



Marco Antonio da Silva Ramidan

**ESTUDO DE UM PROCESSO DE
VOÇOROCAMENTO PRÓXIMO A UHE DE
ITUMBIARA – GO**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Engenharia Civil: Geotecnia

Orientadores: Prof^o. Tácio Mauro P. Campos
Prof^o. Franklin S. Antunes

Rio de Janeiro
Setembro de 2003



Marco Antonio da Silva Ramidan

**Estudo de um processo de voçorocamento
próximo a UHE de Itumbiara – GO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Tácio Mauro P. de Campos

Presidente/ Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC - Rio

Prof. Franklin dos Santos Antunes

Co-Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC - Rio

Prof. Eurípides do A. Vargas Jr.

Departamento de Engenharia Civil – PUC - Rio

Eng. Celso José Pires Filho

FURNAS Centrais Elétricas S.A.

Prof. Nelson Ferreira Fernandes

IG/UFRJ

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 19 de Setembro de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Marco Antonio da S. Ramidan

Engenheiro Civil, pertencente ao quadro de Furnas Centrais Elétricas S. A, SE.T / DEC.T. Ingressou no curso de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Geotecnia no ano de 2000, atualmente atuando na área de Geotecnia, na Divisão de Geotecnia e Segurança de Barragem – DGSB.T. Desenvolveu pesquisa sobre o estudo dos processos erosivos em ocorrência na região referente a uma área de empréstimo, situada a jusante da barragem de terra, ombreira direita, da UHE de Itumbiara – GO. Pretende-se, a partir do levantamento de informações Geológico-Geotécnicas; Climáticas; Instrumentação de campo e execução de Ensaios de Laboratório e Campo, definir o mecanismo de erosão atuante e propor alternativas de Solução para o problema.

Ficha Catalográfica

Ramidan, Marco Antonio da Silva

Estudo de um Processo de Voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara – GO/ Marco Antonio S. Ramidan; orientadores: Tácio Mauro P. Campos; co-orientador: Franklin S. Antunes – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

v.1, 242 f.:il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas

1. Hidrelétrica; 2. Erosão; 3. Voçoroca; 4. Geológico-geotécnico; 5. Ensaios. I. Ramidan, M. A. S. (Marco Antonio da Silva Ramidan). II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título

In Memoriam

Aos meus queridos e saudosos pais, Omar e Raymunda, pelo grande exemplo de vida e incentivo ao desenvolvimento intelectual e científico.

Dedico a minha querida esposa Eliane e aos meus filhos Leonardo e Caroline a compreensão pelos momentos em que me fiz ausente para a elaboração desta dissertação e por sempre me apoiarem e incentivarem, em todos esses anos de estudo.

Agradecimentos

Aos meus irmãos, irmãs, sobrinhos e sobrinhas que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos professores Franklin dos Santos Antunes e Tácio Mauro Pereira de Campos, pela orientação, dedicação e companheirismo ao longo do curso.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial aos professores Eurípedes do A. Vargas Jr., Celso Romanel, Alberto Sayão, Sérgio Fontoura, José Araruna e Cláudio Amaral, pelo incentivo, companheirismo e conhecimentos obtidos ao longo do curso de mestrado.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio dos cursos de mestrado e doutorado, que sempre me ajudaram de certa forma e que me incentivaram durante todos esses anos de estudo e pesquisa. Em especial aos colegas: Rodrigo Spagnolo, Fávio Alchaar, Carlos Caetano, Ewerton Pimentel, Carlos Ataliba, Ciro Portela, Ricardo Cuentas, Javier Perez e Jorge L. Cárdenas.

Aos funcionários do DEC, PUC-Rio, pelo profissionalismo e dedicação, em especial a Ana Roxo por quem tenho um imenso carinho e admiração.

Aos funcionários do Laboratório de Mecânica dos Solos, PUC-Rio, pela ajuda na execução dos ensaios, indispensável ao desenvolvimento deste trabalho, em especial ao Willian e Amauri.

Ao Laboratório de Difractometria de Raios-X, do DCMM da PUC-Rio, em especial ao Ronaldo pela colaboração neste ensaio.

À empresa Furnas Centrais Elétricas S.A., grande incentivadora e inovadora na área de pesquisa e desenvolvimento Técnico Científico, sem a qual não seria possível o

desenvolvimento deste estudo, em especial à Superintendência de Engenharia (SE. T) e Superintendência de Geração (SG.T), aos Departamentos de Patrimônio Imobiliário (DPI.T), Departamento de Engenharia Civil (DEC.T), Departamento de Construção de Geração Corumbá (DGB.T), Departamento de Produção Goiás (DRG.O) e ao Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.T).

Aos colegas de Furnas, Eng^o Antônio de Pádua (SG. T); Eng^o Walton Pacelli, Eng^o Cláudia de Castro e Geólogo Pedro de Moura (DCT. T); Eng^o Hélio Goulart, Eng^o Ademar B. Filho, Eng^o Cláudio Motta, Des. Proj. Danilo Reis, Eng^o Étore F. de Faria (DEC. T), Eng^o José Reinaldo, Des. Proj. Maria da Conceição (DPI. T), pelo incentivo e apoio que me deram ao longo do desenvolvimento deste curso.

Aos Eng^{os} José Gilvomar e Manoel Martins, pela solidariedade com o desenvolvimento da causa geotécnica.

Em especial, ao Eng^o Celso Pires (DEC. T) coordenador do convênio entre Furnas e PUC, meu amigo e grande incentivador que sempre se mostrou solícito e atuante, quando solicitado a intervir em prol do bom desempenho desse programa de trabalho e ao Eng^o Wanderson Silvério (DCT. T), pelo apoio na realização dos ensaios no laboratório de solos de Furnas-GO.

Resumo

Ramidan, Marco Antonio da Silva; Campos, Tácio Mauro Pereira; Antunes, Franklin dos Santos. **Estudo de um Processo de Voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara – GO**. Rio de Janeiro, 2003, 242p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação, desenvolvida dentro do contexto do projeto PRONEX do Centro Geotécnico de Meio Ambiente da PUC-Rio e através de um convênio com FURNAS - PUC-Rio, apresenta uma contribuição quanto à identificação e compreensão dos mecanismos envolvidos em processos de erosão, considerando seus aspectos geológico-geotécnicos bem como medidas preventivas de reparo no caso da formação de uma voçoroca específica. A evolução do processo erosivo estudado tem suas origens na remoção mecânica de uma camada com cerca de cinco metros de solo argiloso de uma área explorada na época da construção de uma barragem de terra homogênea pertencente ao complexo Hidrelétrico de Itumbiara. Os principais aspectos da área estudada, tais como sua localização, condições climáticas e tipos de solo e vegetação foram considerados no desenvolvimento do trabalho, além de aspectos geológicos regionais e características geológico-geotécnicas da área afetada pelos processos de erosão. Tomando como base o perfil de intemperismo identificado pela inspeção das paredes da formação da voçoroca, bem como amostras de furos de sondagens SPT (ensaio de penetração normal), quatro tipos de camadas de solo foram tomados como representantes das condições do local. Objetivando-se a identificação, classificação e definição do potencial de erosão de tais materiais, espécies de amostras indeformadas de bloco (bem como as amolgadas) foram submetidas a investigações laboratoriais abrangendo: ensaio convencional de caracterização de solo; ensaio de caracterização MCT (mini-MCV); Crumb Test; ensaio de Desagregação; Pinhole Test; e Inderbitzen; ensaios de permeabilidade (também desenvolvidos em campo); análise química da água intersticial; análise mineralógica (difração de raios-X); ensaio de Resistência a Tração (sob condições de saturações

diferentes) e ensaio de papel filtro (para definição das curvas características da umidade). Baseado em testes de laboratório, observações e dados de pesquisas de campo advindos de um monitoramento de poro-pressão (através de piezômetros instalados no local), mecanismos de erosão que possam predominar na área foram definidos como: micro-ravinas, ravinas e voçorocas, dentre outros. Também, ao final do trabalho, são apresentadas sugestões para remediação do local, considerando-se medidas corretivas usadas dentro do contexto da prática geotécnica convencional, e uma metodologia a ser seguida em investigações futuras relacionadas à caracterização do local e desenvolvimento de processos de erosão.

Palavras-Chave

Complexo Hidrelétrico de Itumbiara; Erosão; Voçoroca; Geológico-Geotécnico; Ensaio Geotécnicos.

Abstract

Ramidan, Marco Antonio da Silva; Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor); Antunes, Franklin dos Santos (Advisor). **The Gully Process Study next to the Itumbiara Hydroelectric Complex – GO**. Rio de Janeiro, 2003, 242p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation, developed within the context of the PRONEX Project of the Environmental Geotechnical Center of PUC-Rio and through a FURNAS-PUC-Rio Convenium, presents a contribution towards the identification and comprehension of mechanisms involved in erosion processes, considering its geological and geotechnical aspects as well as preventive repairing measures in the case of a specific gully formation. The evolution of the studied erosive process has its origin in the mechanical removal of some five meters of a clayey soil layer from a borrow area exploited at the time of the construction of an homogeneous embankment dam belonging to the Itumbiara Hydroelectric Complex. The main aspects of the studied area, such as its location, climatic conditions and soil and vegetation types were considered in the development of the work, besides regional geological aspects and geological-geotechnical features of the area affected by the erosion processes. Taking as a basis the unsaturated weathering profile identified by inspection of the walls of the gully formation, as well as of samples from SPT (standard penetration test) boreholes, four types of soil ‘layers’ were taken as representative of site conditions. Aiming the identification, classification and definition of the erodibility potential of such materials, specimens from undisturbed block samples (as well as remolded ones) were submitted to laboratory investigations comprising: conventional soil characterization tests; MCT characterization test (mini-MCV); crumb test; desegregation test; pinhole test; Inderbitzen test, permeability tests (also performed in the field); chemical analysis (both soil and voids -water); mineralogical analysis (X-rays diffraction); tensile strength test (under different saturation conditions) and filter paper test (for definition of soil-moisture characteristic curves). Based on the results

of the laboratory tests, field observations and data from pore-pressure monitoring (through piezometers installed in the site), erosion mechanisms that may prevail in the area were defined as micro-rills, rill, gully and others. Also, at the end of the work, are presented suggestions for remediation of the site, considering corrective measures used within the context of conventional geotechnical practice, and a methodology to be followed in further investigations related to the characterization of the site and development of erosion processes.

Keywords

Itumbiara Hydroelectric Complex; Erosion; Gully; Geological-Geotechnical; Geotechnical Tests.

Sumário

1	Introdução	26
1.1	Objetivo	27
1.1.1	Geral	27
1.1.2	Específico	27
1.2	Escopo do Trabalho	28
2	Revisão Bibliográfica	29
2.1	Considerações Iniciais	29
2.2	Formações Superficiais e Desencadeamento dos Processos Erosivos	29
2.3	Processos Determinantes na Erosão dos Solos	34
2.3.1	Processos Relacionados às Formas de Erosão Hídrica	36
2.3.2	Processos Relacionados a Precipitações Pluviométricas	38
2.3.3	Processos Relacionados à Erosão Eólica	42
2.3.4	Processos Erosivos Devido à Geometria de Encostas	43
2.3.5	Processos Erosivos por Formação de Ravinas e Voçorocas	44
2.3.6	Aspectos Geológico-Geotécnicos dos Solos	47
2.3.7	Quantificação de Perda de Solo por Erosão Laminar	54
3	Aspectos Gerais da Área Estudada	58
3.1	Localização	58
3.2	Condições Climáticas	61
3.3	Tipo de Solo	63
3.4	Tipo de Vegetação	63
3.5	Aspecto Geológico – Geotécnicos da Região	64
4	Metodologia adotada na Avaliação da Erodibilidade	69
4.1	Trabalhos Desenvolvidos no Campo	69

4.2 Aspecto Geológico – Geotécnicos Local	75
4.3 Hidrologia Local	79
5 Descrição dos Ensaios e Apresentação dos Resultados	86
5.1 Ensaios de Campo	87
5.1.1 Ensaio Penetrométrico (SPT)	87
5.1.2 Ensaio com o Permeâmetro de Guelph	87
5.2 Ensaios de Laboratórios	90
5.3. Ensaios Convencionais de Caracterização	92
5.3.1. Metodologia Adotada	92
5.3.2. Apresentação e Análise dos Resultados	94
5.3.2.1. Análise Granulométrica	95
5.3.2.2. Limite de Atterberg	99
5.3.2.3. Umidade Natural e Umidade Higroscópica	101
5.3.2.4. Peso Específico	103
5.3.2.5. Índice de Vazios, Porosidade e Grau de Saturação	104
5.3.2.6. Índice de Atividade	106
5.3.3. Correlação entre as propriedades físicas	107
5.4. Ensaios de Erodibilidade	111
5.4.1 <i>Crumb Test</i>	111
5.4.2. Desagregação	117
5.4.3. Ensaio <i>Pinhole Test</i> (Furo de Agulha)	127
5.4.4 <i>Inderbitzen</i>	145
5.5 Ensaios Especiais	155
5.5.1 Análise Química do Solo e da Água Intersticial	155
5.5.2 Caracterização Mineralógica (Difração de Raios-X)	158
5.5.3 Ensaio de Caracterização MCT (mini-MCV)	167
5.5.4 Ensaio de Sucção (Curva Característica)	181
5.5.5 Ensaio de Resistência a Tração – Método Brasileiro	198
6 Discussão dos Resultados	203

7 Conclusões e Sugestões	209
Referências Bibliográficas	218
Anexo	230

Lista de tabelas

Tabela 5.1 - Resumo das Principais propriedades Físicas do Solo	94
Tabela 5.2 – Critério de classificação direta dos solos estudados quanto ao grau de erodibilidade, proposto por Santos e Castro (1967)	95
Tabela 5.3 – Limites de Atterberg para argilominerais (modificado por Mitchell, 1993)	100
Tabela 5.4 – Massa Específica dos Minerais Identificados (modificado – Deer et al, 1981)	104
Tabela 5.5 – Guia de interpretação proposta por Sherard et al (1976)	112
Tabela 5.6 - Resultado do ensaio Crumb Test	114
Tabela 5.7 – Resumo dos resultados do ensaio sedimentométrico comparativo (0,002 – 0,05mm)	116
Tabela 5.8 – Resumo dos critérios interpretativos do Ensaio Pinhole Test (Furo de Agulha) ASTM· D 4647-(93) adaptado a NBR 14114-98 sob forma de texto	130
Tabela 5.9 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SC)	131
Tabela 5.10 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRM)	134
Tabela 5.11 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRJ-A)	137
Tabela 5.12 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRJ-B)	139
Tabela 5.13 – Quadro resumo da quantidade de perda do Solo Coluvionar (SC)	150
Tabela 5.14 – Caracterização Química do Solo	156
Tabela 5.15 – Análise Química da Água	156
Tabela 5.16 – Análise Mineralógica pela difração de Raios-X	160
Tabela 5.17 – Quadro característico de solos dos grupos MCT, quanto à erodibilidade hídrica e propriedades de interesse à sua previsão (condições típicas do Estado de São Paulo) – modificado por Nogami e Villibor, 1995	173
Tabela 5.18 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Coluvionar	174
Tabela 5.19 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Maduro	176

Tabela 5.20 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Residual Jovem A	178
Tabela 5.21 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Residual Jovem B	179
Tabela 5.22 - Célula de placa cerâmica e suprimento de gás utilizado no ensaio	191
Tabela 5.23 – Valores obtidos pelo método do Papel Filtro	192
Tabela 5.24 – Valores obtidos pelo método da Panela de Richards	192
Tabela 5.25 – Amostra de solo na umidade natural	201
Tabela 5.26 – Amostra de solo seca ao ar	201
Tabela 9.1 – Quadro resumo da quantidade de perda de solo laterítico (SL)	239
Tabela 9.2 – Quadro resumo da quantidade de perda de solo (SRJB)	240
Tabela 9.3 – Quadro resumo da quantidade de perda de solo (SRJA)	241
Tabela 9.4 – Quadro resumo de perda de solo (SRM)	242

Lista de figuras

Figura 3.1 – Mapa de Localização da UHE de Itumbiara – GO / Geomapas Produções Cartográficas Ltda (1994) – Escala 1:400. 000	59
Figura 3.2 – Planta Geral com Representação da Hidrogeologia Local	60
Figura 3.3 – Precipitações pluviométricas anuais (Jan/1980-Jun/2003)	62
Figura 3.4 – Precipitações pluviométricas mensais (Jan/80 – Jun/03)	62
Figura 3.5 – Precipitações pluviométricas mensais (Jan2003-Jun/2003)	62
Figura 3.6 – Mapa Geológico Regional – Fonte: AGIM (Agência Goiana de Desenvolvimento Industrial e Mineral). Mapa Geológico e de Recursos Minerais.	65
Figura 3.7 - Mapa Geológico Local	66
Figura 3.9 – Seção Longitudinal no eixo da barragem – Fonte: Relatórios de Furnas Centrais Elétricas S.A. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná (setembro de 1983) – modificado pelo autor, 2003.	68
Figura 4.1 – Coleta de Água	70
Figura 4.2 – Vista aérea com destaque para Erosão 1	71
Figura 4.3 - Planta da Erosão 1	72
Figura 4.4 - Perfil Representativo dos Taludes	73
Figura 4.5 – Local de retirada de blocos (SC – Solo Coluvionar ; SRM – Solo Residual Maduro ; SRJ-A – Solo Residual Jovem A ; SRJ-B – Solo Residual Jovem B)	74
Figura 4.6 – Tipos de Solos	74
Figura 4.7 – Perfil Geológico-Geotécnico (Seção Longitudinal AB – Figura 3.2)	75
Figura 4.8 - Alcovas de regressão e queda de bloco	76
Figura 4.9 – Trinca superficial (vista lateral e superior)	76
Figura 4.10 – Fraturas de alívio sub-horizontais / verticais a sub-verticais (Parede esquerda da Erosão I)	77
Figura 4.11 – Leituras Piezômetros e medidores de níveis d’água recentemente instalados	80
Figura 4.12 – Leituras dos Piezômetros e medidores de níveis d’água existentes ao longo da ombreira direita da barragem	81
Figura 4.13 – Leituras da precipitação pluviométrica versus elevação do reservatório	82

Figura 4.14 – Modelo dinâmico da evolução das voçorocas	83
Figura 4.15 – Modelo representativo do comportamento de fluxo no processo erosivo do solo estudado (estágio I)	84
Figura 4.16 – Modelo representativo do comportamento de fluxo no processo erosivo do solo estudado (estágio II)	84
Figura 4.17 – Modelo representativo dos processos erosivos resultantes da incidência de fluxo sobre o solo estudado (estágio I)	85
Figura 4.18 – Modelo representativo dos processos erosivos resultantes da incidência de fluxo sobre o solo estudado (estágio II)	85
Figura 5.1 – Ensaio com Permeâmetro de Guelph	88
Figura 5.2 – Valores de K (cm/s), K_{fs} (cm/s) e F_m (cm/s)	89
Figura 5.3 – Curva Granulométrica por peneiramento e sedimentação	96
Figura 5.4 – Variação das Frações Silte e Argila por sedimentação	98
Figura 5.5 – Variação das Frações Pedregulho + Areia	98
Figura 5.6 - Variação dos Limites de Atterberg	100
Figura 5.7 – Variação dos teores de Umidade Natural (W_{nat}) e Umidade Higroscópica (W_h)	102
Figura 5.8 – Variação do Peso específico aparente seco (γ_d) com o peso específico natural (γ_{nat}) e o Peso específico dos sólidos (γ_s)	103
Figura 5.9 - Variação do Índice de Vazios (e), Porosidade (n) e do Grau de Saturação (S)	105
Figura 5.10 – Variação do Índice de Atividade	106
Figura 5.11 – Análise da unidade higroscópica (W_h) em função do Índice de Plasticidade (I_p)	108
Figura 5.12 – Índice de Plasticidade, Umidade higroscópica versus o percentual de argila.	108
Figura 5.13 – limite de Atterberg e Umidade higroscópica versus Porcentual de argila e silte	109
Figura 5.14 - Curvas representativos do Ensaio Sedimentométrico Comparativo	116
Figura 5.15 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a base – 30 min)	119
Figura 5.16 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a 1/3 H – 45 min)	120
Figura 5.17 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a 2/3 H – 60 min)	121

