura 344 e a Figura 345 mostram a encosta E8, já com o uso de pasto, novamente. O Local S4 encontra-se na parte mais baixa da encosta, elevação de 614 m, devido à restrição da área em transformação, a qual ocupava cerca de $\frac{1}{4}$ da encosta, ou menos.

Figura 344: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E8, Corumbataí.

Figura 345: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E8, Corumbataí.

Os resultados do Local S4, porém, foram interessantes. Realizado sobre cordão em nível, recém construído, os ensaios de resistência à penetração (RP), com o solo seco, apresentaram valores baixos até 80 cm, variando entre 0,1 e 2 MPa, incluindo os valores do ensaio com o solo úmido, apresentando um pico de valores entre 3 e 8 MPa, entre 80 e 120 cm, praticamente igualando-se a partir de 140 cm de profundidade. Nota-se que abaixo do cordão construído, o comportamento da resistência à penetração é semelhante aos ensaios realizados em outras encostas com pasto como uso, tornando-se interessante somente a nova faixa. De fato, se compararmos o resultado do ensaio realizado em pasto, à 150 m do Local S4 com os resultados abaixo de 80 cm, são praticamente iguais.

Os baixos valores de RP do solo remexido, somados à alta intensidade de chuva adotada no ensaio com simulador, justificam os resultados de geração de sedimento, que foram maiores entre todos os ensaios realizados em outras encostas. Fatores que justificam também ter sido um dos poucos locais a apresentar formação de sulcos na área ensaiada.

As condições do solo em que foi realizado o ensaio com S.C. no Local 4 apresentaram-se com maior influência ao desenvolvimento de sulcos, que as condições de fluxo, uma vez que neste local o ensaio gerou um valor de ES de 8,7 cm/h, enquanto outros ensaios feitos em locais de uso consolidado por décadas geraram valores iguais ou até 2 vezes maiores que estes, porém, geraram quantidades de sedimento no mínimo 3 vezes menores que no Local S4.

8.2.9. Séries de Ensaios dos Locais da Encosta E9

A série de ensaios do Local S7 foi realizada no alto da encosta E9. Na Figura 346 e Figura 347 é possível notar feições erosivas lineares ocorrendo em várias elevações da encosta, inclusive na mesma elevação do Local S7, de 730 m. Na Figura 348 nota-se que tais feições ocorrem do alto até meia encosta, fator determinante para escolha do local na encosta.

Figura 346: Local S7 na encosta E9, Ibaté.

Figura 347: Local S7 em vista na encosta E9, Ibaté.

Figura 348: Vista ampliada da encosta E9, posicionando o Local S7, Ibaté.

Os resultados com Simulador de Chuva (S.C.), porém, foram pouco relevantes, pois assim como o ensaio do Local S5 da E7, a taxa de infiltração, gerada com ensaio de Duplo Anel (D.A.), foi elevada, de 27,0 cm/h. A intensidade média de chuva (I_{me}) adotada no ensaio do Local S7 foi praticamente 3 vezes menor que a taxa de infiltração citada. Apesar dessa diferença, o ensaio gerou 0,5 cm/h de escoamento superficial (ES). Por tratar-se de um valor

mínimo de ES, este pode ter sido gerado em função da cobertura de grama, por ser mais cheia que no ensaio do Local S5, a água retida na grama pode ter sido transportada pelas folhas. A cobertura de pasto no Local S5 mostrava-se mais rala. A declividade do terreno em ambos locais foi bastante próxima, entre 10,3 e 12,1% e a capacidade de armazenamento de água na superfície (MDS) do Local S7 foi das menores medidas em todos os ensaios, 0,26 cm, enquanto a MDS do Local S5 foi a maior medida, 2,23 cm.

Nota-se, portanto, que a grama pode influenciar na definição do ES, por dois motivos: por um lado, por reter parte da chuva, e por outro, por aumentar a quantidade de ES, porém sem carregar sedimento.

Devido ao fato de praticamente toda água da chuva infiltrar, o ensaio do Local S7 foi o único realizado na encosta E7.

Analisando os demais ensaios realizados no Local S7, os valores de resistência à penetração (RP) com o solo seco variaram entre 1 e 2 MPa, enquanto com o solo úmido os valores foram entre 0,5 e 1,2 MPa. Os ensaios com solo seco foram realizados com baixas porcentagens de umidade, indicando a menor influência desse parâmetro nos resultados de RP. Quanto à textura, a quantidade de argila foi entre 5 e 6% por todo o perfil.

8.2.10. Séries de Ensaio dos Locais da Encosta E10

A encosta E10 tem relevo suave e as séries de ensaios realizadas nessa encosta localizaram-se no alto da encosta, com a elevação do Local S8 em 789 m e do Local S9 em 733 m (Figura 349 e Figura 350). Parte da encosta E10 tinha como uso do solo um canavial, formado recentemente. foi deixado uma faixa sem ocupação por toda a extensão da estrada municipal que passa no limite do canavial recém formado. Nessa faixa estão os Locais S8 e S9. Conforme citado anteriormente, essa região foi escolhida por apresentar incisões no solo de vários tamanhos, entre alguns decímetros e poucos metros.

Figura 349: Distribuição em planta dos locais ensaiados na encosta E10, Ibaté.

Figura 350: Distribuição em vista dos locais ensaiados na encosta E10, Ibaté.

Na encosta E10 os resultados de resistência à penetração (RP), com o solo seco, apresentaram valores variando entre 3 e 8 MPa, nos primeiros 50 cm, sendo esta a faixa mais compactada.

A frente de molhamento com os ensaios de Duplo Anel (D.A.) atingiram 70 e 60 cm, respectivamente nos Locais S8 e S9. Os ensaios de RP feitos após esse ensaio, revelaram valores aproximadamente constantes igualando-se aos valores constantes com a profundidade, que foram de 1,5 e 1,0 MPa, respectivamente nos Locais S8 e S9. Os ensaios com Simulador de Chuva, por outro lado, atingiram menores frentes de molhamento, 40 e 15 cm, respectivamente. Fato possivelmente explicado devido ao tempo de ensaio, que foi curto nos dois locais.

Quanto à textura do solo, em ambos os locais a granulometria não variou significativamente, em profundidade. No Local S8 a diferença na quantidade de argila foi de 6% a mais em 200 cm, enquanto no Local S9 não houve variação. Do mesmo modo, os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) dos locais da encosta E10 não variaram em profundidade, mas apresentaram valores diferentes entre si, de 2,76 g/cm³ no Local S8 e 3,18 g/cm³ no Local S9.

Os valores de massa específica natural do solo (ρ) e de massa específica do solo seco (ρ_d) variaram em profundidade e entre os dois locais ensaiados. No Local S8 os valores de ρ variaram entre 1,52 e 1,65 g/cm³; e no Local S9 variaram entre 1,61 e 1,79 g/cm³. No Local S8 os valores de ρ_d variaram entre 1,41 e 1,58 g/cm³; e no Local S9 variaram entre 1,53 e 1,74 g/cm³. Em todos os casos apresentando valores decrescentes com a profundidade.

Os valores dos índices relativos à umidade, com o solo seco, foram menores no Local S9, com valores de umidade volumétrica (θ) variando entre 7 e 10%, enquanto no Local S8 a

variação foi entre 11,5 e 20,7%. Do mesmo modo, o grau de saturação (S) foi menor no Local S9, com valores entre 14,4 e 19,6%, enquanto no Local S8 a variação foi entre 25,5 e 38,5%.

Com o solo úmido, após ensaio com D.A., a situação se inverteu, pois o Local S8 apresentou maiores valores dos índices relativos à umidade. Assim, no Local S8, os valores de umidade volumétrica (θ) variaram entre 26,5 e 31,8%, enquanto no Local S9 a variação foi entre 11,2 e 24,2%. O mesmo ocorreu com os valores do grau de saturação (S), os quais no Local S8 variaram entre 48,5 e 54,2%, enquanto no Local S9 variaram entre 21,7 e 43,2%.

Observa-se a diferença na maioria dos resultados dos ensaios entre os dois locais da encosta E10. Tal diferença pode ser devida ao fato de cada local ter sido realizado sobre material inconsolidado de origem diferente, sendo o Local S8 sobre material residual arenoso com finos do Itaqueri e o Local S9 sobre residual arenoso do Botucatu.

Na encosta E10 o índice de vazios (e) (Figura 351) e a porosidade (n) (Figura 352) apresentaram valores próximos entre os Locais S8 e S9, porém com a profundidade ambos mostraram a mesma variabilidade da maioria das encostas, com o primeiro variando entre 0,8 e 1,1 e o segundo, variando entre 44 e 52%.

Figura 351: Índice de vazios (e) por profundidade, dos locais da encosta E10, Ibaté.

Figura 352: Porosidade (n) por profundidade, dos locais da encosta E10, Ibaté.

8.3. Análise Estatística por Parâmetros

Alguns parâmetros são únicos por local ensaiado. Caso da taxa de infiltração, uso do solo, declividade, rugosidade, escoamento superficial e sedimento gerado. Excetuando-se a taxa de infiltração, os demais parâmetros são relacionados à superfície do terreno.

Outros parâmetros tiveram resultados obtidos em profundidade, ou seja, resultados em perfis, pois com o tempo a erosão das camadas superficiais pode expor camadas de menor

erodibilidade, as quais devem apresentar propriedades diferentes das camadas superficiais (LAL e ELLIOT, 1994). Algumas das propriedades que podem variar são: índices físicos, granulometria, erodibilidade e resistência do solo à penetração.

Para os parâmetros únicos, não há dúvida sobre sua consideração, para os demais, porém, serão necessárias algumas considerações. Inicialmente foram testados os resultados superficiais de cada um desses parâmetros. Assim, tomaram-se os valores dos índices físicos, da granulometria e da erodibilidade obtidos entre 0 e 20 cm, considerando-se o valor mais superficial encontrado. Para os ensaios com resultados em perfil, considerou-se valores médios de faixas em profundidade.

A seguir, será apresentada a análise dos parâmetros obtidos considerando-se as encostas como parcelas. Assim, a Tabela 85 apresenta os Locais ensaiados encontrados em cada encosta. Lembrando que os Locais ensaiados da primeira etapa foram identificados somente por números, enquanto os da segunda etapa foram identificados por números precedidos da letra S (de simulador de chuva) e sub-índice para as repetições de ensaios num mesmo local.

Nem todos os parâmetros, porém, possuem número de dados suficiente para uma análise quantitativa, estatística por exemplo. Nesses casos foram realizadas análises qualitativas, com os resultados obtidos e com as observações de campo.

Tabela 85: Distribuição por encosta dos Locais ensaiados e a respectiva cidade da área de estudo.

Cidade	Encosta	Local dos Ensaios								
Corumbataí	E1	1	2	3	4					
Corumbataí	E2	5	6	7	8	9	10			
Corumbataí	E3	11	12	13						
Corumbataí	E4	14	15	16	19	20	21	S1.1	S1.2	S1.3
Corumbataí	E5	22	23							
Corumbataí	E6	17	18							
Corumbataí	E7	S2.1	S2.2	S3.1	S5.1	S5.2	S5.3	S6.1		
Corumbataí	E8	S4.1								
Ibaté	E9	S7.1								
Ibaté	E10	S8.1	S9.1							

8.3.1. Resistência do Solo à Penetração

Apesar da imprecisão dos valores de tensão de cisalhamento obtidos indiretamente com ensaios de campo, optou-se por adotar o ensaio com penetrômetro devido à possibilidade de realização de maior quantidade de ensaios, abrangendo uma área mais extensa e com perfil mais detalhado.

Considerando os ensaios das duas etapas descritas anteriormente, optou-se por tratá-los com uma distribuição aleatória e, portanto, utilizar a ferramenta estatística de análise de variância, a ANOVA, para comprovar a igualdade significativa dos valores obtidos, ou, por outro lado, a significância das diferenças.

O resultado da análise, apresentado a seguir, mostra que para o solo no estado seco a hipótese é rejeitada, ou seja, não existe igualdade entre os resultados de uma encosta, ou sequer entre os resultados entre as encostas da primeira área de estudo (na região de Corumbataí). Na segunda área de estudo (região de Ibaté) os ensaios realizados foram insuficientes para caracterizar uma amostra.

A análise de variância de fator duplo (ANOVA) tem maior aceitação quando considerado um número igual de blocos de amostras por parcela e número de repetições por bloco também igual (GOMES, 1966). Os ensaios com penetrômetro foram distribuídos aleatoriamente, conforme já discutido, e em número desigual de distribuição. Com base na amostra existente definiu-se uma análise de fator duplo com 3 blocos, incluindo 5 encostas e outra com 2 blocos, incluindo 7 encostas. Ambos com 3 repetições de ensaio. Mais adiante, será possível observar que os resultados não diferem entre as duas considerações.

