Geóloga Débora de Oliveira Fernandes

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 20 / 08 / 03
Ass.: <i>Kaua</i>

ERODIBILIDADE DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS DA BACIA DO
RIBEIRÃO SAMAMBAIA (REGIÃO DE SÃO PEDRO - SP)

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100044165

Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

São Carlos

2003

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Geólogo **DÉBORA DE OLIVEIRA FERNANDES**

Dissertação defendida e julgada em 30-06-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

Profa. Dra. **TERESINHA DE JESUS BONUCCELLI**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

aprovada

Dra. **DENISE BALESTRERO MENEZES**
(PROGEO Mineração e Meio Ambiente Ltda.)

aprovada

Prof. Assoc. **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Para Norma, José, Luíza
e Flávio Augusto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente á Deus que sempre coloca "anjos da guarda" em meu caminho.

Ao Professor Dr. Lázaro V. Zuquette pela confiança e orientação neste desafio.

Aos demais professores do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, os quais contribuíram não só nesta pesquisa, mas, também, no meu enriquecimento profissional. "Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina". (Cora Coralina)

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - Capes, pela concessão da bolsa de pesquisa.

À Universidade de São Paulo – USP, em nome da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, pela infra-estrutura.

Aos moradores dos Municípios de São Pedro e Águas de São Pedro (SP), os quais gentilmente consentiram a realização dos devidos levantamentos de campo em suas propriedades. Ao Sr. Gervásio, mateiro que muito auxiliou nas empreitadas de campo.

Aos técnicos Antônio, Décio, Oscar, José Luiz e Benedito. Nenhuma pesquisa é possível ou realizável sem a ajuda e a experiência dos técnicos, os quais, de forma simples e segura, muito nos ensinam. Ao técnico Herivelto pelo suporte na área de informática.

Ao Pessoal da Secretaria do Departamento de Geotecnia, sempre dispostos a auxiliar (mesmo fora do horário de atendimento dos alunos) Álvaro, Maristela e Neiva.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais, Automobilística e Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial, ao Professor Luiz Carlos Casteletti, o qual viabilizou a utilização do microscópio eletrônico. Ao técnico "Tico" que realizou a captura das imagens. Aos amigos e colegas do Departamento, com quem convivi não só nas horas felizes, mas, também, nas horas de trabalho, em especial, à engenheira Karla Maria W. Rabelo e à geóloga Janaina B. Palma. A amiga Ana Maria Scherer pelos telefonemas e e-mails incentivantes.

Aos professores do tempo de graduação (Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná – UFPR) os quais compartilharam, além dos ensinamentos de geologia, o gosto pela pesquisa e a vontade de sempre querer saber mais. Em especial, ao Professor Renato Eugenio de Lima. – "E desceu a chuva, correram as torrentes, sopraram os ventos, e bateram com ímpeto contra aquela casa; contudo não caiu, porque estava fundada sobre a rocha." (Matheus Cap.7)

A minha família: mãe e avós maternos. E ao engenheiro civil Flávio Augusto Scherer, companheiro de todas as horas (principalmente das mais estressantes).

"Se você soubesse quem você é, até onde vai a sua fé?

O que você faria, pagaria para ver?

Se pudesse escolher entre o bem e o mal, entre ser ou não ser?

Se querer é poder, tem que ir até o final se quiser vencer."

RPM

RESUMO

FERNANDES, D. de O. (2003). *Erodibilidade de materiais inconsolidados da Bacia do Ribeirão Samambaia (Região de São Pedro – SP)*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Dentre as diferentes propriedades de um solo, a erodibilidade é uma das mais importante, por refletir a tendência um de determinado solo à erosão. Os fatores que mais interferem nesta propriedade são: a textura, a presença de agregados, a mineralogia e teor de argila presente, a pH, o Eh, a condutividade elétrica, entre outras. Neste contexto, devido à presença de inúmeras feições erosivas, desenvolveu-se uma pesquisa sobre os materiais inconsolidados, na Bacia do Ribeirão Samambaia, região dos Municípios de São Pedro e Águas de São Pedro, no Estado de São Paulo, área de aproximadamente 60 Km². Para a elaboração dessa pesquisa, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização química e física de materiais inconsolidados presentes nesta bacia. Na quantificação da erodibilidade utilizou-se dos ensaios de absorção e perda de massa por imersão, pelos quais obtiveram-se respectivamente os coeficientes S e P, e posteriormente índices internacionais baseados em fatores como a presença de agregados, teores de argila, entre outros. Foram obtidos valores de erodibilidade altos, principalmente para os materiais inconsolidados transportados arenosos com matéria orgânica. Os altos resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade para alguns materiais estão relacionados às baixas perdas de massa por imersão. Estas baixas perdas podem ser explicadas por algumas propriedades peculiares observadas nos ensaios básicos de caracterização, e posteriormente, confirmadas em observações com lupa e microscópio eletrônicos, dentre elas presença de agregados, raízes e cimento herdado da rocha fonte. Também foi realizado um monitoramento hidrológico em quatro seções da Bacia do Ribeirão Samambaia, com o qual pretendeu-se obter algumas informações sobre o comportamento dos sedimentos no interior desta bacia.

Palavras-chave: Erodibilidade; Materiais inconsolidados; São Pedro; Águas de São Pedro; Ribeirão Samambaia.

ABSTRACT

FERNANDES, D. de O. (2003). *Erodibility of unconsolidated material from Samambaia River Basin (region of São Pedro – SP)*. M.S.c. Dissertation – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2003.

The erodibility is one of the most important among the different properties of a soil, for reflecting the tendency to the erosion. The factors that more interferes in this property are: texture, presence of aggregate, mineralogy and clay content, pH, electric conductivity, among others. This research was developed with the unconsolidated materials of the Ribeirão Samambaia basin, of São Pedro and Águas de São Pedro region, located in the State of São Paulo, due to countless erosive features. Laboratory tests were carried out for chemical and physical characterization of unconsolidated materials. For the quantification of the erodibility were performed water absorption and mass loss by immersion tests and international indexes based on basic properties as the presence of aggregate, clay content were done, too. High erodibility values were obtained for transported unconsolidated materials: alluvial deposit whit organic material, and for some samples of others unconsolidated. For residual unconsolidated materials of Pirambóia, Botucatu, and Serra Geral formations were got low erodibility values due to peculiar intrinsic characteristics as observed by magnifying glass and electronic optical microscope, such as: presence of aggregates, roots and inherited cement of the original rock. An accompaniment hydrological was also accomplished in four sections of the Basin of Ribeirão Samambaia, with which intended to obtain some information about the behavior of the sediments inside this basin.

Keywords: Erodibility; unconsolidated materials; São Pedro; Águas de São Pedro; Ribeirão Samambaia.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Tipos de degradação dos solos.</i>	20
<i>Figura 2 - Ação das gotas da chuva sobre a superfície do solo.</i>	35
<i>Figura 3 - Classificação de voçorocas de acordo com o tipo de seção transversal. Formatos "U" e "V", respectivamente.</i>	37
<i>Figura 4 - Agregação presente em materiais inconsolidados. Imagem obtida com o auxílio de lupa eletrônica.</i>	47
<i>Figura 5 - Fluxograma com a seqüência de trabalho desenvolvida.</i>	70
<i>Figura 6 - Procedimento de coleta de material inconsolidado indeformado.</i>	72
<i>Figura 7 - Fotografia esquema do Penetrômetro utilizado em campo.</i>	75
<i>Figura 8 - Fluxograma com as etapas do ensaio de adsorção de Azul e metileno</i>	82
<i>Figura 9 - Exemplos de possíveis manchas nos teste de adsorção de Azul de Metileno.</i>	83
<i>Figura 10 - Ficha utilizada durante os ensaios erodibilidade.</i>	86
<i>Figura 11 - Aparelho de absorção de água utilizado no ensaio de erodibilidade.</i>	87
<i>Figura 12 - Sistema de armazenamento de massa perdida durante as 24 horas de imersão.</i>	88
<i>Figura 13 - Detalhe da suporte utilizado no ensaio de perda de massa por imersão.</i>	88
<i>Figura 14 - Mapa de localização da bacia do Ribeirão Samambaia.</i>	89
<i>Figura 15 - Mapa com estradas de acesso a área de estudo partindo-se dos principais município do estado de São Paulo.</i>	90
<i>Figura 16 - Alto da Serra de São Pedro.</i>	91
<i>Figura 17 - Depressão Periférica vista do alto da Serra de São Pedro.</i>	92
<i>Figura 18 - Fotografias aéreas do setor norte da Bacia do Ribeirão Samambaia, dos anos de 1972 e 1995, respectivamente.</i>	93
<i>Figura 19 - Fotografias aéreas do setor Centro-norte da Bacia do Ribeirão Samambaia, dos anos de 1972 e 1995 respectivamente.</i>	95
<i>Figura 20 - Fotografia da voçoroca no Haras Vila Rica em 2002. Setas indicam diferentes camadas de materiais diferenciados.</i>	96
<i>Figura 21 - Fotografias aéreas do setor Centro - Sul da Bacia do Ribeirão Samambaia, anos de 1972 e 1995, respectivamente. Fonte: Levantamento aéreo de agosto de 1972, escala original 1:25.000, IBC – GERCA. Levantamento aéreo de junho de 1995, escala original 1:25.000, SEMAE – BASE S.A.</i>	97
<i>Figura 22 - Foto aérea com pontos de deposição de sedimentos, indicados pela s setas.</i>	98
<i>Figura 23 - Área com deposição de sedimentos no ano de 2002.</i>	98
<i>Figura 24 - Fotografias aéreas do setor Sul da Bacia do Ribeirão Samambaia, dos anos de 1973 e 1995, respectivamente.</i>	99
<i>Figura 25 - Precipitação acumulada mensal (mm) na Bacia do Ribeirão Samambaia.</i>	100
<i>Figura 26 - Precipitação anual máxima (mm) na Bacia do Ribeirão Samambaia.</i>	101
<i>Figura 27- Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Norte.</i>	103
<i>Figura 28 -Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Centro-Norte.</i>	103

<i>Figura 29 - Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Sul.</i>	104
<i>Figura 30 - Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Centro- Sul.</i>	104
<i>Figura 31 -Precipitação diária durante o período de monitoramento.</i>	105
<i>Figura 32 - Precipitação diária acumulada antes do momento das coletas.</i>	106
<i>Figura 33 - Variação na quantidade de sedimento coletados nas quatro seções monitoradas na Bacia do Ribeirão Samambaia.</i>	107
<i>Figura 34 - Variação das velocidades médias obtidas nas seções.</i>	108
<i>Figura 35 - Variação dos teores de Na¹ em relação a precipitação.</i>	109
<i>Figura 36- Valores de condutividade elétrica.</i>	110
<i>Figura 37 - Comportamento do pH da água do Ribeirão Samambaia.</i>	111
<i>Figura 38 - Comportamento do Eh da água do Ribeirão Samambaia.</i>	111
<i>Figura 39 - Curva de absorção de água dos materiais inconsolidados arenosos da Formação Pirambóia.</i>	114
<i>Figura 40 - Curvas de absorção de água</i>	114
<i>Figura 41 - Imagem da amostra nº 24 obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta indicando resquícios de uma raiz.</i>	115
<i>Figura 42 - Imagem da amostra nº 15, obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta indicando resquícios de uma raiz.</i>	116
<i>Figura 43 - Imagem da amostra nº 15, obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta indicando resquícios de uma raiz.</i>	116
<i>Figura 44 - Imagem da amostra nº 14, obtida por meio de microscopia eletrônica com de matéria orgânica</i>	117
<i>Figura 45 - Imagem da amostra nº 24. Seta assinalando cimento argiloso entre os grãos de quartzo.</i>	117
<i>Figura 46 - Imagem da amostra no 24 obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta assinalando cimento argiloso entre os grãos de quartzo.</i>	118
<i>Figura 47 - Imagem da amostra nº 14, obtida por meio de microscopia eletrônica, com o contato entre o material quartzoso predominante na amostra e uma lente constituída por quartzos e cimento argiloso de cor avermelhado.</i>	118
<i>Figura 48 - Imagem da amostra no 24, obtida por meio de microscopia eletrônica, onde é possível observar a formação de agregados.</i>	119
<i>Figura 49 - Imagem obtida por meio de microscópio eletrônico da amostra nº 24, onde pode-se observar a formação de agregados.</i>	119
<i>Figura 50 - Imagem da amostra nº 25, obtida por meio de microscopia eletrônica, observar a presença de agregados.</i>	120
<i>Figura 51 Resultado do ensaio de penetração do cone no perfil onde foi realizada a amostragem nº15.</i>	120
<i>Figura 52 –Materiais inconsolidados arenosos e os arenitos da Formação Botucatu.</i>	121
<i>Figura 53 - Curvas de absorção de água.</i>	122
<i>Figura 54 - Curvas de absorção de água .</i>	124

<i>Figura 55 - Resultado do ensaio de penetração do cone no perfil onde foi realizada a amostragem nº 7.</i>	125
<i>Figura 56 - Talude nas proximidades do aeroclube mostrando um perfil constituído pelo material inconsolidado arenosos em topo.</i>	126
<i>Figura 57 - Curvas de absorção de água.</i>	127
<i>Figura 58 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica, com presença de raízes e de óxidos e de argila atuando como material cimentante.</i>	128
<i>Figura 59 - Detalhe figura anterior, área assinalada por um quadrado. Setas apontando cimento argiloso e a presença de raiz.</i>	129
<i>Figura 60 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica. Setas apontando cimento e quartzo.</i>	129
<i>Figura 61 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica, mostrando a presença de um agregado, contornado pela linha branca.</i>	130
<i>Figura 62 - Detalhe figura anterior, área assinalada por um quadrado, mostrando os grãos de quartzo formando agregados.</i>	130
<i>Figura 63 - Imagem da amostra nº 23, obtida por meio de microscopia eletrônica. Observar os grãos de quartzo em meio a uma matriz orgânica.</i>	131
<i>Figura 64 - Imagem da amostra nº 23, obtida por meio de microscopia eletrônica. Observar os grãos de quartzo em meio a uma matriz orgânica.</i>	131
<i>Figura 65 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica mostrando a presença de um agregado.</i>	132
<i>Figura 66 - Material inconsolidado arenoso com pedregulho, observar níveis dessimétricos de pedregulho.</i>	133
<i>Figura 67 - Detalhe da figura anterior, mostrando o nível de pedregulho</i>	133
<i>Figura 68 - Curvas de absorção de água.</i>	134
<i>Figura 69 - Afloramento onde foi realizada a amostragem nº 04.</i>	135
<i>Figura 70 - Amostra indeformada nº 04, material inconsolidado arenoso com pedregulho, com setas apontando para lentes de material mais fino (argiloso).</i>	135
<i>Figura 71 - Imagem de uma lente com granulometria mais grossa na amostra nº 04, obtida por meio de microscopia eletrônica.</i>	136
<i>Figura 72 - Imagem de uma lente de material com granulometria mais grosseira na amostra nº 4, obtida por meio de microscopia eletrônica.</i>	136
<i>Figura 73 -- Comportamento o perfil do onde foi realizada a amostragem nº 4 frente ao ensaio de penetração do cone.</i>	137
<i>Figura 74 -- Comportamento o perfil do onde foi realizada a amostragem nº 4 frente ao ensaio de penetração do cone.</i>	138
<i>Figura 75 - Perfil onde foi realizada a amostragem nº 8.</i>	138
<i>Figura 76 - Geomorfologia nas proximidades da cachoeira do Furna, as setas indicam a localização de alguns corpos de cones argiloso e arenosos.</i>	139
<i>Figura 77 - Curvas de absorção de água.</i>	140

<i>Figura 78- Curvas de absorção de água.</i>	141
<i>Figura 79 - Curvas de absorção de água</i>	143
<i>Figura 80 - Amostragem dificultada pela falta de coesão do material. A seta indica um nível orgânico.</i>	144
<i>Figura 81 - Voçoroca em material inconsolidado.</i>	144
<i>Figura 82 – Vista para montante da voçoroca instalada neste material inconsolidado.</i>	144
<i>Figura 83 - Curva de absorção de água dos materiais inconsolidados aluviões arenosos com matéria orgânica.</i>	145
<i>Figura 84 - Perda de massa por imersão e índice de absorção obtidos nos ensaios para alguns materiais estudados.</i>	149
<i>Figura 85 - Teores de areia, silte e argila com defloculante.</i>	150
<i>Figura 86 - Teores de areia, silte e argila sem defloculante.</i>	150
<i>Figura 87 - Valores de Eh com água destilada e KCℓ obtidos nos ensaios.</i>	151
<i>Figura 88 – Valores de pH com água destilada e com KCℓ obtidos nos ensaios.</i>	151
<i>Figura 89-- Relação de Na/TDS por TDS para as amostras analisadas.</i>	154

Lista de abreviaturas siglas

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Acb - Índice de Atividade da Fração Argilosa

CREAMS - Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management

CTC - Capacidade de troca de cátions

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

EUROSEM - European Soil Erosion Model

GUESS - Griffith University Erosion Sedimentation System

IAEG - International Association for Engineering Geology and Environment

IG - Instituto de Geociências

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LNEC - Laboratório de Engenharia Civil de Portugal

MUSLE - Equação Universal de Perda de Solos Modificada

PUCE - Pattern Uniformed Component Evaluation

PVC - Policloreto de Vinila

RUSLE - Equação Universal de Perda de Solos Revisada

SCSA - United States Soil Conservation Society of America

SE - Superfície específica

SGS - Departamento de Geotecnia

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

USLE - Equação Universal de Perda de Solos Systems

USP - Universidade de São Paulo

Vb - Valor de Azul de Metileno Adsorvido

WEPP - Water Erosion Prediction Projector

ZERMOS - Zonas Expostas a Riscos de Movimentos de Massa

Lista de tabelas

<i>Tabela 1 - Tipos de escoamento superficial em cabeceiras de bacias hidrográficas.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 2- Classificação de Voçorocas.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 3 – Principais tipos de modelos utilizados na predição da erosão.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4 - Variações do parâmetro “R” para os modelos USLE, RUSLE e MUSLE.</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 5 - Fatores que interferem na erodibilidade dos solos.</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 6 - Influência da vegetação a estabilidade de solos em encostas frente à erosão.</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 8 - Características do Penetrômetro construído no SGS.</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 9 – Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 10 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 11 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 12 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>128</i>
<i>Tabela 13 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>134</i>
<i>Tabela 14 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>140</i>
<i>Tabela 15 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>141</i>
<i>Tabela 16 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>143</i>
<i>Tabela 17 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.</i>	<i>145</i>
<i>Tabela 18 -- Alguns índices de erodibilidade para os diversos materiais inconsolidados estudados.</i>	<i>147</i>

Sumário

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 17

1.1 O PROBLEMA DA EROSÃO	17
1.2 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	20
1.3 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS CONCEITUAIS..... 26

2.1 CONCEITOS PARA EROSÃO	26
2.2 TIPOS E MECANISMOS	28
2.2.1 Ação da Chuva	33
2.3 CLASSIFICAÇÕES	35
2.4 MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS	37

CAPITULO 3 - ERODIBILIDADE 42

3.1 FATORES QUE INTERFEREM NA ERODIBILIDADE DOS SOLOS	43
3.1.1 PRESENÇA DE AGREGADOS	47
3.1.2 RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO	50
3.1.3 ARGILAS.....	51
3.1.4 FORMAÇÃO DE CROSTAS	54
3.2 ÍNDICES PARA QUANTIFICAÇÃO DA ERODIBILIDADE	55

CAPITULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS 68

4.1 ATIVIDADES DE CAMPO PRELIMINARES.....	70
4.2 ATIVIDADES DE CAMPO PARA AMOSTRAGEM	70
4.2.1 AMOSTRAGEM INDEFORMADA	70
4.2.2 AMOSTRAGEM DEFORMADA.....	72
4.3 ENSAIOS	72

4.3.1 ENSAIOS <i>IN SITU</i>	72
4.3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS.....	76

CAPITULO 5 – LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

5.1 GEOLOGIA	89
5.2 GEOMORFOLOGIA	90
5.3 A EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA.....	91
5.3.1 SETOR NORTE DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA.....	91
5.3.2 SETOR CENTRO-NORTE DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA	93
5.3.3 SETOR CENTRO-SUL DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA	95
5.3.4 SETOR SUL DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA.....	98
5.4 CLIMA.....	98

CAPITULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISES DO MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA.....

6.1 RESULTADOS E ANÁLISES	101
--	------------

CAPITULO 7 – MATERIAIS INCONSOLIDADOS.....

7.1 MATERIAIS INCONSOLIDADOS RESIDUAIS.....	111
7.1.1 ARENOSOS DA FORMAÇÃO PIRAMBÓIA.....	112
7.1.2 ARENOSOS DA FORMAÇÃO BOTUCATU	120
7.1.3 ARGILLO – SILTOSOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL.....	121
7.2 MATERIAIS INCONSOLIDADOS RETRABALHADOS.....	124
7.2.1 ARENOSOS EM TOPO	124
7.2.3 ARENOSOS COM PEDREGULHO	131
7.2.4 CONES ARGILOSOS E ARENOSOS.....	138
7.2.5 ARENO - ARGILOSOS.....	139
7.2.6 ARENOSOS DA SERRA.....	141
7.2.7 ALUVIÕES COM MATÉRIA ORGÂNICA.....	142
7.2.8 RESULTADOS E ANÁLISES	145

CAPITULO 8 - CONCLUSÕES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 157

ANEXO I

ANEXO II

ANEXO III

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 O PROBLEMA DA EROSÃO

A erosão acelerada é um fenômeno presente no dia-a-dia do Homem desde a Antigüidade, sendo contemporânea à utilização do solo pela prática agrícola. Foi iniciada com a mudança do sistema nômade para o sedentário.