Figura 5.18 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (período de 24 horas)	122
Figura 5.19 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (logo após a inundação)	123
Figura 5.20 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (após 15 min)	124
Figura 5.21 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (após 24 h)	125
Figura 5.22 – Modelo Esquemático do Ensaio de <i>Pinhole Test</i>	129
Figura 5.23 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão. (Solo Coluvionar)	131
Figura 5.24 – Fotos Representativas da amostra de Solo Coluvionar após o ensaio	133
Figura 5.25 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRM)	134
Figura 5.26 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Maduro após o ensaio	136
Figura 5.27 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJ-A)	136
Figura 5.28 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Jovem A após o ensaio	138
Figura 5.29 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJ-B)	139
Figura 5.30 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Jovem B após o ensaio	140
Figura 5.31 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SC)	141
Figura 5.32 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRM)	142
Figura 5.33 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJ-A)	143
Figura 5.34 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJ-B)	144
Figura 5.35 – Ensaio de Inderbitzen em andamento	146
Figura 5.36 – Resultado da perda de solo total das amostras	149
Figura 5.37 – Resultado da perda de Solo Coluvionar	151
Figura 5.38 – Resultado da perda de Solo Laterítico	152

Figura 5.39 – Resultado de perda de solo (SRJ-B)	153
Figura 5.40 – Resultado da perda de solo (SRJ-A)	154
Figura 5.41 – Resultado da perda de solo (SRM)	155
Figura 5.42 – Difractogramas de Raios-X (SNE e SC)	162
Figura 5.43 – Difractogramas de Raios-X (SE e SRM)	164
Figura 5.44 – Difractogramas de Raios-X (SRJ-A e SRJ-B)	166
Figura 5.45 – Aparelho com Ensaio de Classificação MCT em andamento e esquema representativo	168
Figura 5.46 – Exemplo de curvas de deformabilidade - MCV	169
Figura 5.47 – Exemplo de Curva para determinação de c'	170
Figura 5.48 – Exemplo de Curva de Compactação para determinação de d'	171
Figura 5.49 – Representação Esquemática do Ensaio de Perda de solo por Imersão	171
Figura 5.50 – Ábaco classificatório dos solos pela metodologia MCT	173
Figura 5.51 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SC)	175
Figura 5.52 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRM)	177
Figura 5.53 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRJ-A)	178
Figura 5.54 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRJ-B)	180
Figura 5.55 – Extração da amostra de solo com anel de metal	183
Figura 5.56 – Amostras de solos envolvidos com filmes plásticos	185
Figura 5.57 – Balança para pesagem de papel filtro	186
Figura 5.58 – Curvas Características pelo método do Papel Filtro	186
Figura 5.59 – Câmara de Pressão de Richards	187
Figura 5.60 – Saturação de amostras de solos por capilaridade sobre placa cerâmica	188
Figura 5.61 – Expansão da amostra de Solo Residual Maduro (SRM)	189
Figura 5.62 – Saturação de amostras de solo por capilaridade	189
Figura 5.63 – Curva de sucção pelo método de Panela de Richards	190
Figura 5.64 – Curvas características de sucção versus umidade, obtidas segundo os métodos de Papel Filtro e da Panela de Richards	193

Figura 5.65 – Ensaio de tração (equipamento e ensaio em andamento)	198
Figura 5.66 - Soluções teóricas das tensões ao longo do diâmetro vertical de uma amostra de solo submetida a compressão diametral	199
Figura 5.67 – Representação gráfica das amostras natural e seca ao ar	202

Lista de abreviaturas e símbolos

S: somatório

°: graus

#: peneira

%: porcentagem

A: Índice que representa a parte de solo por unidade de área

a: fator de redução

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGIM: Agência Goiana de Desenvolvimento Industrial e Mineral

Al: alumínio

Al³⁺: cátion de alumínio

C: argilas

C: Índice relativo ao fator referente ao uso e manejo do solo

Ca: cálcio

cm: centímetro

cm²: centímetro quadrado

cm³: centímetro cúbico

cm³/s: centímetro cúbico por segundo

CNPS: Centro Nacional de Pesquisa de Solos

Cu: coeficiente de não uniformidade dos solos

D: diâmetro

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica

DATUM-SAD-69: Spath American DATUM-69

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisas Agrárias

E: Energia cinética total para um dado evento chuvoso

EPG: ensaio com permeâmetro de Guelph

e : índice de vazios

e₀ : índice de vazios inicial

Fe: ferro

G: cascalho

g: grama

GO: Goiás

GPS: Global Positioning System ou NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite with time and ranging)

h: hora

h_{OT} : umidade ótica

Hc: Teor de umidade de compactação

H₂O: água

I: Equivale a precipitação pluviométrica máxima durante 30 minutos

Ia: Índice de atividade das argilas

K: potássio

K: Índice relativo a erodibilidade do solo

K: permeabilidade

K_{fs} : condutividade hidráulica saturada de campo

K_m : permeabilidade média

L: Índice relativo ao comprimento da encosta

Li: lítio

LA': Solo laterítico arenoso

LG': Solo laterítico argiloso

M: siltes

m: metro

Marégrafo: Referencial altimétrico, coincidente com a superfície equipotencial que contém o nível médio do mar

MCT: Miniatura Compactada Tropical

Mini-MCV: Moisture Condition Value

Md: Massa seca da parte desprendida

Ms: Massa seca em estufa

Mu: Massa úmida do corpo de prova

min: minuto

ml: mililitro

MG: Minas Gerais

Mg: magnésio

m/s: metro por segundo

mm: milímetro

mm/h: milímetro por hora

n: Porosidade

Na: sódio

NaOH : hidróxido de sódio

O: solos orgânicos

P: Índice relativo a prática conservacionista adotada

Pd: Grau de dispersão

PG: permeâmetro de Guelph

Pi: Perda de solo por imersão

pH: potencial de hidrogenização

PZ: piezômetro

R: Índice relativo a erodibilidade da chuva e da enxurrada

S: areias

S: Grau da saturação

S: Índice relativo a declividade da encosta

SC: Solo coluvionar

SCS: Ensaio Sedimentométrico comparativo

SE: Solo Erodido

Seg: segundo

SNE: Solo Não Erodido

SRJ-A: Solo Residual Jovem A

SRJ-B: Solo Residual Jovem B

SRM: Solo Residual Maduro

SPT: *Standard Penetration Test* (Sondagem a percussão)

UHE: Usina Hidrelétrica

USLE: *Universal Soil Loss Equation* (Equação Universal de Perdas de Solos)

UTM: Universal Transverso de Mercator

w : umidade do solo

WEPP: *Water Erosion Predict Project* – Projeto de Previsão de Erosão
Hídrica

W_L : Limite de liquidez

w_{nat} : Umidade natural do solo

w_p : Índice de plasticidade

w_h : Umidade Higroscópica

γ_s : Peso específico real dos grãos

γ_{nat} : Peso específico natural

γ_d : Peso específico seco

μ_m : micron (= 0,001 milímetro)

F_m : potencial de fluxo mátrico

1 INTRODUÇÃO

O Processo Erosivo de Voçorocamento, aplicado à área de empréstimo localizada a jusante da ombreira direita da UHE de Itumbiara – GO, foi escolhida devido ao aspecto local, resultante da exposição e degradação ambiental da área ao longo do tempo, bem como o seu agravamento, diagnosticado pelos fatos a seguir:

- extração mecânica da camada de solo com aproximadamente 4,0 metros de espessura, utilizada na década de 70 na construção da barragem de terra, sem que houvesse uma medida mitigadora ao longo desses anos;
- deficiência da cobertura vegetal em grande parte da área estudada;
- declividade local que, provavelmente venha a favorecer em grande parte, o avanço desses mecanismos, durante as precipitações pluviométricas ao longo dos anos na região;
- gradagem do solo para o cultivo de cana – de – açúcar, em escala industrial, sem o devido cuidado com a preservação ambiental;

A área de influência atingida direta e indiretamente por essas erosões totaliza aproximadamente 70 hectares, sendo 10 hectares degradados por erosões lineares, tais como: sulcos, ravinas e voçorocas e os 60 hectares restantes, sendo 25 ha explorados em escala industrial com o cultivo de cana

– de – açúcar, somados a 35 hectares que apresentam deficiência do recobrimento vegetativo sujeitos dessa forma à gênese e evolução de processos erosivos futuros. Áreas essas, especificamente localizadas ao longo das erosões encontradas.

Como caso estudado foi selecionada a Erosão I (Figura 4.5), por sua proximidade com a Barragem e por suas características Geológico – Geotécnicas apresentadas, semelhantes aos demais processos erosivos, que ocorrem na região.

1.1. Objetivo

1.1.1. Geral

Pretende-se a partir do levantamento de informações geológico–geotécnicas, climáticas, instrumentação de campo, execução de ensaios de laboratório e campo, definir o mecanismo de erosão atuante e propor alternativas de soluções para o problema.

1.1.2. Específico

Para tanto, a proposta deste estudo foi embasada nos resultados obtidos a partir das seguintes linhas de ação:

- reconhecimento da área de estudo;
- levantamento topográfico plani-altimétrico do local, com ênfase nos processos erosivos e suas condições naturais;
- execução de sondagem a percussão (SPT) com recuperação de amostras de solos;

- implantação de uma linha piezométrica e de medidores de nível de água ao longo das erosões;
- coleta de blocos de solo indeformada e amolgada.

1.2. Escopo do Trabalho

Esta dissertação está dividida em 7 (sete) capítulos, incluindo esta introdução. No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto abordado sendo em seguida descrito, no capítulo 3, o aspecto geral da área.

Posteriormente, serão descritas no capítulo 4, a metodologia aplicada na avaliação da erodibilidade, da mesma forma que se descreverá no capítulo 5, os ensaios, apresentação dos resultados e a análise correspondente ao esclarecimento do estudo. Para melhor elucidação do tema proposto, será apresentado no capítulo 6, uma análise e discussão dos resultados obtidos, bem como propostas de alternativas que conduzam à solução do problema.

No capítulo 7 serão apresentadas as conclusões gerais da dissertação, sendo proposto um novo modelo de metodologia a ser adotada no estudo de feições erosivas existentes na região, e sugestão para realização de pesquisas futuras.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações Iniciais

Esta dissertação está estruturada e fundamentada em diversos, autores consagrados por seus trabalhos científicos, além das pesquisas de campo realizadas na área de estudo, verificando a possibilidade de aplicação de Medidas Corretivas e Preventivas de Formação Erosiva do Tipo Voçoroca.

No entanto, para que os resultados obtidos através dos ensaios realizados tenham embasamento teórico, faz-se necessária uma revisão dos conceitos referentes aos processos erosivos de autores de nível nacional e internacional que colaboram com suas pesquisas para o desenvolvimento de novas teorias relacionadas ao tema.

De acordo com Cunha e Guerra (1999), a questão dos processos erosivos vem sendo estudada com grande intensidade há algum tempo (apesar de ainda estar longe do ideal), tendo nas universidades e instituições públicas especializadas, como por exemplo, a EMBRAPA, seu maior raio de atuação.

2.2. Formações Superficiais e Propriedades do Solo nos Processos Erosivos

Segundo Oliveira *et al.* (1992), as características das coberturas superficiais ou dos solos propriamente ditos, estão intimamente relacionadas

com as propriedades dos minerais do complexo coloidal e da composição das soluções químicas que interagem com esses elementos.

Condições térmicas e hidrológicas provocam modificações, desintegrando e decompondo o material constituinte do solo, pelos processos de intemperismo, dos quais resultam as partículas de argilominerais e os óxidos de ferro e alumínio. O intemperismo, como formador do solo, caracteriza os diferentes tipos de coberturas e, sob a ação de diferentes processos “os solos são estruturados e ordenados em camadas, de aspectos e constituições diferentes, denominadas horizontes” (Lepsch, 1982).

Desta forma, segundo Pitty (1978), cada horizonte se identifica por suas propriedades físicas como cor, textura, estrutura, porosidade, permeabilidade, consistência, densidade aparente e compactação, onde os processos químicos também são responsáveis por essas características.

A textura é uma propriedade intimamente relacionada à erosão (Farmer, 1978; De Ploey e Poesen, 1985; Tavares e Vitte, 1993). De acordo com Mazuchowski e Derpsh (1984), ela é a mais importante propriedade física do solo, devido à sua pouca mudança no tempo, sendo, portanto, uma das características mais estáveis do solo.

Conforme a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo determina, para caracterizar a textura do solo consideram-se as partículas menores que 2,0 mm, constituídas por areia, silte e argila que, de acordo com as proporções relativas dessas frações, pode ser classificada como textura arenosa, siltosa e argilosa, ou ainda, formada pela combinação desses três tipos (Guerra, 1998). Normalmente essas partículas (areia, silte e argila) juntam-se, formando os agregados, dando ao solo a sua estrutura característica (Resende *et al.*, 1995).

Os principais elementos influenciadores na formação dos agregados são as argilas e a matéria orgânica (Imeson e Kwaad, 1990). De acordo com Kiehl (1979), “os minerais de argilas são poderosos agentes cimentantes na formação de agregados estáveis à ação da água”. A influência desses minerais deve-se à dimensão de suas partículas que caracterizam suas propriedades coloidais.

Segundo Lepsch (1982), a mais importante propriedade coloidal da argila é a afinidade pela água e pelos elementos químicos nela dissolvidos. O pequeno tamanho das partículas aumenta a superfície específica, o que lhe confere maior adsorção de íons nas reações do solo. Esse fato explica a grande variação entre o comportamento físico e físico-químico das argilas e das areias, pela grande diferença que existe entre as superfícies específicas desses dois constituintes do solo e suas composições mineralógicas (Medina, 1975).

Cabe frisar que o tipo de argilomineral influencia determinantemente na retenção de água, como no caso da esmectita que retém mais água que a illita e a caulinita (Pitty, 1978). Solos arenosos apresentam-se mais susceptíveis à percolação de água, em decorrência do baixo teor de argila (Kiehl, 1979).

De acordo com os autores citados acima, os solos de textura argilosa apresentam grande microporosidade, no entanto, todo solo argiloso pode possuir também macroporosidade devido à agregação. A microporosidade, segundo Kiehl (1979) é a principal responsável pela retenção de água, enquanto que, a macroporosidade, deixa a água percolar com mais facilidade.

Para Kirkby (1980), a matéria orgânica do solo desempenha papel semelhante ao da argila, retendo a água, as substâncias nutritivas

inorgânicas e os materiais nutritivos orgânicos, sendo também muito importante para manter os agregados e proporcionar um solo úmido, com permeabilidade baixa.

Segundo Tavares e Vitte (1993), a presença da matéria orgânica é imprescindível para a resistência do solo à erosão. Os agregados que se formam aumentam a capacidade de infiltração dos solos, diminuindo, conseqüentemente, o escoamento superficial.

A atividade biológica que se desenvolve no solo e os processos bioquímicos correspondentes são também importantes no processo de agregação das partículas e, suas relações. Esses dependem da intensidade da decomposição dos detritos orgânicos, o que corresponde a um efeito agregante sobre o solo. Esse efeito, de acordo com Resende *et al.* (1995), diminui com a profundidade do solo devido a menor aeração e ao menor suprimento de matéria orgânica.

No entanto, onde a atividade dos organismos é intensa, além da agregação das partículas, pelas substâncias viscosas que eles produzem, como no caso dos fungos e actinomicetes (Resende *et al.*, 1995), eles também influem na formação de canais e no aumento da permeabilidade, quando fazem caminhos ou escavam galerias no interior do solo.

Kiehl (1979) afirma que, do volume dos poros depende a densidade aparente e a resistência oferecida pelo terreno. Quanto mais compacto e menos poroso for o solo maior será a sua resistência mecânica. A densidade aparente é variável para um mesmo solo, alterando-se de acordo com a estrutura. Quanto maior for a densidade do solo, maior será o seu grau de compactação, resultando em uma menor porosidade. A densidade aparente geralmente aumenta com a profundidade do perfil do solo, uma vez que, as

pressões exercidas pelas camadas superiores provocam a compactação, reduzindo a porosidade.

De acordo com Kiehl (1979), solos secos argilosos apresentam consistência dura, já solos úmidos argilosos apresentam consistência friável, enquanto molhado. Dependendo do excesso de água, a consistência de um solo argiloso pode ser alterada não só pelos diferentes teores de água, mas também, pela natureza da argila, uma vez que, a consistência aumenta em função do menor tamanho das partículas do solo.

Solos que contêm mais de 30 a 35% de argila segundo Evans (1980), são, em geral, coerentes e formam agregados estáveis, os quais resistem ao impacto das gotas de chuva (*splash*) e conseqüentemente, à erosão. Bryan (1971), considera que o tipo de mineral argiloso é um fator importante para controlar a estabilidade dos agregados e também a sua erodibilidade. Os argilominerais, ao se desidratarem, podem exercer considerável força de coesão que cimenta vigorosamente os agregados. A alternância de umidade e ressecamento causando dilatação e contração da massa do solo provoca rachaduras e individualiza os torrões. Isso justifica o fato de que os solos argilosos, quando secos, tornam-se duros e entorroados.

Segundo Brady (1989), a ação da água intersticial no interior do solo, juntamente com o ar, nele contido, determinam as reações químicas que definem as suas propriedades. Nesse processo há que se considerar a temperatura. A presença de água e temperatura elevada acelera as reações químicas, mas, se a temperatura é elevada e a água é escassa, as reações tendem a diminuir.

A água das precipitações que chega à superfície, pode se infiltrar e ser armazenada nos interstícios do solo, ou escoar em forma de drenagem superficial. O movimento da água, no solo, segundo Thornes (1980), ocorre

como resultado das diferenças potenciais pela migração da água e difusão do ar através dos espaços porosos. A água ao penetrar no solo passa a ocupar os espaços antes preenchidos pelo ar, isto é, se o solo estiver completamente seco. Assim, a água e o ar são inversamente proporcionais, ou seja, quando aumenta a quantidade de água, diminui a proporção de ar. Essa relação será maior ou menor em função de outros fatores, como: textura, profundidade, teor de umidade e estado de agregação. Segundo Camargo (1975):

“a difusão do ar no solo é um fenômeno importante para as suas propriedades físicas e químicas, por tratar do movimento do ar atmosférico para os espaços porosos livres de água, de onde é absorvido para as atividades químicas e bioquímicas”.

De acordo com esse autor, o oxigênio, assim como o carbono, o hidrogênio e o nitrogênio são elementos essenciais ao metabolismo, porque interferem nos fenômenos respiratórios das raízes das plantas e dos microorganismos e na decomposição da matéria orgânica do solo.

As propriedades do solo que têm controle sobre a erosão estão relacionadas com os processos químicos, sobretudo, através da decomposição da matéria orgânica (Thornes, 1980). Segundo Fassbender (1984), as reações do solo são influenciadas pelas trocas catiônicas e aniônicas. Muitos são os processos químicos e físicos relacionados com as trocas catiônicas e aniônicas, consideradas por alguns autores como sendo uma das propriedades químicas mais importantes do solo (Wutke e Camargo, 1975; Fassbender, 1984).

2.3. Processos Determinantes na Erosão dos Solos

Segundo Guerra (1998), “os fatores controladores da erosão dos solos são aqueles que determinam as variações nas taxas de erosão”.

A erodibilidade de um solo pode ser caracterizada pelos seguintes fatores:

- chuva;
- erodibilidade dos solos, proporcionada pelas suas propriedades físicas e químicas;
- características das encostas, como, forma, tamanho e declividade;
- natureza da cobertura vegetal, na qual se incluem os efeitos espaciais, que podem impedir ou não os efeitos da energia cinética das chuvas (Morgan, 1977; Evans, 1980; Boardman, 1983).

Muitos autores enfatizam essa questão nas pesquisas que tratam da erosão dos solos.

O estudo de Jackson (1986), sobre estimativa de perda de solos, procura identificar os fatores responsáveis pela intensidade da erosão. Entre os mais importantes estão as características das chuvas, as encostas, uso da terra e propriedades do solo.

As chuvas, os fluxos de água e o vento, segundo Thornes (1980), representam forças de deslocamento e transporte das partículas do solo. Quando essas forças são superiores à resistência do solo ocorre erosão.

No entanto, a erosão não é a mesma em todos os solos, decorrência da diferença de resistência que varia entre eles, cujo efeito, depende das suas propriedades físicas e químicas, além das características da cobertura vegetal.

Portanto, para se compreender o problema da erosão é necessário pesquisar os aspectos relevantes dos fatores controladores dessas e

identificá-los com mais precisão para que se possa entender quando e como a erosão se manifesta.

2.3.1. Processos Relacionados às Formas de Erosão Hídrica

Os principais processos associados às formas de erosão hídrica são definidos como:

- **golpeamento (*splash*)** – Segundo Guerra (1999), a ação do *splash*, também conhecido como erosão por salpicamento, é o estágio mais inicial do processo erosivo, pois separa as partículas que compõem o solo, para serem transportadas pelo escoamento superficial.
- **formação de poças (*ponds*)** – Segundo o mesmo autor, esse é o estágio que antecede ao escoamento superficial (*runoff*), sendo formados pela concentração de água nas irregularidades existentes no topo do solo (microtopografia), que podem ter de 1 a 2mm de profundidade, podendo atingir até alguns centímetros, dependendo do tipo de solo.
- **escoamento superficial (*runoff*)** – Guerra (1999), cita que à medida que a água se infiltra no solo e começa a saturá-lo, formam-se poças na superfície, dando início ao processo de escoamento superficial:

“Horton (1945) foi um dos primeiros pesquisadores a procurar compreender como esses processos se desenvolvem nas encostas. A visão do autor em relação aos processos de escoamento superficial e da formação de ravinas está relacionada aos conceitos de infiltração e geração de runoff”.