A escolha dos Locais ensaiados, para cada encosta, foi feita também de forma aleatória. Poderá ser observado que a escolha não excluiu ensaios feitos em solo com uso diferente, considerando todos num mesmo grupo. Uma tentativa de selecionar somente ensaios feitos em pasto, por exemplo, que constitui quase a totalidade da área estudada, não apresentou resultados mais convincentes e diminuía o número de encostas possível de ser considerado. Assim, manteve-se a seleção aleatória citada.

A Tabela 86, portanto, mostra os ensaios selecionados por encosta, na região de Corumbataí. Na região de Ibaté, foi feita somente a análise por encosta, da encosta E10, que contém os Locais S8 e S9. As encostas E8 (região de Corumbataí) e E9 (região de Ibaté) possuem um local ensaiado apenas.

Tabela 86: Distribuição por encosta dos Locais considerados.

Encosta	Local dos Ensaios		
E1	1	3	4
E2	8	9	10
E3	11	12	13
E4	14	15	19
E5	22	23	-
E6	17	18	-
E7	S3	S5	S6

Como observado na Tabela 86 os blocos equivalem aos Locais dos ensaios. Com uma análise prévia dos perfis, tanto com o solo seco, como com o solo úmido, observou-se certa regularidade nos valores de resistência à penetração. O valor da resistência varia, mas segue um padrão de mudança em profundidades mais ou menos definidas na maioria dos ensaios.

Os perfis foram divididos em faixas de profundidade e tomou-se a média da resistência em cada faixa. As faixas foram definidas a partir de análise prévia dos perfis, considerando as profundidades em que mais comumente as resistências se alteravam. Desta forma, foram analisadas as médias de faixas entre 0 e 10 cm; entre 0 e 20 cm; entre 20 e 40 cm; entre 20 e 60 cm; entre 60 e 100 cm e, finalmente, entre 100 e 180 cm.

Avaliando os perfis de forma geral, com o solo seco e úmido, pode-se observar certa diferença na faixa entre 0 e 10 cm e entre 0 e 20 cm, mas observando os resultados das faixas entre 20 e 40 cm e entre 20 e 60 cm, pode-se perceber que as diferenças praticamente são inexistentes, salvo casos pontuais.

8.3.1.1. Resultados Por Encosta Para o Solo Seco

A hipótese considerada na análise proposta é de que as médias dos blocos de cada encosta são significativamente iguais, considerando-se um erro de 10%. Tal hipótese é válida se o valor de F (calculado) for menor ou igual ao valor de F crítico (tabelado). Os resultados realçados em amarelo são aqueles que aceitam a hipótese (ou seja, as médias são significativamente iguais), assim como os valores sem realce são aqueles que rejeitam a hipótese (ou seja, as médias não são significativamente iguais).

8.3.1.1.1. Profundidade média entre 0 e 10 cm

Na Tabela 87 é apresentado o resumo dos cálculos estatísticos da ANOVA (análise de fator único), por encosta e para a faixa de profundidade entre 0 e 10 cm. Conforme já mencionado, tomou-se a média da faixa. As encostas avaliadas neste item são E1 à E7 e E10. A memória de cálculo de toda a parte estatística apresentada neste capítulo encontra-se disponível no Apêndice.

Os resultados apresentados no resumo citado mostram que, na faixa de profundidade entre 0 e 10 cm, as encostas E2, E6, E7 e E10 podem ter as médias dos blocos consideradas significativamente iguais. Enquanto nas encostas E1, E3, E4 e E5 a hipótese foi rejeitada, ou, as médias dos blocos não podem ser consideradas significativamente iguais.

Tabela 87: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 0 e 10 cm.

Encosta	F	F crítico
E1	11,27	3,07
E2	2,54	2,52
E3	5,58	3,46
E4	4,25	2,28
E5	22,92	4,54
E6	0,80	4,54
E7	2,46	2,66
E10	0,36	4,54

8.3.1.1.2. Profundidade média entre 0 e 20 cm

Na Tabela 88 é apresentado o resumo dos cálculos estatísticos da ANOVA (análise de fator único), por encosta e para a faixa de profundidade entre 0 e 20 cm. As encostas avaliadas neste item são E1 à E7, E9 e E10.

Os resultados apresentados no resumo citado mostram que, na faixa de profundidade entre 0 e 20 cm, somente as encostas E2 e E10 podem ter as médias dos blocos consideradas significativamente iguais. Enquanto nas demais encostas a hipótese foi rejeitada, ou, as médias dos blocos não podem ser consideradas significativamente iguais.

Tabela 88: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 0 e 20 cm.

Encosta	F	F crítico
E1	4,75	3,07
E2	2,42	2,52
E3	6,64	3,46
E4	5,25	2,28
E5	15,24	4,54
E6	9,95	4,54
E7	3,20	2,66
E9+E10	15,18	3,11
E10	0,42	4,54

8.3.1.1.3. Profundidade média entre 20 e 60 cm

Na Tabela 89 é apresentado o resumo dos cálculos estatísticos da ANOVA (análise de fator único), por encosta e para a faixa de profundidade entre 20 e 60 cm. As encostas avaliadas neste item são E1 à E7 e E10.

Os resultados apresentados no resumo citado mostram que, na faixa de profundidade entre 20 e 60 cm, as encostas E1, E3, E5 e E10 podem ter as médias dos blocos consideradas significativamente iguais. Enquanto nas encostas E2, E4, E6 e E7 a hipótese foi rejeitada, ou, as médias dos blocos não podem ser consideradas significativamente iguais.

Tabela 89: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 20 e 60 cm.

Encosta	F	F crítico
E1	0,56	3,29
E2	11,41	2,52
E3	2,54	3,46
E4	2,44	2,28
E5	2,75	4,54
E6	29,88	4,54
E7	3,95	2,66
E9+E10	9,15	3,11
E10	0,45	4,54

8.3.1.1.4. Profundidade média entre 60 e 100 cm

Na Tabela 90 é apresentado o resumo dos cálculos estatísticos da ANOVA (análise de fator único), por encosta e para a faixa de profundidade entre 60 e 100 cm. As encostas avaliadas neste item são E1 à E7 e E10.

Os resultados apresentados no resumo citado mostram que, na faixa de profundidade entre 60 e 100 cm, as encostas E4, E5 e E6 podem ter as médias dos blocos consideradas significativamente iguais. Enquanto nas encostas E1, E2, E3, E7 e E10 a hipótese foi rejeitada, ou, as médias dos blocos não podem ser consideradas significativamente iguais.

Tabela 90: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 60 e 100 cm.

Encosta	F	F crítico
E1	6,76	3,29
E2	23,77	2,81
E3	3,71	3,46
E4	1,77	2,28
E5	3,80	4,54
E6	1,12	4,54
E7	3,44	2,66
E9+E10	3,80	3,11
E10	24,20	4,54

8.3.1.1.5. Profundidade média entre 100 e 180 cm

Na Tabela 91 é apresentado o resumo dos cálculos estatísticos da ANOVA (análise de fator único), por encosta e para a faixa de profundidade entre 100 e 180 cm. As encostas avaliadas neste item são E1 à E7 e E10.

Os resultados apresentados no resumo citado mostram que, na faixa de profundidade entre 100 e 180 cm, as encostas E1, E2, E5, E6, E7 e E10 podem ter as médias dos blocos considerada iguais. Enquanto nas encostas E3 e E4 a hipótese foi rejeitada, ou, as médias dos blocos não podem ser consideradas iguais.

Tabela 91: ANOVA, por encosta, para faixa de profundidade entre 100 e 180 cm.

Encosta	F	F crítico
E1	1,28	3,78
E2	2,05	2,81
E3	4,03	3,46
E4	3,68	2,28
E5	0,34	4,54
E6	0,34	4,54
E7	0,90	2,66
E9+E10	3,71	3,11
E10	1,00	4,54

8.3.1.2. Resultados Entre Encostas Para o Solo Seco

A hipótese considerada na análise proposta é de que as médias dos blocos de cada encosta e as médias das encostas são significantemente iguais. Tal hipótese é válida se o valor de F (calculado) for menor ou igual ao valor de F crítico (tabelado). Os resultados realçados em amarelo são aqueles que aceitam a hipótese (ou seja, as médias são significativamente iguais) e os demais são aqueles que rejeitam a hipótese (ou seja, as médias não são significativamente iguais).

Nas tabelas a seguir (Tabela 92 a Tabela 96) são apresentados os resumos dos cálculos estatísticos da ANOVA (análise de fator duplo), por encosta e para as seguintes faixas de profundidade: entre 0 e 10 cm; entre 0 e 20 cm; entre 20 e 60 cm; entre 60 e 100 cm e entre 100 e 180 cm, respectivamente. Conforme já mencionado, tomou-se a média da faixa. As encostas avaliadas neste item variam de acordo com a consideração de repetições (3 ou 2). Assim, para 3 repetições as encostas selecionadas foram E1 à E4 e E7, enquanto para 2 repetições as encostas selecionadas foram E1 a E7. Somente na análise com 3 repetições para a faixa entre 100 e 180, a encosta E1 não foi considerada, por falta de dados em tal profundidade. A memória de cálculo de toda a parte estatística apresentada neste capítulo encontra-se disponível no Apêndice.

Os resultados apresentados no resumo citado mostram que, na faixa de profundidade entre 0 e 10 cm, as encostas E2, E6, E7 e E10 podem ter as médias dos blocos consideradas significantemente iguais. Enquanto nas encostas E1, E3, E4 e E5 a hipótese foi rejeitada, ou,

as médias dos blocos não podem ser consideradas significativamente iguais. Em todas as faixas de profundidade, tanto na análise com 3 ou com 2 repetições, pode-se observar que a hipótese foi rejeitada, tanto entre amostras, como entre interações, ou em outras palavras, na avaliação geral das amostras e na interação entre encostas. Isso significa que não existe nenhuma significância entre os resultados.

A análise feita aqui não pode ser aplicada na área de estudo da região de Ibaté, por esta conter somente 2 encostas e uma delas com somente um local ensaiado.

Tabela 92: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 0 e 10 cm.

Nº Repetições		F	F crítico
3	Amostra	29,59	2,14
3	Colunas	3,16	2,49
3	Interações	2,98	1,88
2	Amostra	22,28	2,00
2	Colunas	3,03	2,89
2	Interações	3,05	2,00

Tabela 93: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 0 e 20 cm.

Nº Repetições		F	F crítico
3	Amostra	30,85	2,14
3	Colunas	3,53	2,49
3	Interações	3,51	1,88
2	Amostra	21,62	2,00
2	Colunas	7,54	2,89
2	Interações	4,98	2,00

Tabela 94: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 20 e 60 cm.

Nº Repetições		F	F crítico
3	Amostra	10,94	2,14
3	Colunas	6,26	2,49
3	Interações	2,20	1,88
2	Amostra	8,87	2,00
2	Colunas	11,06	2,89
2	Interações	3,00	2,00

Tabela 95: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 60 e 100 cm.

Nº Repetições		F	F crítico
3	Amostra	12,36	2,14
3	Colunas	7,38	2,49
3	Interações	3,01	1,88
2	Amostra	9,01	2,00
2	Colunas	8,02	2,89
2	Interações	4,13	2,00

Tabela 96: ANOVA Entre Encostas (blocos com 3 e 2 repetições), profundidade entre 100 e 180 cm.

Nº Repetições		F	F crítico
3	Amostra	5,28	2,33
3	Colunas	4,99	2,54
3	Interações	3,10	2,04
2	Amostra	3,85	2,00
2	Colunas	3,79	2,89
2	Interações	4,18	2,00

8.3.1.3. Resultados Entre Encostas Para o Solo Úmido

A hipótese considerada na análise proposta para o solo úmido é de que as médias das encostas (observar que aqui as encostas são os blocos) são significativamente iguais. Tal hipótese é válida se o valor de F (calculado) for menor ou igual ao valor de F crítico (tabelado). Os resultados realçados em amarelo são aqueles que aceitam a hipótese (ou seja, as médias são iguais), assim como os realçados em cinza são aqueles que rejeitam a hipótese (ou seja, as médias não são iguais).

Nas tabelas a seguir (Tabela 97 e Tabela 98), são apresentados os resumos dos cálculos estatísticos da ANOVA (análise de fator único), entre encostas e para as seguintes faixas de profundidade: entre 0 e 10 cm; entre 0 e 20 cm; e entre 20 e 40 cm. Conforme já mencionado, tomou-se a média da faixa. Foram analisados resultados até 40 cm de

profundidade por garantia de que todos os ensaios atingiram, no mínimo, até essa faixa de profundidade.

Para o solo no estado úmido (após ensaio com duplo anel e após ensaio com simulador de chuva) foram feitos ensaios de resistência à penetração somente em um ou dois pontos por local. Desta forma, não havendo repetições nos locais, não há como calcular médias dos locais, por isso a análise foi feita somente entre encostas.