O uso e a ocupação do meio físico, sem um planejamento fundamentado em aspectos técnicos, acarretam desequilíbrios que podem ser expressos por enchentes, movimentos gravitacionais de massa, e pelos processos erosivos.

Para Ellison (1947), a erosão é um processo de desagregação e transporte de materiais do solo, pela ação dos diversos agentes erosivos, e que pode ser dividida em dois eventos seqüenciais, sendo o primeiro a desagregação das partículas e o segundo, o transporte destas. Quanto ao tipo a erosão pode ser dividida em geológica e acelerada.

Nas regiões de clima tropical a água das chuvas é o agente principal, por propiciar o escoamento superficial que é o responsável por grande parte do transporte de materiais inconsolidados.

Gomes e Rodrigues (1998), afirmaram que o elevado grau de urbanização e a diversidade de uso e ocupação do solo têm favorecido substancialmente o surgimento de vários problemas ambientais, e

principalmente aqueles decorrentes da erosão acelerada dos solos.

Para Bastos *et al.* (2000), em muitos loteamentos a erosão é o problema geotécnico que causa os maiores prejuízos, uma vez que afeta as obras de infra-estrutura como os pavimentos, sistemas de drenagem e esgoto, redes de água e energia.

Os impactos causados pela erosão também atingem os recursos hídricos, levando ao assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios. Por sua vez, os assoreamentos geram outros problemas, como a maior frequência de enchentes. Quando ocorrem em reservatórios, os assoreamentos provocam a perda na capacidade de armazenamento da água, podendo acarretar cortes no abastecimento de energia e água.

A resistência de um solo frente à erosão, segundo Nishiyama (1998), é influenciada pelas suas propriedades físicas/hidrológicas, químicas/mineralógicas e biológicas/bioquímicas, assim como as características do perfil. De acordo com Lal (1990), o solo é um recurso natural que pode ser considerado como não renovável, e uma vez perdido, torna-se impossível de ser recuperado rapidamente. Sendo assim, a perda de solos frente aos processos erosivos torna-se um problema que merece muita atenção.

Os processos responsáveis pela deterioração dos solos segundo Mettervicht (1996), podem ser agrupados em três tipos: físicos, químicos e biológicos, como pode se observar na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de degradação dos solos.

Fonte: Lal 1988 modificado por Mittervicht 1996.

No estudo dos processos erosivos, a erodibilidade destaca-se por ser um fator intrínseco ao solo e variável com o tempo. Para Lal (1988) e Morgan (1995), a erodibilidade representa o efeito integrado de processos que regulamentam a infiltração de água e a resistência de um corpo de solo à desagregação.

Das diversas propriedades que interferem no fator erodibilidade dentre as mais importantes pode-se citar, a textura, a mineralogia e teor das argilas, a presença de agregados, a resistência ao cisalhamento, o pH, o Eh, a condutividade elétrica, e os cátions trocáveis.

O fator erodibilidade de um solo pode ser determinado por processos diretos em campo (chuvas naturais ou simuladas), ou por processos indiretos, em laboratórios por meio de inferências com

índices químicos e físicos. Os processos de determinação em campo são muito utilizados, porém são extremamente onerosos e demorados.

Entre os métodos indiretos para a determinação da erodibilidade, segundo Nishiyama (1998), o mais utilizado é o do nomograma desenvolvido por Wischmeier *et al.* (1971), que vem sendo amplamente utilizado com resultados satisfatórios nos Estados Unidos, sendo que o mesmo, não tem ocorrido em sua utilização nos solos tropicais.

A metodologia de Nogami e Villibor (1979), que envolve dois ensaios distintos e subseqüentes (ensaio de absorção de água e ensaio de perda de massa por imersão) tem sido utilizada no Brasil com bons resultados. Pejon (1992), ao avaliar solos da região de Piracicaba, apresentou um novo critério de classificação visando privilegiar a capacidade de absorção de água destes solos.

1.2 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Segundo Fontes (1999), os primeiros mapas geotécnicos desenvolvidos tinham como finalidade a construção de túneis, barragens e ferrovias, e representavam os passos iniciais de uma atuação conjunta entre geólogos e engenheiros em trabalhos de engenharia. Porém a necessidade de que estes mapas apresentassem textos contendo a interpretação de informações específicas sobre a geologia/pedologia frente à engenharia, levaram ao desenvolvimento dos chamamos mapas geotécnicos.

Matula (1974), considera que o mapeamento é a ferramenta fundamental para a correta investigação geotécnica.

Segundo International Association for Engineering Geology and Environment - IAEG (1976), o mapa geotécnico pode ser definido como um mapa geológico que fornece uma representação generalizada de todos os componentes do meio físico.

Zuquette e Gandolfi (1987), afirmaram que o mapeamento geotécnico é um processo de análise dos componentes do meio físico, tendo por finalidade básica levantar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico.

O mapeamento geotécnico pode ser dividido em dois segmentos principais, de acordo com Zuquette e Gandolfi, (1987):

- mapeamento regional - voltado para o planejamento;
- mapeamento específico-direcionado envolve a avaliação de problemas específicos e localizados em termos e extensão territorial do meio físico.

Existem, atualmente diversas propostas metodológicas internacionais para estudos de cartografia geotécnica, sendo que algumas metodologias possuem objetivos específicos, enquanto outras, apresentam objetivos mais diversificados. Dentre as principais metodologias internacionais tem-se:

- metodologia aplicada Zonas Expostas a Riscos de Movimentos de Solos - ZERMOS (1973) - com origem na França, sua finalidade básica é fornecer detalhes de uma área, quanto às condições de instabilidade, potenciais ou reais. Apresenta as interpretações através do uso de cores (verde - áreas sem problemas; laranja - áreas com potencialidade; e vermelho - áreas instáveis com chances reais de risco);

-metodologia Francesa - proposta por Sanejouand (1973), que reuniu e publicou o tratado intitulado "A cartografia Geotécnica na França" com toda a cartografia até então realizada neste país. As cartas nesta metodologia são usadas no planejamento do meio físico, e classificadas quanto à escala, conteúdo e forma;

-metodologia Pattern Uniformed Component Evaluation - PUCE - diversos autores participaram de seu desenvolvimento, porém foi apresentada por Grant (1970) e complementada por Aitchson e Grant (1976). Propõe que os terrenos que tenham evoluído de materiais similares e que passaram pelos mesmos processos geológicos, possuem propriedades semelhantes. Opera em quatro níveis: a província, o padrão de terreno, a unidade de terreno e o componente de terreno;

-metodologia IAEG - publicada em 1976, foi elaborada durante as atividades do primeiro congresso internacional da IAEG, pela Comissão de Mapas Geotécnicos da Associação Internacional de Geologia da UNESCO em 1970. Classifica os mapas de acordo com a finalidade, escala e conteúdo.

No Brasil, atualmente, existem diversos grupos que trabalham com atividades de cartografia e mapeamento geotécnicos, com diversas publicações sobre o assunto. Dentre as principais metodologias brasileiras, pode-se citar:

-metodologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro - IG/UFRJ (1986);

-metodologia do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP -(ZUQUETTE, 1993);

-metodologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (PRANDINI, 1995);

-metodologia do Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (1995);

-metodologia do Instituto Geológico de São Paulo IG/SP (1995).

Como uma ferramenta de planejamento urbano, controle e recuperação de áreas degradadas por fenômenos naturais e antrópicos, a Geotecnia, segundo Nishiyama (1998), abrange um amplo espectro de informações relativas ao meio físico.

Dentre os primeiros estudos de fenômenos erosivos sob enfoque geotécnico no Brasil, pode-se citar a caracterização geotécnica de sedimentos cenozóicos da região do Município de São Carlos, realizada por Rodrigues (1981). Posteriormente, diversos trabalhos extremamente relevantes foram realizados, muitos dos quais produzidos no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – SGS/EESC/USP, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo – IG/USP, além dos sete Simpósios Nacionais de Controle de Erosão, realizados pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE em parceria com a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – ABMS.

1.3 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A Bacia do Ribeirão Samambaia, localizada na região dos municípios de São Pedro e Águas de São Pedro, no Estado de São Paulo, apresenta diversas feições erosivas, com diferentes tipologias e

portes, decorrentes da associação de vários fatores, sejam estes intrínsecos ou extrínsecos aos solos.

Neste contexto, desenvolveu-se um estudo preliminar do fator erodibilidade de alguns materiais inconsolidados presentes nesta bacia. No qual foram levados em consideração índices tanto nacionais como internacionais, fundamentados em diversas características do solo, tais como, a granulometria, aspectos químicos, presença de agregados.

Também foi realizado um estudo hidrológico em quatro seções transversais da bacia, visando obter uma noção do comportamento de transporte e de deposição dos sedimentos nas drenagens da mesma.

A presente dissertação foi organizada em 8 Capítulos e 3 Anexos, com os seguintes conteúdos:

- Capítulo 1 – Introdução: apresentação do tema estudado e exposição dos objetivos propostos;
- Capítulo 2 – Aspectos conceituais: consta da revisão bibliográfica, na qual procurou-se descrever de forma concisa o fenômeno da erosão e seus agentes.
- Capítulo 3 – Erodibilidade dos solos: dar sustentação aos aspectos relevantes que interferem na variabilidade do fator erodibilidade;
- Capítulo 4 – Materiais e métodos: contém a descrição dos materiais e métodos utilizados no decorrer da pesquisa;
- Capítulo 5 – Localização e caracterização geológica da Bacia do Ribeirão Samambaia: breve estudo sobre as características físicas e da evolução do uso e ocupação presentes nesta área;
- Capítulo 6 – Resultados e análises do monitoramento hidrológico do Ribeirão Samambaia: exposição e ponderações acerca dos resultados.

obtidos durante o período de monitoramento.

- Capítulo 7 – Materiais Inconsolidados: apresentação e caracterização dos materiais consolidados estudados. Resultados dos ensaios e análises;
- Capítulo 8 – Conclusões: como o próprio nome do capítulo indica, consta das conclusões e observações finais.
- Referências Bibliográficas – Listagem das bibliografias citadas no texto;
- Anexo I – Mapa de monitoramento do Ribeirão Samambaia;
- Anexo II – Mapa de Materiais consolidados.
- Anexo II – Tabela com os resultados de caracterização química e física dos materiais consolidados analisados e do monitoramento do Ribeirão Samambaia;

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS CONCEITUAIS

2.1 CONCEITOS PARA EROSÃO

O termo erosão tem origem na palavra latina *erodere*, que significa corroer. Segundo a United States Soil Conservation Society of America - SCSA (1966), a erosão do solo é definida como um desgaste natural do terreno pela ação de água corrente, vento, gelo ou outro agente geológico, onde estão incluídos os movimentos gravitacionais de massa como o rastejo.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (1980), conceitua erosão como um processo de desagregação e remoção das partículas do solo pela ação da água, gelo, vento e/ou organismos.

Já para Mutchler, Murphree e McGregor (1988), a erosão constitui-se apenas no desprendimento das partículas do solo, tratando-se, portanto, de um processo distinto da deposição e do transporte.

Weggel e Rustom (1992), consideram que a erosão trata-se de um processo de desagregação e carreamento de partículas de solo, resultante da ação de processos naturais como, precipitação, escoamento superficial, ventos e escorregamentos, bem como das atividades humanas que alteram a cobertura de proteção da superfície do terreno.

Vilar e Prandi (1993), consideram que a erosão consiste em um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre

são desagregados ou desgastados, e transportados de um lugar para outro, pelos agentes erosivos (geleiras, rios, mares ou chuva).

Em suma, pode-se dizer que a erosão é um fenômeno que ocorre quando uma partícula é desagregada da massa de solo, e transportada por meio dos agentes erosivos (vento, chuva, geleira, rios ou mares). Não se deve esquecer que o Homem através das suas mais variadas atividades pode causar o desequilíbrio de um sistema natural levando à erosão acelerada.

Bennet (1939), dividiu a erosão entre: geológica e acelerada, sendo a geológica um processo lento e contínuo da evolução da superfície da Terra, e a erosão acelerada como um processo rápido, e induzido, dentre outros fatores, pelas ações antrópicas.

As feições erosivas são divididas em três tipos morfológicos distintos, os sulcos, as ravinas e as voçorocas. Segundo Fournier (1960) *apud* Souza (2001), os sulcos erosivos são pequenos canais resultantes do escoamento superficial concentrado, e as ravinas, podem ser conceituadas como as feições erosivas que ocorrem devido à concentração do fluxo de água em caminhos preferenciais.

Para Infanti Jr e Filho (1998) as voçorocas são o resultado da erosão causada pelos fluxos d'água superficiais e subsuperficiais, onde estão presentes diversos fenômenos, tais como erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, que conferem a voçoroca um elevado poder destrutivo devido a sua rápida evolução.

A palavra voçoroca apresenta grafia distinta de acordo com a região do país a qual pertence o pesquisador, Pichler (1953), já considerava três grafias diferentes para o termo, todas com origem em

ibi-çoroc, do Tupi-guarani, que significa terra rasgada ou rasgão no solo.

Segundo Nishiyama (1998), não se verifica uma terminologia específica em língua inglesa que diferencie ravina de voçoroca, sendo ambas denominadas, geralmente, de *gully* ou *gully erosion*, apesar da importância devido à frequência em que ocorrem as voçorocas nos países tropicais.

Na literatura nacional, segundo Lima (2001), normalmente utiliza-se os seguintes termos para denominar as feições erosivas na tradução de textos do inglês: laminar ou em lençol (correspondente ao termo em inglês *sheet erosion*), linear (correspondente ao termo em inglês *rill erosion*), intersulco (correspondente ao termo em inglês *interrill erosion*), erosão de margem (correspondente ao termo em inglês *stream bank erosion*) e o termo em inglês *piping*, utilizado com a grafia inglesa. Deve-se lembrar que dependendo do autor estes conceitos acabam por apresentar pequenas variações.

2.2 TIPOS E MECANISMOS

Para Lal (1988), a erosão acelerada dos solos coloca-se como um dos principais desencadeadores da degradação de terras, uma vez que contribui para a diminuição do seu potencial produtivo, bem como para o assoreamento e decréscimo da qualidade dos recursos hídricos.

Segundo Guerra *et al.* (1995), os impactos ambientais advindos da erosão acelerada dos solos, são encontrados tanto nas áreas

erodidas, como naquelas a jusante do processo erosivo, na forma de assoreamento de cursos d'água.

A intervenção do Homem no ambiente, como agente modificador do meio através do uso e ocupação do solo, pode ser exemplificado no aparecimento de algumas feições erosivas. Para Baccaro (1997), alguns elementos como as trilhas, especialmente as de gado, contribuem para a geração de sulcos erosivos. Fontes (1999), afirma que a criação de gado é uma prática que contribui muito para o agravamento dos fenômenos erosivos, uma vez que os animais além de exterminarem alguns espécimes vegetais, pelo constante "pisoteio", geram trilhas nas encostas que servem de canais de escoamento para as águas pluviais.

A erosão em ravinas, segundo Fournier (1960) *apud* Souza (2001), ocorre devido à concentração do fluxo de água em caminhos preferenciais, arrastando as partículas e aprofundando os sulcos.

Erosão intersulco, para Meyer *et al.* (1975), é causada pelo escoamento superficial, que pode ocorrer em uma lâmina de água de pequena espessura e extensão, concentrada em determinadas áreas, já formada pelos processos erosivos e as marcas de cultivo.

Segundo Pichler (1953), a formação das voçorocas pode ser atribuída ou, à erosão superficial, ou ainda, mais comumente, a ação conjunta da erosão superficial e da subterrânea. A intensidade com que a erosão, neste caso a voçoroca, progride depende essencialmente de três fatores:

- fator resistência que a formação geológica opõe à sua desagregação;
- fator força da água no solo, que por sua vez depende da vazão e do gradiente hidráulico;

-fator condições topográficas da região e do nível de base local.

Segundo Baccaro (1994), diversos processos, além da erosão causada pela água do escoamento pluvial, estão presentes nas voçorocas; dentre eles: o escoamento pluvial (lavagem superficial e formação de sulcos), erosão interna do solo “*piping*”, solapamentos e escorregamentos dos solos. No interior de uma voçoroca há surgências e água, que durante o ano são alimentadas pelo lençol freático.

Dentre todos os tipos de erosão, aquela causada pela ação das águas é considerada a mais destrutiva. Segundo Bastos *et al.* (2001), o fenômeno da erosão hídrica, embora, pareça de simples compreensão, destaca-se por sua complexidade, e é causada pela inter-relação e multiplicidade de seus fatores.

Os tipos de escoamento de cabeceiras de bacias hidrográficas, segundo Derbyshire *et al.* (1979), *apud* Nishiyama (1998), podem ser divididos de acordo com a velocidade do fluxo em três tipos: escoamento rápido; escoamento de restituição e escoamento retardado. Na Tabela 1 é possível observar algumas características destes três tipos de escoamentos.

Tabela 1 - Tipos de escoamento superficial em cabeceiras de bacias hidrográficas.

VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	TIPO DE ESCOAMENTO	CARACTERÍSTICAS	OCORRÊNCIA
	Subsuperficial	Movimento de água no perfil, para a parte baixa da vertente.	Vertentes com solos bem drenados guiados por discontinuidades no perfil.
	Subsuperficial saturado	Escoamento lateral.	Quando uma cunha saturada estende-se no sentido da parte alta da vertente do perfil.
	Translatório	Escoamento lateral que ocorre por deslocamento da água armazenada devido à adição de mais água.	Vertente de solos com zona saturada.
	Restituição ou fluxo básico	Sinônimo de	Vertente de solo com nível d'água permanente e presença de discontinuidades que servem de guia para o escoamento lateral.
	Interno	Escoamento subsuperficial.	Em presença de uma cunha saturada, abaixo da superfície e que se estende para a parte alta da vertente.
	Interno saturado	Ocorre quando o solo encontra-se saturado.	
	Em tubos (pipe)	Fluxo através da rede subsuperficial de canais ou tubos maiores (podem ultrapassar 1 metro de diâmetro) que os vazios do solo.	Áreas variadas incluindo encostas íngremes, onde há camadas erodíveis sobrejacentes a camadas permeáveis.

Tabela 1 - Tipos de escoamento superficial em cabeceiras de bacias hidrográficas (continuação).

VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	TIPO DE ESCOAMENTO	CARACTERÍSTICAS	OCORRÊNCIA
Rápido	Superficial	Intensidade da chuva maior que a capacidade de infiltração.	Regiões semi-áridas; Regiões úmidas, adjacentes a canais fluviais, em encostas convergentes ou que sem vegetação.
	Superficial saturado	Solo saturado sem a capacidade de infiltração saturada.	Canais fluviais; Locais em que o nível de água aumenta rapidamente durante períodos de chuva.
Retardado ou fluxo lento	Água subterrânea	Movimento em direção às partes baixas da vertente, e em direção à superfície em taxas determinadas pela pressão hidráulica.	Áreas onde a água subterrânea é armazenada.

Fonte: Derbyshire *et al.* (1979), *apud* Nishiyama, (1996)

Para Carson e Kirkby (1975) *apud* Rodrigues (1998), e Guerra *et al.* (1995), as formas erosivas causadas pelas águas das chuvas podem ser divididas em dois grandes grupos, de acordo com os tipos de escoamento que lhe originou, as resultantes do processo de escoamento superficial e as resultantes do escoamento subsuperficial.

O escoamento superficial tende a ser difuso, quando as águas começam a escoar pela superfície do terreno, podendo provocar a erosão em lençol ou laminar, cuja terminologia em inglês é *sheet erosion*. A erosão em lençol ou laminar segundo Bennet (1939) e a SCSA

(1982), resulta na remoção de uma camada delgada e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo pela água de escoamento.

No escoamento subsuperficial, as águas que se infiltram no solo, podem escoar em subsuperfície formando dutos, os *pipes*, devido à dissolução e remoção de sedimentos formando as ravinas e voçorocas.

De acordo com Morgan (1995), a erosão marginal é causada pelo escoamento concentrado nos cursos d'água, formando feições erosivas transversais ao eixo do fluxo. As erosões lineares, segundo Salomão e Iwasa (1995), são causadas pela concentração do fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em pequenas incisões no terreno, ou seja, iniciando-se na forma de sulcos, e podendo evoluir para ravinas e voçorocas.

2.2.1 AÇÃO DA CHUVA

Para Lal (1990), a gota da chuva é o mais importante agente responsável pelo início da erosão. A gota ao atingir a superfície desprotegida do solo, desloca as partículas retirando-as de sua posição natural. O processo das gotas ao golpear, destacarem e retirarem as partículas é denominado em inglês de *splash* ou *soil splash*, e pode ser subdividido em duas ações sequenciais: *detachment* e transporte.

Para a SCSA (1982), *detachment* significa ação de destacamento ou remoção de fragmentos de uma massa de solo por agentes erosivos.

Segundo Christofolletti (1974) e Bertoni e Lombardi Neto (1990), a erosão pelo impacto das gotas de chuva acontece quando elas golpeiam a superfície do solo, rompendo os grânulos e torrões,

reduzindo-os a partículas menores. Isto diminui a capacidade de infiltração da água no solo. Uma gota golpeando um solo úmido forma uma cratera, com área central compactada, além de movimentar as partículas deixando-as prontas para um posterior transporte, como está esquematizado na Figura 2.

Figura 2 - Ação das gotas da chuva sobre a superfície do solo.

Quando a gota de chuva cai em um terreno coberto com vegetação densa, ela divide-se em inúmeras gotículas, diminuindo o impacto (RIBEIRO 2000).

Como a chuva é o principal agente deflagrador dos processos erosivos, torna-se importante estudar o seu comportamento por meio de um monitoramento da intensidade pluviométrica em uma região através dos tempos.

As condições de saturação de um solo no momento da chuva, também, podem interferir na erosividade, uma vez que quanto mais úmido estiver o solo, mais rápido seu ponto de saturação será atingido, e mais rápido o volume de água excedente escoará pela superfície do terreno.