- **escoamento em lençol (*sheetflow*)** – De acordo com Guerra (1999), a água acumulada nas depressões do terreno começa a fluir pela encosta quando o solo está saturado e as poças não conseguem mais conter essa água. A princípio o fluxo é difuso, ou seja, um escoamento

em lençol. Este tipo de processo também é conhecido como fluxo laminar.

- **desenvolvimento de Microrravinas (*Micro-Rills*)** – O mesmo autor define esse como sendo o terceiro estágio da evolução do escoamento superficial no processo de formação de ravinas. Neste caso, a maior parte da água que escoar em superfície está concentrada em canais bem definidos, embora ainda sejam bem pequenos.
- **formação de Bifurcação, através dos Pontos de Ruptura do solo (*Knickpoints*)** – Para Bryan (1990), a formação de ravinas é um processo erosivo crítico, freqüentemente associado a um rápido aumento na concentração de sedimentos transportados pelo *runoff*. Segundo Guerra (1999):

“O reconhecimento do desenvolvimento de ravinas é de grande importância prática na conservação dos solos, e a não distinção entre situações onde as ravinas podem se estabelecer ou não, contribui para uma menor capacidade de predição da ocorrência de tais processos em alguns modelos, como é o caso da Equação Universal de Perda de Solo”.

- **voçoroca** – Feição erosiva oriunda da expansão de ravinas ou originada pela ação do escoamento subsuperficial, sucedidas pela destruição da vegetação nativa ou pela deficiência de drenagem de águas pluviais, sem as devidas dissipações de energia. Enfim, essas feições erosivas podem ter origens variadas.

A complexidade do processo de erosão por voçorocas tem sido mencionada em diversos trabalhos (Guidicini e Nieble, 1984; Bigarella e Mazuchowski, 1985). Apesar disso, alguns autores buscam generalizar os fatores que determinam esse tipo de erosão. Selby (1994), por exemplo, salienta que voçorocas se formam quando um pequeno grupo de fatores se

conjuga, em áreas submetidas a mudanças ambientais, quais sejam: aumento local de declividade, concentração de fluxo de água e remoção de cobertura vegetal.

2.3.2. Processos Relacionados a Precipitações Pluviométricas

A precipitação pluviométrica é considerada, por diversos autores, um importante fator erosivo (Stocking e Elwell, 1973; Hodges e Bryan, 1982), observando-se a forte influência que esta exerce sobre os efeitos do trabalho das águas, tanto em superfície como em subsuperfície. O processo erosivo pela ação da chuva se inicia com a desagregação de partículas, sendo esta proporcional a erosividade e à susceptibilidade dos solos a sofrerem erosões (Sanchez *et al.*, 1986).

Vale ressaltar que diversos autores como Wischmeier (1959); Wischmeier e Smith (1958); Hudson (1973); Lal (1976), entre outros, tem estudos voltados para a correlação entre o índice de erosividade e a perda de solo.

Hudson (1961), define erosividade como sendo “*a habilidade da chuva causar erosão*”. A indicação mais apropriada da erosividade, segundo Morgan (1986), se fundamenta no índice da energia cinética da chuva.

De acordo com Guerra (1999):

“a projeção de partículas implica erosão e depende da intensidade e, sobretudo, da energia cinética da chuva. A energia cinética nos solos, devido a chuva, é obtida pela expressão $E_k = \frac{1}{2} mv^2$, onde m representa a massa em (Kg) e v a velocidade em (m/s). Boa parte dessa energia é dissipada em atrito, sobrando apenas 2% de energia para o trabalho erosivo (Selby, 1993 e 1994). A projeção de partículas para fora da zona de impacto contribui com o fornecimento de material móvel a ser carregado pelo escoamento superficial”.

Muitos parâmetros têm sido sugeridos como medida de erosividade, devido ao impacto da gota de chuva (*Splash*). Elwell (1973); Hodges e Bryan (1982); Boardman e Robinson (1985); Morgan (1986), entre outros, consideram como parâmetros de erosividade a intensidade e total da chuva, a energia cinética e o momento.

O total e a intensidade das chuvas podem causar diferentes taxas de erosão, ao provocar a dispersão das partículas, cujo efeito está em função da duração e frequência da chuva. Quanto maior a intensidade da chuva, maior a perda de solo por erosão (Bertoni e Neto 1985).

Hudson (1961), Elwell e Stocking (1973), entre outros autores, associam momento e energia cinética a erosividade e perda de solo. A física define energia cinética como sendo a energia de um corpo em movimento. Daí a correlação do efeito dessa força, devido ao efeito do impacto das gotas de chuva em movimento que incidem bruscamente na superfície do solo, enquanto o momento é o produto deste impacto, em função da massa e velocidade de queda das gotas. Segundo Morgan (1986), a transferência do momento para as partículas do solo tem dois efeitos, compactar o solo e desagregar partículas.

A força do impacto das gotas de chuva é o estágio mais inicial no destacamento de partículas (*splash*) dificultando a infiltração até causar a selagem do solo, antes do início do *runoff*. Esse processo, segundo Hudson (1973) é uma função do tamanho da gota, velocidade e forma. O tamanho da gota implica na energia cinética da chuva e na velocidade terminal, de acordo com Elwell e Stocking (1973), depende do tamanho e da forma das gotas.

Uma gota com 2 mm de diâmetro tem velocidade terminal de cerca de 6 m/s, enquanto, uma gota de tamanho maior que 6 mm de diâmetro tem

uma velocidade de 9 m/s (Laws, 1941). Logo, à medida que as gotas aumentam de tamanho há também aumento da velocidade terminal.

O efeito das gotas de chuva, sobre os agregados do solo, varia em função da inclinação, do ângulo de incidência do gotejamento e das características da cobertura vegetal. Segundo Bertoni e Neto (1985), as superfícies planas com o impacto das gotas de chuva, as partículas que são desagregadas tendem a ser espalhadas em todas as direções. Nas superfícies inclinadas, as partículas são movimentadas encosta abaixo, o que pode desprender grande quantidade de solo, pelo efeito de salpicamento.

Na desagregação de partículas, de acordo com Ellison (1963), muitas delas podem ser deslocadas a mais de 60 cm de altura e mais de 1,5 m de distância. Conforme diz o autor, em terrenos sem cobertura vegetal há um desprendimento de centenas de partículas.

Segundo Evans (1980), o impacto da gota de chuva sobre o solo não tem capacidade suficiente para remover as partículas desagregadas para muito longe. Kirkby (1980), associa a formação de pedestais de alguns centímetros de altura, encontrados debaixo de conchas, seixos ou outros obstáculos ao salpicamento (*splash*). As presenças de microformas, na superfície do solo, representam indícios de perda de solo pela erosividade das chuvas.

A distribuição, quantidade e intensidade das chuvas são fatores importantes, tanto para erosão como para a infiltração. Se cair mais chuva do que a quantidade que se infiltra no solo, ocorre escoamento e erosão. Para Hudson (1961), a partir de 25 mm/h de chuva ocorre erosão nas áreas intertropicais. Wischmeier (1959), considera uma intensidade de 30 mm/h como parâmetro para avaliar perda de solo.

Já Morgan (1986), associa erosão a partir de 10 mm/h de chuva. Boardman e Robinson (1985) atribuem a 5 mm/h. No entanto, observa-se que não há coincidência entre os valores considerados pelos referidos autores, sobre a quantidade de chuva capaz de causar erosão. Isso se deve ao fato de que outros fatores estão envolvidos nesse processo, como a capacidade de erosão do solo, o diâmetro da gota, características das encostas, tipo de vegetação, umidade antecedente, entre outros, que interferem nos processos erosivos, sobre vários aspectos, tornando difícil a obtenção de um único parâmetro capaz de prever a erosão dos solos.

A erosão dos solos ocorre de forma mais séria nas regiões com regime de chuvas tropicais (Stocking, 1983), como no caso do Brasil e da África, onde as pesquisas têm apontado a erosão hídrica como um dos principais fatores de desgaste do solo, acelerada pelo homem devido ao desmatamento intensivo e à utilização de práticas agrícolas inadequadas.

Nas áreas desprovidas de vegetação, que foram convertidas em terras aráveis, ou com vegetação esparsa, os solos ficam menos protegidos e, durante as fortes precipitações, dependendo das características dos solos e do relevo, o processo erosivo pode ser acelerado, com a concentração das águas de escoamento. Como as propriedades do solo podem variar com o tempo, pode haver mudanças no comportamento da erodibilidade do solo, sobretudo, na estabilidade dos agregados, visto que, segundo Tisdall e Oades (1982), onde os solos são freqüentemente cultivados, ocorre ruptura dos agregados, em função do impacto das gotas de chuvas e o rápido umedecimento.

No caso deste trabalho, pretende-se avaliar o processo de voçorocamento ocorrido na área de empréstimo localizada a jusante da ombreira direita da Barragem de Itumbiara – GO. Visando Medidas Corretivas e Preventivas desta Formação Erosiva.

2.3.3. Processos Relacionados à Erosão Eólica

O principal fator na erosão eólica, conforme Morgan (1986), corresponde à velocidade do movimento do ar. Quanto mais forte for o vento maior será a quantidade de partículas que transporta, sendo, portanto, proporcional à velocidade e à carga.

A susceptibilidade dos solos à erosão eólica depende do tamanho e densidade das partículas. Para uma certa velocidade existe um tamanho na remoção de partículas móveis (Wilson e Cook, 1984). As partículas mais destacáveis pela erosão eólica, se comparada com a erosão da água, são muito pequenas (Morgan, 1986).

Segundo Kirkby (1980), a erosão do solo pelo vento, assim como, a erosão da água, se fundamenta na força com que o fluido pode atuar sobre as partículas e essa força para qualquer fluido (ar ou água), depende da rugosidade da superfície.

A taxa em que ocorre a erosão eólica depende da erodibilidade do solo e da erosividade do vento (Wilson e Cook, 1984). Segundo esses autores, o impacto de uma partícula em uma superfície de baixa resistência pode ser suficiente para que outras partículas sejam mobilizadas.

O principal fator que afeta a erosividade por abrasão é a força do vento (Wilson e Cook, 1984). Se os solos são bem estruturados, a abrasão e o desgaste podem ser mínimos. A resistência à erosão do vento aumenta rapidamente quando há predominância de partículas primárias e agregados maiores do que 1 mm (Morgan, 1986). Essas taxas são maiores nas áreas de pouca ou quase nenhuma proteção de cobertura vegetal. Qualquer superfície relativamente lisa, conforme Kirkby (1980), pode ser susceptível à

erosão eólica e o perigo aumenta quando o solo contém quantidades apreciáveis de partículas finas.

A erosão eólica também pode ser acelerada em decorrência das práticas agrícolas inadequadas e seus efeitos, assim como, a erosão hídrica, pode resultar em danos ao solo e aos cultivos (Wilson e Cook, 1984). O pastoreio, a exploração de madeira e outras formas de exploração da terra também conduzem a um aumento de erosão do solo, tanto pelo vento como pela água.

2.3.4. Processos Erosivos devido à Geometria de Encostas

A declividade, comprimento e forma da encosta, juntamente com outros fatores ligados às propriedades do solo, podem afetar a erodibilidade (Morgan, 1986). Sua ação reflete, sobretudo, na dinâmica da água, que pode interferir na formação de *runoff* e na infiltração.

A quantidade de material transportado depende da velocidade da água e esta é uma consequência direta do declive. Muitos estudos têm feito correlações com perdas de solos e efeito *runoff* como consequência da declividade e comprimento das encostas. Para Wischmeier (1959), o efeito *runoff* diminui com o aumento do comprimento da encosta.

No entanto, o mesmo não é demonstrado por outros pesquisadores que tratam desse assunto como Morgan (1986), por exemplo, que associa maiores perdas de solos às encostas mais longas, como consequência do efeito *runoff*, em função de sua maior velocidade que aumenta com o aumento do comprimento da encosta.

Morgan (1986), ressalta que a erosão é maior nas encostas íngremes e compridas, devido ao aumento da velocidade e a quantidade de *runoff*.

Experiências têm demonstrado que o aumento do comprimento das encostas age no sentido de acentuar a erosão.

O comprimento de rampa aumenta o caminho percorrido pelas águas e o processo erosivo. Quanto mais longa a encosta, maior o volume de água que escoar e maior a capacidade de remover sedimentos (Tavares e Vitte, 1993).

Além da inclinação das encostas, conforme Poesen (1984), outros importantes fatores influenciam nas taxas de infiltração, como a textura do solo, a estrutura e a rugosidade da superfície.

Outro fator que também deve ser considerado é a forma da encosta. As variações do perfil têm um papel significativo nas propriedades dos solos e na erosão. À ocorrência de convexidade e concavidade reflete variações na dinâmica do fluxo e no processo de infiltração. A parte mais côncava da encosta geralmente é a mais erodida. Segundo Morgan (1986), na parte superior das encostas, particularmente, aquelas de forma convexa, o transporte por *splash* pode ser um processo dominante.

2.3.5. Processos Erosivos por Formação de Ravinas e Voçorocas

A erosão em ravinas e voçorocas é determinada, principalmente pelas propriedades físicas e químicas do solo e pela velocidade e profundidade do fluxo de água. O processo se inicia pelo impacto das gotas de chuvas em um terreno descoberto e pelos pontos de ruptura das partículas do solo.

As incisões do terreno ocorrem em função da intensidade e frequência das chuvas, embora a magnitude dos efeitos varie com as condições do solo, características das encostas, cobertura vegetal e as práticas agrícolas adotadas no terreno (Wischmeier e Smith, 1958).

A intensidade e frequência das chuvas respondem pela quantidade da água precipitada que chega à superfície do solo, que de acordo com seu estado poderá absorver parte dessa água e o excedente passa a fluir no topo do solo. Nesse caso, a incisão é mais rápida em solos que oferecem pouca resistência. A fraca coerência entre as partículas e a diferença na velocidade do fluxo, influenciada pelas características das encostas e rugosidade do terreno, determina diferenças na força erosiva (Kirkby, 1980).

A erosão em ravina e voçoroca depende, principalmente, da capacidade do *runoff* e dos fatores controladores desta. Alguns autores associam *runoff* à formação de crosta, muito embora, segundo eles, nem sempre crosta e ravina são necessariamente encontradas na mesma área estudada.

Segundo Govers e Rauws (1986), os processos erosivos em ravinas são um dos mais importantes subprocessos de erosão pelo fluxo. Muitos estudos de erosão, segundo Morgan (1986), não distinguem os efeitos da erosão em ravina dos efeitos do *overland flow*, uma vez que ambos afetam, geralmente, a mesma parte da encosta e as ravinas são também muitas vezes formas efêmeras sobre a superfície.

Ravinas em terras agrícolas localmente diferem de um ano para outro, porque as práticas agrícolas podem interromper seu desenvolvimento pela obliteração das mesmas através das gradagens. No entanto, com as chuvas, novas ravinas poderão se formar.

Quando a forma da encosta influencia uma maior concentração de fluxo, em função do volume, da velocidade e da resistência do solo, a erosão nas ravinas pode se aprofundar e evoluir para a voçoroca.

Thornes (1980) *apud* Guerra (1999), cita que as voçorocas são dinamicamente semelhantes aos pequenos canais de escoamento, que se desenvolvem pela instabilidade das margens, decorrente do solapamento e desmoronamento de material, provocado pelo aumento do fluxo de água.

O desenvolvimento de voçorocas em uma área, geralmente é associado com erosão acelerada e instabilidade da paisagem (Morgan, 1986). As causas de sua formação são várias, as quais, em geral, se atribui ao desmatamento, o pisoteio de animais nos pastos, às técnicas agrícolas inadequadas e às queimadas, áreas de expansão urbana, entre outras.

Conforme essas modificações, ligadas às atividades antrópicas, estão: a forma, a inclinação e comprimento das encostas, que vão influenciar na velocidade e volume do *runoff*, dependendo da chuva e da infiltração, a resistência à erosão do topo do solo e subsolo e a concentração de fluxos turbulentos, cuja capacidade erosiva aumenta consideravelmente (Leopold *et al.*, 1964)

A formação de voçorocas, em decorrência da presença de *pipes*, tem sido ressaltada nos estudos de Berry (1970), Morgan (1986) e Guerra (1998). Processos de voçorocamento também podem ser causados através das cicatrizes de antigos deslizamentos de terra, que são deixados nas encostas íngremes, onde o escoamento das águas pode se concentrar podendo causar a evolução de voçorocas (Vittorini, 1972).

Segundo Kirkby (1980), a intensidade da erosão está associada com a incisão das voçorocas. Esse tipo de erosão é uma das principais causas do depauperamento dos solos, o que reflete em sérios problemas para a agricultura.

2.3.6. Aspectos Geológico-Geotécnicos dos Solos

A princípio pode-se dizer que a natureza do solo depende das características mineralógicas/estruturais da rocha matriz (rocha fonte), tipo de solo, a sua estrutura, a composição físico-química desses, entre outros, além da intensidade dos processos intempéricos, podendo com isso, ser mais susceptível ou não aos processos erosivos.

Gray e Leiser (1989) entendem que "*não há ainda um índice para erodibilidade simples e universalmente aceito*". Sendo assim, os autores apresentaram uma classificação de forma organizada da erodibilidade, fundamentada na classificação unificada dos solos, quais sejam: mais erodível para menos erodível, representada da seguinte forma:

ML > SM > SC > MH > OL > CL > CH > GM > GP > GW

Onde a terminologia **G** indica cascalho e **S** areias, sendo areias e cascalhos bem graduados designados por **SW** e **GW**, respectivamente. Os materiais mal graduados são indicados pelas designações **SP** e **GP**, respectivamente. As partículas finas do solo são subdividas conforme os seus limites de liquidez, quais sejam: se $LL < 50$ o símbolo é **L**, se $LL > 50$ o símbolo é **H**. Quanto às letras **M**, **C** e **O**, são indicadas como representativas de siltes, argilas e solos orgânicos, respectivamente.

É citado ainda pelos mesmos autores que a erodibilidade é baixa, em solos bem graduados e altos em siltes e areias finos e uniformes. Esta tendência diminui, entretanto, com o aumento do teor de argila e matéria orgânica, índices de vazios baixos e teor de umidade alta.

Vilar e Prandi (1993) definem erodibilidade de um solo como sendo a aptidão que este possui de resistir aos esforços provenientes dos processos erosivos, associando a essa resistência, as características intrínsecas do

solo e os fatores subsidiários, tais como: ciclos de secagem e umedecimento e a composição química da água presente. Esta é uma forma comum de se identificar os processos erosivos de um solo, através de suas características físicas e químicas, acrescidas de outros condicionantes externos.

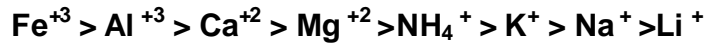
Mortari (1994), a partir do trabalho de Vargas (1987), descreve como propriedades físicas de maior interesse do ponto de vista geotécnico, como sendo: a textura do solo expressa por sua distribuição granulométrica; a plasticidade expressa pelos Limites de Atterberg e a sua estrutura expressa pela porosidade, arranjo dos grãos e estrutura reliquiar.

Apesar dos índices físicos de um solo serem geralmente suficientes para identificá-lo, a caracterização do seu comportamento geomecânico só é possível quando se considera em conjunto o seu estado natural.

Fácio (1991), apresentou uma correlação entre a erodibilidade dos solos do Distrito Federal e as suas características físico-químicas, para isso realizou análise sobre os seguintes parâmetros:

- **plasticidade** – conclui que o aumento deste índice está associado a um aumento na resistência a erosão;
- **granulométrica** – Hémensal (1987) *apud* Fácio (1991), relaciona a erodibilidade com a curva de distribuição granulométrica, considerando o coeficiente de não uniformidade dos solos, definido como $cu = D_{(60)} / D_{(10)}$. Os valores $D_{(60)}$ e $D_{(10)}$, referem-se aos diâmetros onde respectivamente 60% e 10%, em peso, das quantidades de partículas são menores que estes diâmetros. Solos mal distribuídos ($cu < 5$) são definidos como solos erodíveis ao passo que solos com ($cu > 15$) são classificados como solos menos erodíveis.
- **presença de cátions trocáveis** – os cátions existentes no solo influenciam na floculação e na sua plasticidade. Arulanandan *et al.*

(1975) *apud* Fácio (1991) diz que, o poder de floculação dos cátions decresce da seguinte forma:



Sherard *et al.* (1976) descrevem que argilas dispersivas, ricas em sódio, são erodidas quando as partículas entram em suspensão ao contato com a água. O tipo de cátion presente atua de forma diferenciada na plasticidade dos minerais.