As encostas avaliadas neste item foram E1 à E7 e E9 à E10. Desconsiderou-se a encosta E8 por possuir somente um ensaio com o solo úmido. A encosta E9, que conta com um Local apenas, possui 2 ensaios com o solo úmido, um após ensaio com duplo anel e outro após ensaio com simulador de chuva. A memória de cálculo de toda a parte estatística apresentada neste capítulo encontra-se disponível no Apêndice.

Os resultados apresentados nos resumos citados mostram que, em todas as faixas de profundidade as hipóteses foram aceitas, em outras palavras, é possível considerar igualdade entre as médias das encostas. Tal conclusão vale tanto para as encostas da região de Corumbataí, quanto para a região de Ibaté. Esta última, apesar do número reduzido de amostras.

Tabela 97: ANOVA Entre Encostas, para o solo úmido e todas as faixas de profundidade, região de Corumbataí.

Profundidade (cm)	F	F crítico
0-10	1,96	2,00
0-20	1,72	2,00
20-40	1,08	2,00

Tabela 98: ANOVA Entre Encostas, para o solo úmido e todas as faixas de profundidade, região de Ibaté.

Profundidade (cm)	F	F crítico
0-10	0,73	4,54
0-20	1,00	4,54
20-40	1,68	4,54

8.3.1.4. Considerações Gerais sobre Resultados de Resistência do Solo à Penetração

As análises de variância das médias dos ensaios de Resistência do solo à penetração mostram que com o solo no estado seco, na maioria das vezes não é possível considerar igualdade estatística entre os resultados, enquanto com o solo no estado úmido, a análise mostra que é possível considerar igualdade estatística entre os ensaios.

Os ensaios considerados com o solo seco possuíam teores de umidade diferentes, tal fato justifica a rejeição da hipótese de igualdade. Surge um indicativo da necessidade de se obter resultados de determinados ensaios, principalmente os de resistência do solo à penetração, com variação temporal, para conseguir resultados para diferentes umidades.

Uma vez que o escoamento superficial tem que vencer a resistência do solo ao cisalhamento (possível de obter em função da resistência à penetração, conforme discutido anteriormente) para ocorrer erosão, o mais provável é que isso aconteça no momento em que o perfil umedece e, portanto diminui sua resistência.

8.3.2. Índices Físicos

Alguns dos índices físicos foram analisados com a ANOVA, fator único, considerando as encostas como blocos e cada local ensaiado como amostra, uma vez que foi definido um índice físico para cada local. Os índices físicos analisados desta forma foram: porosidade (n), índice de vazios (e), umidade volumétrica (θ) e grau de saturação (S). Outros, porém, não tiveram tratamento matemático, quais sejam: massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ).

Alem disso, na apresentação dos resultados dos ensaios por local, os valores obtidos para os índices físicos foram analisados por local, em profundidade. De maneira geral, não apresentaram variação significativa com a profundidade.

A Tabela 99 apresenta um resumo dos índices físicos para os ensaios da primeira e segunda etapas, para a profundidade entre 0 e 20 cm. A partir desta tabela é possível notar que os parâmetros que não tiveram tratamento matemático (massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d) e a massa específica natural do solo (ρ)) apresentaram

valores muito próximos, justificando a possibilidade de se realizar um menor número de ensaios em uma área com o mesmo material geológico.

A seguir serão tratados os índices físicos com tratamento matemático.

8.3.2.1. Porosidade do Solo na Profundidade de 20 cm

O resultado da ANOVA, com fator único, para as encostas E2 à E7, na profundidade entre 0 e 20 cm, mostrou que a hipótese foi aceita, pois o valor de F (0,59) foi menor que F crítico (2,19). Isso denota que estatisticamente as médias dos valores de porosidade das encostas são consideradas significativamente iguais. A memória de cálculo de toda a parte estatística apresentada neste capítulo encontra-se disponível no Apêndice.

8.3.2.2. Índice de Vazios na Profundidade de 20 cm

O resultado da ANOVA, com fator único, para as encostas E2 à E7, na profundidade entre 0 e 20 cm, mostrou que a hipótese foi aceita, pois o valor de F (0,43) foi menor que F crítico (2,20). Isso denota que estatisticamente as médias dos valores de índice de vazios das encostas são consideradas significativamente iguais. A memória de cálculo de toda a parte estatística apresentada neste capítulo encontra-se disponível no Apêndice.

8.3.2.3. Umidade Volumétrica, para o Solo Úmido

O resultado da ANOVA, com fator único, para as encostas E2 à E7, na profundidade entre 0 e 20 cm, mostrou que a hipótese foi rejeita, pois o valor de F (2,66) foi maior que F crítico (2,20). Isso denota que estatisticamente as médias dos valores de umidade volumétrica das encostas não são consideradas significativamente iguais.

Tabela 99: Resumo dos índices físicos para os ensaios da primeira e segunda etapas, para a profundidade entre 0 e 20 cm.

Local	Cidade	Altitude (m)	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	w (%)	Solo seco		Solo úmido		
									q (%)	S (%)	w (%)	q (%)	S (%)
1	Corumbataí	637	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Corumbataí	636	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Corumbataí	628	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Corumbataí	632	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Corumbataí	656	2,6	1,43	1,42	0,96	48,91	7,65	10,87	20,78	24,75	35,14	67,22
6	Corumbataí	660	2,6	1,54	1,5	0,72	41,99	2,10	3,15	7,55	22,94	34,41	82,40
7	Corumbataí	664	2,60	1,58	1,54	0,69	40,78	2,61	4,02	9,85	21,24	32,71	80,20
8	Corumbataí	676	2,61	1,63	1,56	0,75	42,84	9,25	14,44	32,23	23,15	36,11	80,62
9	Corumbataí	671	2,61	1,61	1,57	0,75	42,77	7,79	12,22	27,19	19,42	30,49	67,83
10	Corumbataí	675	2,61	1,67	1,60	0,66	39,65	6,03	9,64	23,94	17,81	28,49	70,73
11	Corumbataí	668	2,61	1,56	1,53	0,72	41,76	2,62	4,01	9,54	21,53	32,94	78,38
12	Corumbataí	664	2,61	1,59	1,55	0,73	42,17	5,33	8,27	19,09	22,15	34,33	79,29
13	Corumbataí	636	2,62	1,59	1,54	0,72	41,85	4,36	6,71	15,87	16,23	25,00	59,11
14	Corumbataí	652	2,78	1,61	1,56	0,79	44,20	3,78	5,90	13,27	19,67	30,68	69,04
15	Corumbataí	640	2,78	1,65	1,62	0,73	42,10	2,51	4,06	9,59	18,46	29,91	70,59
16	Corumbataí	639	2,78	1,58	1,53	0,84	45,55	4,37	6,69	14,53	19,63	30,04	65,25
17	Corumbataí	642	2,76	1,62	1,58	0,78	43,71	4,27	6,74	15,16	15,96	25,22	56,74
18	Corumbataí	634	2,77	1,62	1,57	0,82	44,92	6,18	9,70	20,99	16,65	26,13	56,54
19	Corumbataí	640	2,78	1,56	1,54	0,86	46,12	4,16	6,40	13,49	22,35	34,42	72,58
20	Corumbataí	633	2,78	1,61	1,60	0,79	44,04	3,49	5,58	12,32	18,96	30,34	66,99
21	Corumbataí	644	2,78	1,60	1,58	0,82	44,91	4,47	7,06	15,25	18,61	29,41	63,48
22	Corumbataí	703	2,76	1,60	1,54	0,82	45,19	5,77	8,89	19,33	26,19	40,34	87,67
23	Corumbataí	691	2,76	1,57	1,55	0,82	45,00	3,42	5,30	11,53	21,57	33,44	72,78
S1	Corumbataí	637	2,78	1,56	1,54	0,86	46,12	4,16	6,40	13,49	22,35	34,42	72,58
S2	Corumbataí	694	3,20	1,64	1,59	1,06	51,48	5,49	8,73	16,59	18,50	29,42	45,08
S3	Corumbataí	687	2,77	1,59	1,55	0,79	44,04	2,74	4,25	9,65	14,71	22,80	51,76
S4	Corumbataí	614	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S5	Corumbataí	702	2,61	1,66	1,55	0,66	39,65	5,39	8,35	21,41	20,91	32,42	60,57
S6	Corumbataí	687	2,53	2,00	1,92	0,32	24,06	4,09	7,86	32,68	17,17	32,97	90,10
S7	Ibaté	730	2,72	1,75	1,64	0,64	39,16	5,74	9,42	24,28	21,01	34,45	64,87
S8	Ibaté	789	2,76	1,65	1,58	0,80	44,60	8,02	12,68	27,48	19,58	30,93	54,08
S9	Ibaté	733	3,18	1,79	1,74	0,86	46,18	4,72	8,22	17,48	12,54	21,81	39,94

Legenda: "-" = dados não obtidos

8.3.2.4. Grau de Saturação, para o Solo Úmido na Profundidade de 20 cm

O resultado da ANOVA, com fator único, para as encostas E2 à E7, na profundidade entre 0 e 20 cm, mostrou que a hipótese foi aceita, pois o valor de F (1,91) foi menor que F crítico (2,20). Isso significa que estatisticamente as médias dos valores de umidade volumétrica das encostas são consideradas iguais.

8.3.3. Taxa de Infiltração de Água no Solo

A taxa de infiltração do solo foi analisada com a ANOVA, fator único, considerando as encostas E1 a E7 como blocos e os ensaios dos locais de cada encosta como amostras. O resultado da análise estatística, mostrou que a hipótese foi aceita, pois F (1,34) foi menor que F crítico (2,08). Assim, estatisticamente as médias dos valores da taxa de infiltração entre as encostas são consideradas iguais.

8.3.4. Textura e Erodibilidade do Solo

A textura do solo, medida por meio da granulometria, já foi considerada única por encosta, devido à análise tátil-visual prévia das amostras. Os resultados, apresentados na Tabela 100, mostram que também não existe variação significativa entre encostas. Tal parâmetro foi avaliado em perfil na apresentação dos resultados dos ensaios por local. Foi possível observar que em perfil também não houve variação significativa, salvo algumas exceções.

A Tabela 100 apresenta um resumo do grau de erodibilidade dos ensaios das duas etapas. Nota-se que, em geral, a erodibilidade é considerada baixa. Somente os ensaios dos Locais 7 e S6.1 indicaram erodibilidade alta em alguma profundidade do perfil. Portanto, é possível considerar igualdade na erodibilidade para as duas áreas de estudo.

Tabela 100: Resumo da textura do solo, uso e erodibilidade no perfil, para todos os locais ensaiados.

Local	Cidade	Altitude (m)	Profund. (cm)	Tamanho dos Grãos			Uso do Solo	Erodibilidade no perfil
				Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)		
1	Corumbataí	637	20	8	2	90	pasto	baixa
2	Corumbataí	636	20	8	2	90	pasto	baixa
3	Corumbataí	628	20	8	2	90	pasto	baixa
4	Corumbataí	632	20	9	4	87	terra arada	baixa
5	Corumbataí	656	40	5	1	94	pasto	baixa
6	Corumbataí	660	40	5	1	94	pasto	baixa
7	Corumbataí	664	40	5	1	94	pasto	baixa até 60 cm e alta a partir de 60
8	Corumbataí	676	40	12	4	84	pomar	alta
9	Corumbataí	671	40	12	4	84	pasto	baixa
10	Corumbataí	675	40	12	4	84	pasto	baixa
11	Corumbataí	668	40	9	3	88	pasto	baixa
12	Corumbataí	664	40	9	3	88	pasto	baixa
13	Corumbataí	636	40	11	3	86	pasto	baixa
14	Corumbataí	652	40	8	3	89	pasto	baixa
15	Corumbataí	640	40	9	1	90	pasto	baixa
16	Corumbataí	639	40	9	1	90	pasto	baixa
17	Corumbataí	642	20	12	4	84	pasto	baixa
18	Corumbataí	634	20	13	5	82	eucalipto	baixa
19	Corumbataí	640	40	8	3	89	pasto	baixa
20	Corumbataí	633	40	8	3	89	pasto	baixa
21	Corumbataí	644	40	8	3	89	pasto	baixa
22	Corumbataí	703	20	5	2	93	terra arada	baixa
23	Corumbataí	691	20	5	2	93	pasto	baixa
S1.1	Corumbataí	637	40	8	3	89	pasto	-
S1.2							pasto sem grama	
S1.3							pasto sem grama	
S2.1	Corumbataí	694	45	6	3	91	pasto	baixa
S2.2							pasto sem grama	
S3.1	Corumbataí	687	20	6	1	93	pasto	-
S4.1	Corumbataí	614	-	-	-	-	terra arada	-
S5.1	Corumbataí	702	20	8	2	90	pasto	baixa
S5.2							pasto	
S5.3							pasto sem grama	
S6.1	Corumbataí	687	20	6	1	93	pasto	alta entre 20 e 40 cm
S7.1	Ibaté	730	20	5	1	94	pasto	baixa
S8.1	Ibaté	789	20	24	3	73	sem cobertura	baixa
S9.1	Ibaté	733	20	10	4	86	sem cobertura	alta até 20

Capítulo 9: CONCLUSÕES

Do ponto de vista do objetivo principal, de avaliar a variabilidade e representatividade de ensaios de caracterização geotécnica e parâmetros envolvidos nos processos erosivos, é possível extrair conclusões sobre os ensaios realizados, discutidos e analisados, como um todo, ou seja, considerando as duas etapas de ensaios.