Um fator importante a ser lembrado é que após a saturação do terreno, toda a água passará a escoar pela encosta. Para Nishiyama (1998), o volume da água infiltrada ou escoada na superfície, que influência no desenvolvimento dos processos erosivos, depende de alguns fatores básicos, tais como: intensidade e duração das chuvas, temperatura, e profundidade do substrato rochoso.

Hudson (1973), estudando solos da África subtropical, constatou que a energia cinética de chuvas individuais de intensidade iguais ou superiores a 25,4 mm estavam mais relacionadas com as perdas de solo, do que qualquer outro parâmetro individual testado.

2.3 CLASSIFICAÇÕES

Existem várias classificações quanto ao tipo de voçorocas, Vieira (1980), classifica as voçorocas em simples e complexas, individualizadas pelos tipos de solos e mecanismos envolvidos. As simples ocorrem em perfis geológicos arenosos diferenciados apenas pela granulometria, não existindo camadas intercaladas de argila, o processo erosivo é superficial, e ocorrem perdas consideráveis do solo. Ao atingir os sulcos e valetas, o processo se multiplica, ramificando-se sobre a forma dendrítica. As voçorocas complexas formam-se quando o perfil geológico apresenta horizontes arenosos intercalados por horizontes argilosos. A atuação da água é constante, quer seja por escoamento superficial (no período chuvoso), quer seja pelo escoamento subterrâneo durante todo o período seco.

Para Fendrich (1997), as voçorocas, podem ser classificadas de acordo com alguns aspectos, tais como: a seção transversal, o tamanho, a profundidade, o formato em planta, entre outros. De acordo com a seção transversal, elas podem ser diferenciadas em voçorocas com vale em formato "U" e voçorocas com vales em formato "V", Figura 3.

Figura 3 - Classificação de voçorocas de acordo com o tipo de seção transversal. Formatos "U" e "V", respectivamente.

Fonte: Fendrich, (1997).

Quanto à profundidade, Fendrich (1997), propõem uma classificação para as voçorocas encontradas no Estado do Paraná que leva em consideração as suas dimensões, conforme a Tabela 2.

Tabela 2- Classificação de Voçorocas.

CLASSIFICAÇÃO	PROFUNDIDADE (METROS)	
	Pequena	< 1,0
	Média	1,0 a 5,0
	Grande	>5,0

Fonte: Fendrich (1997).

Segundo Companhia de Eletricidade de Minas Gerais - CEMIG (2001), as voçorocas podem ser divididas em três tipos: ovóides, coalescentes e lineares. As voçorocas ovóides são as mais típicas, apresentando na parte superior a configuração de um anfiteatro de

paredes íngremes, e um canal estreito à jusante. As coalescentes são constituídas por mais de um anfiteatro à montante, sendo resultante de reentrâncias nas paredes laterais, que evoluem de forma independente. As lineares apresentam um grande desenvolvimento longitudinal, assemelhando-se a um cânion, mas terminando, igualmente, por um canal estreito.

2.4 MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS

De acordo com Morgan (1995), os modelos são uma necessidade de simplificação da realidade, para auxiliar a tomada de decisões. Podem, também, ser utilizados por planejadores e governantes na previsão de eventos e ações futuras.

Para Dooge (1973) *apud* Tucci (1998), a diferença entre modelos, sistemas e simulação pode ser descrita como:

-sistema é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato que num dado tempo de referencia inter-relaciona-se com uma entrada, ou informação, e uma saída, ou efeito. Por exemplo, uma bacia hidrográfica é um sistema acionado por uma entrada, a precipitação, que através dos diversos processos do ciclo hidrológico é transformada em vazão;

-modelo é uma representação do comportamento do sistema. Como exemplo, pode-se citar a analogia que permite representar o escoamento hidráulico por meio de um circuito elétrico;

-simulação é o processo de utilização do modelo, geralmente em três fases: estimativa ou ajuste, verificação e previsão.

Segundo Morgan (1995), os modelos erosivos mais utilizados são os empíricos. Estes são baseados nas definições dos fatores de influência, observações, medições, técnicas estatísticas e experimentais, que relatem como ocorre a perda do solo. Os tipos de modelos mais utilizados, segundo este autor estão presentes na Tabela 3

Tabela 3 – Principais tipos de modelos utilizados na predição da erosão.

TIPO	DESCRIÇÃO
Físico	Usualmente são construídos em laboratórios. É necessário que se assuma uma similaridade entre o modelo e o mundo real.
Análogo	Utiliza sistemas mecânicos ou elétricos análogos aos sistemas sob investigação
Digital	Baseados no uso de sistemas computacionais, e indicados quando se tem um grande numero de dados.
Baseados Fisicamente	Fundamentados em equações matemáticas para descrever processos envolvidos
Estocástico	Utilizados quando a seqüência de dados a ser avaliada é representativa de um período de observações muito curto.
Estatístico	Baseados na identificação de significados estatísticos das relações assumidas entre importantes variáveis, quando existe uma base de dados considerável.

Fonte: Morgan (1995).

Para Christofletti (2000), a configuração tipológica de modelos proposta por Chorley (1964) e Woldenberg (1985), pode ser dividida em três categorias, os modelos análogos naturais, análogos abstratos e aqueles que sintetizam sistemas, a saber:

-modelos análogos naturais, apresentam como finalidade esclarecer determinadas categorias de fenômenos ou sistemas, traduzindo seus aspectos supostamente importantes ou característicos por meio da representação analógica simples. Podem ser diferenciados em duas classes, os análogos históricos, e os análogos espaciais;

-modelos análogos abstratos, são fundamentados na perspectiva de que a pesquisa pode ser realizada por meio de uma análise da estrutura do sistema envolvido na problemática focalizada por ela;

-modelos que sintetizam sistemas, seu objetivo é conhecer o sistema como um todo. Apresentam como finalidade fornecer um quadro global de todo o sistema, estabelecendo o grau de conhecimento sobre as partes componentes. Suas interações entre os elementos e o funcionamento interativo entre as entradas e saídas do sistema.

A Equação Universal de Perda de Solos - USLE é um dos modelos empíricos mais utilizados no mundo para a predição da erosão. É aplicado principalmente para avaliação de perdas de um determinado solo, é regida pela equação 1. Por se tratar de um modelo essencialmente empírico, não se adapta a todas as condições.

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Onde:

A= perda de solo por erosão média anual (t/ha ano);

R= erosividade da chuva e da enxurrada (MJ mm/ha h);

K= erodibilidade do solo (t ha h/ha MJ mm);

L= fator de comprimento do declive (adimensional);

S= fator grau de declividade (adimensional);

C= fator uso do solo e manejo de culturas (adimensional);

P= fator prática conservacionista (adimensional);

A Equação Universal de Perda de Solos Modificada – MUSLE e a Equação Universal de Perda de Solos Revisada - RUSLE são

modificações do USLE, propostas por pesquisadores que ao tentarem aplicá-lo, notaram algumas limitações no modelo, principalmente referentes ao parâmetro R, que quantifica a erosividade. Os diferentes parâmetros, propostos para cada um desses modelos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Variações do parâmetro “R” para os modelos USLE, MUSLE e MUSLE.

MODELO	PARÂMETRO “R” EROSIVIDADE
USLE	$R = \left[\sum (0,0199 + 0,0873 \log I) \times Vp \right] \times I_{30}$
MUSLE	$R = 89,6 \times (Q \times qp)^{0,56}$
RUSLE	$R = \left[\sum \left(0,29 \times \left(1 - 0,72e^{-0,0051} \right) \right) \times Vp \right] \times I_{30}$

Onde:

I= intensidade do segmento de chuva (mm/h)

VP= volume de precipitação do segmento (mm)

I₃₀ = intensidade máxima da chuva em 30 minutos (mm/h)

Q= volume de enxurrada (m³)

qp= vazão e pico da enxurrada (m³/s)

Outro modelo empírico muito difundido, de acordo com Morgan (1995), é o Soil Loss Estimator for South Africa (SLEMSA), cuja equação encontra-se abaixo:

$$Z = K \cdot X \cdot C \quad (2)$$

Onde:

Z= perda anual de solo (t/ha);

K= perda anual de solos (t/ha) de um talude;

X= combinação de dados característicos do talude (adimensional);

C= fator manejo do solo.

Dentre os modelos baseados fisicamente destacam-se o Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems - CREAMS, o Water Erosion Prediction Project - WEPP, o Griffith University Erosion Sedimentation System - GUESS, e o European Soil Erosion Model - EUROSEM.

O CREAMS é um modelo, em escala de campo, desenvolvido nos Estados Unidos, e utilizado na investigação quantitativa das conseqüências ambientais causadas pela ação da agricultura. É dividido em três componentes: hidrologia, erosão e química.

Desenvolvido pela Agencia de Agricultura dos Estados Unidos - USDA/ARS, o Water Erosion Prediction Project - WEPP trata-se de um modelo bastante difundido. É fundamentado em técnicas hidrológicas e agronômicas.

O EUROSEM é um modelo de ambiente computacional, considerado como o mais real dentre todos os demais. É utilizado para a análise da formação dos diferentes tipos de feições erosivas, uma vez que simula a maneira como ocorrem as feições erosivas, tais como sulcos e intersulcos. Analisa eventos únicos com base em processos provenientes de várias fontes, com a finalidade de predizer a erosão do solo causada pela água.

CAPITULO 3 - ERODIBILIDADE

De acordo com Nogami e Villibor (1995), dentre as diferentes propriedades de um solo, a erodibilidade é uma das mais importantes, sendo aquela que reflete a maior ou menor tendência de um determinado solo à erosão.

Rodrigues (1998), afirma que a erodibilidade trata-se de uma propriedade intrínseca ao solo que reflete a sua pré-disponibilidade ao destacamento das partículas, sendo representada pelo fator K da equação universal de perda do solo.

A erodibilidade é um dos mais importantes fatores para o estudo e compreensão do fenômeno da erosão, sendo função de vários fatores (físicos, químicos e biológicos) em uma inter-relação complexa, e que pode variar com as condições climáticas. Se dois solos diferentes com o mesmo uso forem expostos a um mesmo agente erosivo, o que mais sofrerá a ação da erosão será o solo com alta erodibilidade.

A erodibilidade pode variar de acordo com as estações do ano (por exemplo, o maior ou menor umedecimento do solo) e com o tipo de uso e ocupação empregado pelo homem a este solo.

As ações do homem sobre o solo são sentidas principalmente nas camadas superficiais, pela ação da retirada da vegetação natural, técnicas agro-pastoris, e de engenharia civil. De acordo com Facincani (1995), os modelos de ocupação urbana e rural refletem a ausência de

um conhecimento prévio das características físicas do meio a ser ocupado, resultando a sua degradação.

3.1 FATORES QUE INTERFEREM NA ERODIBILIDADE DOS SOLOS

Segundo Wischmeier e Smith (1965) *apud* Ângulo *et al.* (1984), as características que mais influenciam a erodibilidade de um solo são aquelas que afetam a infiltração, a permeabilidade e a capacidade de armazenamento de água, a desagregação, a abrasão e o transporte pelo escoamento superficial e chuva.

Para Nascimento e Castro (1976), os principais parâmetros que condicionam a resistência de um solo à erosão são granulometria, para os arenosos, expansibilidade e petrificação para os argilosos.

Ângulo *et al.* (1984), concluíram que a estabilidade dos agregados em água e sua resistência ao impacto da gota da chuva, foram às propriedades que melhor quantificaram este fator.

Em pesquisas realizadas com solos provenientes de países de clima tropical e de países de clima temperado, Roose e Sarrailh (1989), observaram que os solos tropicais apresentaram uma maior tendência à erosão frente aos solos de clima temperado, e que esta erodibilidade apresenta uma variação durante o ano em função das estações. Outra correlação obtida por estes autores foi que a erodibilidade desses solos também estava relacionada com propriedades físicas, e com a evolução da matéria orgânica, além do tipo de uso do solo.

Dentre as propriedades que mais interferem na erodibilidade dos solos, pode-se citar: textura, mineralogia e teor de argilas, presença

de agregados, resistência ao cisalhamento, pH, Eh, condutividade elétrica, e cátions trocáveis. Propriedades *in situ*, como a infiltração e a umidade, segundo Pejon (1992), também exercem influência na erodibilidade. Quanto maior o seu volume e maior a velocidade da água em infiltrar, menor a possibilidade de escoamento superficial, e também, menor a possibilidade de ocorrer à erosão.

Algumas propriedades que influenciam a erodibilidade podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores que interferem na erodibilidade dos solos.

PROPRIEDADES	FATORES	CARACTERÍSTICAS
Mecânicas	Textura	-influi no destacamento e carregamento de partículas do solo; -determina a facilidade de dispersão do solo; -determina a força limite necessária para o destacamento.
	Estrutura	-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 de torrões/ Cultivo do solo	-superfícies rugosas e cheias de torrões possuem elevada capacidade de retenção; -resistência à desagregação pela chuva e pelo vento.
	Formação de crostas	-responsável pelo aumento na taxa de escoamento superficial; -solos com baixos teores de matéria orgânica.
Resistência	Resistência ao cisalhamento	-importante no destacamento de partículas de solo (impacto e escoamento superficial).
Reológicas	Sistema água/solo	-a umidade do solo influi na suscetibilidade à erosão por afetar a coesão, a resistência ao cisalhamento, consistência e plasticidade.

Tabela 5 – Fatores que entreverem na erodibilidade dos solos (continuação).

PROPRIEDADES	FATORES	CARACTERÍSTICAS
Característica do perfil	Diretos e indiretos	-Influência sobre o escoamento subsuperficial em decorrência de mudanças nas propriedades hidrológicas de diferentes horizontes; -influência sobre o crescimento vegetal.
	Retenção de água	-o estado de energia da água do solo ou pressão neutra influencia a resistência ao cisalhamento em um solo; -a resistência de um solo ao arrastamento pela água é influenciada pela umidade inicial; -solos secos são mais suscetíveis à erosão pelo vento e pela água que os solos úmidos; -a umidade fornece coesão entre as partículas.
Hidrológicas	Transmissão de água no solo	-taxa de infiltração determina o maior ou menor volume de escoamento superficial.
	Permeabilidade	-solos com permeabilidade extremamente baixa a moderada geram mais escoamento superficial.
Químicas e mineralógicas	Matéria orgânica	-influência a distribuição granulométrica, assim como, propriedades de retenção e transmissão de água; -fortalece as ligações que estabilizam as unidades estruturais e mantém um balanço favorável entre a retenção e transmissão nos poros; -diminui o efeito da compactação; -concentração de matéria orgânica em micro-agregados aumenta a sua resistência à desagregação e à dispersão.
	Argilo - minerais	-a estrutura do solo e a resistência são influenciadas pela quantidade e natureza dos argilo-minerais; -a fração fina do solo interage com a matéria orgânica para formar agregados mais estáveis ao impacto das gotas de chuva.

Fonte: Nishiyama (1998).

A presença da cobertura vegetal influencia na erodibilidade uma vez que age como agente de proteção aos impactos das gotas de chuva, e também, promove a resistência mecânica do solo pela ação do sistema radicular.

Bailey (1941) *apud* Rodrigues (1982), considerava a importância da vegetação no papel de proteção da encosta, afirmando que certos solos que possuem ângulo de repouso próximo a 60° , quando protegidos pela vegetação, ao terem esta vegetação retirada apresentam uma queda neste ângulo para aproximadamente 30° .

Para Greenway (1990) *apud* Nishiyama (1998), a vegetação influencia na estabilidade de encostas por meio de dois mecanismos, um hidrológico e um mecânico. Sendo que, tanto o hidrológico como o mecânico, podem interagir tanto positivamente como negativamente, junto à estabilidade da encosta. Baseando-se nas idéias de Greenway (1990) *apud* Nishiyama (1998), elaborou-se a Tabela 6, adaptada para a influência da vegetação na estabilidade de solos em encostas frente à erosão.

Tabela 6 - Influência da vegetação a estabilidade de solos em encostas frente à erosão.

TIPO DE MECANISMO	AÇÃO	INFLUÊNCIA	TIPO DE INTERAÇÃO NA ESTABILIDADE DA ENCOSTA
Hidrológico	INTERCEPTAÇÃO DA CHUVA PELO SISTEMA FOLIAR	Perda por evaporação e absorção	Benéfica
	Extração da umidade do solo (raízes)	Perda de água por transpiração Diminuição de pressão de poro (pressão neutra)	
	Aumento da rugosidade superficial (raízes e restos)	PROTEGE A CAMADA SUPERFICIAL DO SOLO, FRENTE À AÇÃO DAS ÁGUAS DAS CHUVAS	

Tabela 6 - Influência da vegetação a estabilidade de solos em encostas frente à erosão. (Continuação)

TIPO DE MECANISMO	AÇÃO	INFLUÊNCIA	TIPO DE INTERAÇÃO NA ESTABILIDADE DA ENCOSTA
Mecânico	Aumento da resistência pela ação de raízes (união das partículas pelas raízes)	Aumento a resistência ao cisalhamento	Benéfica

Baseado nas idéias de Greenway (1990).

3.1.1 PRESENÇA DE AGREGADOS

A agregabilidade pode ser definida como o comportamento no qual as partículas de solo são encontradas naturalmente agrupadas, com formatos e tamanhos variados, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Agregação presente em materiais inconsolidados. Imagem obtida com o auxílio de lupa eletrônica.

A presença de agregados trata-se de um fenômeno muito complexo, onde são envolvidas as forças de atração das partículas de argila, pH, e a presença de cátions trocáveis.

As propriedades químicas de um solo, tais como pH, Eh, cátions trocáveis, entre outras, controlam além da estabilidade dos minerais, a formação e estabilidade dos agregados. Ao ocorrer uma mudança química no solo, uma variação no pH, por exemplo, poderá provocar a desestabilização de minerais e/ou agregados presentes neste solo. Esta desestabilização de minerais e/ou agregados pode acarretar a diminuição ou o aumento da resistência deste solo frente à erosão. Em solos básicos, onde há o predomínio de cátions bivalentes, as propriedades de expansibilidade das argilas 2:1 são minimizadas e a agregação é favorecida. No entanto, em solos ácidos, onde há predominância de cátions monovalentes, e, o hidrogênio é dominante, as argilas 2:1 têm sua propriedade de expansibilidade realçada e, neste caso, a dispersão do solo ocorre (MITTERVICH, 1996).

A granulometria influi na estabilidade dos agregados, porém deve-se ter muito cuidado com a aplicação de valores obtidos em curvas granulométricas para a caracterização dos agregados e suas propriedades. Em trabalhos como de Lima *et al.* (1990) *apud* Nishiyama (1998), são levantadas dúvidas sobre a aplicabilidade dos resultados de granulometria com dispersão total na previsão do comportamento de latossolos quanto à erosão.

Os mesmos autores, acima citados, afirmam que em latossolos vermelho-amarelo e vermelho-escuro, agregados de elevada estabilidade permanecem como agregados menores, ocupando a faixa granulométrica de silte e areia muito fina.

Para Lal (1990), a granulometria dos agregados estáveis exerce influência na erosão, sendo que os compreendidos na faixa de 0,25 a 5 mm são mais estáveis à ação da chuva. Ainda segundo Lal (1990), a

intensidade da erosão pelo vento, também, está relacionada estabilidade dos agregados, que de certa forma, atua como agente de proteção.

De acordo com estudos realizados por Bryan (1968) *apud* Nishiyama (1998), para 90 amostras de diferentes tipos de solos analisados por diversos métodos de avaliação do índice de erodibilidade, nenhum deles demonstrou ser totalmente confiável, porém concluiu que há uma forte ligação com aqueles relacionados à agregação das partículas. Esta disparidade e não adequação entre as diversas metodologias, também foi observada por Silva *et al.* (2000), que realizaram uma pesquisa com amostras de diferentes latossolos brasileiros, objetivando a determinação indireta do índice de erodibilidade por 23 modelos diferentes, sendo que, nenhum método testado mostrou-se satisfatório para o conjunto de solos estudados.

Os teores de matéria orgânica de um solo constituem-se em um fator muito importante na estabilidade dos agregados. Voroney *et al.* (1981) *apud* Morgan (1995), sugerem que a erodibilidade diminui linearmente com o aumento no conteúdo de matéria orgânica, enquanto o destacamento pelo impacto das gotas de chuva diminui exponencialmente com o aumento do conteúdo de matéria orgânica.

Segundo Alcântara (1997), o método do impacto da gota (e suas variações) apresenta um bom potencial para o estudo da estabilidade de agregados. A análise de impacto da gota, segundo este mesmo autor, é indicativa de resistência do agregado à quebra pela precipitação.

3.1.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência ao cisalhamento é a força que se opõem ao arrastamento dos grãos de solo ao longo de um talude, desenvolvido entre a camada dos grãos e a superfície desse talude, e pode ser expressa conforme a equação (3):

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (3)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento de um solo;

c = coesão do solo;

σ = tensão normal aplicada no solo;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

Segundo Bryan (2000), apesar da resistência ao cisalhamento ser muito importante no controle de solos coerentes, há uma grande dificuldade para obtê-la diretamente em solos envolvidos em processos erosivos, uma vez que, é bastante complexo e trabalhoso simular as reais condições ambientais em que ocorre a erosão. Uma simples variação no teor de umidade altera a resistência ao cisalhamento de um solo.

Em geral um aumento no teor de umidade leva um solo a uma diminuição de sua resistência ao cisalhamento. Com baixos teores de umidade os solos passam a se comportar como um sólido e se fraturam sob tensão, mas se houver um aumento no teor de umidade inicia-se o comportamento plástico, ocorrendo a deformação sem o fraturamento.

Segundo Morgan (1995), embora muitas argilas percam resistência ao cisalhamento no início do processo de umedecimento, devido ao alívio gerado nas ligações entre as partículas, algumas recuperam esta resistência horas depois. Este processo é denominado de comportamento tixotrópico, e ocorre devido à absorção de água pelo mineral, que promove a formação de pontes de hidrogênio.