Grim (1962) mostra que a presença dos cátions Na^+ e Li^+ em montmorilonitas aumenta consideravelmente os valores da plasticidade. Já as ilitas mostram uma diminuição da plasticidade quando enriquecidas nos cátions de Na^+ e Li^+ ou amônia (NH_4^+). Esta diminuição também é observada nas caulinitas ricas em sódio.

Arumugan (1974) *apud* Fácio (1991), descreve a influência dos argilominerais na susceptibilidade à erosão como: as argilas do tipo montmorilonita possuem resistência à erosão maior que a ilita, que por sua vez, possui uma resistência maior do que a caulinita.

Fácio (1991), conclui que o uso das correlações entre a erodibilidade do solo e suas características, físico-químicas e geotécnicas, ficam comprometidas pelo elevado número de parâmetros que interferem nesse processo, carecendo, portanto de uma análise sob as condições específicas de cada um destes para a formulação de um modelo universal.

Morgan (1986) cita que "*as partículas menos resistentes a processos erosivos são siltes e areias*". Já Evans (1980) analisa a erodibilidade de um solo em função do teor de argila, concluindo que solos que apresentam fração argila limitada são mais susceptíveis a processos erosivos.

A erodibilidade dos solos é também definida por Morgan (1986), como sendo a resistência do solo em ser removido e transportado. Esta varia com o tempo, dependendo das modificações que ocorrem:

- no teor de matéria orgânica;
- na estabilidade dos agregados; nas propriedades físicas, químicas e bioquímicas (Hadley *et al.*, 1985).

Morgan (1986) e Evans (1990) estimam que as modificações na erodibilidade dos solos, através do tempo, podem torná-los mais ou menos susceptíveis à erosão. Sempre que analisada, para determinados fins, ligados à agricultura ou outras formas de uso do solo, deve ser observada por um certo período de tempo.

A textura, segundo muitos autores (De Ploey e Poesen, 1985; Guerra, 1998), tem relação com erodibilidade e não pode ser considerada como único parâmetro para explicar as características do solo, porque as frações, areia, silte e argila normalmente não estão isoladas, encontrando-se agrupadas na forma de agregados, que podem ser estáveis ou instáveis, dependendo do grau de coesão existente entre as partículas individuais.

A maioria dos solos arenosos ou areno-siltosos é considerada como solos de alta erodibilidade (Evans, 1980 e 1990), por serem geralmente mais permeáveis e soltos, além de mais facilmente erodidos que os solos argilosos. Solos mais estáveis são correlacionados com os maiores teores de argila e de matéria orgânica.

As argilas, segundo Guerra (1998) são menos removidas, principalmente, se estão agregadas. Conforme esse autor, as porcentagens de areia, silte e argila devem ser analisadas em conjunto com outras propriedades, porque a agregação dessas partículas inclui outros elementos como o teor de matéria orgânica. Alguns desses elementos são mais

facilmente removidos que outros pela ação da água e pelo vento, como é o caso das areias finas e dos siltes.

Farmer (1978) e Poesen (1984) indicaram a importância do teor de areia em um solo, no deslocamento de partículas, observaram nos seus estudos que não só as areias propiciam erodibilidade, mas os siltes também. Os trabalhos são notórios em afirmar que os solos com elevado teor de silte são mais susceptíveis à erosão.

A concentração das frações silte ou silte e areia fina e o menor teor de argila aumentam a erodibilidade (Wischmeier, 1959). Segundo Resende *et al.* (1995), os altos teores de silte e de areia também favorecem a formação de crosta, citando como exemplo a presença de solos endurecidos encontrados em alguns lugares do Brasil, alegando, que a proporção de areia de vários tamanhos juntamente com a argila, induzem ao empacotamento, resultando na formação dessa estrutura.

Segundo Thornes (1980), as argilas e a matéria orgânica, devido às suas propriedades coloidais, em adsorver cátions, influem em outras propriedades do solo e, portanto, na sua susceptibilidade à erosão. Solos argilosos são mais resistentes à ação exercida pela chuva e ao escoamento superficial, em decorrência da força coesiva existente entre as partículas.

De Ploey (1985), Morgan (1986), Evans (1990) e Guerra (1990 e 1991), avaliam através de suas pesquisas a importância da matéria orgânica na erodibilidade dos solos, cujo teor é significativo para definir, juntamente com outras propriedades, a forma como ela interfere na erosão.

De acordo com as experiências feitas na Inglaterra, Greenland *et al.* (1975), concluíram que os solos com menos de 3,5 % de matéria orgânica são instáveis à erosão. Enquanto De Ploey e Poesen (1985) estimaram que

os solos instáveis são aqueles que possuem menos de 2% de matéria orgânica. A importância do baixo teor de matéria orgânica na instabilidade é também referida por Evans (1990), quando afirma que os solos com pouca matéria orgânica podem ser considerados propensos à erosão.

As plantas representam a fonte mais importante de matéria orgânica, porque incorporam detritos orgânicos ao solo, contribuem para sua estabilidade e para o suprimento de nutrientes dos microorganismos (Brady, 1989; Resende *et al.*, 1995). A retirada da vegetação impede a adição da matéria vegetal morta ao solo, alterando a produção de húmus, cujo processo é de grande importância no desenvolvimento da estrutura granular.

As modificações impostas pela agricultura como aração, uso de máquinas agrícolas, fertilização e calagem são atividades que mais afetam a estrutura do solo, principalmente a granular, por ser ela uma característica de muitos solos, particularmente, daqueles que apresentam altos teores de matéria orgânica (Brady, 1989).

O processo citado acima, evidentemente, afeta a erodibilidade estabelecendo-se de certa forma, uma relação entre a erosividade da chuva e do vento e a susceptibilidade dos solos à erosão.

A estabilidade dos agregados reduz a erosão (Bryan, 1990), esta depende da proporção de argila, de matéria orgânica, da ação biótica e dos processos físicos e químicos (Imeson e Kwaad, 1990). De acordo com estes autores, os processos bióticos produzem a estrutura granular dos solos cobertos por florestas e gramíneas.

De Ploey e Poesen (1985) correlacionam a estabilidade dos agregados à influência da matéria orgânica, elemento de grande atividade na estruturação do solo e que tem sido reconhecido pela função de agregar

partículas e influenciar na erodibilidade tornando-os mais ou menos susceptíveis à erosão, conforme aumenta ou diminui o seu teor.

Para De Ploey e Poesen (1985), a estabilidade dos agregados representa um dos fatores controladores da erodibilidade da água no topo do solo e na formação de crosta.

Agregados de baixa resistência (Farres, 1978) condicionam a formação de crosta devido ao recobrimento da superfície pelo material fino, que é desagregado durante as chuvas e que causa dificuldade na infiltração dos solos.

Segundo Guerra (1998), “a densidade aparente pode aumentar sob várias circunstâncias, mas a agricultura parece ser a que mais afeta essa propriedade, tanto devido à redução de matéria orgânica como pelo uso de máquinas agrícolas”.

O pH, que também é um fator controlador de erodibilidade, não é uma característica fixa no solo, podendo também variar com as mudanças que ocorrem. Essa variação se deve à troca do regime das chuvas que torna os solos mais ácidos ou mais alcalinos.

A relação do pH com a erodibilidade, conforme os estudos que tratam de erosão como os de Wischmeier (1959), entre outros, atribuem correlações das medidas do pH com os elementos que participam das soluções químicas do solo, como o sódio, o cálcio, etc.

Segundo Fassbender (1984), a influência do pH na estabilidade dos agregados é indireta através do complexo de troca catiônica. Com o pH alto e predominância de cálcio na solução pode ocorrer maior floculação pela dispersão do oxigênio, provocando maior atividade biológica e,

conseqüentemente, maior intensidade de agregação. No entanto, se predomina sódio e potássio ocorre dispersão excessiva dos colóides e se perde a estabilidade dos agregados.

2.3.7. Quantificação de Perda de Solo por Erosão Laminar

Ao longo dos anos, diversas equações empíricas foram desenvolvidas a fim de se tentar quantificar as perdas dos solos por erosão laminar, até que fosse encontrado um modelo que atendesse de uma forma mais satisfatória, quanto a confiabilidade dos resultados encontrados.

Desta forma, Wischmeier e Smith (1958) desenvolveram a Equação Universal de Perdas de Solos (**Universal Soil Loss Equation**), também reconhecida pela sigla (**USLE**), internacionalmente consagrada.

A equação é fundamentada em análises estatísticas de medição de erosão “*in situ*” para eventos de precipitações pluviométricas naturais ou simuladas, adotando parâmetros que exerçam, de certa forma, um determinado grau de influência na erosão laminar provocada por chuvas, a qual é expressa pela relação: $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$, onde:

A: Índice que representa a perda de solo por unidade de área (t/ha.ano);

R: Índice relativo a erodibilidade da chuva e da enxurrada (MJ; mm/ha; h.ano);

K: Índice relativo a erodibilidade do solo (t/ha; h/ha; MJ; mm);

L: Índice relativo ao comprimento da encosta (adimensional);

S: Índice relativo à declividade da encosta (adimensional);

C: Índice relativo ao fator referente ao uso e manejo do solo (adimensional);

P: Índice relativo à prática conservacionista adotada (adimensional).

O índice relativo a erodibilidade da chuva (**R**), é função da energia dissipada pela chuva multiplicada pela sua intensidade mínima de precipitação no período de 30 minutos: $R = EI / 100$, onde:

E: Energia cinética total para um dado evento chuvoso

I: Equivale a precipitação pluviométrica máxima durante 30 minutos

De acordo com Gray e Leiser (1989), “Os registros de tempestades isoladas são tomadas ao longo de um determinado intervalo de tempo para obter valores acumulados de **R**” para outros períodos de tempo, como por exemplo: (um mês ou um ano).

O índice relativo a erodibilidade do solo (**K**), pode ser obtido através de um monógrafo desenvolvido por Wischmeier (1959), utilizando somente cinco parâmetros do solo, quais sejam: porcentagens de silte e areia muito fina, porcentagem de areia, porcentagem de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade do solo estudado.

Quanto aos índices relativos ao comprimento e declividade de encosta (**L,S**), costumam ser considerados em conjunto, apesar da importância interdependente, como um fator topográfico, o qual é determinado utilizando-se uma expressão empírica.

O índice relativo ao uso e manejo do solo (**C**), é tabelado de forma a atender como o solo se apresenta em diversas modalidades, quais sejam: Solos com proteção vegetal, solos desprovidos de proteção vegetal, entre outras.

O índice relativo à prática de controle (**P**), é também tabelado e como tal representa um parâmetro de medidas mitigadoras adaptadas no controle

dos processos erosivos no campo, tais como: drenagem, terraceamento, estabilização de cursos d'água, entre outros.

Segundo Vilar e Prandi (1993) *apud* Santos (1997) a Equação Universal de Perdas de Solo, apesar do seu reconhecimento internacional, apresenta uma série de limitações devido ao caráter empírico que lhe é atribuído além da omissão das leis físicas que envolvem os processos erosivos.

Sua utilização é questionada por diversos autores no que tange a previsão de perda de solos em voçorocas ou durante eventos de chuva intensa. Batista (1997), condicionou a equação a uma nova linha de pesquisa, ao diagnosticar a perda laminar de solos no Distrito Federal, através da utilização de Geoprocessamento. O trabalho desenvolvido procurou mostrar que apesar de limitações no aspecto quantitativo, a aplicação da **(USLE)** dentro do ambiente proposto, permite identificar as perdas de solo assim como simular o comportamento do mesmo em projeções futuras.

O avanço crescente de disponibilidade de recursos computacionais associados ao melhor entendimento de processos físicos, envolvendo mecanismo de erosões, possibilitou o surgimento de modelos desenvolvidos nesta área, que melhor resultado apresentam para o entendimento desses fenômenos.

Dentre as pesquisas computacionais existentes, destaca-se o modelo desenvolvido por alguns órgãos do Ministério da Agricultura dos Estados Unidos, denominado de WEEP (*Water Erosion Prediction Project*).

Este modelo baseia-se fundamentalmente nos processos de infiltração, escoamento superficial, presença da cobertura vegetal, resíduos

decompostos, na prática do cultivo e manejo do solo, consolidação do solo e nos mecanismos de erosões atuantes (Neagring et. al., 1989).

Chave (1994), contesta, a aplicabilidade do modelo WEEP assim como outros na previsão de erosões em sulco e em voçoroca, em distinguir os processos de erosão de fundo de canal e de movimentos de massa em taludes, o que gera uma redução da capacidade de entendimento destes processos, prevista pelos modelos.

Como forma de superar a deficiência desses modelos, o autor propõe a utilização de um método estocástico onde, além dos processos hidráulicos de desestruturação de canais, são previstos fatores que levam em conta a instabilização de taludes, utilizando para isso um modelo probabilístico que contempla a ocorrência deste fenômeno.

3

ASPECTOS GERAIS DA ÁREA ESTUDADA

3.1. Localização

O aproveitamento Hidrelétrico de Itumbiara, com potência instalada de 2080 MW, situa-se no rio Paranaíba, na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás, nos Municípios de Tupaciguara (MG) e Itumbiara (GO), distando aproximadamente, por via aérea, 780 km do Rio de Janeiro e cerca de 640 km de São Paulo, estando a barragem a cerca de 10 km a montante da cidade de Itumbiara – GO (Figura 3.1).

A fossa erosiva, objeto deste estudo, está localizada em uma antiga área de empréstimo à jusante da ombreira direita da barragem de terra da UHE de Itumbiara, distando esta, em média 800 metros da mesma, conforme levantamento de campo ilustrado na Figura 3.2.

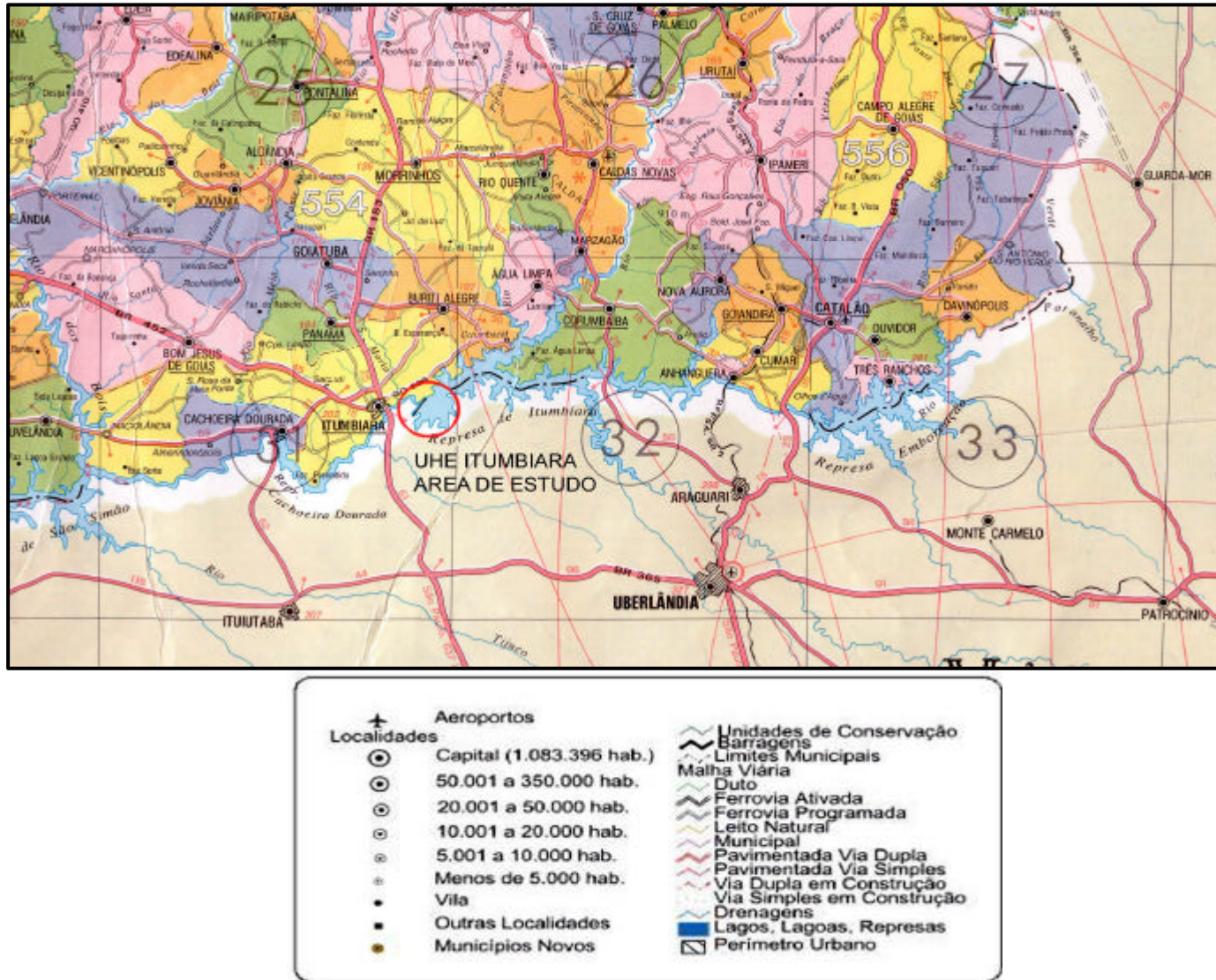


Figura 3.1 – Mapa de Localização da UHE de Itumbiara – GO / Geomapas Produções Cartográficas Ltda (1994) – Escala 1:400. 000

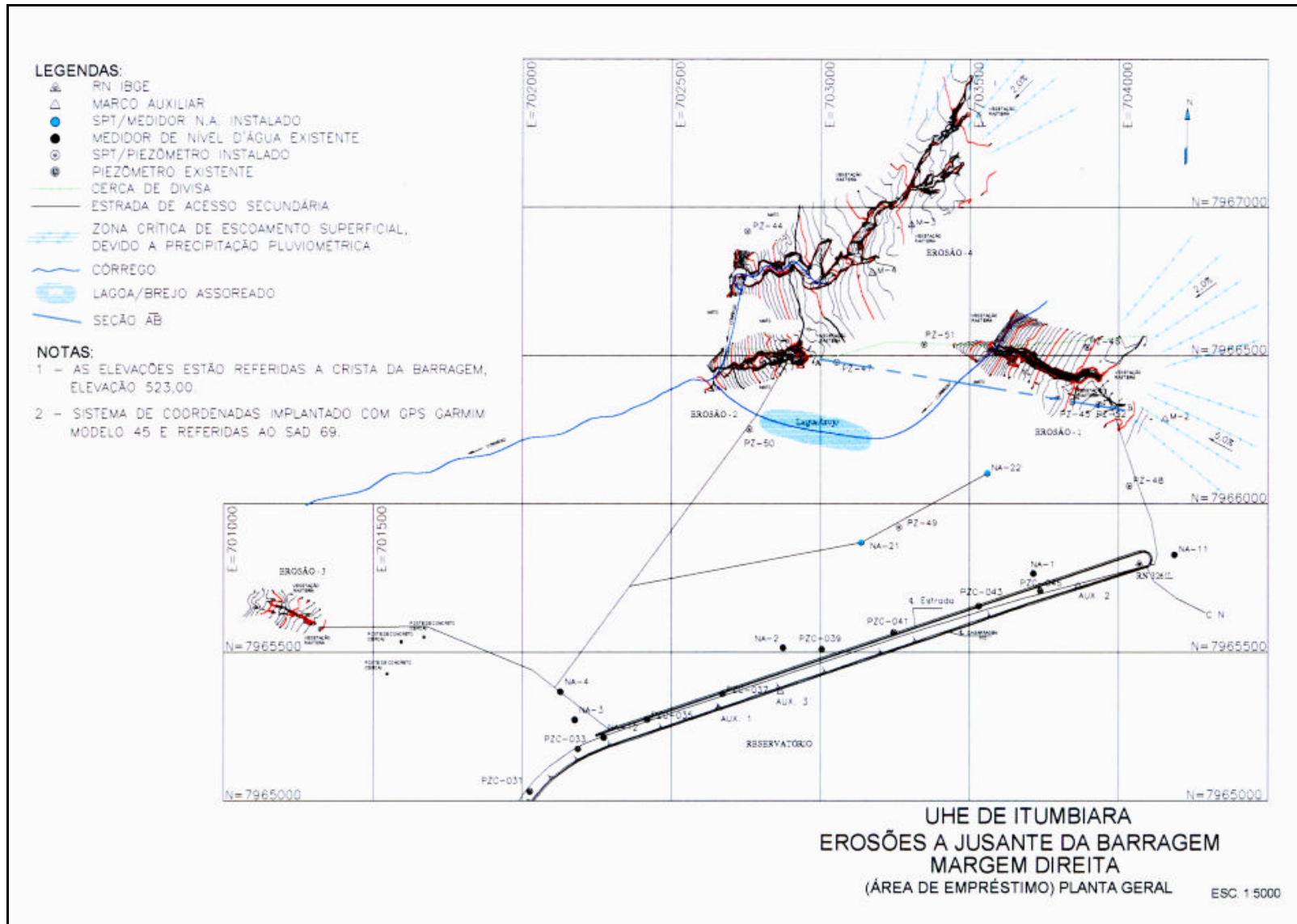


Figura 3.2 – Planta Geral com Representação da Hidrogeologia Local

3.2. Condições Climáticas¹

O clima da bacia do Paranaíba é tipicamente tropical – continental, com ocorrência de duas estações: a seca e fria, e a úmida e quente. A temperatura média anual é de 20,5 °C nas altitudes mais elevadas, aumentando muito pouco nas altitudes menos elevadas.