Com a análise dos resultados dos ensaios verificou-se que a variabilidade aumenta com a diminuição da umidade. O que indica que os ensaios *in situ* devem ser realizados em diferentes períodos do ano, e que qualquer que seja o modelo utilizado deve considerar a variação anual ou de ciclos temporais maiores, ou ainda realizar os ensaios impondo diferentes condições de umidade.

A diferença entre valores de resistência à penetração de ensaios de uma série, com a profundidade, pode indicar um comportamento adverso na encosta e, portanto, um maior potencial erosivo.

As taxas de infiltração geradas com o ensaio de Duplo Anel podem servir de base para determinação da quantidade de chuva necessária para gerar escoamento superficial, no ensaio com Simulador de Chuva. Dessa forma, pode-se ter uma estimativa inclusive do escoamento superficial que se deseja obter.

As condições de uso do solo revelaram-se como um dos fatores de maior influência na variabilidade dos resultados dos parâmetros analisados.

O ensaio com simulador de chuva permitiu concluir que a cobertura vegetal, a micro e meso rugosidade e a resistência à penetração do solo definem áreas mínimas muito diferentes para o início do processo erosivo, inclusive para uma encosta constituída por um mesmo material geológico.

O uso dos resultados de simuladores de chuva para validação de modelos deve ser avaliado cuidadosamente em função da combinação de vegetação e rugosidade. A definição da chuva adotada no ensaio deve basear-se na taxa de infiltração do solo, gerada com ensaio de Duplo Anel e ser função do escoamento superficial que se deseja obter.

Os ensaios de resistência a penetração representam adequadamente as condições do material geológico em função da umidade associada à sazonalidade climática (chuvas e evapotranspiração).

Para as encostas estudadas as feições erosivas existentes são fruto de áreas mínimas de contribuição mais extensas que as ensaiadas, assim como de concentração do escoamento superficial por usos, aspectos da macro-rugosidade ou em decorrência do processo de escoamento superficial ao longo do tempo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. (2005). *A Review of Hillslope and Watershed Scale Erosion and Sediment Transport Models*. Catena. v. 64, p. 247-271.
- ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. and HOLT, R. F. (1966). Total Porosity and Random Roughness of the Interrow Zone as Influenced by Tillage. USDA-ARS. Conservation Research Report. n. 7, p. 1-21.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2007). *ASTM D 2850 – Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. 6 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2009). *ASTM D 3385 – Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-ring Infiltrometer*. 7 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2011). *ASTM D 3080-3080M – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1980). *NBR 5734 – Peneiras para Ensaio com Tela Metálica. Especificações*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 6508 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 7181 – Solo: Análise granulométrica. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995). *NBR 6502 – Rochas e Solos: Terminologia*. Rio de Janeiro.
- BELINCANTA, A.; REIS, J. H. C. dos. (2008). Avaliação do Uso de Penetrômetro Dinâmico de Cone para Controle de Execução das Fundações de Pavimentos Rodoviários. In: *IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, 2008, Coimbra-Portugal. Anais do IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Coimbra-Portugal: IV GEO.
- BERTOL, I.; AMARAL, A. J. do; VÁZQUEZ, E. V.; GONZÁLEZ, A. P.; BARBOSA, F. T.; BRIGNONI, L. F. (2006). *Relações da Rugosidade Superficial do Solo com o Volume de*

Chuva e com a Estabilidade de Agregados em Água. Revista Brasileira de Ciências do Solo. v. 30. p. 543-553.

BERTOL, I.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. (2007). *Rugosidade Superficial do Solo sob Diferentes Doses de Resíduo de Milho Submetido à Chuva Simulada*. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 42, n. 1, p. 103-110.

BERTOLANI, F. C.; GONZÁLEZ, A. P.; LIÑARES, M. L.; VÁZQUEZ, E. V.; MIRANDA, J. G. V. (2000). *Variabilidade Espacial da Rugosidade Superficial do Solo Medida com Rugosímetros de Agulhas e Laser*. Bragantia. Campinas, v. 59, n. 2, p. 227-234.

BEVEN, K. (1989). *Changing Ideas in Hydrology – The Case of Physically Based Models*. Journal of Hydrology, 105, 157–172.

BLANQUIES, J.; SCHARFF, M.; HALLOCK, B. (2003). *The Design and Construction of a Rainfall simulator*. International Erosion Control Association (IECA), 34th Annual Conference and Expo. Las Vegas/Nevada. p. 24-28.

BLUM, P. (1997). *Physical properties handbook*. ODP Tech. Note, 26.
doi:10.2973/odp.tn.26.1997

BORAH, D. K.; BERA, M. (2003). *Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Mathematical Bases*. American Society of Agricultural Engineers. v. 46(6), p. 1533-1566.

BURWELL, R. E.; ALLMARAS, R. R.; AMEMIYA, M. (1963). *A Field Measurement of Total Porosity and Surface Microrelief of Soils*. Soil Science Society of America Proceedings, v. 27, p. 697-700.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D., FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. (2006). Processos Erosivos. In: CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. da S. (Ed.). *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Brasília, Distrito Federal: Finatec. Cap. 2.

CAPRA, A.; MAZZARA, L.M.; SCICOLONE, B. (2005). *Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy*. Catena. v. 59, p. 133-146.

CARSON, M.A.; KIRKBY, M.J. (1975). *Hillslope form and process*. Oxford, Cambridge University Press, 475p.

CASSAN, M. (1982), *Los Ensaíos in Situ em la Mecánica del Suelo*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A., p. 139-166.

- CHIEW, F.H.S. AND SIRIWARDENA, L. (2005). *Estimation of SIMHYD Parameter Values For Application In Ungauged Catchments*. MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. Melbourne: December 2005, pp. 2883-2889.
- CHOW, V.T. (1964). Runoff. In: CHOW, V.T. (editor). *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill, New York, Section 14, p.14-1/14-54.
- CHU, S. T. (1978). *Infiltration During an Unsteady Rain*. Water Resources Research. v. 14, n. 3, p. 461-466. June.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. (2012). *Introduzindo Hidrologia*. Disponível em: http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila_hidrologia/apostila.html. Acesso em: 20/mar.
- CURRENCE, H.D. & LOVELY, W.G. (1970). *The analysis of soil surface roughness*. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. v. 13. p. 710-714.
- DE ROO, A. P. J.; HAZELHOFF, L.; BURROUGH, P. A. (1989). *Soil Erosion Modelling Using 'Answers' And Geographical Information Systems*. Earth Surface Processes And Landforms, v. 14, p. 517-532.
- DERBYSHIRE, E., GREGORY, K. AND HAILS, J. (1979), *Geomorphological processes: Boulder*. Colorado: Westview, 312 p.
- DURKIN, P. R. (2004). *Documentation for the Use of GLEAMS (Version 3) and Auxiliary Programs in Forest Service Risk Assessments (Version 2.04)*. New York: Syracuse Environmental Research Associates, Inc.
- ENGMAN ET. (1986). *Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. v. 112, n. 1, p. 39-53.
- FAGUNDES, J. R. T. (2010). *Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, São Paulo.
- FOSTER, G. R. (1986). Understanding Ephemeral Gully Erosion. In: *Soil Conservation: An Assessment of the National Resources Inventory*. v. 2. Cap. 4. p. 90-128.

- GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. (2004). *Variabilidade Temporal da Resistência à Penetração de um Latossolo Argiloso sob Semeadura Direta com Rotação de Culturas*. Revista Brasileira de Ciências do Solo. v. 28, p. 477-484.
- GOMES, F. P. (1966). Curso de Estatística Experimental. Piracicaba: Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 3 ed. 404 p.
- GORDON, L. M.; BENNETT, S. J.; BINGNER, R. L.; THEURER, F. D.; ALONSO C. V. (2007). *Simulating Ephemeral Gully Erosion in Annagyps*. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. v. 50, n. 3, p. 857-866.
- HAIRSINE, P. B.; ROSE, C. W. (1992a). *Modeling Water Erosion Due to Overland Flow Using Physical Principles 1. Sheet Flow*. Water Resources Research. v. 28, n. 1, p. 237-243.
- HAIRSINE, P. B.; ROSE, C. W. (1992b). *Modeling Water Erosion Due to Overland Flow Using Physical Principles 2. Rill Flow*. Water Resources Research. v. 28, n. 1, p. 245-250.
- HANSEN, B.; SCHJØNNING, P. and SIBBESEN, E. (1999). *Roughness Indices for Estimation of Depression Storage Capacity of Tilled Soil Surfaces*. Soil & Tillage Research. n. 52, p. 103-111.
- HERRICK, J. E. (2005) Response to “Comments on ‘Simultaneous Measurement of Soil Penetration Resistance and Water Content with a Combined Penetrometer – TDR Moisture Probe’ and ‘A Dynamic Cone Penetrometer for Measuring Soil Penetration Resistance’”. Soil Science Society of America Journal, v. 69, p. 926-927.
- HESEL, R.; DIJCK, S. van; STOLTE, J.; ELSER, E. van den. (2003). *LISEM Project Field Measurements Manual: Version 1.3*. ALTEIRA: Green World Research.
- HIGGINS, C. G.; HILL, B. R.; LEHRE, A. K. (1990). Gully Development. Geological Society of America. Special Paper 252. Chapter 6.
- HORTON, R.E. (1933). *The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle*. EOS, American Geophysical Union Transactions. v.14, p. 446-460.
- HUANG, C.; BRADFORD, J. M. 1992. *Application of a Laser Scanner to Quantify Soil Microtopography*. Soil Science Society of America Journal. v. 56, p. 14-21.
- IWASA, O. Y.; FENDRICH, R. (1998) Controle da Erosão Urbana. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Cap. 16.

- JAKOBSEN B. F.; DEXTER A. R. (1987). *Effect of Soil Structure on Wheat Root-Growth, Water-Uptake and Grain-Yield – A Computer-Simulation Model*. Soil and Tillage Research. v.10, p.331–345.
- JESTER, W.; KLIK, A. 2005. Soil Surface Roughness Measurement – Methods, Applicability, and Surface Representation. Catena. v. 64, p. 174-192.
- JETTEN, V. (2002). *LISEM: Limburg Soil Erosion Model: Windows version 2.x: User Manual*. Utrecht: UCEL (Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics). 64 p.
- KAMPHORST, E. C. (2000a). *Measurement and Estimation Methods of Maximum Depression Storage on Tilled Soils*. (In French, with English summary.) Ph.D. dis., Institut National Agronomique Paris, Grignon, France.
- KAMPHORST, E. C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITKÄNEN, J.; IVERSEN, B. V.; DOUGLAS, J. T.; PAZ, A. (2000b). *Predicting Deopressional Storage from Soil Surface Roughness*. Soil Science Society of America Journal. v. 64, p. 1749-1758.
- KARMANN, I. (2000) Ciclo da Água, Água Subterrânea e Sua Ação Geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 7, 2ª Reimpressão.
- LAFLEN, J. M.; WATSON, D. A.; FRANTI, T. G. (1985). *Effect of Tillage Systems on Concentrated Flow Erosion*. Proceeding Fourth International Conference on Soil Conservation, November 3-8. Maracay, Venezuela.
- LAL, R. (1990). *Soil Erosion in the Tropics – Principles and Manegement*. McGraw-Hill, New Yor, 580 p.
- LAL, R. (1994). Soil Erosion by Wind and Water: Problems and Prospects. In: LAL, R. (Ed.). *Soil Erosion: Research Methods*. 4. ed. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press. Cap. 1.
- LAL, R.; ELLIOT, W. (1994). Erodibility and Erosivity. In: LAL, R. (Ed.). *Soil Erosion: Research Methods*. 4. ed. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press. Cap. 8.
- LAMBE, T. W. and WHITMAN, R. V. (1969) Soil Mechanics. New York: John Wiley.
- LINDEN, D. R.; VAN DOREN, D. M. (1986). Parameters for Characterizing Tillage-induced Soil Surface Roughness. Soil Science Society of America Journal. v. 50, p. 1560-1565.