3.1.3 ARGILAS

Argilo-minerais ou argilas, segundo Boules (1979), são minerais predominantemente formados por alumínio e/ou ferro e magnésio, extremamente pequenos (inferiores a $2\mu\text{m}$), e eletronicamente ativos.

São silicatos hidratados com estrutura em camadas formadas por ligações que geram folhas de tetraedros de silício, e oxigênio, e folhas de octaedros de alumínio e oxigênio e hidroxilas.

As argilas podem se classificadas de acordo com o tipo de cátion presente na folha octaédrica em: dioctaédricas ou tricoctaédricas, por exemplo, se o cátion presente na folha for um Al, só dois terços das posições estão ocupadas e a argila é classificada como dioctaédrica, se ao contrário, o cátion for o Mg todas as posições do octaédro estão ocupadas e a argila é classificada como tricoctaédricas.

O silício presente nos tetraedros pode ser substituído por alumínio, e o alumínio dos octaedros por magnésio ou mesmo pelo ferro. Estas trocas de cátions são denominadas de substituições isomórficas, uma vez que, são feitas entre cátions com tamanhos similares e não há uma variação na estrutura principal da argila,

apenas um excesso de cargas negativas em suas camadas que pode ser compensado com a adsorção de cátions hidrogênicos (H^+) das moléculas de água (Figura 5). Esta compensação também pode ser realizada com adsorção de os cátions de sódio (Na^+), cálcio (Ca^+) e potássio (K^+), dentre outros. Uma vez que as moléculas de água são polarizadas, seu pólo negativo pode ligar-se a outras moléculas de água, formando a camada de água adsorvida.

A camada de água absorvida pode ter sua espessura variável, de acordo com o cátion presente na ligação com o H^+ , os cátions de Na^+ , devido ao seu tamanho, levam a um aumento na espessura dessas camadas, o que gera uma diminuição nas forças entre partículas, podendo levar ao destacamento destas da massa de solo.

Figura 5 - Partícula de argila polarizada atraindo moléculas de água.

Sherard *et al.* (1976), afirmaram que algumas argilas naturais se dispersam ante a presença de água relativamente pura, como a originada por chuva. O fenômeno é gerado devido à presença da água de poros do solo ter maior concentração de cátions que a água pura da chuva.

Sherard *et al.* (1976) e Mullins (1999), conceituam a dispersão como um processo associado aos teores de sódio em um solo, o que pode levar a uma separação espontânea das partículas de argila. A dispersão ocorre quando as forças de repulsão interpartículas excedem as de atração, levando ao destacamento dessas partículas, facilitando assim, seu posterior transporte.

Ainda segundo Sherard *et al.* (1976), quando a água da chuva ingressa no solo, produz dois efeitos:

- tomada de cátions da água de poro - buscando reduzir a diferença de concentração, o que gera um desequilíbrio entre o complexo de adsorção da partícula de argila e a água de poro, levando a uma transferência de cátions da partícula em direção a esta água retida no poro. Isto resulta numa descompensação elétrica da estrutura química da argila, aumentando a repulsão eletrostática entre as partículas.
- aumento da esfera de solvatação - os cátions que permanecem aderidos nas partículas de argila tendem a aumentar a sua esfera de solvatação pela diminuição dos cátions na solução. Isto aumenta a distancia entre partículas com a conseqüente redução das forças de atração.

Para Holmger *et al.* (1976), a tendência à erosão por dispersão depende fundamentalmente do tipo de cátion predominante na estrutura da argila, sendo os solos sódicos mais dispersivos que os que contêm cálcio e magnésio.

Segundo Morgan (1995), a presença de argilas dispersivas é um dos mais importantes fatores que podem influenciar a erodibilidade do solo.

As argilas influenciam na erodibilidade de um solo, tanto através do tipo como dos teores presentes no solo. Para Grissinger (1966) *apud* Lal (1990), a quantidade de argila influencia na textura, uma vez que ao serem cimentadas com partículas de granulometria silte, formam agregados. Em estudos com solos previamente classificados como erodíveis Evans (1980), concluiu que os solos com teores variando acima de 35% de argilas, são geralmente mais coerentes e formam agregados estáveis sob o efeito das gotas de chuva.

3.1.4 FORMAÇÃO DE CROSTAS

Moldernhauer e Kosawara (1968) *apud* Nishiyama (1998), afirmaram que, em geral a perda de solo diminui com a formação de crosta. Para Moore e Singer (1990) o selamento superficial do solo e o desenvolvimento de crostas endurecidas reduzem a quantidade de infiltração, e aumentam a resistência do solo. Porém uma vez destruída a crosta, o processo erosivo pode instalar se, como é possível de ser observado na Figura 6, tirada em São Pedro em um loteamento.

Figura 6 - Implantação do processo erosivo no município de São Pedro, na área de um loteamento residencial, onde o solo encontra-se desprotegido.

Estein e Grant (1973) *apud* Rodrigues (1998), constataram que a erodibilidade do solo é uma função da taxa e extensão da formação de uma crosta endurecida, visto que maior perda de solo ocorre nos dez primeiros minutos da chuva, após os quais, decresce para um valor constante.

Nishiyama (1998), cita que durante o evento da formação da crosta, a água de infiltração decresce para uma constante com o tempo, o que cria desse modo, um aumento concomitante do volume de escoamento superficial. E ainda afirma que, este aumento no escoamento superficial, associado à intensificação da energia de arremesso de partículas pelo *splash* em presença de escoamento laminar, conduz a uma erosividade crescente relacionada ao evento de formação de crosta, atingindo um valor máximo com o tempo.

3.2 ÍNDICES PARA QUANTIFICAÇÃO DA ERODIBILIDADE

A erodibilidade de um solo pode ser determinada diretamente no campo, com chuvas tanto naturais como simuladas, ou por processos indiretos, por meio de correlações com as propriedades físicas e químicas.

Frente à sua complexidade, muitos estudos foram realizados na tentativa de quantificar a erodibilidade dos solos. Os primeiros trabalhos com este objetivo surgiram em 1925 com Bennet, e com Middleton no ano de 1930. Estas pesquisas correlacionavam o fator erodibilidade com uma característica física, a granulometria, na

tentativa de quantificar a erodibilidade utilizando-se a capacidade de agregação de um solo.

Posteriormente, na década de sessenta, o Laboratório de Engenharia Civil de Portugal - LNEC e o Laboratório de Engenharia de Angola investigaram várias propriedades que poderiam interferir na erodibilidade de solos tropicais encontrados em cortes de estradas, dando destaque às propriedades químicas, físicas e mineralógicas que potencialmente podem influenciar na erodibilidade. Ainda na década de sessenta, Bryan em 1968, ao estudar a suscetibilidade à erosão de 90 amostras de diferentes tipos de solos por diversas metodologias, concluiu que nenhuma delas demonstrou ser totalmente confiável e que havia uma grande ligação do comportamento da erodibilidade com a agregação das partículas.

Wishmeier *et al.*(1971), apresentaram o nomograma que ficou conhecido como nomograma de Wishmeier, para determinação do fator K – erodibilidade, que até os dias de hoje é amplamente utilizado. Para a sua utilização requer o conhecimento de algumas propriedades do solo em análise, tais como: porcentagem de matéria orgânica, porcentagem de material na faixa granulométrica entre 0,002 a 0,1 mm, porcentagem de material na faixa granulométrica 0,1 a 0,2 mm, classe de permeabilidade e tipo de estrutura do solo.

Estudando a erosão causada pela dispersão de certas argilas em algumas barragens de terra, Scherard *et al.*(1976) desenvolveram algumas metodologias para a identificação da erodibilidade. Dentre elas, a mais utilizada é a de Identificação Química de Argilas Dispersivas.

No Brasil foram realizados muitos estudos sobre o fator erodibilidade dos solos, sendo que, a grande maioria, visava à aplicação e/ou a adaptação das metodologias internacionais, criadas em países de clima temperado, para as nossas condições climáticas.

Em 1979, os professores Nogami e Villibor, deram um novo direcionamento à pesquisa de solos tropicais e subtropicais por meio da Metodologia MCT que é voltada a estes solos com finalidade empregá-los na construção de estradas. A metodologia utiliza a combinação de dois ensaios, ensaio de absorção e ensaio de perda de massa por imersão, relativamente simples para a determinação do índice de erodibilidade. Pejon (1992), apresentou um novo critério de classificação para os solos erodíveis, utilizando os ensaios propostos por Nogami e Villibor (1979), mas onde privilegiava a característica de absorção de água por um solo, mais que a de perda de massa por imersão.

Alcântara (1997), em pesquisas também realizadas na Escola de Engenharia de São Carlos – ESSC, propôs a utilização do ensaio do cone, com algumas modificações, para a correlação entre os valores da penetração do cone com a erodibilidade dos solos analisados.

Morgan (1995), e Mittervicht (1996), compilaram separadamente, na forma de tabelas, as principais metodologias para quantificação dos índices de erodibilidade. Estas metodologias mais as principais metodologias nacionais foram montadas em uma única tabela (Tabela 7). Vale ressaltar que a heterogeneidade e carência de algumas informações, entre as diversas metodologias, deve-se a diferenças na descrição e enfoque empregado por Morgan (1995), e Mittervicht (1996).

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos.

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
Índice de sesquióxidos (Sesquioxido ratio)	Bennet (1926)	Princípio: $\frac{\text{SiO}_2}{\text{R2O3}}$
		Limites: Solos erodíveis > 9,03 Solos não erodíveis < 0,52
		Desenvolvido para: Solos Lateríticos
		País onde foi desenvolvido: Cuba
Índice de dispersão (Dispersion ratio)	Middleton (1930)	Tipo de erosão: não especificado
		Princípio: $\frac{\% \text{ silte} + \% \text{ argila (com defloculante)}}{\% \text{ silte} + \% \text{ argila (com água destilada)}}$
		Limites: não especificado
		Desenvolvido para: solos superficiais arenosos, siltosos e argilosos
Índice de erosão (Erosion ratio)		País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América
		Tipo de erosão: não especificado
		Princípio: Índice de dispersão dividido pelo índice de colóide (matéria orgânica + argila).
		Limites: Solos erodíveis > 10% Solos não erodíveis < 10%
Índice de argila (Clay ratio)	Bouyoucos (1935)	Desenvolvido para: solos superficiais arenosos, superficiais siltosos e argilosos.
		País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América
		Tipo de erosão: não especificado
		Princípio: $\frac{\% \text{ areia} + \% \text{ silte}}{\% \text{ argila}}$ Limites: não especificados

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
Índice de erosão (<i>Erosion index</i>)	Voznesensky (1940)	Princípio: $\frac{d \times h}{a}$
		Onde: d = índice de dispersão; h = índice de retenção de água; a = índice de agregação.
		Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos: não especificado
Índice de superfície de agregação (<i>Surface aggregation ratio</i>)	Anderson (1954)	País onde foi desenvolvido: Rússia
		Tipo de erosão: não mencionado
		Princípio: Área da superfície das partículas de solo maiores que 0,05mm, dividido pelos agregados de silte e argila.
		Limites: não especificados
Simulador de chuva (<i>Simulated rainfall test</i>)	Woodburn e Kozachyn (1956)	Desenvolvido para: solos de textura média a grossa provenientes de material aluvionar ou vulcânico.
		País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América
		Tipo de erosão: Erosão marginal
		Princípio: Comparação da erosão de diferentes tipos de solos submetidos a uma chuva padrão.
Índice de instabilidade (<i>Instability index</i>)	Hénin, Monnier e Combeau (1958)	Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos: de diferentes tipos
		País onde foi desenvolvido: não especificado
		Tipo de erosão: Erosão pela ação de chuvas
		Princípio: $\frac{\% \text{silte} + \% \text{argila}}{Ag_{ar} + Ag_{alc} + Ag_{benz}}$
		Onde: Ag_{ar} = % de agregados > 0,2 mm; Ag_{alc} = pré-tratamento com álcool; Ag_{benz} = pré-tratamento com benzeno.
		Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos: não especificado
		País onde foi desenvolvido: não especificado
		Tipo de erosão: não especificado

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
		Princípio:
		$\frac{1}{\text{resistência de cisalhamento} \times \text{permeabilidade}}$
Índice de instabilidade (<i>Instability index</i>)	Chorley (1959)	Limites: não especificados Desenvolvido para solos: com textura variando entre fina a média País onde foi desenvolvido: não especificado Tipo de erosão: Laminar
		Princípio:
		$\frac{\% \text{ silte} + \% \text{ Argila}}{(\% \text{ agregados} > 0,2 \text{ mm}) - 0,9 \times (\% \text{ areia grossa})}$
Índice de instabilidade (<i>Instability index</i>)	Monnier e Combeau (1961)	Limites: não especificados Desenvolvido para solos: não especificado País onde foi desenvolvido: não especificado Tipo de erosão: não especificado
		Princípio: Índice de argila de Bouyoucos com a adição de matéria orgânica da fração ligante
Índice de argila modificado (<i>Modifield clay ratio</i>)		Limites: não especificados Desenvolvido para solos: não especificado País onde foi desenvolvido: Inglaterra
	Bryan (1968)	Tipo de erosão: Laminar. Princípio: Índice de superfície de agregação de Anderson com a adição de matéria orgânica da fração ligante.
Índice de superfície de agregação modificado (<i>Modified surface aggregation ratio</i>)		Limites: não especificados Desenvolvido para solos: não especificado País onde foi desenvolvido: Inglaterra Tipo de erosão: Laminar

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
Agregados estáveis em água (<i>Percentage water-stable aggregates - WSA</i>)	Bryan (1968)	Princípio: % de WSA > 3 mm
		Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos do tipo: não especificado
		País onde foi desenvolvido: Inglaterra
		Tipo de erosão: Laminar
Índice de intabilidade (<i>Instability index</i>)	Monnier e Combeau (1961)	Princípio: $\frac{\% \text{ silte} + \% \text{ Argila}}{(\% \text{ agregados} > 0,2 \text{ mm}) - 0,9 \times (\% \text{ areia grossa})}$
		Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos do tipo: não especificado
		País onde foi desenvolvido: não especificado
		Tipo de erosão: Laminar
Índice de erodibilidade (<i>Erodibility index</i>)	Wischmeier e Mannering (1969)	Princípio: média anual de perda de solo por unidade de EI ₃₀ (índice de erosão da chuva para um intervalo de 30 minutos)
		Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos do tipo: não especificado
		País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América.
		Tipo de erosão: erosão causada pela ação da chuva
Índice de erosão (<i>Erosion ratio</i>)	Lugo - Lopez (1969)	Princípio: $\frac{\text{índice de dispersão}}{\text{conteúdo colóide/índice de umida equivalente}}$
		Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos do tipo: não especificado
		País onde foi desenvolvido: não especificado
		Tipo de erosão: erosão causada pela ação da chuva
Agregados estáveis em água (<i>water-stable aggregates - WSA</i>)	Bryan (1976); Woodburn et al. (1976)	Princípio: % WSA > 0,5mm
		Limites: não especificados
		Desenvolvido para solos do tipo: não especificado
		País onde foi desenvolvido: não especificado
		Tipo de erosão: erosão causada pela ação da chuva

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
		Princípio: estimativa da erodibilidade dos solos baseado nos parâmetros: % matéria orgânica, estrutura, e classe de permeabilidade.
Fator K da Equação Universal de Perdas de solos (USLE – <i>Universal Soil Loss Equation</i>)	Wischmeier <i>et al.</i> (1971)	<p>Limites: retirar no nomograma.</p> <p>Desenvolvido para solos: de países com clima Temperado</p> <p>País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América</p> <p>Tipo de erosão: utilizado para erosões dos tipos sulco e entre sulco</p>
Índice “K” de Young	Young <i>et al.</i> (1972)	<p>Princípio: estimativa a partir do índice de agregados (2,9mm), porcentagem de montmorilonita, silte mais areia fina, peso específico e índice de dispersão.</p> <p>Limites: não especificados</p> <p>Desenvolvido para solos do tipo: não especificado</p> <p>País onde foi desenvolvido: não especificado</p> <p>Tipo de erosão: não especificado</p>
Índice KE (<i>KE index</i>)	Bruce-Okine <i>et al.</i> (1975)	<p>Princípio: média do número de gotas (energia cinética) necessário para destruir um agregado de solo</p> <p>Limites: Solos estáveis 0 – 0,4 Solos não estáveis >0,4</p> <p>Desenvolvido para solos: argilosos e argilo-arenosos.</p> <p>País onde foi desenvolvido: Nigéria</p> <p>Tipo de erosão: causada pela ação das gotas das chuvas</p> <p>Princípio: consiste em fazer percolar água (com um gradiente hidráulico conhecido) através de um furo de 1 mm em amostra cilíndrica</p>
Ensaio do furo de agulha (<i>Pinhole test</i>)	Sherard <i>et al.</i> 1976	<p>Limites: No Brasil é normatizado pela ABNT na NBR 14114/95</p> <p>Desenvolvido para solos: argilosos</p> <p>País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América</p> <p>Tipo de erosão: erosão por <i>piping</i></p>

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
		Princípio: um pequeno torrão de solo seco é colocado em água, às partículas de argilas dispersivas tentem a se liberar e formar uma zona mais densa ao redor do torrão.
Ensaio de pulverização (<i>Crumb test</i>)		Limites: quanto maior a zona densa ao redor do torrão maior a tendência à dispersão. Desenvolvido para solos: não especificado País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América
	Sherard <i>et al.</i> 1976	Tipo de erosão: não especificado Princípio: extração e quantificação dos cátions trocáveis de uma pasta de solo mais água e posterior classificação utilizando um ábaco.
Ensaio laboratorial usado para identificação de argilas dispersivas (<i>Laboratory test used to identify dispersive clays</i>)		Limites: Zona não dispersiva Zona pouco dispersiva Zona dispersiva Desenvolvido para solos: não especificado País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América
		Tipo de erosão: não especificado Princípio: Coeficiente de erodibilidade para solos argilosos baseados em regressões múltiplas dos parâmetros K da USLE, mais a % Fe_2O_3 e Al_2O_3 Limites: não especificado
Fator K para solos superficiais (<i>K for surface soil erodibility</i>)		Desenvolvido para solos: com textura variando entre areia e argila. País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América
	Römkens <i>et al.</i> (1977)	Tipo de erosão: sulco e intersulco Princípio: $K = 0,145 + (6,87 \cdot 10^{-5} M) + 0,034 \times (\text{estrutura}) + 0,038 \times (\text{permeabilidade}) - 0,157 (\text{carbono})$ Limites: não especificado
Fator K de Römkens		Desenvolvido para solos: com textura variando entre areia e argila. País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América Tipo de erosão: sulco e intersulco

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
Índice SUS/MWD		Índice de suspensão em porcentagem.
		Limites: não especificado
		Desenvolvido para solos: para latosolos provenientes de colúvios com composição basáltica
		País onde foi desenvolvido: Hawaii
SURF	Yamamoto <i>et al.</i> (1978)	Tipo de erosão: gerada pela ação da gota de chuva
		Princípio: área da superfície de agregados maior que 0,25mm.
		Limites: não especificado
		Desenvolvido para: latosolos provenientes de colúvios com composição basáltica
Índice de WSA < 0,25/MWD		País onde foi desenvolvido: Hawaii
		Tipo de erosão: gerada pela ação da gota de chuva
		Princípio: Porcentagem de agregados maiores que 0,25mm/ diâmetro em mm
		Limites: não especificado
Agregados estáveis em água (<i>water-stable aggregates - WSA</i>)		Desenvolvido para solos do tipo: latosolos provenientes de colúvios com composição basáltica
		País onde foi desenvolvido: Hawaii
		Tipo de erosão: gerada pela ação da gota de chuva
		Princípio: WSA entre 0,25 e 0,5mm
Erodibilidade	Nogami e Villibor (1979)	Limites: não especificado
		Desenvolvido para solos: para latosolos provenientes de colúvios com composição basáltica
		País onde foi desenvolvido: Hawaii
		Tipo de erosão: gerada pela ação da gota de chuva
		Princípio: $E = 50 \times S/P$
		Onde: S= coeficiente de absorção
		P= perda de massa por imersão
		Limites: $E < 1 \Rightarrow$ materiais com alta erodibilidade
		Desenvolvido para solos: de países com clima tropical
		País onde foi desenvolvido: Brasil

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
		Princípio: % de agregados destruídos por 15 gotas sem umedecimento prévio (15 _{do}) e 10 gotas com umedecimento(10 _{d24})
Teste da gota de água (<i>water drop test</i>)	Bersgma e Valenzuela (1981)	Limites: não especificado Desenvolvido para solos do tipo: não especificados País onde foi desenvolvido: Espanha Tipo de erosão: gerada pela ação da gota de chuva Princípio: $MSL = 862 + 23,7 (\text{teor de esmectita} + \text{teor de vermiculita}) + (855Db + 135 (Al + Fe)) + 0,006M$ Onde: Db= densidade específica M do fator K da USLE
Perda média de solo (<i>Mean soil loss - MSL</i>)	Trott <i>et al.</i> (1983)	Limites: não especificado Desenvolvido para solos dos tipos: não especificados País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América Tipo de erosão: não especificado Princípio: Incorporação da matéria orgânica, dos cátions trocáveis, na percentagem de alumínio e de SAR (índice de absorção de sódio) ao parâmetro M do fator K da USLE.
Erodibilidade em sulcos (<i>Rill erodibility - Kr</i>)	Elliot <i>et al.</i> (1987)	Limites: não especificados Desenvolvido para solos: com textura variando entre areia e argila País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América Tipo de erosão: em sulcos Princípio: perda de solo a cada 5 min., até completar 1 h. $S_{60} = \frac{23,35 + 3814 KE}{\text{resistência ao cisalhamento} - 0,28 (\text{teor de silte dispersado})}$ Limites: não especificado
S_{60}	Bradford <i>et al.</i> (1987)	Desenvolvido para solos: com textura variando entre areai e argila. País onde foi desenvolvido: Estados Unidos da América Tipo de erosão: inter sulcos

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
		Princípio: estabilidade de agregados. Porcentagem acumulada de sólidos suspensos em água após 5 minutos.
Sólidos suspensos após cinco minutos (<i>Suspended solids after five minutes - SED</i>)	de Roo (1993)	Limites: não especificado Desenvolvido para solos: coluvionais e solos pedregulhos País onde foi desenvolvido: Holanda
		Tipo de erosão: sulco e inter sulco.
		Princípio: valor do cisalhamento direto de amostras indeformadas.
		Limites: não especificado
Ensaio de palheta (<i>Shear vane test</i>)		Desenvolvido para solos: argilosos e solos superficiais País onde foi desenvolvido: Espanha, Tailândia e Sri-Lanka
		Tipo de erosão: sulco e inter sulco.
		Princípio: medir a fragilidade da superfície onde o fluxo escoar.
		Limites: não especificado
Ensaio para sulcos (<i>Rilling test</i>)	Bergsma (1990)	Desenvolvido para solos: argilosos e solos superficiais País onde foi desenvolvido: Espanha, Tailândia e Sri-Lanka
		Tipo de erosão: sulco e inter sulco.
		Princípio: medida do volume de solos perdido em uma área de teste de 30 x 30 cm, com de inclinação de 9 %, submetido a um pequeno simulador de chuva
		Limites: não especificado
Ensaio de perda de solo (<i>Soil loss test</i>)		Desenvolvido para solos: argilosos e solos superficiais País onde foi desenvolvido: Espanha, Tailândia e Sri-Lanka
		Tipo de erosão: sulco e inter sulco.