A estação seca tem início em abril ou maio, e termina em setembro ou outubro. A umidade relativa média durante a estação seca geralmente varia entre 45% e 55% durante o dia. A massa de Ar Tropical Continental prevalece sobre a bacia durante esta estação. Um poucas penetrações de Massas de Ar Polar Antártico ocorrem de junho a agosto, porém a interação poucas vezes produz chuvas expressivas.

Durante a estação-úmida (setembro-outubro a abril-maio) a Massa úmida de Ar Continental-Equatorial desloca-se rumo ao sul desde a Bacia Amazônica, encobrindo parcial ou totalmente a Bacia do Paranaíba. Disto resultam tempestades esparsas convectivas e orográficas² na região.

Também, da interação entre esta massa de ar úmido e as frentes frias procedentes do sul, resultam freqüentes chuvas de longa duração. Durante esta estação a umidade relativa média varia geralmente entre 75% e 85% durante o dia.

Conforme dados obtidos pela estação pluviométrica localizada a jusante da ombreira direita da barragem de terra da UHE de Itumbiara-GO, as Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 mostram os ciclos pluviométricos durante o período de 1980 a 2003, com destaque para as principais médias anuais e mensais.

¹ Relatório de Furnas Centrais Elétricas S.A. – Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná (setembro de 1983).

² Orográficas – precipitações pluviométricas que ocorrem pela ascensão de uma massa de ar forçada a transpor barreiras de montanhas.

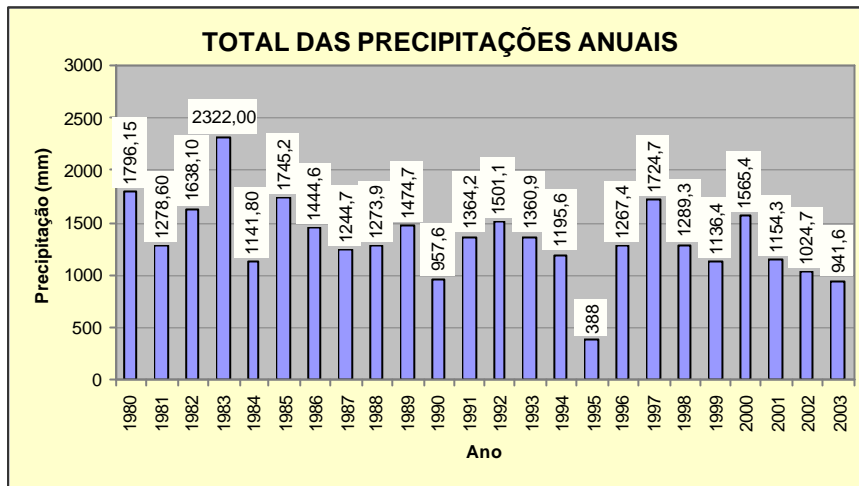


Figura 3.3 – Precipitações pluviométricas anuais (Jan/1980-Jun/2003)

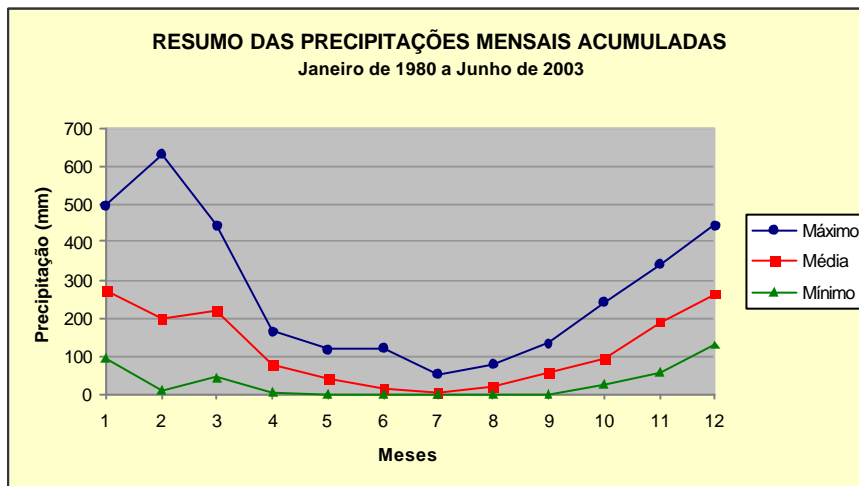


Figura 3.4 – Precipitações pluviométricas mensais (Jan/80 – Jun/03)

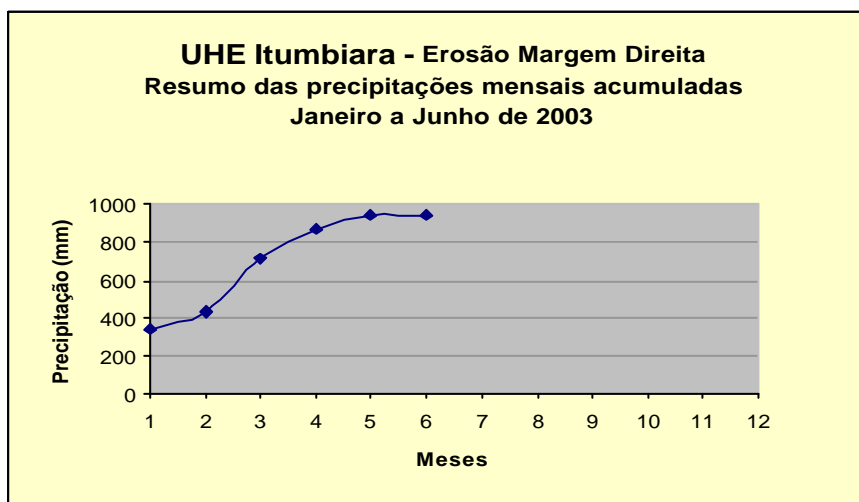


Figura 3.5 – Precipitações pluviométricas mensais (Jan2003-Jun/2003)

3.3. Tipo do Solo³

O solo local é predominante constituído de argila, silte e areia, por vezes arenoso, bem estruturado e homogêneo com cores sempre em tons rosa acinzentados a esbranquiçados, além de presença marcante de minerais micáceos. Este solo é provavelmente derivado de rochas metamórficas (muscovita gnaisse) pertencentes ao Grupo Araxá (Proterozóico Médio).

A parte superficial do terreno desprovido de cobertura vegetal apresenta uma delgada camada de solo laterítico compactado de cor avermelhado escuro a marrom.

O solo de cobertura vegetal apresenta - se geralmente constituído na superfície, de matéria orgânica e por silte arenoso a areno-argiloso de coloração marrom a marrom avermelhada, de aspecto heterogêneo com presença de fragmentos de quartzo e óxido de ferro na matriz silto-argilosa.

Por suas características pode-se dizer que este solo é alóctone, ou seja, transportado e derivado principalmente de rochas basálticas da Bacia do Alto Paraná.

3.4. Tipo da Vegetação⁴

Para a região de estudo, há ocorrência expressiva de mata ciliar ao longo de córregos e rios regionais com presença de cerrado e campo de várzea em menor proporção.

³ Relatório de Furnas Centrais Elétricas S.A. – Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná (setembro de 1983).

⁴ Idem.

O cerrado ocorre em cotas mais elevadas acompanhando a geometria das encostas ou elevações e interflúvios. Os campos de várzea restringem-se às áreas sujeitas a inundações e quando permite o relevo, em locais de encaixe dos cursos d'água.

3.5. Aspecto Geológico – Geotécnicos da Região

O Rio Paranaíba, na região da barragem de Itumbiara, atravessa rochas metamórficas de idade pré-cambrianas, representadas por gnaisses. Afastando-se das margens do rio e em cotas mais elevadas, encontram-se afloramentos de rocha basáltica, provenientes de derrames de espessuras variáveis.

A ação do intemperismo e de agentes erosivos causaram o arrasamento dos basaltos superpostos às rochas pré-cambrianas, notadamente nas proximidades da calha do rio.

A seqüência litológica da região compreende, da base para o topo da formação rochosa, as seguintes variedades: anfibólio-gnaisse, basalto, muscovita -gnaisse e quartzito. O contato entre as rochas metamórficas do pré-cambriano é brusco com o derrame basáltico, separado, eventualmente por brecha de matriz siltosa.

O limite de escala atribuído ao mapa geológico regional (Figura 3.6), fez com que a área de estudo fosse representada pontualmente.

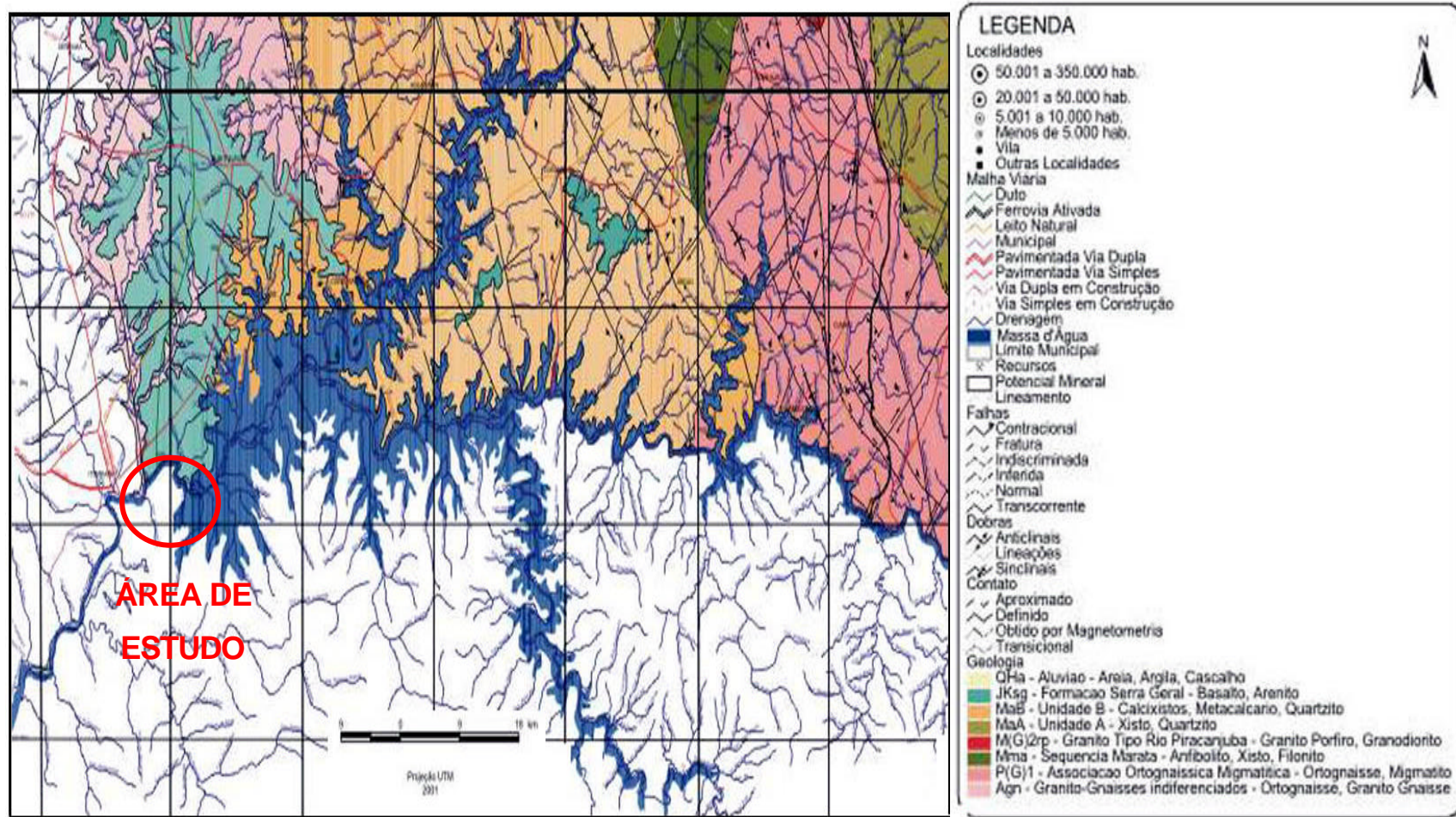


Figura 3.6 – Mapa Geológico Regional – Fonte: AGIM (Agência Goiana de Desenvolvimento Industrial e Mineral). Mapa Geológico e de Recursos Minerais.

Aproximadamente 75% da área de implantação da barragem, esta localizada em fundação de solos provenientes de alteração “*In Situ*” de rochas metamórficas segundo o mapa geológico local modificado pelo autor (Figura 3.7). A espessura de solos residuais de gnaiss varia de 32 metros junto às ombreiras da barragem até 4 metros de espessura nas proximidades do leito do Rio Paranaíba.

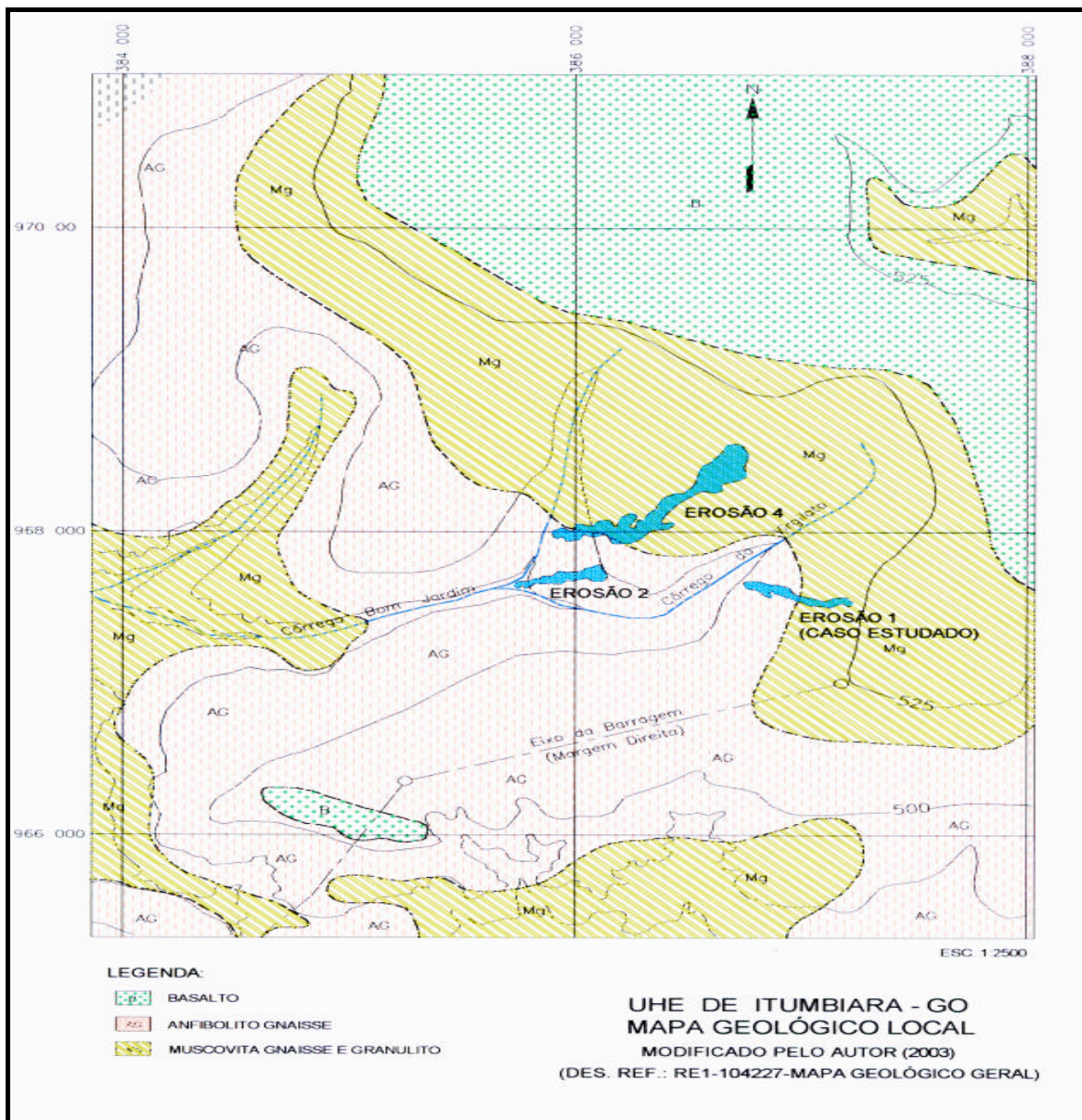


Figura 3.7 - Mapa Geológico Local

Os solos residuais de basalto situam-se nas cotas mais elevadas com espessura média de camada de aproximadamente 12 metros. Os solos transportados, provenientes do intemperismo de basalto têm espessura média de cerca de 6 metros, chegando a atingir em um trecho restrito da margem direita, a espessura de 18 metros. Uma seção longitudinal pelo eixo da barragem é representada a partir da Figura 3.8, que mostra essas variações das espessuras dos solos na Figura 3.9, devendo ambas ser analisadas em função do eixo da barragem, margem direita, representada na Figura 3.7.

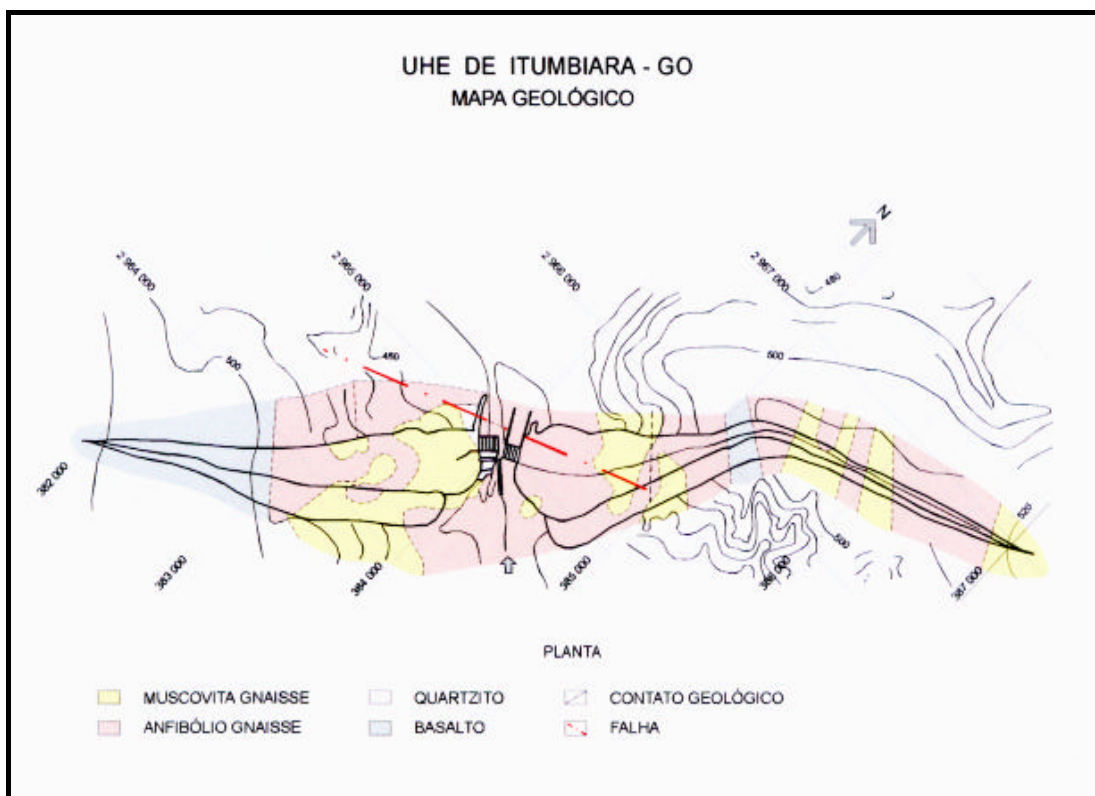


Figura 3.8 – Mapa Geológico da Barragem – Fonte: Relatório de Furnas Centrais Elétricas S.A. – Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná (setembro de 1983) – modificado pelo autor, 2003.