- LINDEN, D. R.; VAN DOREN, D. M. (1988). A Model of the Effects of Tillage-induced Soil Surface Roughness on Erosion. In: Tillage and Traffic in Crop Production. Proceedings of the 11th International Conference of the International Soil and Tillage Research Organization. Edinburgh, UK. v. 1, p. 373-378.
- LINSLEY Jr., R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. (1975). *Hydrology for Engineers*. New York: McGraw-Hill Company, 2 ed.
- MERRIT, W. S.; LETCHER, R. A.; JADEMAN, A. J. (2003). *A Review of Erosion and Sediment Transport Models*. Environmental Modelling & Software. v. 18, p. 761-799.
- MEYER, L. D. (1994). Rainfall Simulators for Soil Erosion Research. In: LAL, R. (Ed.). *Soil Erosion: Research Methods*. 4. ed. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press. Cap. 4.
- MEYER, L. D.; HARMON, W. C. (1979). Multiple-Intensity Rainfall Simulator for Erosion Research on Row Sideslopes. ASAE. n. 77-2025, p. 100-103.
- MILLER, W. P. (1987). *A Solenoid-Operated, Variable Intensity Rainfall Simulator*. Soil Science Society of America Journal. v. 51 (3): 832.
- MOORE, I. D.; LARSON, C. L. 1974. *Estimating Micro-relief Surface Storage from Point Data*. Transactions of the ASAE, n. 20, p. 1073-1077.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI D.; AND STYCZEN M. E. (1998) *The European Soil Erosion Model (Eurosem): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments in Earth Surface Processes and Landforms*. v. 23, 527–544.
- MORGAN, R. P. C; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E.; FOLLY, A. J. V. (1998a). *The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide*. Silsoe, Bedford United Kingdom: Silsoe College, Cranfield University.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI D.; STYCZEN, M. E. (1998b). *The European Soil Erosion Model (Eurosem): A Dynamic Approach For Predicting Sediment Transport From Fields And Small Catchments*. Earth Surf. Process. Landforms, 23, p. 527–544.
- MORGAN, R.P.C. (1982). *Splash Detachment Under Plant Covers: Results And Implications of a Field Study*. Transactions of American Society Agricultural Engineering, 25 p. 987-991.

- MUTCHLER, C. K.; MURPHREE, C. E.; MCGREGOR, K. C. (1994). Laboratory and Field Plots for Erosion Research. In: LAL, R. (Ed.). *Soil Erosion: Research Methods*. 4. ed. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press. Cap. 2.
- NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; OOSTWOUD WIJDENES, D.; ROXO, M. (2001). *Testing the Ephemeral Gully Erosion Model (Egem) For Two Mediterranean Environments*. *Earth Surface Processes and Landforms*. v. 26, p. 17-30.
- NAVAS, A.; ALBERTO, E. F.; MACHÍN, J.; GALÁN, Z. (1990). *Design and Operation of a Rainfall Simulator for Field Studies of Runoff and Soil Erosion*. *Soil Technology – A Cooperating Journal of Catena*. v. 3, p. 385-397.
- NEARING, M. A., LANE, L. J., LOPES, V. L. (1994). Modeling soil erosion. In: LAL, R. (Ed.). *Soil Erosion: Research Methods*. 4. ed. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press. Cap. 6.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. (2004). *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. Texas. 529 p.
- NISHIYAMA, L. ; ZUQUETTE, L. V. (1994). *Importância da Cartografia Geotécnica Para Caracterização de Vulnerabilidade de Aquíferos Livres: Exemplo do Aquífero Botucatu na Quadrícula de São Carlos - Sp*. *Geociências (São Paulo)*, São Paulo - S.P., v. 13, n. 2, p. 345-357.
- NISHIYAMA, L. (1998). *Procedimentos de Mapeamento Geotécnico como Base para Análises e Avaliações Ambientais do Meio Físico, em Escala 1:100.000, Aplicados ao Município de Uberlândia – MG*. 2 v. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, São Paulo.
- NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. (1979). *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 19, p. 196-199.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Ed. Vilibor. São Paulo.
- NUNES, J. P. (2007). *Vulnerability of Mediterranean Watersheds to Climate Change: the Desertification Context*. Lisboa. Dissertação de doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

- NUNES, J. P.; GONÇALO, N. V.; SEIXAS, J.; GONCALVES, P.; CARVALHAIS, N. (2005). *Evaluating the MEFIDIS Model for Runoff and Soil Erosion Prediction During Rainfall Events*. Catena. v. 61, p. 210-228.
- ONSTAD, C. A. (1984). *Depressional Storage on Tilled Soil Surfaces*. Transactions of the ASAE. n. 27, p. 729-732.
- PEJON, O. J. (1992). Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos. São Carlos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. (2003) *Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs*. Catena. v. 50, p. 91-133.
- REIS, J. H. C. dos; MICHELAN, P. P.; BELINCANTA, A. (2010). *Estudo de correlação entre ensaios penetrométricos estáticos e dinâmicos*. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRANSEG. Gramado, RS.
- ROOSEBOOM A.; MÜLKE F. J. (1982). Erosion Initiation, Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield. In: Proceedings of the Exeter Symposium. IAHS Publ. n. 137, July.
- SALEH, A. (1993). *Soil Roughness Measurement: Chain Method*. Journal Soil and Water Conservation. v. 48, p. 527-529.
- SALOMÃO, F. X. de T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; Silva, A. S. da; Botelho, R. G. M. *Erosão e Conservação dos Solos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. Cap. 7, p. 229-267.
- SANGLERAT, G. (1967). *El Penetrometro y el Reconocimiento de los Suelos*. Traduzido por G. de Navacerrada. Madri: Servicio de Publicaciones Ministerio de Obras Publicas.
- SIDORCHUK, A. (1999). *Dynamic and Static Models of Gully Erosion*. Catena, Giessen, v. 37, n. 3-4, p. 401-414.
- SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F. de; SACRAMENTO, J. A. A. S. do; SILVEIRA, E. C. P. S. (2010). *Relação Umidade Versus Resistência à Penetração para um Argissolo Amarelo Distrocoeso no Recôncavo da Bahia*. Revista Brasileira de Ciências do Solo. v. 34, p. 659-667.

- SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. (2002). *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*. Journal of Hydrologic Engineering. July/august, p. 270-292.
- STOLF, R. (1991) Teoria e Teste Experimental de Fórmulas de Transformação dos Dados de Penetrômetro de Impacto em Resistência do Solo. Revista Brasileira de Ciências do Solo. Campinas, v. 15 p. 229-235.
- STRAUSS, P; PITTY, J.; PFEFFER, M.; MENTLER, A. (2000) Rainfall Simulation for Outdoor Experiments. In: JAMET, P.; CORNEJO, J. (eds.): *Current research methods to assess the environmental fate of pesticides*. INRA Editions. p. 329-333.
- TOSSEL, R. W.; DICKINSON, W. T.; RUDRA, R.P.; WALL, G. J. (1987). *A Portable Rainfall Simulator*. Canadian Agricultural Engineering. v. 29, n. 2, p. 155-187.
- USDA (United States Department of Agriculture): Agricultural Research Service: KINEROS (2012). Disponível em: <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>. Acessado em 15/03/2012.
- USDA (United States Department of Agriculture): Agricultural Research Service: KINEROS (1990). KINEROS, a Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and Use Manual.
- VANAGS, C.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. (2005). *The Dynamic Penetrometer for Assessment of Soil Mechanical Resistance*. Super Soil 2004. Sydney: The Regional Institute.
- VANDAELE, K.; POESEN, J.; GOVERS, G.; WESEMAEL, B. (1996). *Geomorphic Threshold Conditions for Ephemeral Gully Incision*. Geomorphology. v. 16, p. 161-173.
- VAZ, C.; HOPMANS, J. W. (2001). Simultaneous Measurement of Soil Penetration Resistance and Water Content with a Combined Penetrometer – TDR Moisture Probe. Soil Science Society of America Journal. v. 65, p. 4-12.
- VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; MARIA, I. C. de. (2011). *Modeling and Correction of Soil Penetration Resistance for Varying Soil Water Content*. Geoderma. v. 166, p. 92-101.
- VENTE, J. de; POESEN, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. Earth-Science Reviews. v. 71, p. 95-125.
- WILKINSON, S.; HENDERSON, A.; CHEN, Y.; SHERMAN, B. (2004). *SedNet User Guide*. Client Report, CSIRO Land and Water; Canberra.

- WILLGOOSE, G. (2005). *Mathematical Modeling of Whole Landscape Evolution*. Journal: Annual Review of Earth and Planetary Sciences. v. 33, p. 443-459.
- YU, B.; ROSE, C.W.; CIELSIOLKA, C.A.A.; COUGHLAN, K.J.; FENTIE, B. (1997). Towards a Framework for Runoff and Soil Loss Prediction Using GUEST Technology. Australian Journal of Soil Research 35, 1191–1212.
- ZORINA, Ye. F. (1979). Methods of Gully Erosion Potential Calculating. In: *Soil Erosion and Channel Processes*, v. 7, p. 81- 90. Chalov RS (ed.). Moscow University Press: Moscow (in Russian).
- ZUQUETTE, L. V.; PALMA, J. B.; PEJON, O. J. (2006). *Initial Assessment of the Infiltration and overland flow for different rainfall events in land constituted of sandstones of the Botucatu Formation (Guarani Aquifer), State of São Paulo, Brazil*. Environmental Geology (Berlin).

APÊNDICE

Relação dos cálculos estatísticos para Resistência dos solos à penetração e Índices Físicos.

9.1. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Resistência à Penetração por Encosta, para Profundidade Média Entre 0 e 10 cm

Anova: fator único

RESUMO		E1			
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
1	3	9	3	0,13	
2	2	4,4	2,2	0,08	
3	3	10,1	3,366667	0,103333	
4	3	5,4	1,8	0,19	

ANOVA					Encosta: E1	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,475152	3	1,491717	11,26837	0,004531	3,074072
Dentro dos grupos	0,926667	7	0,132381			
Total	5,401818	10				

Notas:

profundidade: 0-10 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO		E2			
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
5	3	8,7	2,9	0,04	
6	2	6,6	3,3	0,32	
7	2	8,6	4,3	2,88	
8	3	5,3	1,766667	0,013333	
9	3	7,9	2,633333	0,863333	
10	3	9,4	3,133333	0,823333	

ANOVA					Encosta: E2	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,469375	5	1,693875	2,535741	0,09872	2,521641

Dentro dos grupos 6,68 10 0,668

Total 15,14938 15

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
11	3	14	4,666667	0,763333
12	3	10,6	3,533333	0,373333
13	3	18,8	6,266667	1,903333

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

ANOVA

Encosta: E3

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	11,31556	2	5,657778	5,583333	0,042697	3,463304
Dentro dos grupos	6,08	6	1,013333			
Total	17,39556	8				

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
14	3	26,1	8,7	8,17
15	3	17	5,666667	1,203333
16	2	8,2	4,1	0,02
19	3	20,7	6,9	1,63
20	3	23,1	7,7	0,76
21	3	27,3	9,1	0,25
S1.1	3	18,2	6,066667	0,253333

ANOVA

Encosta: E4

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	48,14867	6	8,024778	4,248796	0,013793	2,282979
Dentro dos grupos	24,55333	13	1,888718			

Total	72,702	19
-------	--------	----

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
22	3	3,3	1,1	0,07
23	3	8,5	2,833333	0,323333

ANOVA

Encosta: E5

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,506667	1	4,506667	22,91525	0,008731	4,544771
Dentro dos grupos	0,786667	4	0,196667			
Total	5,293333	5				

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
17	3	23,6	7,866667	4,503333
18	3	20,2	6,733333	0,303333

ANOVA

Encosta: E6

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,926667	1	1,926667	0,801664	0,421206	4,544771
Dentro dos grupos	9,613333	4	2,403333			
Total	11,54	5				

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
--------------	-----------------	-------------	--------------	------------------

S2.1	2	6,6	3,3	7,22
S3.1	3	10,2	3,4	3,13
S5.1	6	9	1,5	0,172
S6.1	4	7,7	1,925	0,175833

ANOVA					Encosta: E7	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,965833	3	3,321944	2,457803	0,117625	2,660229
Dentro dos grupos	14,8675	11	1,351591			
Total	24,83333	14				

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
S8.1	3	16,2	5,4	2,47
S9.1	3	13,9	4,633333	2,423333

ANOVA					Encosta: E10	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,881667	1	0,881667	0,360354	0,580663	4,544771
Dentro dos grupos	9,786667	4	2,446667			
Total	10,66833	5				

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

9.2. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Resistência à Penetração Entre Encostas para Profundidade Média Entre 0 e 20 cm