Tabela 7 - Principais índices nacionais e internacionais utilizados para a quantificação do fator erodibilidade dos solos (continuação).

NOME DO ÍNDICE	AUTOR/ANO	DESCRIÇÃO
Teste de infiltração de chuva (<i>Rainfall acceptance test</i>)	Bersgma (1990)	Princípio: volume de água infiltrada em 10 min. de chuva
		Limites: não especificado
		Desenvolvido para solos: argilosos e solos superficiais
		País onde foi desenvolvido: Espanha, Tailândia e Sri-Lanka
Erodibilidade* (<i>Critério de classificação</i>)	Pejon (1992)	Tipo de erosão: sulco e inter sulco.
		Princípio: $E = 40 \times S/P$ Onde: S= coeficiente de absorção P= perda de massa por imersão
		Limites: $E < 1 \Rightarrow$ materiais erodíveis $E > 1 \Rightarrow$ materiais não erodíveis
		Desenvolvido para solos: de países com clima tropical
Ensaio de penetração do cone	Alcântara (1997)	País onde foi desenvolvido: Brasil
		Princípio: correlação entre os calores obtidos com o ensaio de penetração de cone laboratório.
		Limites: não especificado
		Desenvolvido para solos: de países de clima tropical
		País onde foi desenvolvido: Brasil
		Tipo de erosão: não especificada

Fonte: Modificado de Morgan (1995) e Mettervicht (1996).

*Erodibilidade: Pejon (1992), utilizando a metodologia de Nogami e Villibor (1979), apresenta um novo critério de classificação para a erodibilidade, que se mostrou mais adequado aos solos estudados, por ele, na região de Piracicaba.

CAPITULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para dar embasamento teórico à proposta previamente definida no projeto de pesquisa apresentado à Secretaria do Departamento de Pós-Graduação de Geotecnia da EEESC/USP, iniciaram-se os trabalhos com a realização de uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto. Esta atividade possibilitou o entendimento dos principais mecanismos que atuam no processo erosivo.

Concomitantemente a este levantamento, procedeu-se a digitalização da base topográfica da região do Ribeirão Samambaia na escala 1:10.000. Posteriormente realizou-se a fotointerpretação da área, utilizando-se de dois conjuntos de fotografias aéreas em escala 1:25.000 obtidas nos anos de 1972 e 1995, com a qual obteve-se o mapa preliminar de materiais inconsolidados.

O mapa obtido por fotointerpretação serviu como base para a escolha das áreas a serem amostradas para a caracterização, descrição, e realização dos ensaios de caracterização física e química. Posteriormente, com resultados obtidos por meio dos ensaios laboratoriais, partiu-se para a realização do mapa final.

Simultaneamente a estas atividades realizou-se o monitoramento hidrológico do Ribeirão Samambaia, com medidas da velocidade de fluxo, taxa de sedimentos, teores de K^+ e Na^+ , além de medidas de pH

e Eh.

A seqüência dos trabalhos desenvolvidos no decorrer desta pesquisa está presente, resumidamente, no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma com a seqüência de trabalho desenvolvida.

4.1 ATIVIDADES DE CAMPO PRELIMINARES

As atividades preliminares de campo foram realizadas após a digitalização do mapa de materiais inconsolidados, e objetivaram a escolha de pontos para amostragem de materiais inconsolidados, assim como a escolha das quatro seções transversais para o levantamento de informações hidrológicas do Ribeirão Samambaia. Nesta etapa, também, foram realizadas as primeiras comparações das informações obtidas por fotointerpretação com aquelas obtidas em encontradas em campo. Posteriormente partiu-se para os trabalhos de campo propriamente ditos.

4.2 ATIVIDADES DE CAMPO PARA AMOSTRAGEM

Os diferentes materiais inconsolidados foram classificados em dois grandes tipos de acordo com a sua origem: materiais inconsolidados residuais e materiais inconsolidados retrabalhados.

Os materiais residuais são o resultado de alteração *in situ* das rochas do substrato rochoso, e, os retrabalhados, são originários do retrabalhamento de diferentes intensidades, e de composição variadas. Em seguida, estes grupos foram subdivididos de acordo com características texturais observadas em análise tátil - visual no campo e confirmadas pelos ensaios laboratoriais.

4.2.1 AMOSTRAGEM INDEFORMADA

Na campanha de amostragem indeformada foram coletados, em cada ponto, um jogo com quatro anéis de Policloreto de Vinila - PVC rígido com amostras indeformadas de material inconsolidado. Desses anéis, um apresentava dimensões de 45 mm de diâmetro por 50 mm de altura, para a obtenção de índices físicos (massa específica dos sólidos, massa específica seca de campo, índice de vazios e porosidade), e os demais apresentavam as dimensões de 45 mm de diâmetro por 20 mm de altura, para utilização nos ensaios de erodibilidade.

O material inconsolidado a ser amostrado tinha uma superfície nivelada horizontalmente, onde era cravado o amostrador, com a extremidade biselada para baixo. Para auxiliar o processo de cravação e utilizada uma espátula, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Procedimento de coleta de material inconsolidado indeformado.

Após a remoção as amostras eram embaladas em filme plástico e em papel alumínio, e armazenadas em caixas de isopor até o momento do ensaio.

Algumas amostras indeformadas foram separadas para serem descritas com o auxílio de lupa, e posteriormente, terem a sua imagem capturada por meio de microscópio óptico eletrônico, pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais Automobilística e Aeronáutica, da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP

4.2.2 AMOSTRAGEM DEFORMADA

As amostras deformadas foram coletadas com o auxílio de uma pá, identificadas e armazenadas em embalagens plásticas bem seladas. Calculou-se uma quantia de amostra suficiente para a realização dos ensaios de granulometria conjunta, com e sem defloculante, massa específica dos sólidos e ensaios químicos.

4.3 ENSAIOS

Foram realizados vários ensaios para a caracterização dos materiais inconsolidados, podendo ser divididos em dois grupos, os *in situ* e os laboratoriais.

4.3.1 ENSAIOS *IN SITU*

Neste item se enquadram os ensaios realizados com o Penetrômetro de Cone Dinâmico e as atividades para monitoramento do Ribeirão Samambaia.

4.3.1.1 ENSAIO DINAMICO DE PENETRAÇÃO DO CONE

O Penetrômetro de Cone Dinâmico trata-se de um equipamento que mede *in situ* a resistência das mais variadas camadas de materiais em subsuperfície.

O equipamento utilizado nesta pesquisa (fotografia e esquema apresentados na Figura 7) foi projetado e construído no próprio Departamento de Geotecnia da EESC/USP, e possui as características físicas descritas na Tabela 8.

O ensaio, basicamente, consiste em anotar quantos golpes são necessários para a ponteira penetrar 10 cm, utilizando-se um martelo com massa de 2,5 kg, e uma altura de queda de 60 cm. Para a instalação do aparelho, retirava-se a camada de solo com vegetação, e nivela-se a superfície antes da montagem do aparelho.

A penetração é medida em função da resistência dos materiais no perfil, dando uma indicação das propriedades dos materiais em subsuperfície. Os dados obtidos com os ensaios foram tratados graficamente com o programa Microsoft Excel ®.

De acordo com Berberian 1971, pode -se classificar a capacidade do solo em:

- fofo - até 2 golpes;
- mediamente compacto - entre 3 e 6 golpes;
- compacto - de 7 a 14 golpes;
- muito compacto - acima de 14 golpes.

Figura 7 – Fotografia esquema do Penetrômetro utilizado em campo.

Tabela 8 - Características do Penetrômetro construído no SGS.

Massa do martelo	2,5 kg
Altura de queda	60 cm
Angulo da ponta do cone	90°
Diâmetro maior do cone	19 mm
Diâmetro menor do cone	26 cm
Massa do cone	262,2 g
Material de confecção do cone	Aço (UND) Maciço
Comprimento do setor com menor diâmetro do cone	2,9cm
Comprimento setor com maior diâmetro do cone	2,5 cm
Massa da haste	1 kg
Diâmetro da haste	19 mm
Comprimento da haste	1 m
Material da haste	Aço (SAE 1020)
Peso da mesa	718,5 g

4.3.1.2 ATIVIDADES DE CAMPO PARA MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

As atividades de monitoramento da Bacia do Ribeirão Samambaia iniciaram-se com a escolha de quatro seções transversais ao longo do curso principal do ribeirão. Estas seções foram escolhidas por apresentarem fácil acesso e não indicassem sinais de futuras mudanças de cunho estrutural (substituição ou retirada de pontes, dragagem, entre outros).

As quatro seções selecionadas, Anexo I, para o monitoramento foram:

- seção Norte – localizada no centro do Município de São Pedro, próximo ao Hotel Colina Verde;
- seção Centro-norte – em frente ao parque municipal Maria Angélica;
- seção Centro-sul – no município de Águas de São Pedro, próximo à chácara Bebedouro;
- seção Sul – próximo à confluência do Ribeirão com o Rio Piracicaba.

As coletas foram realizadas entre os meses de dezembro de 2001 a maio de 2002, preferencialmente, durante as manhãs das sextas-feiras, ou extraordinariamente nas segundas-feiras. O equipamento coletor utilizado foi desenvolvido e construído no próprio Departamento de Geotecnia da EESC/USP, e consta basicamente de um vasilhame de PVC que servia de reservatório para a amostra, ao qual foram adaptados uma tampa com controle de abertura, um “suspiro” para a retirada do ar do interior do mesmo, e hastes de metal para a submersão/içamento do coletor.

Após a coleta o material era armazenado e transportado para o laboratório, onde se realizava a filtração do mesmo com a auxílio de

um papel de filtro e de um sistema: funil-kitazato-bomba de vácuo. Posteriormente o papel filtro era colocado em estufa para secar e em seguida pesado, sendo o peso dos sedimentos obtido pela equação 4:

$$PS = PPFD - PPFA \quad (4)$$

Onde:

PS = peso sedimento coletado;

PPFD = peso papel filtro depois do ensaio;

PPFA = peso papel filtro antes do ensaio.

Juntamente com a coleta dos sedimentos, foi realizado o mapeamento do leito do ribeirão para cada seção. Com o auxílio de um molinete, foi também realizado, o acompanhamento da velocidade de fluxo das águas nas seções monitoradas com espaçamento entre os pontos de leitura que variavam entre 20 a 50 cm de distancia.

Para a correlação com a pluviometria, foram utilizadas as informações provenientes de um pluviômetro que foi instalado no Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Pedro (SAAE/SP), com leituras realizadas a cada seis horas, durante o período de 25 de novembro de 2001 a 28 de fevereiro de 2002.

4.3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

Por questões práticas, os ensaios laboratoriais utilizados para a caracterização dos materiais inconsolidados foram agrupados em dois grupos: os físicos e os químicos.

4.3.2.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Foram realizados dois ensaios de granulometria conjunta, conforme a ABNT NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984), para cada uma das amostras, utilizando-se no primeiro hexametáfosfato de sódio e, no segundo, água destilada.

Após os ensaios de granulometria, foram construídas as curvas granulométricas para cada amostra. Dessa forma pôde-se fazer uso das metodologias internacionais para quantificação da Erodibilidade, por meio dos Índices de Dispersão de Middleton (1930); Índice de argila, de Bouyouco (1935); Índice de Estabilidade de Monier e Combeau (1961); WSA de Bryan (1976); WSA de 0,25 % Yamamoto (1978), *apud* Morgan (1995) e Mettervicht (1996).

A massa específica seca de campo (ρ_d) e a massa específica natural (ρ) foram determinadas conforme ZUQUETTE (1987), e consistem basicamente na retirada de amostras indeformadas em anéis rígidos de PVC, com volume interno conhecido. Com o volume interno do anel e o peso do solo mais água e solo seco, calcula-se os índices massa de acordo com as equações 5 e 6 :

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_i} \quad (5)$$

Onde:

ρ_d = massa específica seca de campo (g/cm^3);

m_s = massa de solo seco (g);

V_i = volume interno do anel (cm³).

$$\rho = \frac{m_s + m_a}{V_i} \quad (6)$$

Onde:

ρ = massa específica de campo (g/cm³);

m_s = massa de solo seco (g);

m_a = massa de água (g);

V_i = volume interno do anel (cm³).

A massa específica dos sólidos (ρ_s) foi obtida conforme a ABNT NBR 6508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984).

Os índices de vazios (e), porosidade (n) foram calculados pelas seguintes correlações apresentadas nas equações 7 e 8:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (7)$$

Onde:

e = índice de vazios do solo;

ρ_s = massa específica dos sólidos (g/cm³);

ρ_d = massa específica seca de campo (g/cm³).

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (8)$$

Onde:

n = porosidade do solo (%);

e = índice de vazios do solo.

4.3.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Na caracterização química dos materiais inconsolidados foram realizados os ensaios de adsorção de Azul de Metileno, teores de cátions trocáveis por fotômetro de chama, pH, Eh e condutividade elétrica.

4.3.2.2.1 ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO

O ensaio de adsorção de azul de metileno (fórmula química: $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$) foi realizado com papel de filtro, conforme descrito por Pejon (1992). Consistindo basicamente, na determinação, por titulação, do volume máximo de solução de azul de metileno padronizada, que é necessária para substituir os cátions de Na^+ , Ca^+ , K^+ , Mg^{2+} e H_3O^+ , absorvidos nos argilo-minerais de uma solução aquosa de solo. A amostra a ser ensaiada deve ser deixada ao ar para secar, depois destorroada, e peneirada a seco, sendo ensaiado o material que passar na peneira #200. A execução do ensaio pode ser resumidamente descrita pela seqüência de trabalhos apresentados na Figura 8.

Deve-se lembrar que no início do ensaio é retirada uma pequena porção da amostra para determinação do teor de umidade

No chamado “ponto de virada”, ou seja, quando a solução solo/água (também chamada de solução titulada), torna-se saturada de corante, não há mais a adsorção de corante pela mesma, ocorre o aparecimento da aura (mancha clara ao redor da gota no papel), como se pode observar na Figura 9.

Com os volumes de corante gastos durante os ensaios, foram calculados os valores de CTC, SE do material, Vb (Valor de Azul de Metileno Adsorvido) e Acb (Índice de Atividade da Fração Argilosa), por meio das equações 9 a 12:

$$CTC = \frac{V \times C \times 100}{m_s} \quad (9)$$

Onde:

CTC = capacidade de troca de cátions (meq/100g);

V = volume gasto da solução de azul de metileno na titulação (mℓ);

m_s = massa de solo seco (g).

$$SE = \frac{3,67 \times V}{m_s} \quad (10)$$

Onde:

SE = superfície específica do material (m²/g);

V = volume gasto da solução de azul de metileno na titulação (mℓ);

m_s = massa de solo seco (g).

Figura 8 - Fluxograma com as etapas do ensaio de adsorção de Azul e metileno

Figura 9 - Exemplos de possíveis mancha nos teste de adsorção de Azul de Metileno.

$$V_b = \frac{C \times V}{10 \times m_s} \quad (11)$$

Onde:

V_b = massa de azul de metileno necessária para recobrir as partículas de um solo, para cada 100g de solo (g/100g de solo);

C = concentração da solução de azul de metileno (g/ℓ);

V = volume gasto da solução de azul de metileno na titulação (mℓ);

m_s = massa de solo seco (g).

$$A_{cb} = \frac{100 \times V_b}{C_2} \quad (12)$$

Onde:

A_{cb} = índice de atividade da fração argilosa (g/100g de argila);

V_b = massa de azul de metileno necessária para recobrir as partículas de um solo, para cada 100g de solo (g/100g de solo);

C_2 = porcentagem de argila.

4.3.2.2.2 DETERMINAÇÃO DE CÁTIOS TROCÁVEIS POR FOTOMETRO DE CHAMA

Os ensaios de extração de cátions trocáveis (Ca^+ , Na^+ e K^+), foram realizados com base em Camargo *et al.* (1986), e consiste basicamente na extração dos destes cátions presentes em uma amostra de materiais inconsolidados por meio da reação com acetato de amônia e leitura dos teores em um fotômetro de chamas.

Os resultados obtidos foram analisados pela metodologia de Sherard *et al.* (1976), que se fundamenta na classificação das argilas em três zonas distintas conforme a sua tendência à dispersão: zona não dispersiva, zona intermediária e zona dispersiva.

4.3.2.2.3 - DEMAIS ENSAIOS QUÍMICOS REALIZADOS

Os ensaios de pH, Eh, condutividade elétrica e cátions trocáveis (Ca^+ , Na^+ e K^+) foram realizados com base em Camargo *et al.* (1986).

Foram realizadas duas determinações de pH e Eh, uma com água destilada e outra com KCl.

O pH segundo Camargo *et al.* (1986), reflete um conjunto complexo de reações no sistema solo, sendo o ΔpH calculado pela equação 13:

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (13)$$

Onde:

ΔpH = diferença entre o pH na solução solo mais KCl e o pH na solução solo mais água destilada;

pH_{KCl} = potencial de hidrogênio medido na solução solo mais cloreto de potássio;

$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ = potencial de hidrogênio medido na solução solo mais água destilada.

4.3.2.2.3 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

O índice de erodibilidade foi obtido de acordo com a metodologia de Nogami e Villibor (1979). Este procedimento é constituído por dois ensaios distintos: ensaio de absorção de água, onde se obtém o índice absorção (S) e o ensaio de perda de massa por imersão, através do qual se obtém o índice de mesmo nome, índice de perda de massa por imersão (P).

Os valores obtidos nestes ensaios são anotados em fichas, de acompanhamento elaborado especialmente para este trabalho, Figura 10.

4.3.2.2.3.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO

A amostra de solo indeformada após secagem ao ar, até a estabilização de sua massa, é colocada sobre o aparelho de ensaio, que pode ser observado na Figura 11, iniciando-se dessa forma a leitura de água absorvida a cada 5 segundos.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC Departamento de Geotecnia -SGS					
ENSAIO DE ERODIBILIDADE					
Informações de identificação					
Ponto:			Coordenadas:		
Informações do anel de PVC					
Massa:	g	ϕ :	cm		
H:	cm	R:	cm		
Informações do anel de PVC + Solo					
Massa anel + solo:	g	Área da base:	cm ²		
Massa solo:	g	Volume:	cm ³		
Absorção de água					
Tempo (segundos)	Tempo (minutos)	Leitura aparelho (cm)	Volume absorvido (cm ³)	q (volume/área da base)	$\sqrt{t}$
0					
5					
10					
15					
20					
25					
30					
35					
40					
45					
50					
55					
60					
65					
70					
Perda de peso por imersão					
Massa perdida de solo em 24hs:			g		
Massa de solo perdida (%) em relação a massa inicial			%		
Perda de peso por imersão					
$E_{(NOGAMI \& VILLIBOR, 1979)} = 52 \cdot S/P$ $E_{(PEJON, 1979)} = 40 \cdot S/P$			$\Rightarrow$ $\Rightarrow$		
Solos com $E < 1$ = Alta erodibilidade (NOGAMI & VILLIBOR, 1979)					
$E < 1$ = material erodível $E > 1$ = mat. não erodível					
PEJON (1992)					

Absorção de água em função do tempo

Coeficiente angular =

Figura 10 – Ficha utilizada durante os ensaios de erodibilidade.

Figura 11 - Aparelho de absorção de água utilizado no ensaio de erodibilidade.

Para a obtenção do coeficiente S , é elaborado um gráfico do volume de água absorvido por unidade de área da base do corpo de prova (q) em função da raiz quadrada do tempo ($\sqrt{t}$). Os pontos plotados no gráfico tendem a uma reta, e o coeficiente angular dessa reta, é igual ao coeficiente S .

4.3.2.2.3.2 ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

Após o ensaio de absorção, à amostra ensaiada tem uma pedra porosa colocada na extremidade que estava em contato com o sistema de absorção. Em seguida, imerge-se o conjunto em um recipiente com água até que o topo da amostra fique na posição horizontal, a aproximadamente 2 mm do nível da água, até que não haja mais modificações de umidade no topo da amostra. A amostra então, é suspensa e colocada na posição vertical, e depois é imersa dentro do recipiente em um suporte. A massa perdida de solo é retida em um

recipiente menor, por 24 horas, como pode ser observado na Figura 12 e Figura 13. Após o tempo de imersão determina-se a porcentagem de perda de solo em relação à massa inicial.