De acordo com o relatório de Furnas (Simpósio sobre Geotecnia da Bacia do Alto Paraná - setembro de 1983) que registra a ocorrência de solos residuais de gnaiss sobrepostos as rochas de anfibólio ou anfibólio-gnaiss (Figura 3.9).

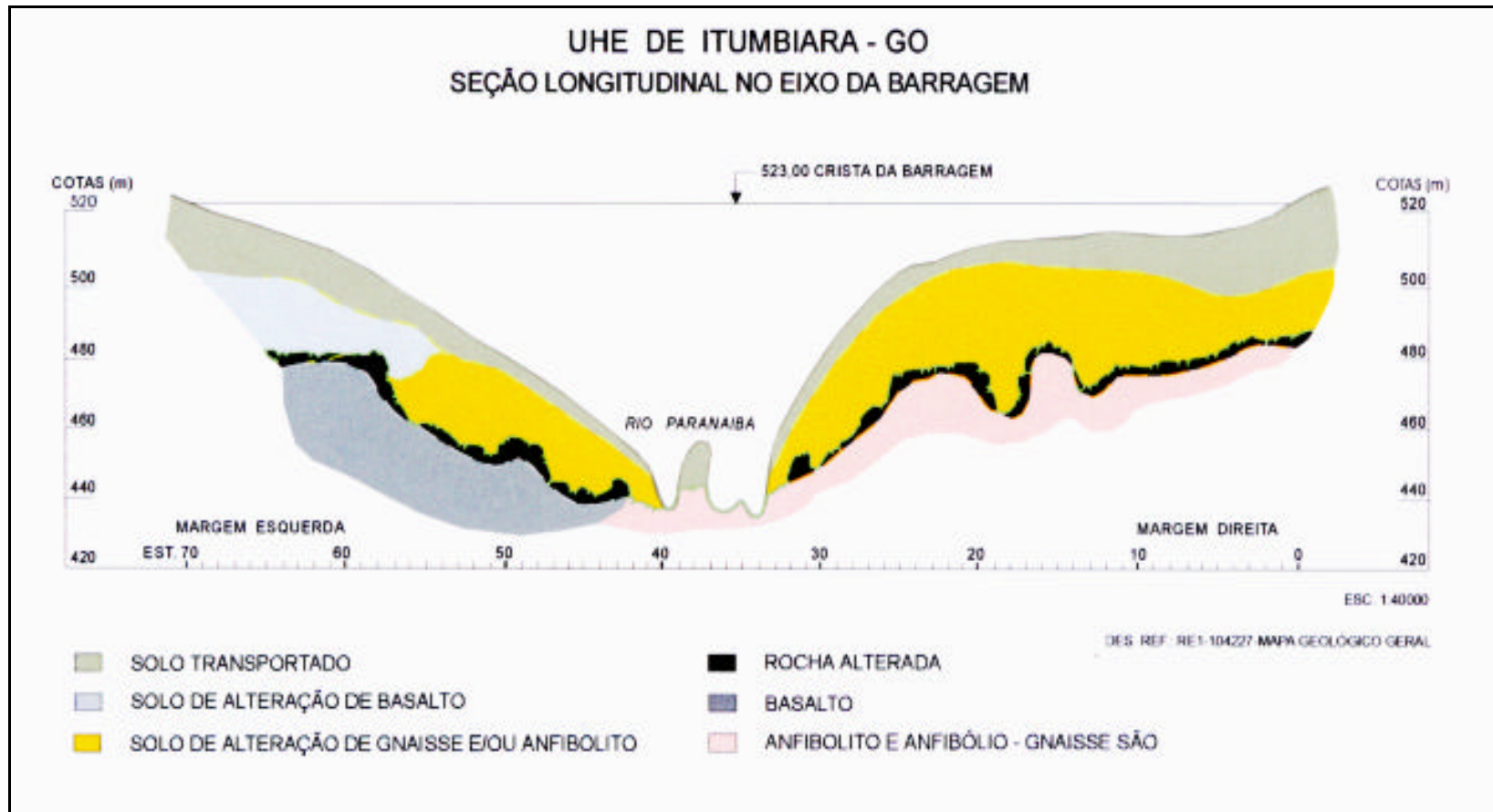


Figura 3.9 – Seção Longitudinal no eixo da barragem – Fonte: Relatórios de Furnas Centrais Elétricas S.A. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná (setembro de 1983) – modificado pelo autor, 2003.

4

METODOLOGIA ADOTADA NA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE

Visando alcançar o que foi proposto como objetivo desta dissertação, adotou-se um modelo de estudo na área experimental, que consiste nas observações de campo voltadas para a caracterização do solo e sua possível correlação envolvendo parâmetros geológico-geotécnicos, que sinalizem indícios de processos erosivos presentes, bem como a dinâmica desses mecanismos.

Desta forma, procurou-se aferir a eficiência deste modelo através do levantamento topográfico e dos aspectos geológico-geotécnicos, que juntos contribuíram para a definição dos tipos de ensaios julgados necessários para análise do processo erosivo em ocorrência, cujas características são citadas ao longo deste trabalho.

4.1. Trabalhos Desenvolvidos no Campo

Foi definida visita ao campo, afim de que fosse estabelecida uma melhor correlação tátil-visual entre os mecanismos erosivos atuantes no local e os diversos fatores inerentes ao seu desenvolvimento.

Um programa de estudo foi elaborado com o objetivo de se obter parâmetros relativos aos condicionantes locais, visando um melhor entendimento quanto aos fatores determinantes no desenvolvimento de processos erosivos, como por exemplo:

- topografia;
- declividade do terreno superficial;
- clima;
- tipo de solo;
- hidrologia;
- deficiência da cobertura vegetal;
- tipo de exploração e manejo do solo.

Foram definidos locais específicos para retirada de blocos indeformados no interior e ao longo da Erosão 1, em função de suas características e peculiaridades inerentes aos demais processos erosivos em ocorrência na região (Figura 4.2).

Realizou-se também, a coleta de água no interior da Erosão 1, afim de que fosse submetida a análise química, de resistividade e condutividade elétrica (Figura 4.1), cujos resultados estão apresentados mais adiante.



Figura 4.1 – Coleta de Água

Pelas evidências surgidas na área de estudo (Figura 4.2), definiu-se que o levantamento plani-altimétrico da área seria a melhor forma de representá-la com vistas a evidenciar os condicionantes naturais existentes ao longo dessas feições erosivas, servindo de base para o monitoramento

futuro e a definição de novos pontos de instrumentação, a partir dos furos de sondagens a percussão (SPT) e marcos notáveis previamente estabelecidos em planta (vide Figuras 3.2, 4.2 e 4.3).

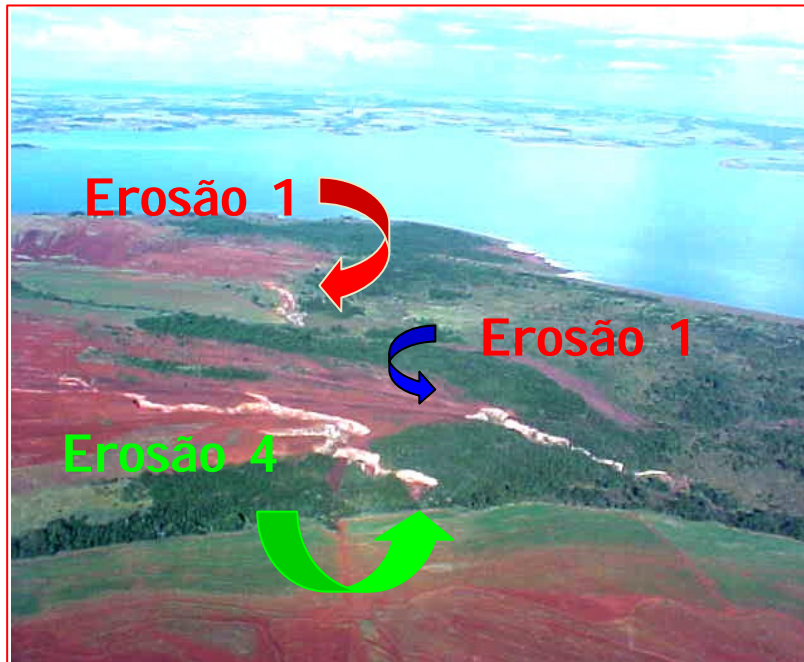


Figura 4.2 – Vista aérea com destaque para Erosão 1

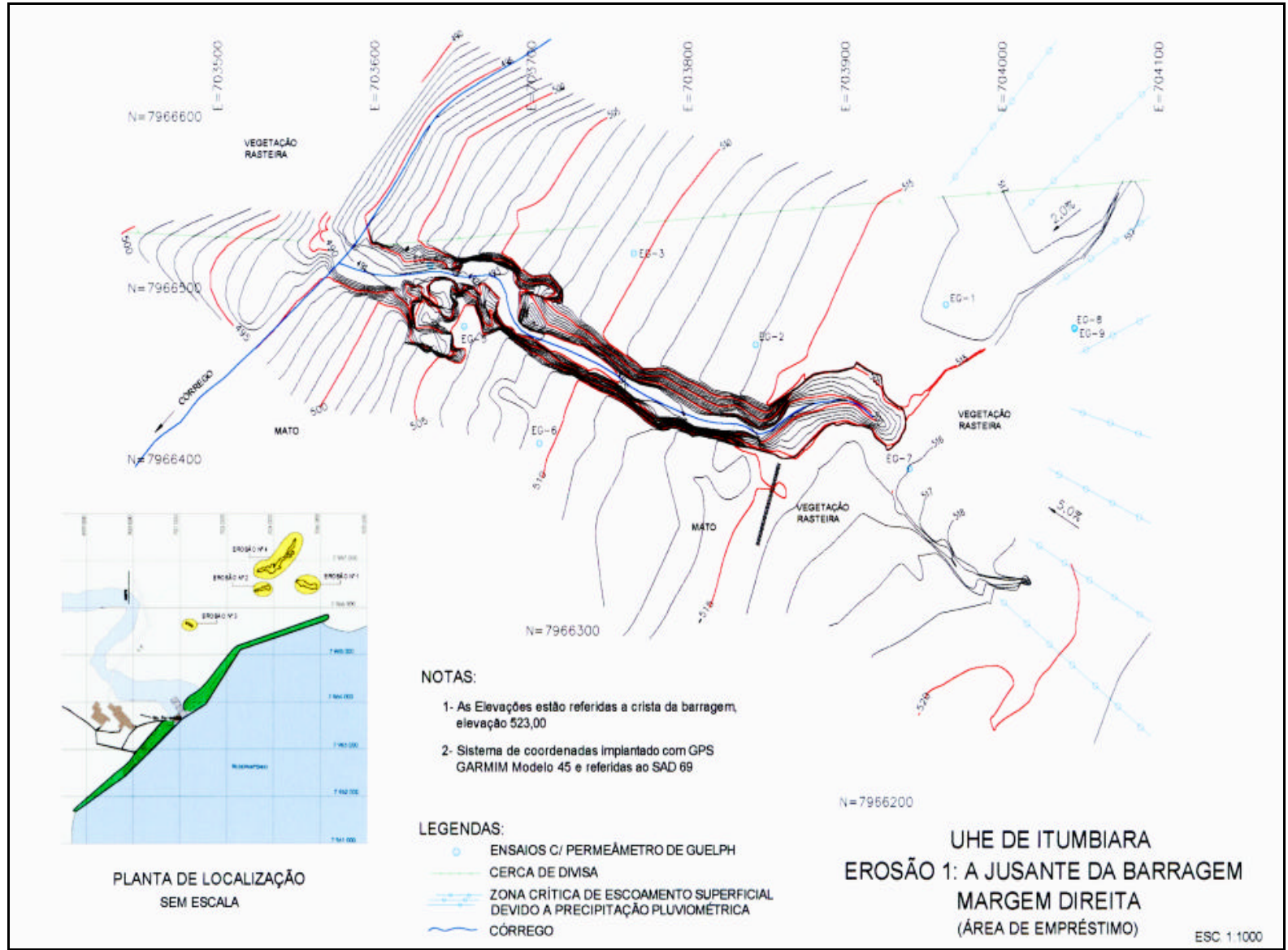


Figura 4.3 - Planta da Erosão 1

Uma outra forma de avaliar essas feições erosivas foi através da descrição dos perfis de alteração observados nas paredes dessas feições, com base nas seguintes características morfológicas: profundidade, transição entre os horizontes, cor, textura, estrutura, porosidade, consistência e presença da atividade biológica, dentre outras.

Sendo assim, os perfis representativos adotados são aquelas onde as paredes possuíam maior altura, nos quais foi possível identificar uma maior diversidade de horizontes, resultante do processo de intemperismo (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Perfil Representativo dos Taludes

Em cada um dos horizontes identificados foram coletados blocos indeformados na proximidade da parede direita da Erosão 1 e em cada horizonte da mesma: no perfil próximo a sua cabeceira, no seu terço médio e próximo ao seu pé. As amostras receberam os seguintes níveis de classificação: Colúvio; Residual Maduro, Residual Jovem A e B, conforme Figuras 4.5 e 4.6, visualizadas a seguir.

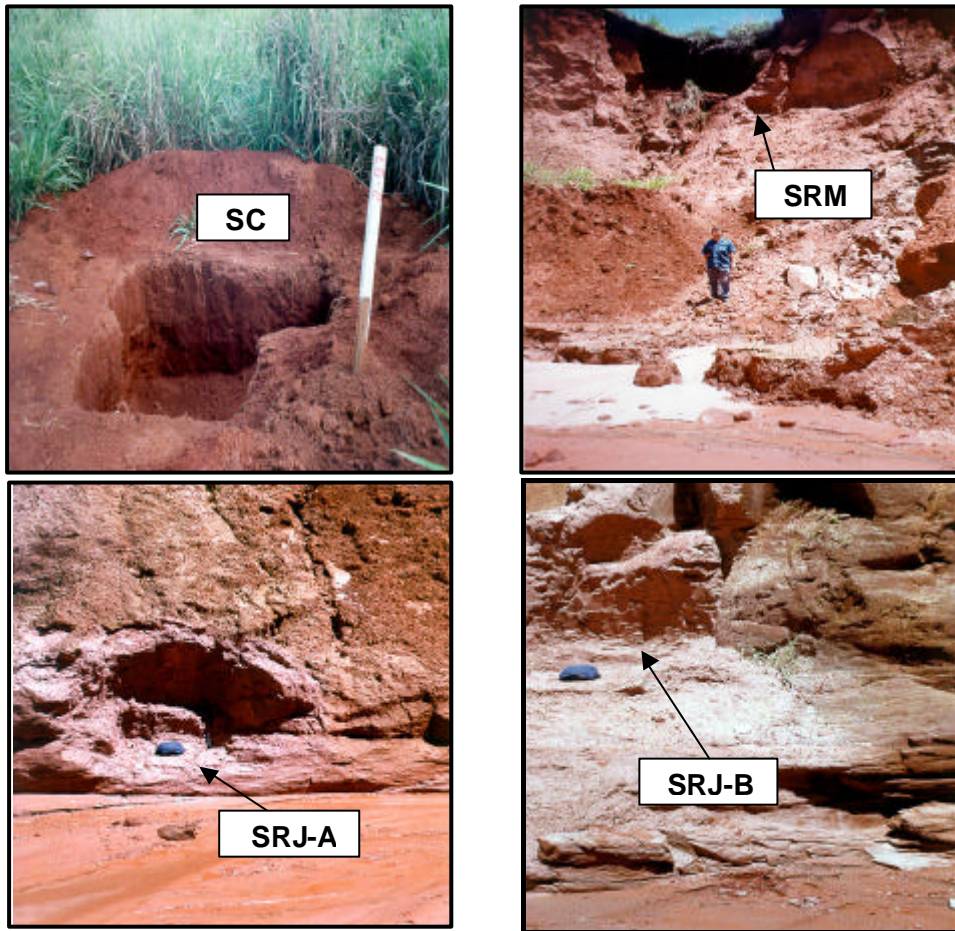


Figura 4.5 – Local de retirada de blocos (SC – Solo Coluvionar ; SRM – Solo Residual Maduro ; SRJ-A – Solo Residual Jovem A ; SRJ-B – Solo Residual Jovem B)

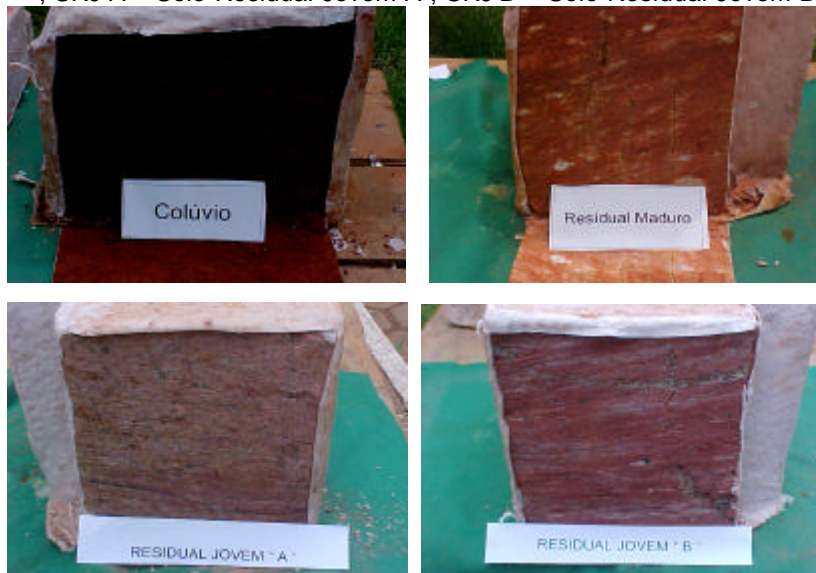


Figura 4.6 – Tipos de Solos

4.2. Aspecto Geológico – Geotécnicos Local

A estratigrafia do terreno e a posição do lençol freático foram possíveis a partir de informação geológico-geotécnica advinda de observações tátil-visuais de campo e resultados de sondagem a percussão (SPT), na área de abrangência do estudo, identificadas nas Figuras 3.2 e 3.7. Para tanto se procederam aos ensaios penetrométricos (SPT), que determinaram os teores de umidade do solo; os níveis da água freática (NA) e a identificação das amostras de solo por meio de registros seqüenciais, representados nos perfis individuais de sondagens, em anexo, definindo-se a partir destes um perfil longitudinal de aproximadamente 1 km dos solos representativos da área de estudo (Figura 4.7).

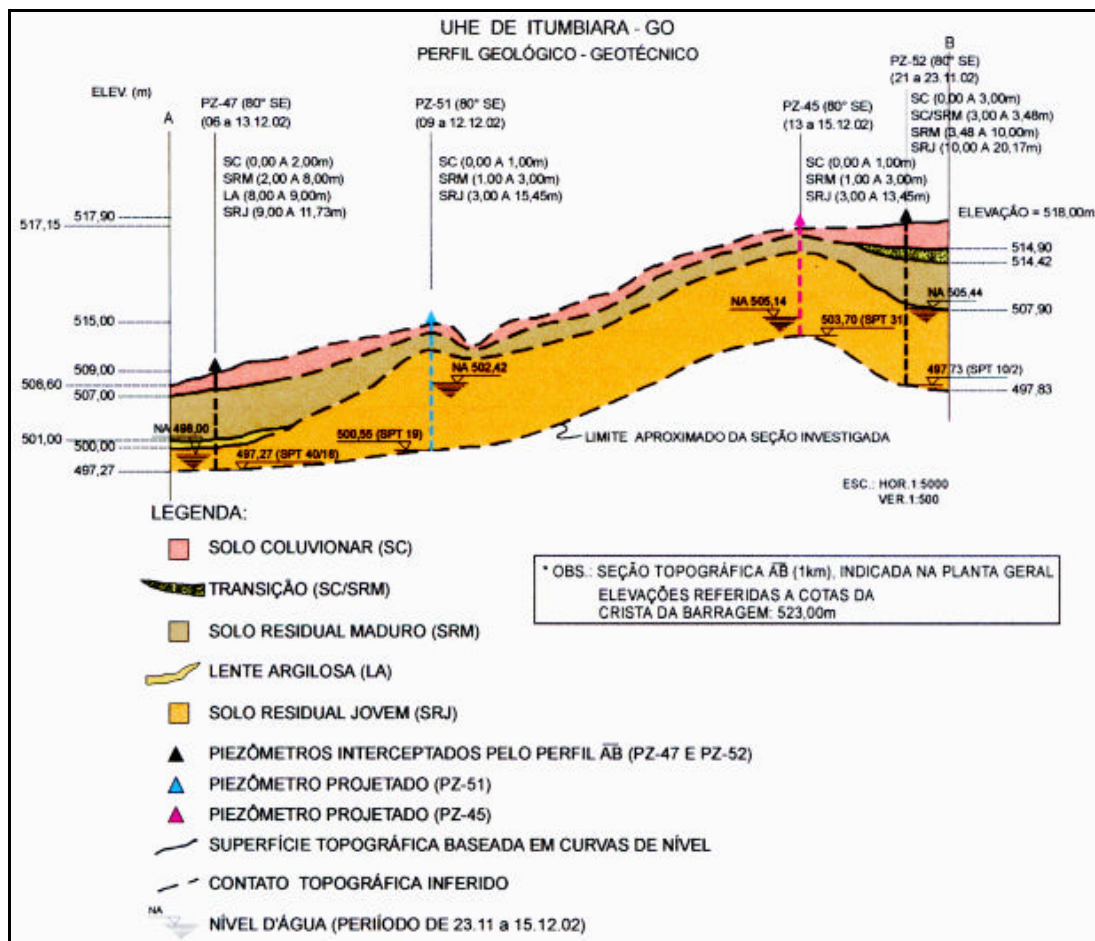


Figura 4.7 – Perfil Geológico-Geotécnico (Seção Longitudinal AB – Figura 3.2)

Foi observado, próximo das bordas superiores das erosões, desprovidas de vegetação, ocorrência de fissuras e trincas superficiais bastante expressivas, provocadas por alcovas de regressão, originadas por filetes de escoamento superficial devido ao direcionamento e concentração de água de chuvas naquela região, resultando em queda de blocos de solo para o interior das voçorocas (Figura 4.8 e 4.9).