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
1	3	9,3	3,1	0,03
2	2	5,5	2,75	0,845

3	3	12,3	4,1	0,52
4	3	7,6	2,533333	0,053333

ANOVA

Encosta: E1

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,175606	3	1,391869	4,748861	0,041185	3,074072
Dentro dos grupos	2,051667	7	0,293095			
Total	6,227273	10				

Notas:

profundidade: 0-20 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
5	3	10,8	3,6	0,43
6	2	6,6	3,3	0,08
7	2	10,3	5,15	4,205
8	3	5,7	1,9	0,07
9	3	9,2	3,066667	0,893333
10	3	9,8	3,266667	1,903333

ANOVA

Encosta: E2

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13,15167	5	2,630333	2,417956	0,110028	2,521641
Dentro dos grupos	10,87833	10	1,087833			
Total	24,03	15				

Notas:

profundidade: 0-20 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
11	3	15,9	5,3	1,03
12	3	12,2	4,066667	0,203333
13	3	19,1	6,366667	0,563333

ANOVA

Encosta: E3

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,948889	2	3,974444	6,636364	0,030173	3,463304
Dentro dos grupos	3,593333	6	0,598889			
Total	11,54222	8				

Notas:

profundidade: 0-20 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
14	3	31,1	10,36667	11,57333
15	3	18,2	6,066667	0,893333
16	2	9	4,5	0,18
19	3	23,4	7,8	0,39
20	3	26,8	8,933333	0,063333
21	3	30,5	10,16667	0,823333
S1.1	3	20,3	6,766667	1,423333

ANOVA

Encosta: E4

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	73,87217	6	12,31203	5,245456	0,006007	2,282979
Dentro dos grupos	30,51333	13	2,347179			
Total	104,3855	19				

Notas:

profundidade: 0-20 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
22	3	4,1	1,366667	0,103333
23	3	9,1	3,033333	0,443333

ANOVA

Encosta: E5

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,166667	1	4,166667	15,2439	0,017477	4,544771
Dentro dos grupos	1,093333	4	0,273333			
Total	5,26	5				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
17	3	29,1	9,7	3,36
18	3	18,7	6,233333	0,263333

ANOVA

Encosta: E6

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	18,02667	1	18,02667	9,950322	0,034368	4,544771
Dentro dos grupos	7,246667	4	1,811667			
Total	25,27333	5				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S2.1	2	6,8	3,4	6,48
S3.1	3	12,5	4,166667	5,853333
S5.1	6	9,5	1,583333	0,129667
S6.1	4	7,2	1,8	0,14

ANOVA

Encosta: E7

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	16,805	3	5,601667	3,200121	0,066151	2,660229
Dentro dos grupos	19,255	11	1,750455			
Total	36,06	14				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
--------------	-----------------	-------------	--------------	------------------

S7.1	5	8,5	1,7	0,01
S8.1	3	17,4	5,8	2,73
S9.1	3	14,9	4,966667	2,263333

ANOVA					Encosta: E9+E10	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	38,04242	2	19,02121	15,1765	0,001893	3,113118
Dentro dos grupos	10,02667	8	1,253333			
Total	48,06909	10				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
S8.1	3	17,4	5,8	2,73
S9.1	3	14,9	4,966667	2,263333

ANOVA					Encosta: E10	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,041667	1	1,041667	0,417223	0,553515	4,544771
Dentro dos grupos	9,986667	4	2,496667			
Total	11,02833	5				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

9.3. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Resistência à Penetração Entre Encostas para Profundidade Média Entre 20 e 60 cm

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
1	2	14,8	7,4	36,98
2	2	12,6	6,3	2,42
3	3	15,9	5,3	1,57
4	3	12,9	4,3	1,48

ANOVA					Encosta: E1	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	12,796	3	4,265333	0,562462	0,659302	3,288762
Dentro dos grupos	45,5	6	7,583333			
Total	58,296	9				
Notas:						
profundidade: 20-60 cm		$\alpha=10\%$				

Anova: fator único

RESUMO					
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
5	3	22,3	7,433333	1,203333	
6	2	10,5	5,25	0,605	
7	2	17,1	8,55	2,645	
8	3	4,5	1,5	0,31	
9	3	10,1	3,366667	4,303333	
10	3	13	4,333333	0,343333	

ANOVA					Encosta: E2	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	88,78938	5	17,75788	11,40519	0,000711	2,521641
Dentro dos grupos	15,57	10	1,557			
Total	104,3594	15				
Notas:						
profundidade: 20-60 cm		$\alpha=10\%$				

Anova: fator único

RESUMO					
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
11	3	24,8	8,266667	8,173333	
12	3	14,3	4,766667	4,463333	
13	3	15,2	5,066667	0,723333	

ANOVA					Encosta: E3	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	22,58	2	11,29	2,53518	0,159209	3,463304
Dentro dos grupos	26,72	6	4,453333			

Total	49,3	8
-------	------	---

Notas:

profundidade: 20-60 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
14	3	34,1	11,36667	7,303333
15	3	16	5,333333	4,163333
16	2	10,7	5,35	5,445
19	3	24,4	8,133333	3,463333
20	3	25	8,333333	14,80333
21	3	29,5	9,833333	1,213333
S1.1	3	18,5	6,166667	6,253333

ANOVA

Encosta: E4

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	89,773	6	14,96217	2,436072	0,08412	2,282979
Dentro dos grupos	79,845	13	6,141923			
Total	169,618	19				

Notas:

profundidade: 20-60 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
22	3	6,4	2,133333	0,573333
23	3	10,4	3,466667	1,363333

ANOVA

Encosta: E5

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,666667	1	2,666667	2,753873	0,172357	4,544771
Dentro dos grupos	3,873333	4	0,968333			
Total	6,54	5				

Notas:

profundidade: 20-60 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
17	3	26,7	8,9	0,91
18	3	14,6	4,866667	0,723333

ANOVA

Encosta: E6

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	24,40167	1	24,40167	29,87959	0,005448	4,544771
Dentro dos grupos	3,266667	4	0,816667			
Total	27,66833	5				

Notas:

profundidade: 20-60 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S2.1	2	2,8	1,4	0,18
S3.1	3	10,8	3,6	4,33
S5.1	6	9,6	1,6	0,028
S6.1	4	6,4	1,6	0,1

ANOVA

Encosta: E7

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	9,989333	3	3,329778	3,946935	0,039	2,660229
Dentro dos grupos	9,28	11	0,843636			
Total	19,26933	14				

Notas:

profundidade: 20-60 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S7.1	5	6,2	1,24	0,013
S8.1	3	9,4	3,133333	0,643333

S9.1 3 7,9 2,633333 1,023333

ANOVA					Encosta: E9+E10	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,740121	2	3,870061	9,145476	0,008573	3,113118
Dentro dos grupos	3,385333	8	0,423167			
Total	11,12545	10				

Notas:

profundidade: 20-60 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
S8.1	3	9,4	3,133333	0,643333
S9.1	3	7,9	2,633333	1,023333

ANOVA					Encosta: E10	
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,375	1	0,375	0,45	0,53908	4,544771
Dentro dos grupos	3,333333	4	0,833333			
Total	3,708333	5				

Notas:

profundidade: 20-60 cm $\alpha=10\%$

9.4. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Resistência à Penetração Entre Encostas para Profundidade Média Entre 60 e 100 cm

Anova: fator único

Encosta: E1

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
1	2	9,1	4,55	3,125
2	2	14,1	7,05	0,845
3	3	11,6	3,866667	0,563333
4	3	9,4	3,133333	0,373333

ANOVA					Encosta: E1	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	19,75267	3	6,584222	6,760753	0,023685	3,288762
Dentro dos grupos	5,843333	6	0,973889			
Total	25,596	9				
Notas:						
profundidade: 60-100 cm		$\alpha=10\%$				

Anova: fator único

Encosta: E2

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
6	2	12,6	6,3	0,02
7	2	14,1	7,05	0,405
8	3	2,3	0,766667	0,013333
9	3	8	2,666667	2,573333
10	3	6,5	2,166667	0,163333

ANOVA					Encosta: E2	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	70,40731	4	17,60183	23,76618	0,00017	2,806426
Dentro dos grupos	5,925	8	0,740625			
Total	76,33231	12				
Notas:						
profundidade: 60-100 cm		$\alpha=10\%$				

Anova: fator único

Encosta: E3

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
11	3	19,3	6,433333	5,103333
12	3	6,9	2,3	0,63
13	3	9,8	3,266667	5,613333

ANOVA					Encosta: E3	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	28,04667	2	14,02333	3,707697	0,089463	3,463304
Dentro dos grupos	22,69333	6	3,782222			

Total	50,74	8
-------	-------	---

Notas:

profundidade: 60-100 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

Encosta: E4

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
14	3	19,2	6,4	1,47
15	3	9	3	1,57
16	2	6,9	3,45	4,205
19	3	10,7	3,566667	1,853333
20	3	10,3	3,433333	6,203333
21	3	14,6	4,866667	0,253333
S1.1	3	11,4	3,8	1,57

ANOVA

Encosta: E4

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,5645	6	4,094083	1,771446	0,182182	2,282979
Dentro dos grupos	30,045	13	2,311154			
Total	54,6095	19				

Notas:

profundidade: 60-100 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

Encosta: E5

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
22	3	6,5	2,166667	0,103333
23	3	10,3	3,433333	1,163333

ANOVA

Encosta: E5

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,406667	1	2,406667	3,8	0,123048	4,544771
Dentro dos grupos	2,533333	4	0,633333			
Total	4,94	5				

Notas:

profundidade: 60-100 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

Encosta: E6

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
17	3	18,1	6,033333	6,003333
18	3	13,1	4,366667	1,443333

ANOVA

Encosta: E6

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,166667	1	4,166667	1,119069	0,349773	4,544771
Dentro dos grupos	14,89333	4	3,723333			
Total	19,06	5				

Notas:

profundidade: 60-100 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

Encosta: E7

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S2.1	2	1,4	0,7	0,02
S3.1	3	3,8	1,266667	0,043333
S5.1	6	4,9	0,816667	0,005667
S6.1	4	3,3	0,825	0,149167

ANOVA

Encosta: E7

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,546833	3	0,182278	3,442155	0,05545	2,660229
Dentro dos grupos	0,5825	11	0,052955			
Total	1,129333	14				

Notas:

profundidade: 60-100 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

Encosta: E9 + E10 ÁREA REGIÃO IBATÉ

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S7.1	5	4,9	0,98	0,097
S8.1	3	4,3	1,433333	0,013333
S9.1	3	3,2	1,066667	0,003333

ANOVA					Encosta: E9+E10	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,400485	2	0,200242	3,802071	0,069088	3,113118
Dentro dos grupos	0,421333	8	0,052667			
Total	0,821818	10				
Notas:						
profundidade: 60-100 cm		$\alpha=10\%$				

Anova: fator único

Encosta: E10

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S8.1	3	4,3	1,433333	0,013333
S9.1	3	3,2	1,066667	0,003333

ANOVA					Encosta: E10	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,201667	1	0,201667	24,2	0,007933	4,544771
Dentro dos grupos	0,033333	4	0,008333			
Total	0,235	5				
Notas:						
profundidade: 60-100 cm		$\alpha=10\%$				

9.5. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Resistência à Penetração Entre Encostas para Profundidade Média Entre 100 e 180 cm

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2	2	6,5	3,25	2,205
3	3	5,2	1,733333	0,263333
4	3	6,4	2,133333	1,403333

ANOVA					Encosta: E1	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,840417	2	1,420208	1,282162	0,355222	3,779716

Dentro dos grupos 5,538333 5 1,107667

Total 8,37875 7

Notas:

profundidade: 100-180 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
6	2	3,6	1,8	0,72
7	2	6,2	3,1	0,02
8	3	1,8	0,6	0,03
9	3	5,1	1,7	1,75
10	3	5,3	1,766667	1,543333

ANOVA

Encosta: E2

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,582564	4	1,895641	2,053041	0,179428	2,806426
Dentro dos grupos	7,386667	8	0,923333			
Total	14,96923	12				

Notas:

profundidade: 100-180 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
11	3	17	5,666667	11,22333
12	3	3,5	1,166667	0,093333
13	3	5,5	1,833333	1,863333

ANOVA

Encosta: E3

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	35,38889	2	17,69444	4,027567	0,077794	3,463304
Dentro dos grupos	26,36	6	4,393333			
Total	61,74889	8				

Notas:

profundidade: 100-180 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
14	3	13,4	4,466667	4,303333
15	3	4,3	1,433333	0,043333
16	2	4,9	2,45	1,805
19	3	5	1,666667	0,363333
20	3	3,9	1,3	0,13
21	3	5,8	1,933333	0,023333
S1.1	3	5,3	1,766667	0,493333