Figura 12 - Sistema de armazenamento de massa perdida durante as 24 horas de imersão.

Figura 13 - Detalhe da suporte utilizado no ensaio de perda de massa por imersão.

CAPITULO 5 - LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

A área em estudo trata-se da bacia hidrográfica do Ribeirão Samambaia, com aproximadamente 60 km², localizada na região dos municípios de São Pedro e Águas de São Pedro, Estado de São Paulo, Figura 14, entre os meridianos 47° 53' 38'' e 47° 57' 35'' W e paralelos 22° 40' 00'' S.

Figura 14 - Mapa de localização da bacia do Ribeirão Samambaia.

O acesso, a partir de São Carlos, se dá pela Rodovia Washington Luís, até a cidade de Rio Claro, e depois pela Rodovia SP 191

até São Pedro. Partindo-se de um dos principais municípios do Estado de São Paulo, o acesso, pode-se dar pelas seguintes trajetórias presentes na Figura 15.

Figura 15 – Mapa com estradas de acesso a área de estudo partindo-se dos principais município do estado de São Paulo.

5.1 GEOLOGIA

A região em estudo encontra-se geologicamente inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, aflorando as litologias das Formações Itaqueri (arenitos), Pirambóia (arenitos), Botucatu (arenitos eólicos), e Serra Geral (basaltos), sendo que recentemente a região foi apeada por Pejon (1992) e Pejon e Zuquette (1996).

A Formação Pirambóia, conforme Fiori (1980), ocupa maior parte da quadrícula de São Pedro, é representada por arenitos do período Triássico.

Segundo Fiori (1980), a Formação Botucatu é representada por depósitos de idade Triássica, formados em condições severas, clima árido, é composta por arenitos eólicos, de coloração amarelada, granulometria variando entre fina a média, com grãos bem arredondados, apresentam estratificações cruzadas de médio à grande porte.

Ainda segundo Fiori (1980), a Formação Serra Geral, é constituída por derrames basálticos, que se sobrepõem aos arenitos da Formação Botucatu, são muito fraturados e apresentam coloração cinza escura a preta, com textura afanítica.

5.2 GEOMORFOLOGIA

De acordo com IPT (1981), a geomorfologia desta área pode ser dividida em três grandes compartimentos: Cuestas Basálticas, Planalto Ocidental (alto da Serra de São Pedro, Figura 16) e Depressão Periférica (Figura 17). Já Ross e Moroz (1997), classificaram a região em: Planalto Ocidental Paulista e a Depressão Periférica, e a unidade morfoestrutural de bacias sedimentares cenozóicas.

Figura 16 - Alto da Serra de São Pedro.

Figura 17 - Depressão Periférica vista do alto da Serra de São Pedro.

5.3 A EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA.

A ocupação dos solos na Bacia do Ribeirão Samambaia teve uma grande expansão nos últimos vinte anos. O uso do solo inicialmente vinculado às práticas da agricultura e da agropecuária perdeu espaço para a urbanização.

Em um estudo de fotointerpretação com fotografias aéreas de duas épocas distintas, anos de 1972 e 1995, pode-se observar a evolução do uso e ocupação dos solos nesta região. Observou-se, também, que a delimitação da área urbana avançou sobre áreas propensas a processos erosivos, tais como as margens de diversos afluentes do Ribeirão Samambaia e de suas planícies de inundação.

5.3.1 SETOR NORTE DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

A grande expansão urbana ocorreu no setor Norte da bacia, entre o período analisado, Figura 18, interior da área retangular "A". Este aumento ocorreu às margens do Ribeirão, sendo ele e alguns de seus afluentes canalizados e/ou curso de suas águas alteradas.

Figura 18 - Fotografias aéreas do setor norte da Bacia do Ribeirão Samambaia, dos anos de 1972 e 1995, respectivamente.

Fonte: Levantamento aéreo de agosto de 1972, escala original 1:25.000, IBC - GERCA. Levantamento aéreo de junho de 1995, escala original 1:25.000, SEMAE - BASE S.A.

Nos círculos "B", "C", "D" e "E" pode-se observar o avanço urbano sobre as margens de alguns afluentes do ribeirão. Nas áreas "C" e "E" são visíveis feições de dessecação, provavelmente de origem erosiva. Na parte esquerda do círculo "C", foto de 1995, esta presente um terraceamento com intuito de estabilizar uma encosta. Já dentro da área circular "E", que demarca um trecho da calha principal do ribeirão, é possível constatar em sua margem um aumento no volume de sedimentos e diminuição da mata ciliar entre no período analisado.

5.3.2 SETOR CENTRO-NORTE DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

Na área demarcada pelo retângulo "F", na Figura 19 observa-se novamente a grande expansão ocorrida no período analisado.

Dentro da área circular "G" observa-se à expansão urbana nas margens de um afluente do ribeirão, neste ponto está presente o material inconsolidado que apresentou os índices de erodibilidade mais críticos. O leito principal do ribeirão, como pode se observado, foi alterado pela ocupação urbana, o que provavelmente, ocasionou um aumento no volume de sedimentos depositados na região. Ainda no interior do círculo "G", em 2002, como pode ser observado na Figura 20, foi encontrada e delimitada uma voçoroca, no Haras Vila Rica, com vários níveis intercalados de materiais inconsolidados muito arenosos e um nível com predomínio de matéria orgânica.

O setor demarcado pela junção do retângulo e do círculo apresenta feições erosivas em ambas as fotos, porém com uma considerável evolução na foto do ano de 1995.

Figura 19 - Fotografias aéreas do setor Centro-norte da Bacia do Ribeirão Samambaia, dos anos de 1972 e 1995 respectivamente.

Fonte: Levantamento aéreo de agosto de 1972, escala original 1:25.000, IBC - GERCA. Levantamento aéreo de junho de 1995, escala original 1:25.000, SEMAE - BASE S.A.

Figura 20 – Fotografia da voçoroca no Haras Vila Rica em 2002. Setas indicam diferentes camadas de materiais diferenciados.

5.3.3 SETOR CENTRO-SUL DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

Na área delimitada pelo retângulo “H” na Figura 21, próxima ao aeroclube de São Pedro, pode-se ver que entre o período das duas fotos foi locado de um pequeno condomínio residencial.

A expansão urbana no centro do município de Águas de São Pedro, entre 1972 e 1995, está delimitada no retângulo “I”. Em 1972, havia apenas o arruamento e algumas poucas construções, já em 1995, toda a área foi ocupada por construções.

Figura 21 - Fotografias aéreas do setor Centro - Sul da Bacia do Ribeirão Samambaia, anos de 1972 e 1995, respectivamente. Fonte: Levantamento aéreo de agosto de 1972, escala original 1:25.000, IBC - GERCA. Levantamento aéreo de junho de 1995, escala original 1:25.000, SEMAE - BASE S.A.

A delimitação do círculo “J” mostra a ocupação de uma área entre afluentes do Ribeirão Samambaia que foi ocupada entre o período de registro das duas fotos por um condomínio de pequenas chácaras. A área indicada por uma seta, próxima ao ponto Centro-Sul de monitoramento hidrológico, assinala a deposição de um grande volume de sedimentos na calha do ribeirão no ano de 1995. A manutenção desta tendência em acumular sedimentos no ano de 2001 pode ser observada na Figura 22 por meio de foto aérea, e em 2002 por fotografia, Figura 23.

Figura 22 - Foto aérea com pontos de deposição de sedimentos, indicados pela s setas.

Fonte: Projeto FAPESP – SGS/USP “Elaboração de cartas de eventos perigosos e riscos associados aos processos erosivos”. Ano de 2001.

Figura 23 – Área com deposição de sedimentos no ano de 2002.

5.3.4 SETOR SUL DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

Na Figura 24 pode-se observar no setor indicados pela seta o aumento no volume de sedimento depositado nas margens do ribeirão.

Figura 24 - Fotografias aéreas do setor Sul da Bacia do Ribeirão Samambaia, dos anos de 1973 e 1995, respectivamente.

Fonte: Levantamento aéreo de agosto de 1972, escala original 1:25.000, IBC – GERCA. Levantamento aéreo de junho de 1995, escala original 1:25.000, SEMAE – BASE S.A.

5.4 CLIMA

De acordo com Facincani e Cavalleiro (1995), a região em estudo apresenta clima tropical com duas estações bem definidas, Seca – Fria e Quente – Úmida, sendo que a primeira compreende os meses de Abril

Nos círculos “B”, “C”, “D” e “E” pode-se observar o avanço urbano sobre as margens de alguns afluentes do ribeirão. Nas áreas “C” e “E” são visíveis feições de dessecação, provavelmente de origem erosiva. Na parte esquerda do círculo “C”, foto de 1995, esta presente um terraceamento com intuito de estabilizar uma encosta. Já dentro da área circular “E”, que demarca um trecho da calha principal do ribeirão, é possível constatar em sua margem um aumento no volume de sedimentos e diminuição da mata ciliar entre no período analisado.

5.3.2 SETOR CENTRO-NORTE DA BACIA DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

Na área demarcada pelo retângulo “F”, na Figura 19 observa-se novamente a grande expansão ocorrida no período analisado.

Dentro da área circular “G” observa-se à expansão urbana nas margens de um afluente do ribeirão, neste ponto está presente o material inconsolidado que apresentou os índices de erodibilidade mais críticos. O leito principal do ribeirão, como pode se observado, foi alterado pela ocupação urbana, o que provavelmente, ocasionou um aumento no volume de sedimentos depositados na região. Ainda no interior do círculo “G”, em 2002, como pode ser observado na Figura 20, foi encontrada e delimitada uma voçoroca, no Haras Vila Rica, com vários níveis intercalados de materiais inconsolidados muito arenosos e um nível com predomínio de matéria orgânica.

O setor demarcado pela junção do retângulo e do círculo apresenta feições erosivas em ambas as fotos, porém com uma considerável evolução na foto do ano de 1995.

Figura 19 - Fotografias aéreas do setor Centro-norte da Bacia do Ribeirão Samambaia, dos anos de 1972 e 1995 respectivamente.

Fonte: Levantamento aéreo de agosto de 1972, escala original 1:25.000, IBC - GERCA. Levantamento aéreo de junho de 1995, escala original 1:25.000, SEMAE - BASE S.A.

CAPITULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISES DO MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DO RIBEIRÃO SAMAMBAIA

Antes de iniciar este capítulo, deve-se deixar claro, que esta pesquisa não teve como objetivo a criação de um modelo para a descarga de sedimentos do Ribeirão Samambaia, uma vez que o período de análise foi pequeno para tal. Pretendeu-se apenas obter algumas informações sobre o comportamento dos sedimentos nesta bacia: se, eram logo carregados para fora, ou se ficavam depositados em algum ponto; e quando estes sedimentos eram então eliminados.

Este monitoramento foram realizadas as seguintes atividades:

- acompanhamento da precipitação diária;
- medidas de velocidade da lâmina d'água';
- mapeamento das variações dos perfis das seções;
- coleta de sedimentos e água;
- análises químicas.

6.1 RESULTADOS E ANÁLISES

Durante o período compreendido entre os meses de janeiro a maio de 2002, foi possível observar o comportamento da lâmina

d'água no ribeirão. Os extremos (as maiores variações nos perfis), para cada uma das quatro seções podem ser observados nas figuras 27, 28, 29 e 30.

Figura 27- Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Norte.

Figura 28 -Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Centro-Norte.

Figura 29 - Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Sul.

Figura 30 - Variação da lâmina de água do Ribeirão Samambaia na seção Centro-Sul.

Observou-se que, exceto para a seção Centro Norte, o mês que apresentou as maiores lâminas de água durante o período de

observação foi o de março. A maior cheia ocorreu no perfil da seção Sul, na data de 15 de março, e foi observado, durante um pico de descarga de sedimentos, após uma chuva intensa e incomum na região para a época do ano.

A análise pluviométrica compreendeu o período de 25 de novembro de 2001 a 28 de Fevereiro de 2002. As leituras eram realizadas a cada 6 horas, o que totalizou 380 medidas de precipitação na bacia. A distribuição diária das precipitações durante o período está representada na Figura 31, onde é possível observar uma tendência a precipitações inferiores a 30 mm. A maior precipitação diária registrada ocorreu no dia 15 de Março de 2002, quando a precipitação registrada chegou a 60 mm.

Figura 31 -Precipitação diária durante o período de monitoramento.

Para a comparação com os resultados das análises preferiu-se as precipitações diárias acumuladas até o momento de coleta, uma vez que: uma chuva de pouca intensidade se antecedida por outras que já proporcionaram a saturação do solo, pode levar a um fluxo superficial

com arraste de sedimentos, ou uma enchente, no caso de leitos de rios. O comportamento acumulado da precipitação diária antes das coletas está apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Precipitação diária acumulada antes do momento das coletas.

O volume de material coletado nas quatro seções, durante o período de monitoramento pode ser observado na Figura 33. No dia 15 de março quando foi observada a maior precipitação do período, houve uma sensível queda nos sedimentos coletados, apontado pela seta "A" na seção Centro-sul, o que provavelmente ocorreu devido ao transporte dos sedimentos que estavam depositados neste ponto do canal. Para seção Sul, os volumes de sedimentos, para este mesmo período, apresentaram uma pequena alta, conforme apontado pela seta "B".

Figura 33 - Variação na quantidade de sedimento coletados nas quatro seções monitoradas na Bacia do Ribeirão Samambaia.

A velocidade do fluxo das águas no canal, influência muito nos teores de sedimentos coletados, como pode ser observado nos pontos marcados com círculos na Figura 34. Os teores assinalados pelo círculo "1", com queda no volume coletado, a velocidade média obtida não ultrapassa 0,45 m/s. Os teores assinalados pelo círculo "2" correspondem a uma queda na taxa de coleta e na velocidade média das seções.

A variação da velocidade média obtida nas seções em cada dia de monitoramento pode ser observada na Figura 34. As maiores velocidades foram obtidas na seção sul, e as menores na seção Centro-Norte.

No dia 15 de março também foram observados um pico de velocidade na seção sul, e um aumento considerável na tendência da velocidade da seção Centro-sul, juntamente a baixas velocidades

obtidas nas demais seções. Este comportamento pode ser explicado pela morfologia e tipo de bacia em estudo, que apresenta como característica um fluxo rápido das águas das chuvas, e a tendência à acumulação de sedimentos junto aos canais.

Figura 34 - Variação das velocidades médias obtidas nas seções.

No tocante às análises químicas, foram realizados quatro ensaios: pH e Eh, e teores dos cátions (Na^+ e K^+). Os resultados foram comparados em gráficos, com a precipitação diária (mm) acumulada até a hora da coleta.

O comportamento dos teores de Na^+ em conjunto com a precipitação está apresentado na Figura 35. É possível observar que ocorre uma tendência ao aumento das concentrações desse cátion nos períodos com menores precipitações. As seções Centro-sul e sul foram as que apresentaram os maiores teores de Na^+ .

No dia 15 de março de 2001 houve uma visível queda nos teores de Na^+ para todas as quatro seções, o que pode ser explicado pela

diluição destes devido à alta precipitação.

Figura 35 - Variação dos teores de Na^+ em relação a precipitação.

As maiores concentrações de K^+ foram obtidas nas seções Centro-sul e Sul, conforme pode ser observado na Figura 35. Na data de 15 de março, não houve um aumento em teores desses cátions, apenas a inversão nos valores entre as seções Centro-sul e Sul, o que pode ser relacionado ao maior poder de transporte da lamina d'água ocorrido na bacia devido à forte precipitação.

Figura 1 -Variação dos teores de K^+ em relação a precipitação.

O comportamento de condutividade elétrica nas seções Norte, Centro-sul e sul, foi muito semelhante, principalmente entre o período o início de janeiro e o final de março, conforme pode ser visualizado na Figura 36. Porém o comportamento da seção Centro-norte foi totalmente diferente, com os seus valores mínimos superando os maiores valores das demais seções.

No dia 15 de março de 2001, observou-se um aumento na condutividade para as seções Norte, Centro-sul e sul, e um pico na Centro-norte. Este pico pode ser explicado pelo aumento na concentração de cátions de K^+ , conforme indicado anteriormente.

Figura 36- Valores de condutividade elétrica.

Para os menores valores de pH, Figura 37, temos a seção sul e para os maiores a seção Centro-norte. Durante a precipitação intensa ocorrida no dia 15 de março de 2001, houve uma queda de pH para todas as seções, principalmente, para as seções Norte, Centro-Sul e Sul.

Os valores de Eh também, Figura 38, sofreram uma queda considerável, sendo a maior variação, presente na seção Centro-norte.

Figura 37 - Comportamento do pH da água do Ribeirão Samambaia.

Figura 38 - Comportamento do Eh da água do Ribeirão Samambaia.

CAPITULO 7 – MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Foram mapeados dez tipos de materiais inconsolidados na Bacia do Ribeirão Samambaia, sendo que destes, nove foram descritos e caracterizados. A distribuição espacial de cada material inconsolidado pode ser observada no ANEXO II.

Os materiais foram inicialmente classificados em dois tipos, de acordo com a sua origem em residuais ou retrabalhados, sendo que os primeiros, os **residuais**, são aqueles formados pela alteração *in situ* das rochas; e os **retrabalhados**, como o próprio nome diz, são originários, do retrabalhamento de materiais procedentes de rochas e lugares diferentes.

7.1 MATERIAIS INCONSOLIDADOS RESIDUAIS

Os materiais inconsolidados classificados como residuais, como já conceituado acima, são encontrados diretamente sobre as rochas que lhe deram origem, não ocorrendo atuação de nenhum agente de transporte. Foram encontrados quatro diferentes tipos de materiais inconsolidados residuais, sendo que destes, por motivos de acesso, apenas três foram descritos e analisados, são eles: arenosos da Formação Pirambóia, arenosos da Formação Botucatu, e argilo - siltosos da Formação Serra Geral.

7.1.1 ARENOSOS DA FORMAÇÃO PIRAMBÓIA

Os materiais inconsolidados arenosos da formação Pirambóia, estão presentes em mais de 50% da área da bacia. O perfil típico pode ser sistematizado em: rocha sã, rocha alterada e solo residual. Apresentam coloração, predominantemente ocre, sendo possível, ainda, encontrar camadas de coloração mais escuras, tendendo para o avermelhado.

Apresenta como mineralogia principal visível a olho nu o quartzo; granulometricamente são solos arenosos variando entre médio a fino, os valores de CTC por azul de metileno são baixos, o ρ_s varia entre 2,66 e 2,7 g/cm³, valores próximos ao do quartzo. Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão apresentados no anexo III.

Para os ensaios de absorção de água, foi obtido um conjunto de dados, que para uma melhor visualização foram separados aleatoriamente em duas figuras (Figuras 39 e 40).

Os valores para a obtenção dos valores de perda de massa por imersão estão presentes na Tabela 9. Nesta é possível observar que, em geral, as amostras tiveram pequenas perdas de massa durante o ensaio.

Estas pequenas perdas podem ser explicadas pela presença de agregados, de raízes e de cimento proveniente da rocha fonte, que fazem com que mais material fique retido no anel durante o ensaio. Nas imagens, Figura 41 e pertencente à amostra nº 24, e Figuras 42 e 43, pode-se observar a presença de raízes e outros tipos de matéria orgânica. Na Figura 44, imagem da amostra nº 24, e na Figura 45,

imagem da amostra nº 14, pode-se conferir a presença do cimento atuando com agente aglutinador. A presença de agregados, pode ser constatada nas Figura 46, 47 e 49 da amostra nº 24 e 50 da amostra nº25.

Figura 39 - Curva de absorção de água dos materiais inconsolidados arenosos da Formação Pirambóia.

Figura 40 - Curvas de absorção de água

Tabela 9 – Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA Nº	PERDA DE MASSA (%)
3A	5,50
3B	4,91
15A	6,34
15B	4,42
19A	2,24
19B	10,68
19C	7,94
24A	2,34
25A	0,47
25B	0,61

Figura 41 - Imagem da amostra nº 24 obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta indicando resquícios de uma raiz.

Figura 42 - Imagem da amostra nº 15, obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta indicando resquícios de uma raiz.

Figura 43 - Imagem da amostra nº 15, obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta indicando resquícios de uma raiz.

Figura 44 - Imagem da amostra nº 14, obtida por meio de microscopia eletrônica com de matéria orgânica

Figura 45 - Imagem da amostra nº 24. Seta assinalando cimento argiloso entre os grãos de quartzo.

Figura 46 - Imagem da amostra no 24 obtida por meio de microscopia eletrônica. Seta assinalando cimento argiloso entre os grãos de quartzo.

Figura 47 - Imagem da amostra nº 14, obtida por meio de microscopia eletrônica, com o contato entre o material quartzoso predominante na amostra e uma lente constituída por quartzos e cimento argiloso de cor avermelhado.

Figura 48 - Imagem da amostra no 24, obtida por meio de microscopia eletrônica, onde é possível observar a formação de agregados.

Figura 49 - Imagem obtida por meio de microscópio eletrônico da amostra nº 24, onde pode-se observar a formação de agregados.

Figura 50 - Imagem da amostra nº 25, obtida por meio de lupa eletrônica, observar a presença de agregados.

O comportamento do perfil onde foi realizada a amostragem nº 15, frente ao ensaio de penetração do cone, encontra-se representado graficamente na Figura 51.

Figura 51 - Resultado do ensaio de penetração do cone no perfil onde foi realizada a amostragem nº15.

7.1.2 ARENOSOS DA FORMAÇÃO BOTUCATU

Estes materiais inconsolidados são encontrados na meia encosta da escarpa da Serra de São Pedro, e, algumas vezes, podem estar recobertos pelos materiais inconsolidados do tipo cones argilosos arenosos.