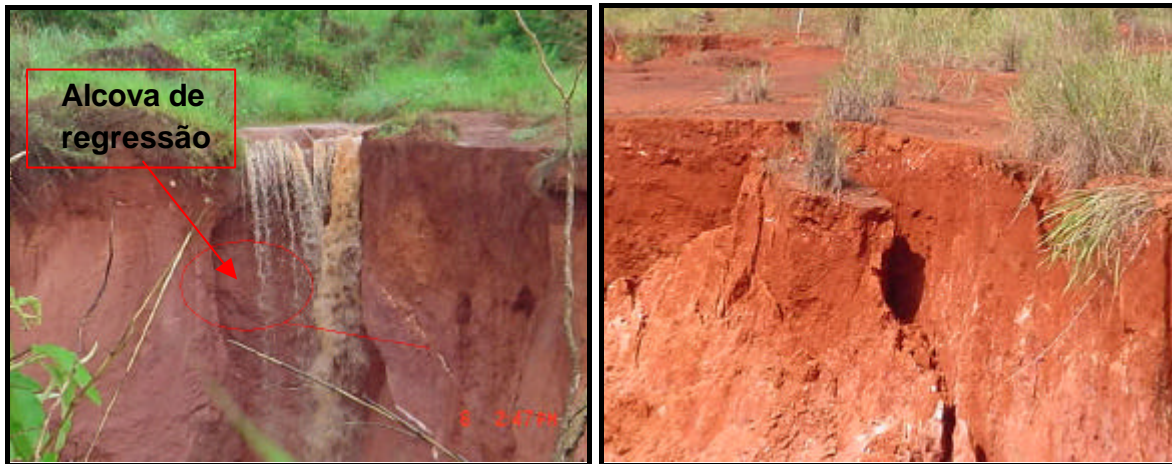


Figura 4.8 - Alcovas de regressão e queda de bloco

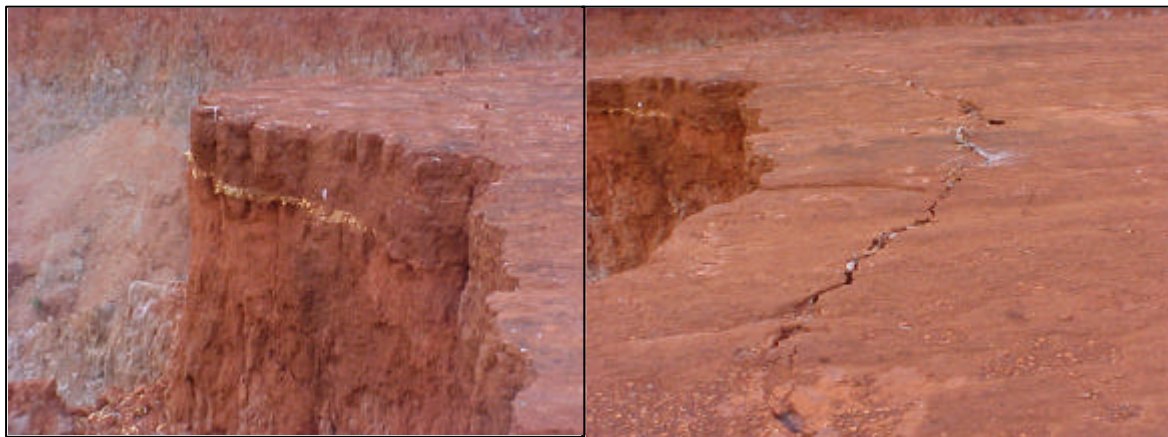


Figura 4.9 – Trinca superficial (vista lateral e superior)

Sendo notadas em algumas regiões das paredes, dessas feições erosivas, em particular no caso estudado (Erosão 1). O aparecimento de blocos de rochas com fraturas de alívio, sub-horizontal / vertical a sub-vertical, sem evidências de surgência de água (Figura 4.10), conforme pode ser constatado adiante.

Na região de ocorrência das erosões verificou-se que o perfil geológico-geotécnico do terreno, de procedência gnáissica, é composto a partir da superfície por camada de solo coluvionar, seguida por camadas de solo residual maduro e de solo residual jovem. As espessuras dessas camadas são muito variáveis, guardando as peculiaridades individuais quanto à textura e comportamento, preservada as heterogeneidades que lhes são inerentes, apresentam uma relativa homogeneidade, quando considerada a sua distribuição espacial em planta.



Figura 4.10 – Fraturas de alívio sub-horizontais / verticais a sub-verticais (Parede esquerda da Erosão I)

Amostras de sondagens a percussão (SPT - *Standard Penetration Test*) indicam que o solo coluvionar é constituído por silte arenoso a areno-argiloso, de coloração marrom a marrom avermelhada, de plasticidade baixa a média, apresentando-se pouco à medianamente compacto, de aspecto heterogêneo.

Este solo ocorre desde a superfície até cerca de 5 metros de profundidade, com extremos de 1 a 7 metros, e espessura média de 3,5 metros.

A transição do solo coluvionar para o solo residual maduro é bem definida, ocorrendo em alguns trechos uma linha de seixos, quartzo em matriz areno-siltosa, com espessura variando de 0,15 a 0,50 metros (Figuras 4.4 e 4.9).

O solo residual maduro subjacente ao solo coluvionar, é constituído predominantemente por silte argiloso a argilo-arenoso, de coloração rosada-avermelhada a vermelho acinzentado, de plasticidade média, com classificação de mediamente compacto a compacto.

De um modo geral esse solo ocorre entre as profundidades de 3 a 8 metros, com extremos de 1 a 11,50 metros, tendo espessura média da ordem de 4 metros, ocorrendo vestígios de solo residual jovem, apesar de raros, nas camadas associadas à coloração vermelho-acinzentada. A passagem do solo residual maduro para o solo residual jovem, se faz de uma forma gradual, não existindo uma nítida separação entre os dois horizontes.

O solo Residual Jovem B é sobrejacente ao maciço rochoso, sendo constituído por silte argiloso a argilo-arenoso, de coloração rosada a rosada-acinzentada, apresentando, em muitos locais, passagens esbranquiçadas, de plasticidade baixa, com classificação de mediamente compacto a muito compacto, com ocorrência geralmente abaixo das profundidades de 3 a 11 metros, podendo atingir espessuras da ordem de 15 a 20 metros.

De um modo geral este horizonte apresenta elevada quantidade de material micáceo, ocorrendo secundariamente a presença de fragmentos de

quartzo. Este solo mostra-se estruturado, ficando esta característica mais evidenciada a medida que atinge a profundidade maiores no perfil do solo.

O nível do lençol freático situa-se no fundo das erosões (Figura 4.4), sendo muito raras surgências de água em suas paredes. Nos terrenos naturais, circunvizinhos às erosões, o nível do lençol freático em período chuvoso situa-se em torno de 10 a 13 metros da superfície, sendo que o nível d'água, medido a cerca de 400 metros a jusante da ombreira direita da barragem, encontra-se em torno de 6 metros de profundidade (Anexos - Perfis de Sondagem a Percussão / SPT).

4.3. Hidrogeologia Local

Como forma comparativa aos perfis identificados na face dos taludes das paredes da Erosão 1, objeto do estudo proposto, e para um melhor entendimento da hidrogeologia local, foi estabelecido que as sondagens à percussão, com ensaios penetrométricos (SPT – *Standar Penetration Test*) ao longo das erosões, tivessem um duplo sentido de aproveitamento.

O primeiro com o objetivo de confirmar a presença e influência do lençol freático ao longo dessas erosões, bem como, a coleta de amostras de solo indeformada e amolgadas, com os seus respectivos teores de umidade, a fim de compará-los com os perfis presentes nas paredes dessas fossas erosivas, através da verificação tátil-visual e ensaios de laboratório, justificando de certa forma, a continuidade da estratigrafia local ao longo da área estudada.

Outra função prevista para os furos de sondagens, foi a implantação de uma rede de piezômetros e de medidores de nível d'água; a primeira em número de nove e a segunda em número de dois, de forma a se obter uma

melhor avaliação do comportamento hidrogeológico da água de subsuperfície ao longo dessas erosões (Figura 3.2).

Os piezômetros instalados, com profundidades que variam de 10,47 metros a 21,17 metros, com cotas de elevação variável, têm como finalidade o estabelecimento de uma correlação entre as leituras de poro-pressões obtidas neste, com os piezômetros existentes ao longo da margem direita da barragem de terra da UHE de Itumbiara-GO. Esta mesma correlação foi utilizada entre os medidores de nível d'água atuais e existentes, instalados a jusante e ao longo da ombreira direita da mesma barragem, de forma a se verificar o comportamento da flutuação do lençol freático na região estudada, conforme consta nos gráficos (Figuras 4.11 e 4.12).

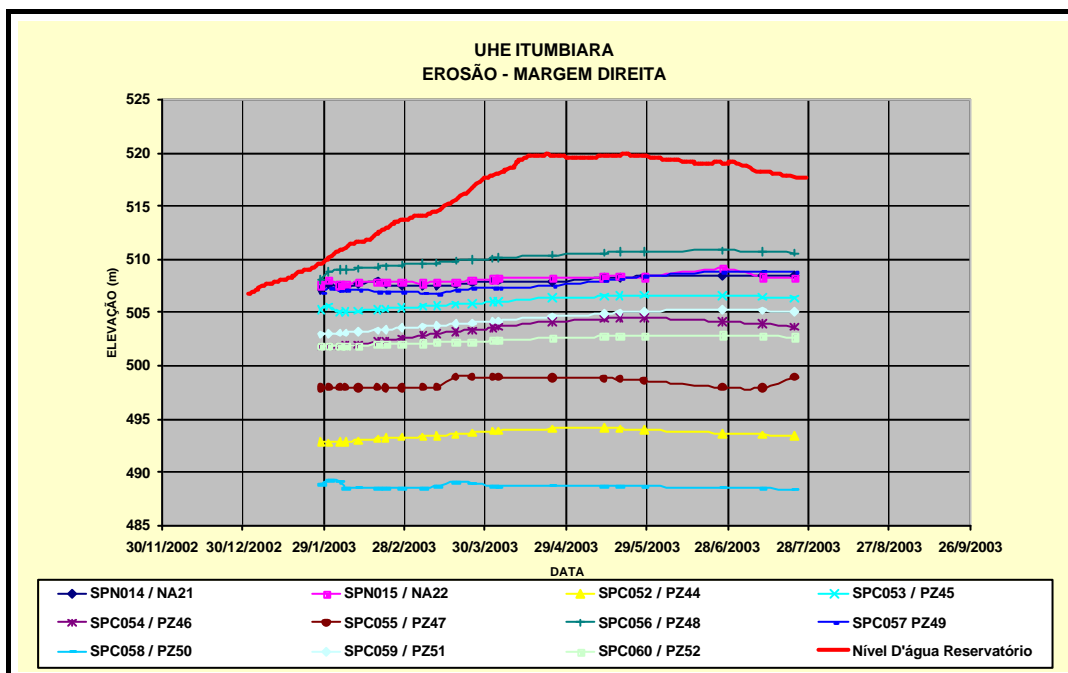


Figura 4.11 – Leituras Piezômetros e medidores de níveis d'água recentemente instalados

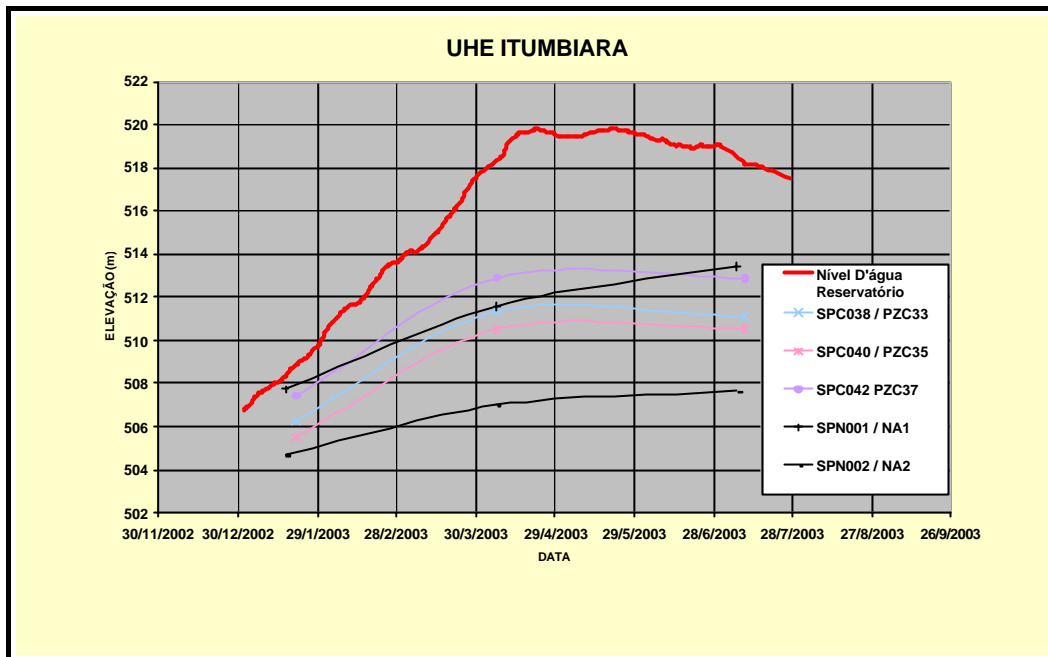


Figura 4.12 – Leituras dos Piezômetros e medidores de níveis d'água existentes ao longo da ombreira direita da barragem

Observando-se os gráficos acima, conclui-se que os piezômetros e medidores de níveis d'água instalados recentemente ao longo das erosões, não apresentam indícios de serem influenciados pelo reservatório da UHE de Itumbiara (Figura 4.11). Isto pode ser confirmado, comparando-se a trajetória das curvas de poro-pressão desse gráfico com as curvas pertencentes ao gráfico da Figura 4.12, que têm nas curvas piezométricas, uma boa correlação com a subida do nível d'água do reservatório devido a surgência do período de chuvas, conforme pode ser observado na Figura 4.13. Já para os novos piezômetros e medidores de níveis d'água pode ser observada uma tendência gradual de subida da trajetória dessas curvas em função do período de chuva.

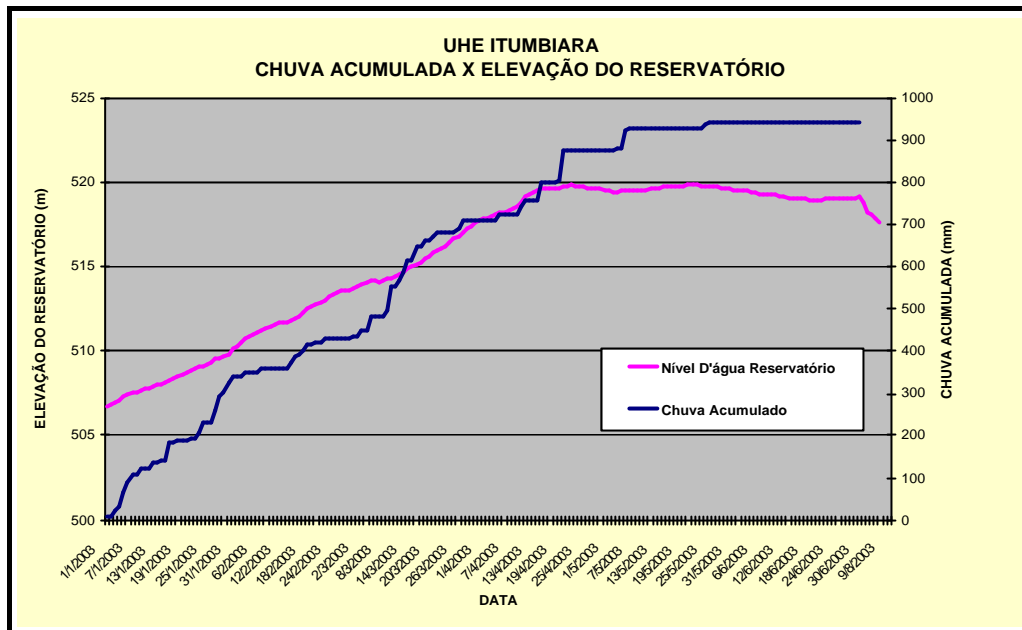


Figura 4.13 – Leituras da precipitação pluviométrica versus elevação do reservatório

Com base nas observações e registros de campo, foram montados modelos representativos, para um melhor entendimento dessa ocorrência, conforme Figuras 4.14 a 4.18.

Estes modelos mostram de uma forma geral como os mecanismos de erosão evoluem no campo. Como exemplo, para o caso estudado, Erosão 1 (Figura 4.14), pode-se dizer que desenvolve um mecanismo crescente de cabeceira, com avanço no sentido da ombreira direita da barragem de terra da UHE Itumbiara, com uma velocidade média de recorrência de aproximadamente 30m/ano.

Para os demais modelos (Figuras 4.15 a 4.18) foram feitos registros nos períodos de chuvas, que ocorreram durante os estudos, procurando-se mostrar de uma forma geral as diversas etapas de ocorrências erosivas, provocadas principalmente por incidência de água no solo.