ANOVA

Encosta: E4

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	21,26367	6	3,543944	3,680304	0,023246	2,282979
Dentro dos grupos	12,51833	13	0,962949			
Total	33,782	19				

Notas:

profundidade: 100-180 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
22	3	5,7	1,9	0,91
23	3	6,9	2,3	0,49

ANOVA

Encosta: E5

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,24	1	0,24	0,342857	0,589628	4,544771
Dentro dos grupos	2,8	4	0,7			
Total	3,04	5				

Notas:

profundidade: 100-180 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
17	3	8,6	2,866667	2,013333
18	3	10,1	3,366667	0,213333

ANOVA

Encosta: E6

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,375	1	0,375	0,336826	0,592792	4,544771
Dentro dos grupos	4,453333	4	1,113333			
Total	4,828333	5				

Notas:

profundidade: 100-180 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S2.1	2	1,3	0,65	0,005
S3.1	3	2,5	0,833333	0,023333
S5.1	6	4	0,666667	0,018667
S6.1	4	2,4	0,6	0,086667

ANOVA

Encosta: E7

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,099	3	0,033	0,896296	0,47367	2,660229
Dentro dos grupos	0,405	11	0,036818			
Total	0,504	14				

Notas:

profundidade: 100-180 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S7.1	5	4,001	0,8002	0,0349
S8.1	3	3,3	1,1	0
S9.1	3	3	1	0,03

ANOVA

Encosta: E9+E10

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
--------------------------	-----------	-----------	-----------	----------	----------------	------------------

Entre grupos	0,185182	2	0,092591	3,711046	0,072408	3,113118
Dentro dos grupos	0,199601	8	0,02495			

Total	0,384783	10
-------	----------	----

Notas:

profundidade: 100-180 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
S8.1	3	3,3	1,1	0
S9.1	3	3	1	0,03

ANOVA

Encosta: E10

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,015	1	0,015	1	0,373901	4,544771
Dentro dos grupos	0,06	4	0,015			
Total	0,075	5				

Notas:

profundidade: 100-180 cm $\alpha=10\%$

9.6. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Duplo com Repetição: Resistência à Penetração Entre Encostas, por Profundidade Média

9.6.1. Para 3 Repetições, na Profundidade Média Entre 0-10 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	3	Total
<i>E1</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	9	10,1	5,4	24,5
Média	3	3,366667	1,8	2,722222
Variância	0,13	0,103333	0,19	0,609444
<i>E2</i>				

Contagem	3	3	3	9
Soma	5,3	7,9	9,4	22,6
Média	1,766667	2,633333	3,133333	2,511111
Variância	0,013333	0,863333	0,823333	0,783611

E3

Contagem	3	3	3	9
Soma	14	10,6	18,8	43,4
Média	4,666667	3,533333	6,266667	4,822222
Variância	0,763333	0,373333	1,903333	2,174444

E4

Contagem	3	3	3	9
Soma	26,1	17	20,7	63,8
Média	8,7	5,666667	6,9	7,088889
Variância	8,17	1,203333	1,63	4,496111

E7

Contagem	3	3	3	9
Soma	10,2	3,7	5,9	19,8
Média	3,4	1,233333	1,966667	2,2
Variância	3,13	0,093333	0,253333	1,78

Total

Contagem	15	15	15
Soma	64,6	49,3	60,2
Média	4,306667	3,286667	4,013333
Variância	7,832095	2,59981	5,672667

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	154,9876	4	38,74689	29,58782	5,02E-10	2,142235
Colunas	8,272444	2	4,136222	3,158493	0,056908	2,488716
Interações	31,18978	8	3,898722	2,977134	0,014049	1,884121
Dentro	39,28667	30	1,309556			
Total	233,7364	44				

Notas:

profundidade: 0-10 cm

3 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.2. Para 2 Repetições, na Profundidade Média Entre 0-10 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	Total
<i>E1</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	9	10,1	19,1
Média	3	3,366667	3,183333
Variância	0,13	0,103333	0,133667
<i>E2</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	5,3	7,9	13,2
Média	1,766667	2,633333	2,2
Variância	0,013333	0,863333	0,576
<i>E3</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	14	10,6	24,6
Média	4,666667	3,533333	4,1
Variância	0,763333	0,373333	0,84
<i>E4</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	26,1	17	43,1
Média	8,7	5,666667	7,183333
Variância	8,17	1,203333	6,509667
<i>E7</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	10,2	3,7	13,9
Média	3,4	1,233333	2,316667
Variância	3,13	0,093333	2,697667
<i>E5</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	3,3	8,5	11,8
Média	1,1	2,833333	1,966667
Variância	0,07	0,323333	1,058667
<i>E6</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	23,6	20,2	43,8

Média	7,866667	6,733333	7,3
Variância	4,503333	0,303333	2,308

<i>Total</i>			
Contagem	21	21	
Soma	91,5	78	
Média	4,357143	3,714286	
Variância	9,380571	3,503286	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	191,3981	6	31,89968	22,2815	1,84E-09	1,995851
Colunas	4,339286	1	4,339286	3,030933	0,092671	2,893846
Interações	26,19238	6	4,365397	3,049171	0,020098	1,995851
Dentro	40,08667	28	1,431667			
Total	262,0164	41				

Notas:

profundidade: 0-10 cm

2 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.3. Para 3 Repetições, na Profundidade Média Entre 0-20 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	3	Total
<i>E1</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	9,3	12,3	7,6	29,2
Média	3,1	4,1	2,533333	3,244444
Variância	0,03	0,52	0,053333	0,622778
<i>E2</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	5,7	9,2	9,8	24,7
Média	1,9	3,066667	3,266667	2,744444
Variância	0,07	0,893333	1,903333	1,125278
<i>E3</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	15,9	12,2	19,1	47,2
Média	5,3	4,066667	6,366667	5,244444

Variância 1,03 0,203333 0,563333 1,442778

E4

Contagem	3	3	3	9
Soma	31,1	18,2	23,4	72,7
Média	10,36667	6,066667	7,8	8,077778
Variância	11,57333	0,893333	0,39	6,724444

E7

Contagem	3	3	3	9
Soma	12,5	4,1	5,4	22
Média	4,166667	1,366667	1,8	2,444444
Variância	5,853333	0,023333	0,21	3,225278

Total

Contagem	15	15	15
Soma	74,5	56	65,3
Média	4,966667	3,733333	4,353333
Variância	11,82238	2,876667	6,21981

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	199,148	4	49,787	30,84696	3,06E-10	2,142235
Colunas	11,40844	2	5,704222	3,534215	0,041856	2,488716
Interações	45,296	8	5,662	3,508055	0,005643	1,884121
Dentro	48,42	30	1,614			
Total	304,2724	44				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

3 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.4. Para 2 Repetições, na Profundidade Média Entre 0-20 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO 1 2 Total

E1

Contagem	3	3	6
Soma	9,3	12,3	21,6
Média	3,1	4,1	3,6
Variância	0,03	0,52	0,52

<i>E2</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	5,7	9,2	14,9
Média	1,9	3,066667	2,483333
Variância	0,07	0,893333	0,793667

<i>E3</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	15,9	12,2	28,1
Média	5,3	4,066667	4,683333
Variância	1,03	0,203333	0,949667

<i>E4</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	31,1	18,2	49,3
Média	10,36667	6,066667	8,216667
Variância	11,57333	0,893333	10,53367

<i>E7</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	12,5	4,1	16,6
Média	4,166667	1,366667	2,766667
Variância	5,853333	0,023333	4,702667

<i>E5</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	4,1	9,1	13,2
Média	1,366667	3,033333	2,2
Variância	0,103333	0,443333	1,052

<i>E6</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	29,1	18,7	47,8
Média	9,7	6,233333	7,966667
Variância	3,36	0,263333	5,054667

<i>Total</i>			
Contagem	21	21	
Soma	107,7	83,8	
Média	5,128571	3,990476	
Variância	13,89914	3,025905	

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	234,0695	6	39,01159	21,62162	2,58E-09	1,995851
Colunas	13,60024	1	13,60024	7,537741	0,010434	2,893846
Interações	53,91143	6	8,985238	4,979942	0,001392	1,995851
Dentro	50,52	28	1,804286			
Total	352,1012	41				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

2 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.5. Para 3 Repetições, na Profundidade Média Entre 20-40 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	3	Total
<i>E1</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	22,7	16,1	12,4	51,2
Média	7,566667	5,366667	4,133333	5,688889
Variância	20,65333	3,623333	1,973333	8,831111
<i>E2</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	5,4	10,9	14,1	30,4
Média	1,8	3,633333	4,7	3,377778
Variância	0,57	5,503333	0,67	3,299444
<i>E3</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	26,1	15,9	18,2	60,2
Média	8,7	5,3	6,066667	6,688889
Variância	5,16	7,41	0,543333	5,663611
<i>E4</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	38,5	17	19,6	75,1
Média	12,83333	5,666667	6,533333	8,344444
Variância	13,58333	3,363333	7,563333	17,60278
<i>E7</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	13,9	5,5	5,2	24,6

Média	4,633333	1,833333	1,733333	2,733333
Variância	8,703333	0,083333	0,063333	4,245

<i>Total</i>				
Contagem	15	15	15	
Soma	106,6	65,4	69,5	
Média	7,106667	4,36	4,633333	
Variância	21,91495	5,108286	4,615238	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	194,4844	4	48,62111	9,177643	5,76E-05	2,142235
Colunas	68,68133	2	34,34067	6,482089	0,004573	2,488716
Interações	89,52089	8	11,19011	2,112227	0,066107	1,884121
Dentro	158,9333	30	5,297778			
Total	511,62	44				

Notas:

profundidade: 20-40 cm

3 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.6. Para 2 Repetições, na Profundidade Média Entre 20-40 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	Total
<i>E1</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	22,7	16,1	38,8
Média	7,566667	5,366667	6,466667
Variância	20,65333	3,623333	11,16267
<i>E2</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	5,4	10,9	16,3
Média	1,8	3,633333	2,716667
Variância	0,57	5,503333	3,437667
<i>E3</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	26,1	15,9	42
Média	8,7	5,3	7

Variância	5,16	7,41	8,496
-----------	------	------	-------

E4

Contagem	3	3	6
Soma	38,5	17	55,5
Média	12,83333	5,666667	9,25
Variância	13,58333	3,363333	22,187

E7

Contagem	3	3	6
Soma	13,9	5,5	19,4
Média	4,633333	1,833333	3,233333
Variância	8,703333	0,083333	5,866667

E5

Contagem	3	3	6
Soma	5,9	10,3	16,2
Média	1,966667	3,433333	2,7
Variância	0,653333	1,003333	1,308

E6

Contagem	3	3	6
Soma	31,5	14,9	46,4
Média	10,5	4,966667	7,733333
Variância	2,47	0,373333	10,32267

Total

Contagem	21	21
Soma	144	90,6
Média	6,857143	4,314286
Variância	21,27757	3,895286

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	257,4481	6	42,90802	8,211686	3,54E-05	1,995851
Colunas	67,89429	1	67,89429	12,99353	0,0012	2,893846
Interações	99,70238	6	16,61706	3,180154	0,016563	1,995851
Dentro	146,3067	28	5,225238			
Total	571,3514	41				

Notas:

profundidade: 20-40 cm

2 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.7. Para 3 Repetições, na Profundidade Média Entre 20-60 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	3	Total		
E1						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	22,2	15,9	12,9	51		
Média	7,4	5,3	4,3	5,666667		
Variância	18,49	1,57	1,48	7,2625		
E2						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	4,5	10,1	13	27,6		
Média	1,5	3,366667	4,333333	3,066667		
Variância	0,31	4,303333	0,343333	2,795		
E3						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	24,8	14,3	15,2	54,3		
Média	8,266667	4,766667	5,066667	6,033333		
Variância	8,173333	4,463333	0,723333	6,1625		
E4						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	34,1	16	18,6	68,7		
Média	11,36667	5,333333	6,2	7,633333		
Variância	7,303333	4,163333	4,89	12,07		
E7						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	10,8	4,8	4,7	20,3		
Média	3,6	1,6	1,566667	2,255556		
Variância	4,33	0,07	0,143333	2,152778		
Total						
Contagem	15	15	15			
Soma	96,4	61,1	64,4			
Média	6,426667	4,073333	4,293333			
Variância	18,58638	4,264952	3,583524			
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico

Amostra	177,2342	4	44,30856	10,93918	1,37E-05	2,142235
Colunas	50,68844	2	25,34422	6,257146	0,005355	2,488716
Interações	71,34044	8	8,917556	2,201624	0,056206	1,884121
Dentro	121,5133	30	4,050444			

Total	420,7764	44				
-------	----------	----	--	--	--	--

Notas:

profundidade: 20-60 cm 3 repetições $\alpha=10\%$

9.6.8. Para 2 Repetições, na Profundidade Média Entre 20-60 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO 1 2 Total