São solos arenosos, Figura 52, com coloração variando entre ocre a róseo, encontrados diretamente sobre os arenitos da Formação Botucatu, dos quais são originários. Estão associados a perfis com pequena espessura, variando entre 0,40 a 1 metro.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão apresentados no Anexo III, mas em geral são solos arenosos, com CTC médio por azul de metileno em torno de 2,18 meq/100g e massa específica com valor de 2,7 g/cm³.

Figura 52 – Materiais inconsolidados arenosos e os arenitos da Formação Botucatu.

A Figura 53 apresenta a curva de obtenção do índice de absorção para as amostras desse material; nela observa-se a semelhança no comportamento das amostras quanto a esta propriedade. Os valores de perda de massa podem ser conferidos na Tabela 10.

Figura 53 - Curvas de absorção de água.

Tabela 10 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA	PERDA DE MASSA
Nº	(%)
10A	3,59
10B	3,82
30A	3,90
30B	4,60

Para este tipo de material inconsolidado, devido a problemas operacionais, não foram realizados ensaios de penetração do cone.

7.1.3 ARGILO – SILTOSOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL

Estes materiais inconsolidados são originados das rochas

basálticas pertencentes à Formação Serra Geral. Geralmente, formam perfis pouco espessos, em torno de 1,0 metro de espessura. Apresentam coloração, variando de vermelho-escuro para o marrom, e camada orgânica desenvolvido. Sua ocorrência é, predominante, no Setor Norte da bacia, na parte superior da Serra de São Pedro, na Vila de Santo Antônio.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão no Anexo III. Em geral são argilo-siltosos com certa contribuição da fração areia, os valores de CTC por azul de metileno variam entre 5,86 e 2,36 meq/100g de solo, e massa específica dos sólidos na faixa de 2,85 g/cm³.

A Figura 54 apresenta as curvas obtidas nos ensaios de absorção para estas amostras. Pode-se observar a pequena variação entre as diferentes repetições realizadas para amostra nº 7.

Os valores obtidos no ensaio de perda de massa por imersão podem ser observados na Tabela 11. Onde se observa a grande variação nestes valores, o que pode ser explicado pelas raízes presentes em algumas amostras.

O comportamento do perfil onde foi realizada a amostragem nº 7, frente ao ensaio de penetração do cone, encontra-se na Figura 55.

Figura 54 - Curvas de absorção de água .

Tabela 11 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA	PERDA DE MASSA
Nº	(%)
6A	29,81
6B	12,95
6D	13,94
7A	0,95
7B	2,70
7C	4,45

Figura 55 - Resultado do ensaio de penetração do cone no perfil onde foi realizada a amostragem nº 7.

7.2 MATERIAIS INCONSOLIDADOS RETRABALHADOS

Os materiais inconsolidados retrabalhados, são aqueles, originados do retrabalhamento de materiais procedentes de rochas e lugares diferentes, e que sofreram a ação dos agentes de transporte.

Foram descritos e analisados seis diferentes tipos de materiais inconsolidados retrabalhados. São eles: arenosos em topo, arenosos com pedregulho, cones argilo e arenosos, arenosos da serra, e aluviões com matéria orgânica.

Em campo foram encontradas feições erosivas nos seguintes materiais: arenosos em topo, arenosos com pedregulho, arenosos da serra e aluviões com matéria orgânica.

7.2.1 ARENOSOS EM TOPO

Estes materiais inconsolidados estão presentes nos topos dos morros, morrotes e colinas. São solos arenosos, com contribuição de argila e silte, constituídos principalmente por quartzo; apresentam coloração ocre, mas é possível, em alguns casos encontrar camadas de solos com coloração mais avermelhada, Figura 56, podendo até mesmo tender para o marrom, o que depende, principalmente, do cimento presente.

Em alguns pontos podem ser observadas superfícies endurecidas, concreções de óxido de ferro e linhas de seixo com espessura decimétrica.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão no Anexo III. São materiais arenosos, com valores de CTC por azul de metileno não ultrapassando a 3,00 meq/100g de solo, e massa específica dos sólidos em torno de 2,70 g/cm³.

Figura 56 - Talude nas proximidades do aeroclube mostrando um perfil constituído pelo material inconsolidado arenosos em topo.

Na Figura 57, são apresentadas as curvas para a obtenção do

índice de absorção, nota-se a pouca variação para os valores das entre as amostras de retiradas na mesmo ponto de amostragem. Porém torna-se possível separar o conjunto de amostras em dois grupos distintos. Esta diferenciação se dá pela variação espacial dos materiais e pelos diferentes graus de desenvolvimento dos perfis em que foram coletadas as amostras. As coletadas de perfis mais desenvolvidos apresentam uma maior capacidade de absorção de água pelos materiais.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores para as perdas de massa obtidas durante 24 horas de imersão.

Exceto para as repetições da amostras nº 13, as perdas obtidas são relativamente altas, ultrapassando valores de 50%. A pequena perda de massa para as repetições da amostra nº 13 deve-se a pouca profundidade com que foram coletadas e a presença de muitas raízes.

Para estes materiais inconsolidados, devido a problemas operacionais, não foram realizados os ensaios de penetração do cone.

Figura 57 - Curvas de absorção de água.

Tabela 12 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA Nº	PERDA DE MASSA (%)
2A	80,57
2B	76,19
2C	57,38
13A	2,13
13B	0,88
13C	0,76
13D	0,89
17A	61,64
17B	52,67
17C	50,63
23A	27,20
23B	27,32

Nas Figuras 58 a 65, é possível observar algumas imagens da amostra nº18 onde são visíveis as presenças de agregados e de raízes, assim como a interação da argila, agindo como agente cimentante.

Figura 58 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica, com presença de raízes e de óxidos e de argila atuando como material cimentante.

Figura 59 - Detalhe figura anterior, área assinalada por um quadrado. Setas apontando cimento argiloso e a presença de raiz.

Figura 60 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica. Setas apontando cimento e quartzo.

Figura 61 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica, mostrando a presença de um agregado, contornado pela linha branca.

Figura 62 - Detalhe figura anterior, área assinalada por um quadrado, mostrando os grãos de quartzo formando agregados.

Figura 63 - Imagem da amostra nº 23, obtida por meio de microscopia eletrônica. Observar os grãos de quartzo em meio a uma matriz orgânica.

Figura 64 - Imagem da amostra nº 23, obtida por meio de microscopia eletrônica. Observar os grãos de quartzo em meio a uma matriz orgânica.

Figura 65 - Imagem da amostra nº 18, obtida por meio de microscopia eletrônica mostrando a presença de um agregado.

7.2.3 ARENOSOS COM PEDREGULHO

O perfil típico deste tipo de material inconsolidado apresenta um horizonte orgânico de espessura extremamente delgada, sobreposto a um arenoso, avermelhado, intercalado por níveis de espessura variando entre 15 a 50 cm, composto por pedregulhos de origem e diâmetros variados, como pode ser observado na Figura 66. Este tipo de material inconsolidado está presente à jusante da Bacia do Ribeirão Samambaia, onde foram encontradas feições erosivas, tais como sulcos e voçorocas.

Figura 66 - Material inconsolidado arenoso com pedregulho, observar níveis dessimétricos de pedregulho.

Figura 67 - Detalhe da figura anterior, mostrando o nível de pedregulho

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão no Anexo III. Os valores de CTC médios por azul de metileno variam entre 3,83 e 1,08 meq/100g de solo, e massa específica dos sólidos na faixa de 2,70 g/cm³.

Na Figura 68 estão apresentadas as curvas obtidas nos ensaios de absorção para este tipo de materiais inconsolidados. Nota-se a pouca variação entre as repetições das amostras.

Figura 68 - Curvas de absorção de água.

As perdas de material durante 24 horas de imersão estão apresentadas na Tabela 13, mostrando valores inferiores a 5%.

Tabela 13 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA Nº	PERDA DE MASSA (%)
4A	3,64
4C	3,32
8A	4,21
8B	3,99
8C	4,18

Deve-se salientar que para fins de caracterização foram analisados apenas os níveis de solo, excluindo os com níveis de pedregulhos.

O perfil onde foi realizada a amostragem nº 04 encontra-se na

Figura 69. A amostra indeformada que foi analisada em lupa e microscópio óptico eletrônico está presente na Figura 70.

Figura 69 - Afloramento onde foi realizada a amostragem nº 04.

Figura 70 - Amostra indeformada nº04, material inconsolidado arenoso com pedregulho, com setas apontando para lentes de material mais fino (argiloso).

Mesmo dentro dos níveis mais finos foram encontradas lentes com granulometria diferenciada. Está característica como pode ser visualizada nas Figuras 71 e 72.

Figura 71 - Imagem de uma lente com granulometria mais grossa na amostra nº 04, obtida por meio de microscopia eletrônica.

Figura 72 - Imagem de uma lente de material com granulometria mais grosseira na amostra nº 4, obtida por meio de microscopia eletrônica.

Na Figura 73, pode-se observar uma queda na resistência à penetração na profundidade de 30 cm, uma possível lente de material menos resistente, e a 160 cm ocorreu um aumento devido, possivelmente, à ocorrência de um nível com pedregulhos.

Figura 73 -- Comportamento o perfil do onde foi realizada a amostragem nº 4 frente ao ensaio de penetração do cone.

O perfil onde foi realizada a amostragem nº 8 encontra-se na Figura 74. Nela é possível observar um nível de pedregulho e o local onde a amostragem foi realizada. Este mesmo perfil apresentou o comportamento mostrado na Figura 75, frente ao ensaio de penetração do cone.

Figura 74 -- Comportamento o perfil do onde foi realizada a amostragem nº 4 frente ao ensaio de penetração do cone.

Figura 75 - Perfil onde foi realizada a amostragem nº8.

7.2.4 CONES ARGILOSOS E ARENOSOS

Esta classe de materiais inconsolidados retrabalhados apresenta solos argilo-arenosos, de coloração avermelhada tendendo, muitas vezes, para o marrom, com seixos de basaltos e arenitos, apresentando diâmetros variados. Estão localizados em faixas estreitas, na base da escarpa da Serra de São Pedro, e, muitas vezes, apresentam-se cobrindo a classe de materiais residuais arenosos da Formação Botucatu, Figura 76.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão no Anexo III. Apresentam valores de CTC por azul de metileno em torno de 1,24 meq/100g de solo, e massa específica dos sólidos em 2,76 g/cm³.

Figura 76 - Geomorfologia nas proximidades da cachoeira do Furna, as setas indicam a localização de alguns corpos de cones argiloso e arenosos.

Devido a problemas de logística, para este tipo de material não foi possível à realização de ensaios de cone.

Na Figura 77 estão apresentadas as curvas obtidas nos ensaios de absorção para este tipo de material inconsolidado.

Figura 77 - Curvas de absorção de água.

Na Tabela 14 são apresentados os valores de perda de massa por imersão desses materiais, que foram inferiores a 3,5%.

Tabela 14 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA Nº	PERDA DE MASSA (%)
11A	1.95
11B	1.90
11C	1.32
11D	3.2

7.2.5 ARENO - ARGILOSOS

Estes materiais inconsolidados encontram-se presente no sopé da escarpa da Serra de São Pedro, sendo constituída de solos areno-argilosos de coloração vermelho-escuro, formando perfis espessos, com presença de seixos de basaltos, de diâmetros em torno de 10 cm.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão no Anexo III. Estes materiais apresentam valores de CTC médios por

azul de metileno não ultrapassando o valor de 1,24 meq/100g de solo, e massa específica dos sólidos em 2,67 g/cm³. O gráfico para a obtenção do índice de absorção pode ser observado na Figura 78 e os teores de perda de massa por 24 horas de imersão na Tabela 15.

Devido a problemas de logística, para este tipo de material não foi possível à realização de ensaios de cone.

Figura 78- Curvas de absorção de água.

Tabela 15 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA Nº	PERDA DE MASSA (%)
12A	36,96
12B	40,20
12C	32,73
12D	40,08
12E	41,89

7.2.6 ARENOSOS DA SERRA

Estes materiais inconsolidados estão localizados no setor norte da área de estudos, próximo da Vila Santo Antônio, apresentam coloração amarelada, podendo variar para marrom-claro, sendo predominantemente arenosos, porém, com uma pequena contribuição de material argiloso. Em alguns pontos é possível observar alguns seixos de quartzo e basalto, com diâmetro não superior a 6,0cm. Em alguns locais, onde a cobertura vegetal foi removida, é possível observar algumas feições erosivas de pequeno porte.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão no Anexo III. Estes materiais apresentam valores de CTC médios por azul de metileno não ultrapassando o valor de 1,36 meq/100g de solo, e massa específica dos sólidos em 2,67 g/cm³. A amostra nº22 apresentou valor negativo para o ΔpH , provavelmente em consequência das pequenas concreções encontradas neste material.

O gráfico para a obtenção do índice de absorção pode ser observado na Figura 79, e os teores de perda de massa por 24 horas de imersão na Tabela 16 com teores próximos a 16% para a amostra nº 21 e próximos a 5,5% para amostra nº 22.

Devido a problemas de logística, para este tipo de material não foi possível à realização de ensaios de cone.

Figura 79 - Curvas de absorção de água

Tabela 16 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA	PERDA DE MASSA
Nº	(%)
21A	17,35
21B	15,49
22A	1,21
22B	5,69
22C	7,37
22D	6,52

7.2.7 ALUVIÕES COM MATÉRIA ORGÂNICA

Este tipo de material apresenta granulometria arenosa e com camadas que podem variar entre as cores cinza, róseo e amarelo, apresentando matéria orgânica disseminada por todo o solo, Figura 80. Por se tratarem de solos altamente arenosos e incoesos, a amostragem indeformada, neste caso, é extremamente dificultada, uma vez que estes solos, quando apresentam baixo teor de umidade, não podem ser moldados e fixados nos anéis de PVC.

Neste material são encontradas feições erosivas, tais como:

sulcos, ravinas e voçorocas, Figuras 80, 81 e 82.

Figura 80 - Amostragem dificultada pela falta de coesão do material. A seta indica um nível orgânico.

Figura 81 - Voçoroca em material inconsolidado.

Figura 82 - Vista para montante da voçoroca instalada neste material inconsolidado.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química estão no Anexo III. Estes materiais apresentam valores de CTC médios por azul de metileno não ultrapassando o valor de 0,63 meq/100g de solo, e massa específica dos sólidos em 2,67 g/cm³. O gráfico para a obtenção do índice de absorção pode ser observado na Figura 83, e os teores de perda de massa por 24 horas de imersão na Tabela 17, na qual pode-se observar que os teores de perda de massa são extremamente altos, chegando a valores superiores a 80 %.

Figura 83 - Curva de absorção de água dos materiais inconsolidados aluviões arenosos com matéria orgânica.

Tabela 17 - Perdas de massa após 24 horas de imersão.

AMOSTRA	PERDA DE MASSA
Nº	(%)
5A	81,32
5B	86,60
26A	45,53
27A	63,33

7.2.8 RESULTADOS E ANÁLISES

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para os índices de erodibilidade de bibliografias internacionais que têm como base a distribuição granulométrica, para quantificar a influência da presença de agregados e os teores de argila na erodibilidade de um determinado solo. Com o auxílio destes índices, obtidos através das curvas granulométricas, pode-se mais facilmente entender a presença de agregados, e a relação areia - silte por argila, que foram posteriormente confirmados na análise em microscópio eletrônico.

O Índice de Dispersão de Middleton (1930) *apud* Morgan (1995), não pode ser aplicado quando os teores de argila tendem a zero, uma vez que sua equação chave torna-se nula. Duas amostras de materiais.

Tabela 18 -- Alguns índices de erodibilidade para os diversos materiais inconsolidados estudados.

Material inconsolidado	Amostra Nº	Índice de dispersão (Middleton, 1930)	Índice de argila (Bouyoucos, 1935)	Índice de instabilidade (Monier, Combeau, 1961)	WSA (Bryan, 1976)	0,25 > % de WSA > 0,5mm (Yamamoto, 1978)
Arenosos da Formação Pirambóia	3	3,00	6,69	0,36	22,00	26,00
	9	1,45	19,00	1,44	18,00	18,00
	15	1,42	0,46	1,68	6,00	8,00
	19	1,20	11,50	0,34	9,00	16,00
	24	3,60	9,00	0,64	21,00	27,00
	25	1,00	15,64	1,25	15,00	16,00
Arenosos da Formação Botucatu	10	1,23	3,55	0,99	14,00	16,00
Argilo-siltosos da Formação Serra Geral	6	4,00	3,00	2,09	29,00	22,00
	7	4,73	2,70	2,34	24,00	28,00
Arenosos em topo	1	27,00	4,56	0,79	31,00	36,00
	2	2,00	11,50	0,26	30,00	28,00
	13	1,67	9,00	0,60	13,00	14,00
	17	2,86	49,00	54,55	14,00	18,00
	18	1,20	11,50	0,23	21,00	22,00
	23	1,75	9,00	0,72	18,00	20,00
	8	2,33	11,50	0,56	8,00	8,00
Cones argilosos e arenosos	11	1,75	8,09	0,62	23,00	26,00
Areno - argilosos	12	1,00	3,90	0,90	16,00	20,00
	20	1,45	3,00	1,43	18,00	22,00
Arenosos da serra	21	1,86	4,88	0,81	17,00	20,00
	22	0,86	49,00	0,29	24,00	28,00
	22A	0,97	4,26	4,37	18,00	22,00
	5	1,07	6,14	0,43	12,00	24,00
Aluviões com matéria orgânica	26	3,00	8,09	0,36	23,00	24,00
	27	---	49,00	0,09	33,00	40,00
	28	---	49,00	0,17	30,00	35,00
	29	7,00	32,33	0,14	31,00	37,00

inconsolidados do tipo aluviões com matéria orgânica apresentaram este problema frente a este índice

Pelo conjunto de resultados obtidos nos ensaios pôde-se observar uma grande variabilidade dentro dos vários tipos de materiais inconsolidados. Essa variabilidade, algumas vezes, estava relacionada aos estágios de evolução do material amostrado, uma vez que se preferiu, quando possível, realizar a amostragem em perfis com diferentes estágios de evolução.

Não se deve confundir estágio de evolução de um perfil, com a profundidade com que a amostragem foi realizada, os graus de evolução são diferentes, porém as amostras eram, preferencialmente, retiradas a uma profundidade de aproximadamente 30 cm da superfície.

Os resultados dos ensaios de erodibilidade também demonstraram esta alta variabilidade, como pode ser observado na Figura 84. Os pontos acima das duas envoltórias são os classificados como erodíveis e os abaixo como não erodíveis, de acordo com cada autor pesquisado.

A grande maioria das amostras ficou restrita à parte inferior às envoltórias, isto se deve às baixas perdas de massa durante o ensaio de imersão. Estas baixas perdas de massa retratam algumas propriedades observadas nas amostras, tais como: presença de agregados; cimento, herdado ou não da rocha fonte; raízes e outros resquícios de material orgânico.

O comportamento dos materiais, frente à agregação, que já foi mostrado pelas imagens obtidas em microscópio eletrônico pode ser também visualizado ao se comparar as Figuras 85 e 86, onde são

Figura 84 - Perda de massa por imersão e índice de absorção obtidos nos ensaios para alguns materiais estudados.

apresentados os teores de areia, silte e argila das amostras analisadas com e sem defloculante.

Figura 85 - Teores de areia, silte e argila com defloculante.

Figura 86 - Teores de areia, silte e argila sem defloculante.

Para os ensaios químico de Eh, Figura 87, é possível observar uma certa uniformidade no conjunto. Apenas para a amostra nº 5, pertencente ao tipo de material inconsolidado aluvião com matéria orgânica, que apresentou valor de Eh relativamente baixo com água destilada.

Já para o ensaio de pH, Figura 88, pode-se observar a tendência

de valores de pH com água destilada são superiores a 5, e o pH com KCl, geralmente é inferior a este número.

Figura 87 - Valores de Eh com água destilada e KCl obtidos nos ensaios.

Figura 88 - Valores de pH com água destilada e com KCl obtidos nos ensaios.

Os resultados dos ensaios de penetração do cone geralmente classificaram os materiais na faixa de fofo a mediantemente compacto, exceto para o ensaio realizado no ponto de amostragem nº 15 (Arenosos da Formação Pirambóia); e para os pontos de amostragem nº 4 e 8 (Arenoso com Pedregulho), mesmo se desconsiderando a

camada de pedregulho, o material pode ser classificada como compacto a muito compacto. Este ensaio, juntamente com outros fatores já citados como agregação, presença de raízes, também corrobora no entendimento dos resultados do ensaio de erosão para estes pontos. Apesar de terem feições erosivas nas proximidades, foram classificados em laboratório como materiais de baixa tendência a erodibilidade, possivelmente o local onde as amostras foram retiradas apresentava uma alta compactação, o que pode ter influenciado nas baixas perdas de massa por imersão.

Dentre todos os tipos de materiais estudados dois apresentam características muito interessantes, são eles os Arenosos da formação Pirambóia, e os Aluviões com matéria orgânica. Ambos classificados em campo como erodíveis, uma vez que apresentavam feições erosivas, porém apenas o segundo foi classificado como erodível pelo ensaio de erosão.

Os materiais Arenosos da Formação Pirambóia foram os que apresentaram as maiores variações, entre si, principalmente para os resultados dos ensaios de erodibilidade, nos quais foram classificados como não erodíveis, devido os baixos valores para o ensaio de imersão, caracterizados pela agregação do material e pelo alto índice de raízes nas amostras.

Os resultados obtidos em laboratório para os materiais inconsolidados do tipo aluvião com matéria orgânica, confirmaram as observações de campo, ou seja, apresentaram alta tendência a erodibilidade. A agregação extremamente baixa, desses materiais, foi confirmada pelos resultados obtidos nos índices de agregação presentes na Tabela 18. Este tipo de material, foi o único do conjunto analisado que ao ter os teores de cátions trocáveis analisados pela

metodologia de Sherard *et al.* (1976), que leva em consideração a relação Na^+/TDS , que teve amostras classificadas na zona intermediária, uma vez que a grande maioria dos materiais analisados foi classificada na zona não dispersiva.