E1

Contagem	3	3	6
Soma	22,2	15,9	38,1
Média	7,4	5,3	6,35
Variância	18,49	1,57	9,347

E2

Contagem	3	3	6
Soma	4,5	10,1	14,6
Média	1,5	3,366667	2,433333
Variância	0,31	4,303333	2,890667

E3

Contagem	3	3	6
Soma	24,8	14,3	39,1
Média	8,266667	4,766667	6,516667
Variância	8,173333	4,463333	8,729667

E4

Contagem	3	3	6
Soma	34,1	16	50,1
Média	11,36667	5,333333	8,35
Variância	7,303333	4,163333	15,507

E7

Contagem	3	3	6
Soma	10,8	4,8	15,6
Média	3,6	1,6	2,6

Variância	4,33	0,07	2,96
-----------	------	------	------

E5

Contagem	3	3	6
Soma	6,4	10,4	16,8
Média	2,133333	3,466667	2,8
Variância	0,573333	1,363333	1,308

E6

Contagem	3	3	6
Soma	26,7	14,6	41,3
Média	8,9	4,866667	6,883333
Variância	0,91	0,723333	5,533667

Total

Contagem	21	21
Soma	129,5	86,1
Média	6,166667	4,1
Variância	16,77033	3,343

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	215,7333	6	35,95556	8,870614	1,85E-05	1,995851
Colunas	44,84667	1	44,84667	11,06414	0,002469	2,893846
Interações	73,04	6	12,17333	3,003289	0,021515	1,995851
Dentro	113,4933	28	4,053333			
Total	447,1133	41				

Notas:

profundidade: 20-60 cm

2 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.9. Para 3 Repetições, na Profundidade Média Entre 60-100 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	3	Total
<i>E1</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	16,8	11,6	9,4	37,8
Média	5,6	3,866667	3,133333	4,2
Variância	4,87	0,563333	0,373333	2,655

E2

Contagem	3	3	3	9
Soma	2,3	8	6,5	16,8
Média	0,766667	2,666667	2,166667	1,866667
Variância	0,013333	2,573333	0,163333	1,415

E3

Contagem	3	3	3	9
Soma	19,3	6,9	9,8	36
Média	6,433333	2,3	3,266667	4
Variância	5,103333	0,63	5,613333	6,3425

E4

Contagem	3	3	3	9
Soma	19,2	9	9,4	37,6
Média	6,4	3	3,133333	4,177778
Variância	1,47	1,57	2,403333	4,141944

E7

Contagem	3	3	3	9
Soma	3,8	2,3	2,3	8,4
Média	1,266667	0,766667	0,766667	0,933333
Variância	0,043333	0,003333	0,203333	0,125

Total

Contagem	15	15	15
Soma	61,4	37,8	37,4
Média	4,093333	2,52	2,493333
Variância	8,526381	1,874571	2,216381

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	84,38756	4	21,09689	12,36307	4,67E-06	2,142235
Colunas	25,18044	2	12,59022	7,378044	0,002478	2,488716
Interações	41,06178	8	5,132722	3,007846	0,013315	1,884121
Dentro	51,19333	30	1,706444			
Total	201,8231	44				

Notas:

profundidade: 60-100 cm

3 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.10. Para 2 Repetições, na Profundidade Média Entre 60-100 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	Total
<i>E1</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	16,8	11,6	28,4
Média	5,6	3,866667	4,733333
Variância	4,87	0,563333	3,074667
<i>E2</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	2,3	8	10,3
Média	0,766667	2,666667	1,716667
Variância	0,013333	2,573333	2,117667
<i>E3</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	19,3	6,9	26,2
Média	6,433333	2,3	4,366667
Variância	5,103333	0,63	7,418667
<i>E4</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	19,2	9	28,2
Média	6,4	3	4,7
Variância	1,47	1,57	4,684
<i>E7</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	3,8	2,3	6,1
Média	1,266667	0,766667	1,016667
Variância	0,043333	0,003333	0,093667
<i>E5</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	6,5	10,3	16,8
Média	2,166667	3,433333	2,8
Variância	0,103333	1,163333	0,988
<i>E6</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	18,1	13,1	31,2

Média	6,033333	4,366667	5,2
Variância	6,003333	1,443333	3,812

Total

Contagem	21	21
Soma	86	61,2
Média	4,095238	2,914286
Variância	7,700476	2,046286

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	98,63571	6	16,43929	9,006653	1,62E-05	1,995851
Colunas	14,64381	1	14,64381	8,022959	0,008464	2,893846
Interações	45,19286	6	7,532143	4,126663	0,004315	1,995851
Dentro	51,10667	28	1,825238			
Total	209,579	41				

Notas:

profundidade: 60-100 cm

2 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.11. Para 3 Repetições, na Profundidade Média Entre 100-180 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	3	Total
<i>E2</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	1,8	5,1	5,3	12,2
Média	0,6	1,7	1,766667	1,355556
Variância	0,03	1,75	1,543333	1,152778

E3

Contagem	3	3	3	9
Soma	17	3,5	5,5	26
Média	5,666667	1,166667	1,833333	2,888889
Variância	11,22333	0,093333	1,863333	7,718611

E4

Contagem	3	3	3	9
Soma	13,4	4,3	6	23,7
Média	4,466667	1,433333	2	2,633333

Variância	4,303333	0,043333	1,51	3,415
-----------	----------	----------	------	-------

E7

Contagem	3	3	3	9
Soma	2,5	1,8	1,8	6,1
Média	0,833333	0,6	0,6	0,677778
Variância	0,023333	0,01	0,13	0,054444

Total

Contagem	12	12	12
Soma	34,7	14,7	18,6
Média	2,891667	1,225	1,55
Variância	8,197197	0,525682	1,253636

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	29,74889	3	9,916296	5,283212	0,006109	2,32739
Colunas	18,73389	2	9,366944	4,990528	0,015406	2,538332
Interações	34,94611	6	5,824352	3,103103	0,021489	2,035132
Dentro	45,04667	24	1,876944			
Total	128,4756	35				

Notas:

profundidade: 100-180 cm

3 repetições

$\alpha=10\%$

9.6.12. Para 2 Repetições, na Profundidade Média Entre 100-180 cm

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	1	2	Total
--------	---	---	-------

E2

Contagem	3	3	6
Soma	1,8	5,1	6,9
Média	0,6	1,7	1,15
Variância	0,03	1,75	1,075

E3

Contagem	3	3	6
Soma	17	3,5	20,5
Média	5,666667	1,166667	3,416667
Variância	11,22333	0,093333	10,60167

E4

Contagem	3	3	6
Soma	13,4	4,3	17,7
Média	4,466667	1,433333	2,95
Variância	4,303333	0,043333	4,499

E7

Contagem	3	3	6
Soma	2,5	1,8	4,3
Média	0,833333	0,6	0,716667
Variância	0,023333	0,01	0,029667

E5

Contagem	3	3	6
Soma	5,7	6,9	12,6
Média	1,9	2,3	2,1
Variância	0,91	0,49	0,608

E6

Contagem	3	3	6
Soma	8,6	10,1	18,7
Média	2,866667	3,366667	3,116667
Variância	2,013333	0,213333	0,965667

E1

Contagem	3	3	6
Soma	5,2	6,4	11,6
Média	1,733333	2,133333	1,933333
Variância	0,263333	1,403333	0,714667

Total

Contagem	21	21	
Soma	54,2	38,1	
Média	2,580952	1,814286	
Variância	5,074619	1,120286	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	37,60143	6	6,266905	3,853169	0,006303	1,995851
Colunas	6,171667	1	6,171667	3,794613	0,061506	2,893846
Interações	40,75667	6	6,792778	4,176499	0,004031	1,995851
Dentro	45,54	28	1,626429			

Total	130,0698	41
-------	----------	----

Notas:

profundidade: 100-180 cm	3 repetições	$\alpha=10\%$
--------------------------	--------------	---------------

9.7. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Resistência à Penetração Entre Encostas, por Profundidade Média, para o Solo Úmido

Anova: fator único

RESUMO				Corumbataí	
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
E1	4	5,2	1,3	0,353333	
E2	6	8	1,333333	0,346667	
E3	3	4,2	1,4	0,13	
E4	9	20	2,222222	1,896944	
E5	2	2,1	1,05	0,125	
E6	2	5,5	2,75	3,125	
E7	8	8,7	1,0875	0,118393	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,727949	6	1,621325	1,962367	0,106673	2,004519
Dentro dos grupos	22,30764	27	0,826209			
Total	32,03559	33				

Notas:

profundidade: 0-10 cm $\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO				Ibaté	
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
E9	2	1,6	0,8	0,18	
E10	4	9,1	2,275	5,2425	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,900833	1	2,900833	0,729425	0,441201	4,544771
Dentro dos grupos	15,9075	4	3,976875			
Total	18,80833	5				

Notas:

profundidade: 0-10 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO					Corumbataí
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
E1	4	5,9	1,475	0,4425	
E2	6	7,7	1,283333	0,101667	
E3	3	4,6	1,533333	0,253333	
E4	9	24,9	2,766667	4,315	
E5	2	2	1	0,18	
E6	2	6	3	5,12	
E7	8	10,5	1,3125	0,212679	

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	16,70404	6	2,784007	1,722017	0,154113	2,004519
Dentro dos grupos	43,65125	27	1,616713			
Total	60,35529	33				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO					Ibaté
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
E9	2	1,6	0,8	0,18	
E10	4	11,1	2,775	6,909167	

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,200833	1	5,200833	0,995018	0,374973	4,544771
Dentro dos grupos	20,9075	4	5,226875			
Total	26,10833	5				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

Anova: fator único

RESUMO					Corumbataí
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
E1	4	5,6	1,4	0,573333	
E2	6	10,3	1,716667	0,569667	
E3	3	4,5	1,5	0,21	
E4	9	30	3,333333	10,9475	
E5	2	1,7	0,85	0,125	
E6	2	4,1	2,05	0,845	
E7	8	12,3	1,5375	0,282679	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	23,02556	6	3,837594	1,08478	0,396274	2,004519
Dentro dos grupos	95,51708	27	3,53767			
Total	118,5426	33				
Notas:						
profundidade: 20-40 cm		$\alpha=10\%$				

Anova: fator único

RESUMO					Ibaté
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
E9	2	1,5	0,75	0,045	
E10	4	9,4	2,35	2,696667	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,413333	1	3,413333	1,678345	0,264851	4,544771
Dentro dos grupos	8,135	4	2,03375			
Total	11,54833	5				
Notas:						
profundidade: 20-40 cm		$\alpha=10\%$				

9.8. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Porosidade

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
E2	6	256,93314	42,82219	10,39884
E3	3	125,76815	41,92272	0,04621
E4	7	313,03551	44,71936	2,04409
E5	2	88,62590	44,31295	0,73746
E6	2	90,18958	45,09479	0,01945
E7	4	159,22884	39,80721	134,10006

ANOVA

Porosidade

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	77,23210	5	15,446421	0,5948452	0,7042726	2,1958275
Dentro dos grupos	467,40826	18	25,967125			
Total	544,64036	23				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

9.9. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Índice de Vazios

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
E2	6	4,52339	0,75390	0,01120
E3	3	2,16558	0,72186	0,00004
E4	7	5,66980	0,80997	0,00212
E5	2	1,59193	0,79596	0,00077
E6	2	1,64265	0,82133	0,00002
E7	4	2,82183	0,70546	0,09549

ANOVA

Índice de Vazios

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,04280	5	0,00856	0,43270	0,81989	2,19583
Dentro dos grupos	0,35606	18	0,01978			
Total	0,39886	23				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

9.10. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Umidade Volumétrica

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
E2	6	197,3492	32,8915	8,5826
E3	3	92,2698	30,7566	25,3252
E4	7	219,2205	31,3172	4,6484
E5	2	51,3542	25,6771	0,4192
E6	2	73,7749	36,8874	23,8116
E7	4	117,6025	29,4006	21,8256

ANOVA

Umidade Volumétrica

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	156,1843	5	31,23685	2,662716	0,056922	2,195827
Dentro dos grupos	211,1616	18	11,7312			
Total	367,3459	23				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$

9.11. Memorial de Cálculo Estatístico, ANOVA Fator Único: Grau de Saturação

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
E2	6	448,993	74,832	48,670
E3	3	216,775	72,258	129,898
E4	7	480,510	68,644	12,644
E5	2	113,282	56,641	0,021
E6	2	160,453	80,227	110,858
E7	4	247,504	61,876	394,239

ANOVA

Grau de Saturação

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	991,854	5	198,3709	1,9068	0,1431	2,1958
Dentro dos grupos	1872,602	18	104,0335			
Total	2864,457	23				

Notas:

profundidade: 0-20 cm

$\alpha=10\%$