Para analisar os teores de cátions tocáveis obtidos para cada amostra, utilizou-se da metodologia de Sherard *et al.* (1976), que leva em consideração a relação Na^+/TDS , Figura 89.

Figura 89-- Relação de Na/TDS por TDS para as amostras analisadas.

CAPITULO 8 - CONCLUSÕES

Para o cálculo do índice de erodibilidade foram considerados os critérios propostos por NOGAMI; VILIBOR (1979) e PEJON (1992). Com os resultados decorrentes da aplicação desses métodos verificou-se que, os materiais inconsolidados considerados erodíveis são os dos tipos, aluviões com matéria orgânica e areno-argilosos, e, também, alguns solos da classe arenosos em topo. Exceto os areno-argilosos, os demais foram classificados em campo com erodíveis.

Os materiais inconsolidados arenosos da Formação Pirambóia, e Arenosos com pedregulho, que apesar de apresentarem feições erosivas em campo, em geral nos ensaios de erodibilidade foram considerados como não erodíveis. Isto se deve as características peculiares as amostras analisadas, tais como: agregação, elevada presença de raízes e cimentação proveniente da rocha fonte.

Com o auxílio dos índices de Middleton (1930), Bouyoucos (1935), Monier; Combeau (1961), Bryan (1976) E Yamamoto (1978), que são obtidos através de dados obtidos nas curvas granulométricas, pode-se mais facilmente entender a presença de agregados, e a relação areia - silte por argila, que foram posteriormente confirmados na análise em microscópio eletrônico.

Alguns índices internacionais mostraram-se inadequados para algumas amostras analisadas, tais como, o índice de Middleton

(1930), por exemplo, que não pode ser aplicado quando os teores de argila tendem a zero, uma vez que sua equação chave torna-se nula.

Por meio do monitoramento hidrológico do Ribeirão Samambaia, pode-se concluir que grande parte dos sedimentos ficam depositados no interior da bacia, até a ocorrência de um fenômeno de intenso de precipitação, quando estes são carregados para fora. Os volumes de sedimentos depositados na margem do rio aumentou muito durante os últimos 30 anos, conforme foi observado na análise realizada no Capítulo 5.

Propõe-se para investigações futuras, a título de complementação, a realização de outros estudos na área pesquisada. Uma vez que, em alguns pontos, não foi possível a completa realização de ensaios, em decorrência da perda de amostra indeformada, com muitas fraturas em sua trama estrutural, ocasionando a eliminação das mesmas, antes mesmo da realização dos ensaios laboratoriais.

Sobre o ensaio de erodibilidade propõem-se a utilização de anéis com diâmetros maiores, sendo dessa forma minimizado o efeito escala, uma vez que, sendo maior a área de análise, maior será a homogeneidade entre as amostras coletadas no mesmo local. Dessa forma a presença de raízes e agregação às vezes presentes em apenas uma amostra terá ação menor durante o ensaio de absorção.

O ensaio de Penetração Dinâmica do Cone com aplicação na quantificação da tendência de um solo a erosão, deveria ser mais estudado, visto que apresentou resultados satisfatórios.

Para uma urbanização dessas áreas, torna-se necessária à realização de um planejamento criterioso, visto que na análise realizada no Capítulo 5, pode-se observar que a ação antrópica gerou o aparecimento de feições erosivas. Isso permitirá uma melhor

adequação no uso e ocupação dos solos, sobretudo, nas regiões que apresentaram solos classificados como erodíveis, conforme as duas metodologias avaliadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AITCHISON, G. D. e GRANT, K. **Terrain evaluation for engineering. Land evaluation**, Melbourn, Mac Millan. 1970 p.124-146.

ALCÂNTARA, M. A. T. **Estudo da erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, EESC/USP, 1997, 129p.

ÂNGULO *et al.* Relações entre a erodibilidade e a agregação, granulometria e características químicas de solos brasileiro. In: **Revista Brasileira de Ciências do solo**, 1984. p. 133-138.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: solo: análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm: determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

BACCARO, C. A. D. **As unidades morfológicas e a erosão nos chapadões do Município de Uberlândia**. Uberlândia, 1994.

BEASLEY, D. B. & HUGGINS, L.F. **Answers User's Manual Agricultural Engineering Department**, West Lafayette Indiana, Indiana 56p, Purdue University, 1980.

BENNET, H.H. **Soil Conservation**. New York, McGraw-Hill, 1939.

BERBERIAN, D. **Notas sobre investigação do subsolo para fins de engenharia**. UFRJ, Rio de Janeiro, 1971, 106 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Editora Livroceres, Piracicaba-SP, 1990, 392 p.

CAMARGO, O. A. *et al.* **Métodos de análise química, mineralogia e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Secretaria de Agricultura e Agropecuária/IAC, 1986. 93p.

CARSON, M. A. e KIRKBY, M. J. **Hillslope form and process**. Oxford,: Cambridge University Press, 1975. 475p.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Erosão e formas de controle**. Belo Horizonte, 2001, 31p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda, 1974.

ELLISON, W.D. **Soil Erosion Studies**. Part. 1. Agricultural Engineering, 1947, v.28, n.4, p.145 -146.

EVANS, R. Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint. In: KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C. **Soil erosion**. New York: Wiley, 1980. p.109-128.

FACINCANI, E. M.; CAVALHEIRO, F. Boçorocas: aspectos da reabilitação por revegetação na região de São Pedro. **Boletim de Geociências**, Rio Claro, v.2, n.14, p.269-275, 1995.

FIORI, O. C. **Contribuição ao estudo das formações superficiais das quadriculas de Piracicaba e São Pedro**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de São Paulo. Rio Claro, 1980, 120 p.

FENDRICH, R. (1997). **Drenagem e controle da erosão urbana**. Curitiba, Editora Champagnat. 1997, 485p.

FONTES, S. B. **Mapeamento geotécnico com ênfase em erosões no Município de Ouro Pedro – MG, escala 1:5.000**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP. São Carlos, 1999, 112 p.

FOURNIER, F. **Climat et erosion**. Press Universitaires de France, 1960, 199p.

GRANT, K. Terrain evaluation. A logical extension of Engineering Geology. In: **Bulletin of the IAEG**. 1970. p. 972 –107.

GUERRA, A.; ROIZEN, J.; SCHUELER, E. Fatores e classificação da erosão fluvial dos solos e seus impactos ambientais. In: **Simpósio Nacional de Controle da erosão**, Bauru, Anais. São Paulo. 1995, p. 447-450.

IAEG. **Engineering geological maps – A guide to their preparation.** Paris, UNESCO. 1976, 79p.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DA ESTADO DE SÃO PAULO Cartas geotécnicas dos morros de Santos e São Vicente. São Paulo. **Relatório: 28975.** 1980, v. 3

IPT. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:1000.000.** Instituto de Pesquisas tecnológicas, Divisão de Minas e Geologia Aplicada. São Paulo, 2v.1981.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. **Soil erosion research methods.** Wageningen, Netherlands: Soil and Water Conservation Society/International Soil Science Society, 1988. p.140-160. ISBN 0-935-73418-X.

LAL, R. **Soil Erosion In The Tropics – Principies And Manegement.** New York, McGraw-Hill. 1990, 580p,

LIMA, R.T. Estudos de Movimentos de Massa Gravitacionais, Processos Erosivos e Áreas Sujeitas a Inundações na Área Urbana de Antonina, Litoral do Paraná - Escala 1:10.000. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos ESSC-USP, 2001.

MATULA, M. (1974). Engineering geology in country and urban planning. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo. Proceedings. ABGE. 1974, v.1, p.1-20.

METTERVICHT, O. I. Conceptual frame and research approach. In: METTERVICHT, O. I. **Detecting and monitoring land degradation features and processes in Cochabamba Valleys, Bolivia**. Netherlands: ITC, 1996. p.13-30.

MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; Nikolov, S. **Effect of flow rate and canopy on rill erosion**. Transactions of the ASES. 1975, v.18, n.6, p. 905-911.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. London: Longman, 1995. 198p. ISBN 0-582-24492-7.

MULLINS, C. E. Hardsetting. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. **Methods for assessment of soil degradation**. Flórida: CRC Press LLC, 1999. p.109-128. ISBN 0-8493-7443-X.

MUTCHLER, C. K.; MURPHREE, C.E.; MCGREGOR, K. C. Laboratory and Field from river Basins. In: LAL, R. (Ed.). **Soil Research Methods**, Iowa, 1988.

NISHIYAMA, L. **Procedimento de mapeamento geotécnico como base para análises ambientais do meio físico, em escala 1:100.000. Aplicação no município de Uberlândia - MG**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos - ESSC/USP. 1998, p. 363.

NOGAMI, J. S; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping unites for highway purposes in a tropical area. **Bull. IAEG**, 19, 1979. p.196 - 199.

NOGAMI, J. S; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Vilibor, 1995. 240p.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba (escala: 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização dos atributos.** 1992. 224p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1992.

PICHLER, E. **Boçorocas.** In: Boletim da sociedade brasileira de geociências. 1953, v.2, n.1. p. 3 - 16.

RODRIGUES, J.E. **Estudo de fenômenos erosivos acelerados das boçorocas.** Tese (Doutorado). - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1982.

RODRIGUES, B. B. **Inventário e análise de susceptibilidade aos Movimentos de massa gravitacionais o Erosões na região de Águas de Lindóia/SP — Escala 1:10.000.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

SALOMÃO, F. X. de T. & IWASA, O. Y. **Erosão e ocupação rural e urbana.** In: **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente.** ABGE/IPT. Divisão de Geologia, São Paulo, 1995.

SANEJOUAND, R. **La carthographie géohectic em France.** Laboratoire Central Ponts et Chaussées, Paris. 1972.

SHERARD *et al.* Pinhole test for Identifying dispersive soils, In: Journal of Geotechnical Engineering Division. 1976. v. 102, p 69-85.

SILVA, M. L. N. *et al.* Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.6, p. 1207-1220, Jun. 2000. ISSN: 0100-204X.

VILAR, O. M. & PRANDI, E.C. Erosão dos solos. In: CINTRA, J.C.A.; ALBIEIRO, J.H. (eds.). **Solos do interior de São Paulo**. São Carlos. Cap. 7 1983. p177-206.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana**. Porto Alegre, Editora da Universidade UFRGS/ABRH, 1995, 428 p. ISBN 85-7025-364-8.

U.S.SOIL CONSERVATION SOCIETY OF AMERICA - SCSA. **Procedure for determining rates of land damage, land depreciation and volume of sediment, produced by gully erosion**. Engineer Division (technical Release, 32 – Geology). 1966.

U.S.SOIL CONSERVATION SOCIETY OF AMERICA - SCSA. **Erosion processes**. Technical release of geology, 1982.

WEGGEL, J. R.; RUSTOM, R. **Soil erosion by rainfall and runoff-state of art**. Geotextiles and Geomembranes, 1982. v. 11, pp. 551 -572.

WISCHMEIER, W. R. e SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain.** Washington D.C. U.S. Department of agriculture, (agriculture Handbook), 1976 . 47p.

WISCHMEIER, W. R. e SMITH, D.D. A soil erodibility monograph for farmland and construction site. In: **J. Soil Water. Conservation**, 1971, v.26 p189.

ZUQUETTE, L.V. & GANDOLFI, N. Metodologia de mapeamento Geotécnico para Áreas Municipais. In: **IV Congr. Bras. de Geol. De Eng.**, Belo Horizonte, ABGE. 1987. v.2.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** 1987. 673 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1987.

ANEXO I

MAPA DE DRENAGEM
Com os pontos de monitoramento
do Ribeirão Samambaia

Legenda

- Drenagem
- Curvas de Nível
- Estradas
- Estradas de terra
- Arruamento
- Igrejas
- Escolas
- Pontes de alvenaria
- Pontes de madeira

Seção Monitorada

- SN - Seção Norte
- SCN - Seção Centro-norte
- SS - Seção Sul
- SCN - Seção Centro-sul

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
MAPA DAS SEÇÕES MONITORADAS - Ribeirão Samambaia
MUNICÍPIOS DE SÃO PEDRO E ÁGUAS DE SÃO PEDRO - SP
ESCALA 1: 15.000
MAIO / 2003
DIGITALIZADO POR: Geol. DÉBORA DE O. FERNANDES

ANEXO II

MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS
Com os pontos de amostragem

ANEXO III

TABELA DE RESULTADOS

Com todos os resultados dos ensaios
realizados com os materiais inconsolidados

Anexo III - Tabela com os resultados dos ensaios de caracterização

Ponto	Azul de Metileno												GRANULOMETRIA (%)						ÍNDICES FÍSICOS						ÍNDICES QUÍMICOS							
	CTC _(10% sol)			SE _(10% sol)			V _{B(10% sol)}			A _{ch} (% de água)			Com defloculante			Sem defloculante			ρ s (g/cm ³)	ρ p (g/cm ³)	ρ d (g/cm ³)	e	n (%)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	ApH	Eh(H ₂ O) (mV)	Eh(KCl) (mV)	Cátions Trocáveis (mg/l)			Condutiv. elétrica (μmho)
	Min.	Médio	Max.	Min.	Médio	Max.	Min.	Médio	Max.	Min.	Médio	Max.	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila											Na ⁺	Ca ⁺	K ⁺	
1	0,46	0,53	0,60	3,62	4,11	4,67	0,14	0,17	0,19	0,78	0,94	1,06	73	9	18	99	1	0	2,68	1,69	1,63	0,64	39,18	5,03	4,42	-0,61	136	157	0,14	0,56	0,88	61,70
2	0,28	0,49	0,92	2,21	3,80	7,17	0,09	0,12	0,17	1,13	1,50	2,13	88	4	8	94	4	2	2,72	1,71	1,59	0,71	41,54	5,03	4,58	-0,45	135	169	0,22	0,80	0,24	21,30
3	0,55	0,67	0,99	4,31	4,64	5,13	0,18	0,22	0,32	1,35	1,65	2,44	85	2	13	95	5	0	2,66	1,54	1,39	0,91	47,74	4,96	4,32	-0,64	129	115	0,12	0,44	0,42	34,90
4	3,71	3,83	4,03	28,99	29,87	31,49	1,18	1,22	1,29	11,85	12,21	12,87	85	5	10	95	2	3	2,67	1,79	1,49	0,79	44,19	4,99	4,14	-0,85	138	175	0,22	4,00	1,18	30,90
5	0,52	0,63	0,70	4,07	4,94	5,43	0,17	0,20	0,22	1,19	1,44	1,59	84	2	14	85	15	0	2,72	1,71	1,52	0,79	44,12	6,12	4,8	-1,32	31	144	0,26	11,00	0,72	41,80
6	4,13	5,86	6,90	51,13	52,49	53,86	1,32	1,87	2,20	1,94	2,75	3,24	7	25	68	90	8	2	2,85	1,61	1,51	0,89	47,02	4,46	4,01	-0,45	137	188	1,30	2,60	1,30	75,40
7	2,91	3,26	3,63	22,73	25,49	28,31	0,93	1,04	1,16	1,60	1,79	1,99	15	27	58	88	11	1	2,85	1,60	1,53	0,86	46,32	5,31	4,59	-0,72	117	121	0,20	14,00	0,72	26,20
8	1,04	1,08	1,14	8,16	8,41	8,89	0,33	0,34	0,36	4,17	4,29	4,54	86	6	8	94	2	4	2,72	1,71	1,52	0,79	44,12	6,12	4,8	-1,32	131	144	0,26	11,00	0,72	41,80
9	2,40	2,68	2,87	18,72	20,89	22,45	0,77	0,85	0,92	15,30	17,08	18,35	84	11	5	89	11	0	2,67	1,66	1,52	0,76	43,07	4,82	3,92	-0,90	153	209	0,35	10,00	2,55	67,00
10	1,60	2,18	2,59	14,12	17,29	20,21	0,58	0,71	0,83	2,62	3,21	3,75	68	10	22	74	26	0	2,73	1,87	1,70	0,61	37,73	5,46	4,13	-1,33	116	124	0,52	0,62	1,22	18,70
11	1,07	1,24	1,31	8,37	9,72	10,26	0,34	0,40	0,42	0,43	0,50	0,52	9	10	80	80	8	12	2,67	///	1,51	0,77	43,45	5,36	4,06	-1,30	178	201	0,38	3,50	0,88	26,30
12	3,28	3,45	3,65	25,65	26,95	28,50	1,05	1,10	1,16	3,38	3,55	3,76	60	9	31	71	10	19	2,80	1,94	1,55	0,81	44,64	5,35	4,03	-1,32	109	176	0,28	0,28	1,20	15,00
13	2,08	2,15	2,24	16,24	16,81	17,52	0,66	0,69	0,72	6,64	6,87	7,16	85	5	10	91	6	3	2,68	1,63	1,36	0,97	49,25	5,15	4,13	-1,02	126	189	0,18	3,50	0,50	18,50
14	3,51	4,20	5,05	27,37	32,82	39,40	1,12	1,34	1,61	11,19	13,42	16,11	84	6	10	95	4	1	2,67	1,71	1,55	0,72	41,95	5,17	4,04	-1,13	129	174	0,04	2,00	0,32	35,10
15	1,52	1,55	1,62	11,87	12,13	12,62	0,49	0,50	0,52	4,41	4,51	4,69	83	6	11	88	12	0	2,67	1,69	1,63	0,64	38,95	4,50	4,03	-0,47	155	171	0,18	3,00	2,86	84,70
16	0,44	1,36	2,27	10,62	14,17	17,73	0,14	0,43	0,72	1,08	3,33	5,57	82	5	13	89	10	1	2,73	1,69	1,63	0,67	40,29	4,84	4,51	-0,33	135	201	0,14	0,66	0,18	11,19
17	0,44	0,47	0,50	3,43	3,66	3,91	0,14	0,15	0,16	7,01	7,47	8,00	40	58	2	79	21	0	2,73	1,69	1,63	0,67	40,29	5,52	4,65	-0,87	200	188	0,70	0,30	0,70	12,00
18	0,84	1,00	1,39	6,57	7,79	10,87	0,27	0,32	0,44	5,37	6,37	8,89	90	5	5	92	4	4	2,67	1,54	1,39	0,92	47,94	5,29	4,22	-1,07	136	145	0,22	1,32	0,32	34,30
19	0,45	0,60	0,69	3,50	4,43	5,40	0,14	0,24	0,42	1,59	2,67	4,66	88	3	9	90	9	1	2,67	///	1,64	0,63	38,58	4,29	4,22	-0,07	202	150	0,30	0,98	0,86	38,20
20	0,68	1,02	1,22	5,33	7,99	9,15	0,22	0,33	0,39	0,87	1,31	1,55	68	7	25	78	6	16	2,67	1,91	1,52	0,76	43,07	4,68	4,28	-0,40	141	160	0,30	2,10	3,80	55,70
21	1,20	1,36	1,59	9,33	10,61	10,65	0,44	0,46	0,51	2,56	2,71	2,98	74	9	17	87	9	4	2,67	1,72	1,58	0,69	40,82	4,94	4,42	-0,52	85	174	0,42	14,00	0,74	21,30
22	0,19	0,19	0,19	1,46	1,46	1,46	0,06	0,06	0,06	2,99	2,99	2,99	90	8	2	86	14	0	2,67	1,60	1,50	0,78	43,82	6,03	4,59	-1,44	178	176	0,50	2,80	1,40	31,50
23	0,33	0,40	0,49	2,55	3,13	3,84	0,10	0,13	0,16	0,55	0,67	0,83	69	12	19	68	32	0	2,67	1,66	1,56	0,71	41,57	4,24	4,17	-0,07	168	175	0,42	1,70	1,40	18,00
24	2,61	3,00	3,21	20,36	23,41	25,03	0,83	0,96	1,02	8,32	9,57	10,23	79	11	10	88	10	2	2,67	///	1,41	0,89	47,19	5,5	4,15	-1,35	101	91	4,90	6,00	2,00	25,30
25	3,73	4,12	4,39	29,10	32,13	34,32	1,35	1,40	1,37	13,48	14,00	13,70	82	8	10	92	8	0	2,66	1,81	1,49	0,79	43,98	4,94	4,12	-0,82	160	156	0,50	0,40	1,30	15,01
26	0,91	1,24	1,42	7,12	9,72	11,07	0,29	0,40	0,45	2,24	3,06	3,48	85	2	13	95	5	0	2,70	1,71	1,55	0,74	42,59	5,34	3,22	-2,12	122	226	0,36	11,60	1,22	33,80
27	0,37	0,42	0,47	2,90	3,30	3,66	0,12	0,13	0,15	1,08	1,23	1,36	85	4	11	95	5	0	2,67	1,85	1,59	0,68	40,45	5,02	4,35	-0,67	153	154	4,40	0,90	4,20	39,10
28	0,13	0,15	0,16	1,02	1,14	1,19	0,04	0,33	1,19	2,09	16,64	59,47	95	3	2	100	0	0	2,67	1,63	1,44	0,85	46,07	4,73	4,46	-0,27	141	153	0,10	0,24	0,30	31,00
29	0,03	0,04	0,05	0,27	0,34	0,41	0,01	0,01	0,01	0,55	0,50	0,65	91	7	2	100	0	0	2,67	1,86	1,60	0,67	40,07	5,56	4,49	-1,07	87	110	0,24	0,50	0,14	28,60
30	0,23	0,23	0,23	1,80	1,82	1,83	0,07	0,07	0,07	2,45	2,48	2,49	95	2	3	99	1	0	2,67	1,84	1,75	0,53	34,46	5,87	4,83	-1,04	117	111	0,14	3,90	2,00	16,20