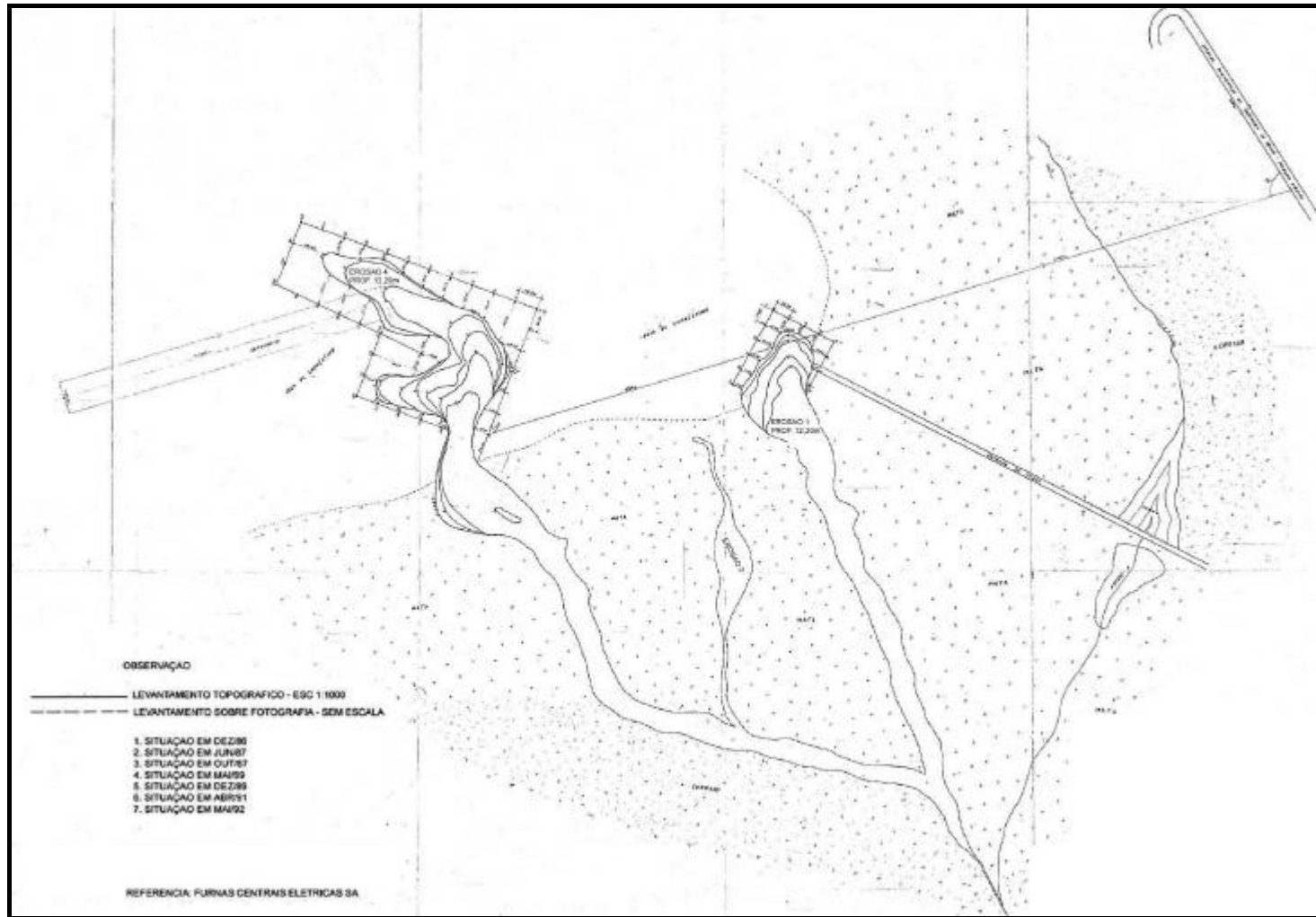


Figura 4.14 – Modelo dinâmico da evolução das voçorocas

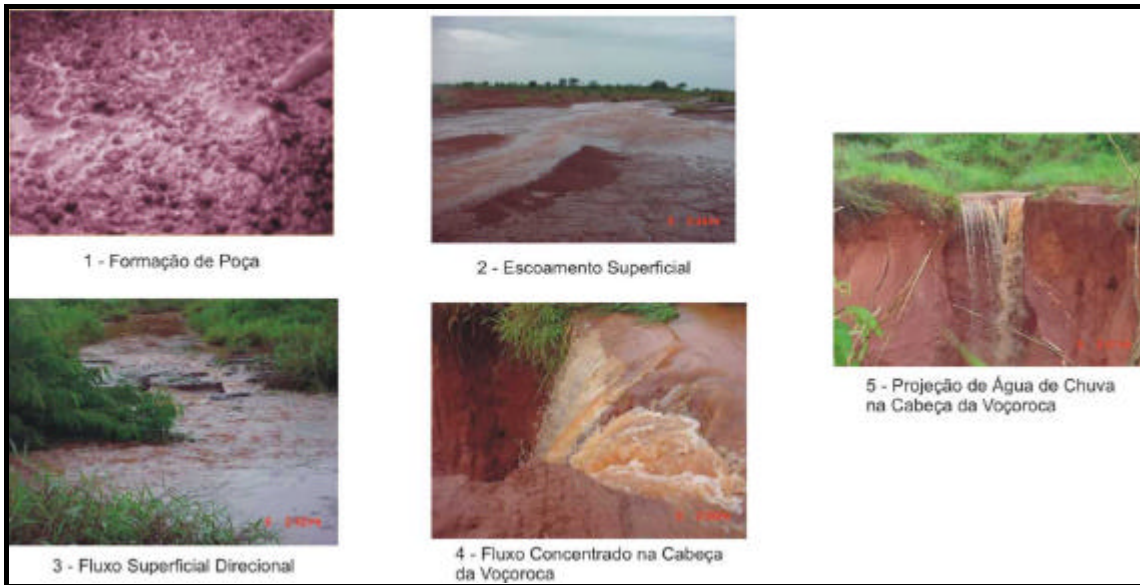


Figura 4.15 – Modelo representativo do comportamento de fluxo no processo erosivo do solo estudado (estágio I)



Figura 4.16 – Modelo representativo do comportamento de fluxo no processo erosivo do solo estudado (estágio II)



Figura 4.17 – Modelo representativo dos processos erosivos resultantes da incidência de fluxo sobre o solo estudado (estágio I)



Figura 4.18 – Modelo representativo dos processos erosivos resultantes da incidência de fluxo sobre o solo estudado (estágio II)

Todos os procedimentos inerentes à instalação de equipamentos, ensaios e coleta de amostras foram regidos por normas técnicas reconhecidas nacionalmente e internacionalmente.

5

DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os ensaios realizados para obtenção de parâmetros geotécnicos, assim como as observações e medições de campo que auxiliam no entendimento dos processos erosivos atuantes na região. Sendo assim, foram realizados ensaios de campo (penetrométrico – SPT e de condutividade hidráulica – Permeâmetro de Guelph) e de laboratório, tais como: de caracterização física, como limites de liquidez e plasticidade, análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, densidade dos grãos, MCT (mini-MCV), além de mineralogia por difração de Raios – X, das frações (silte + argila) e argila nas peneiras 200 e 400, respectivamente.

Somente ensaios de caracterização e visualização de campo, não são parâmetros satisfatórios para que se avalie mecanismo de erosões atuantes. Faz-se necessário, um aprofundamento desses estudos, através dos ensaios específicos e inerentes ao caso.

Dessa forma, procedeu-se aos ensaios de erodibilidade, de permeabilidade e ensaios especiais, utilizando-se quatro gêneses de amostras de solos representativos das erosões locais, as quais foram coletadas e classificadas em ordem crescente de profundidade e definidas como solo Coluvionar (SC), solo Residual Maduro (SRM), solo Residual Jovem A (SRJ-A) e solo Residual Jovem B (SRJ-B), incluindo-se em alguns ensaios, uma capa de solo laterítico, a qual denominou-se de solo erodido (SE) e não erodido

(SNE), classificando-os dessa forma, mediante a um maior ou menor grau de erodibilidade, atribuído a eles.

5.1. Ensaios de Campo

5.1.1. Ensaio Penetrométrico (SPT)

Como já citado anteriormente, este ensaio teve como finalidade determinar os teores de umidade natural do solo e da retirada de amostra amolgada, para comparação da gênese do solo ao longo das paredes das erosões contidas na área de estudo e indicar o comportamento da água de sub-superfície nestas, (Figuras 3.2, 4.7 e anexos)

Não sendo notadas evidências de deslizamentos importantes no fundo e ao longo das paredes de erosão estudada, em relação à convergência das linhas de fluxo para o nível d'água (N.A.), na base dos taludes da erosão estudada e demais casos em ocorrência.

5.1.2. Ensaio com o Permeâmetro de Guelph

Devido às incertezas quanto às diferenças de permeabilidade existentes entre as camadas de solos com vegetação e uma outra desprovida de cobertura vegetal e densamente compactada, optou-se pela realização do ensaio de permeabilidade "in situ", com a utilização do permeâmetro de Guelph modelo 2800 K1, pertencente ao laboratório de solos da PUC-Rio, (Figura 5.1), ao longo da Erosão 1 e de uma área próxima a sua cabeceira, que apresenta feições distintas devido ao mecanismo de erosão diferencial atuante, cujos pontos foram previamente selecionados e plotados (Figura 4.3).

Esse ensaio consiste em estabelecer um fluxo de água de regime permanente em solos não saturados, através de furos a trado nos quais uma

lâmina d'água, com pequena altura, é mantida constante (Reynolds *et al.*, 1985).

Como complemento e confirmação dos resultados de permeabilidade obtidos no campo, optou-se também por realizar ensaio de laboratório. Para a permeabilidade medida em laboratório, utilizou-se um permeâmetro de carga variável (PCV), com gradiente hidráulico de 10, estabelecido a partir de uma coluna d'água igual a 137,30cm de altura, para um corpo de prova de altura e diâmetro iguais a 13,73 e 10,0cm, respectivamente.



Figura 5.1 – Ensaio com Permeâmetro de Guelph

Para os solos estudados, obteve-se em laboratório, uma permeabilidade média (K_m) cujos valores inerentes a cada gênese são: Solo Coluvionar ($K_m = 2,30E-03$ cm/s); Solo Residual Maduro ($K_m = 2,48E-05$ cm/s); Solo Residual Jovem A ($K_m = 3,80E-05$ cm/s) e Solo Residual Jovem B ($K_m = 6,44E-05$ cm/s), conforme representação gráfica da Figura 5.2.

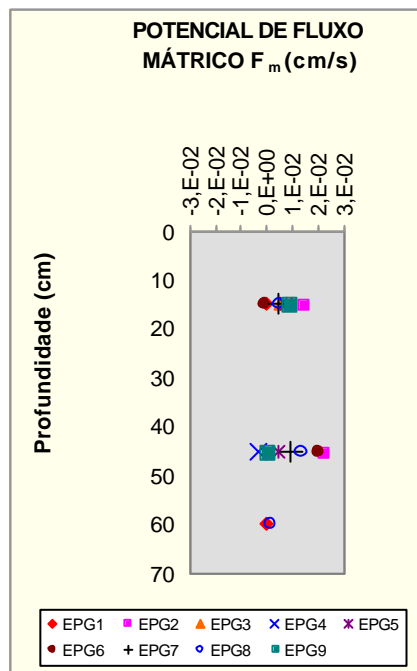
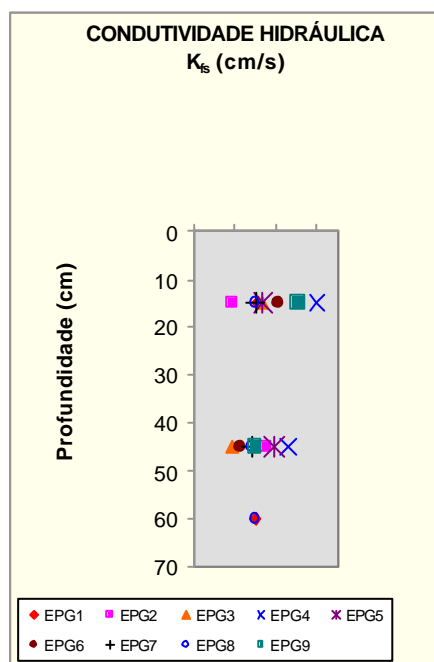
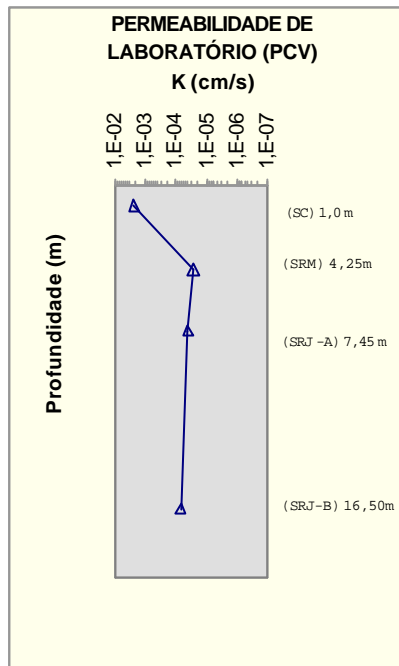


Figura 5.2 – Valores de K (cm/s), K_s (cm/s) e F_m (cm/s)

As permeabilidades “*in situ*”, foram obtidas através da utilização do permeâmetro de Guelph, ao longo da Erosão 1, com profundidades a partir da superfície de 15 a 45 cm, para os ensaios referentes aos pontos EG2 a EG7 e

15,45 e 60cm para os ensaios realizados nos pontos EG1 e EG8, respectivamente (Figura 4.3). Onde foram observadas as condutividades hidráulicas, para os furos com profundidades de 15, 45 e 60 cm, cujos resultados são ($K_{fs} = -1,18E-03$ a $4,15E-05$ cm/s); ($K_{fs} = -7,71E-04$ a $9,02E-04$ cm/s); ($K_{fs} = 0,00E+00$ a $2,02E-05$ cm/s), respectivamente. Apresentando como valores para o potencial de fluxo mátrico para os mesmo furos ($F_m = -4,86E-04$ a $8,91E-03$ cm/s); ($F_m = -3,02E-03$ a $9,21E-03$ cm/s) e ($F_m = 0,00E+00$ a $1,42E-03$ cm/s), respectivamente.

Os resultados negativos medidos nos ensaios com a utilização do permeâmetro de Guelph podem indicar heterogeneidade do solo, sendo esses um indicativo de descontinuidade hidrológica tipicamente causada pela estratificação do solo e presença de orifícios, buracos no solo no entorno dos furos.

Para os resultados de permeabilidade positiva, com a utilização do permeâmetro de Guelph, pode-se dizer que estes apresentam uma boa correlação com os resultados de permeabilidade de laboratório, para as mesmas gêneses de solos, principalmente para as camadas mais próximas da superfície.

5.2. Ensaios de Laboratório

Os critérios utilizados para a escolha dos ensaios, foram focados na obtenção de parâmetros geológico-geotécnicos, definindo-os a partir das observações e condições de campo, nas quais constatou-se na maioria das erosões o aparecimento de trincas de tração, taludes praticamente verticais apresentando em alguns pontos alcovas negativas, além da grande quantidade de blocos de solos depositados no fundo dessas erosões e a surgência do lençol freático no seu interior, independentemente do tipo de solo e condições ambientes a que estejam submetidos.

Desta forma optou-se por dois tipos de avaliação a primeira referente a susceptibilidade através da correlação com as características do solo, visando um melhor conhecimento das suas propriedades física e química. Como por exemplo:

- a sua granulométrica;
- limite de Atterberg;
- densidade dos grãos;
- mini-MCV;
- Caracterização mineralógica através do ensaio de Raios-X;
- ensaio de sucção.

Outra maneira de se buscar uma previsão para ocorrências erosivas é através dos ensaios quantitativos ou de erodibilidade, como os propostos:

- ensaios de desagregação;
- Inderbitzen;
- pinhole test;
- resistência à tração.

Os ensaios acima foram realizados nos laboratórios de Furnas Centrais Elétricas S.A., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, cabendo à Universidade de Brasília a cessão do equipamento para realização do ensaio de Inderbitzen.

5.3. Ensaios Convencionais de Caracterização

5.3.1. Metodologia Adotada

Os procedimentos para os ensaios de caracterização foram desenvolvidos segundo as seguintes recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação para Ensaios de Compactação e Caracterização
- NBR 2887/1988 – Massa Específica Natural
- NBR 6508/1984 – Massa Específica Real dos Grãos
- NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica
- NBR 13602/1996 – Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo-Ensaio de Dispersão (SCS).

A partir dos ensaios de limite e distribuição granulométrica, foram também determinados por fórmulas, os seguintes índices físicos:

- Índice de plasticidade (w_p , %), obtido pela diferença entre o limite de liquidez (w_l , %) e o limite da plasticidade (w_p , %)
- Índice de atividade das argilas (I_a), determinado segundo proposta por Skempton, como:

$$I_a = \frac{\text{Índice de Plasticidade } (I_p)}{\% < 2 \ m_n \text{ (fração argila)}} \quad (1)$$

Classificação segundo a fração argila presente no solo:

- $I_a < 0,75$ inativas
- $1,25 > I_a > 0,75$ atividade normal
- $I_a > 1,25$ ativa

Com as amostras indeformadas, obteve-se:

- peso específico real dos grãos $\gamma_s = \rho_s \times g^*$, sendo ρ_s (massa específica real dos grãos e $g^* \approx 9,81\text{m/s}^2$ (aceleração da gravidade)
- peso específico natural $\gamma_{nat} = \rho_{nat} \times g^*$, sendo, ρ_{nat} (massa específica natural e $g^* \approx 9,81\text{m/s}^2$
- peso específico seco $\gamma_d = \gamma_{nat}/(1+w_{nat})$, sendo w_{nat} a umidade natural do solo.
- Índice de vazios (e), determinado pela equação: $e = (\gamma_s/\gamma_d) - 1$
- porosidade (n, %), determinada a partir da equação: $n = e / (1 + e)$
- grau da saturação (S,%), obtida através da equação: $S = \gamma_s W_{nat} / e \cdot \gamma_w$, sendo W_{nat} a umidade natural do solo e $\gamma_w \approx 10 \text{ KN/m}^3$, com o peso específico da água a 4^oc.

5.3.2. Apresentação e Análise dos Resultados

A seguir observa-se a tabela representativa com os resultados obtidos a partir de ensaios de caracterização física dos solos:

Tabela 5.1 - Resumo das Principais propriedades Físicas do Solo

AMOSTRA		SC	SRM	SRJ-A	SRJ-B	
PROFUNDIDADE MÉDIA (m)		1,0	4,25	7,45	16,50	
UMIDADE	Natural	(w_{nat} ; %)	16,1	16,8	17,2	26,4
		(w_{nat} (SPT); %)	19,8	20,2	25,52	28,2
	Higroscópica	(w_h ; %)	13,0	7,7	6,9	4,5
MASSA ESPECÍFICA	Real dos Grãos (ρ_s ; g/cm ³)		2,717	2,770	2,703	2,715
	Natural (ρ_{nat} ; g/cm ³)		1,413	1,586	1,953	1,872
PESO ESPECÍFICO	Real dos Grãos (γ_s ; kN/m ³)		27,17	27,70	27,03	27,15
	Natural (γ_{nat} ; kN/m ³)		14,13	15,86	19,53	18,72
	Seco (γ_d ; kN/m ³)		12,17	13,58	16,66	14,81
LÍMITE	Liquidez (w_L ; %)		42	54	39	34
	Plasticidade (w_p ; %)		25	35	25	26
ÍNDICE	Plasticidade (I_p ; %)		17	19	14	8
	Vazio (e)		1,23	1,04	0,62	0,83
POROSIDADE (n ; %)		55	51	38	45	
GRAU DE SATURAÇÃO (S_r ; %)		35,6	44,8	75,0	86,4	
FRAÇÃO	Pedregulho (%)		3,0	—	—	—
	Areia (%)		28,0	26,0	42,0	48,0
	Silte (%)		24,0	58,0	50,0	42,0
	Argila (%)		45,0	16,0	8,0	10,0
ÍNDICE DE ATIVIDADE (I_a)		0,38	1,19	1,0	1,4	

Legenda:

(SC): Solo Coluvionar

(SRJ-B): Solo Residual Jovem B

(SRM): Solo Residual Maduro

(SPT)* - Standard Penetration Test

(SRJ-A): Solo Residual Jovem A.

5.3.2.1. Análise Granulométrica

Uma proposta de avaliação indireta da correlação entre erodibilidade e diversas propriedades dos solos, como por exemplo, a sua granulometria, é citada em estudos apresentados por Santos (1953) e Santos e Castro (1967), que definem o seguinte critério de avaliação para solos.

Solos classificados com comportamento de bom a regular como sendo aqueles cujos valores estão compreendidos entre 49 a 96% da porcentagem que passa na peneira (#) 40. Ou correlacionando a granulometria a um outro parâmetro atribuído a letra “a”, como estando compreendido entre 52 e 96%, inclusive, sendo $a = \Sigma\gamma/100n$; onde γ é igual ao somatório das porcentagens dos grãos passando nas peneiras de números 7, 14, 25, 50, 100 e 200 da curva granulométrica sendo $n = 6$ (número de peneiras utilizadas).

Tabela 5.2 – Critério de classificação direta dos solos estudados quanto ao grau de erodibilidade, proposto por Santos e Castro (1967)

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO				
# 40	SC	SRJ-B	SRJ-A	SRM
$a = Sg/100n$	SRJ-B	SC	SRJ-A	SRM

Dessa forma, a Tabela 5.2 mostra a aplicação desse critério para os solos estudados, com a classificação destes em escala crescente quanto ao grau de erodibilidade inerente a cada solo, ou seja, do solo menos erodível para o mais erodível.

Alcântara (1997), define a granulometria como sendo a propriedade mais estudada na tentativa de se avaliar o grau de erodibilidade de um solo, e que solos mais erodíveis, são os que apresentam predominância da fração silte e areia muito fina e com baixo teor de argila, ou seja, solos finos com comportamento mais granular.

Poesen (1981) citado por Guerra (1998), observou que as areias apresentam os maiores índices de erodibilidade e que o teor de silte também afeta a erodibilidade dos solos. Ainda segundo o autor, alguns pesquisadores demonstram que, quanto maior o teor de silte, maior a susceptibilidade dos solos a sofrerem processos erosivos.

Para um melhor entendimento deste tópico, os resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação com o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio, com concentrações de 45,7 g/l), são representados sob a forma de gráficos com as curvas de distribuição granulométrica de cada solo (Figura 5.3) e a variação dessa com a profundidade estudada (Figuras 5.4 e 5.5). Sendo a porcentagem de cada material calculada segundo os critérios da escala granulométrica da ABNT.

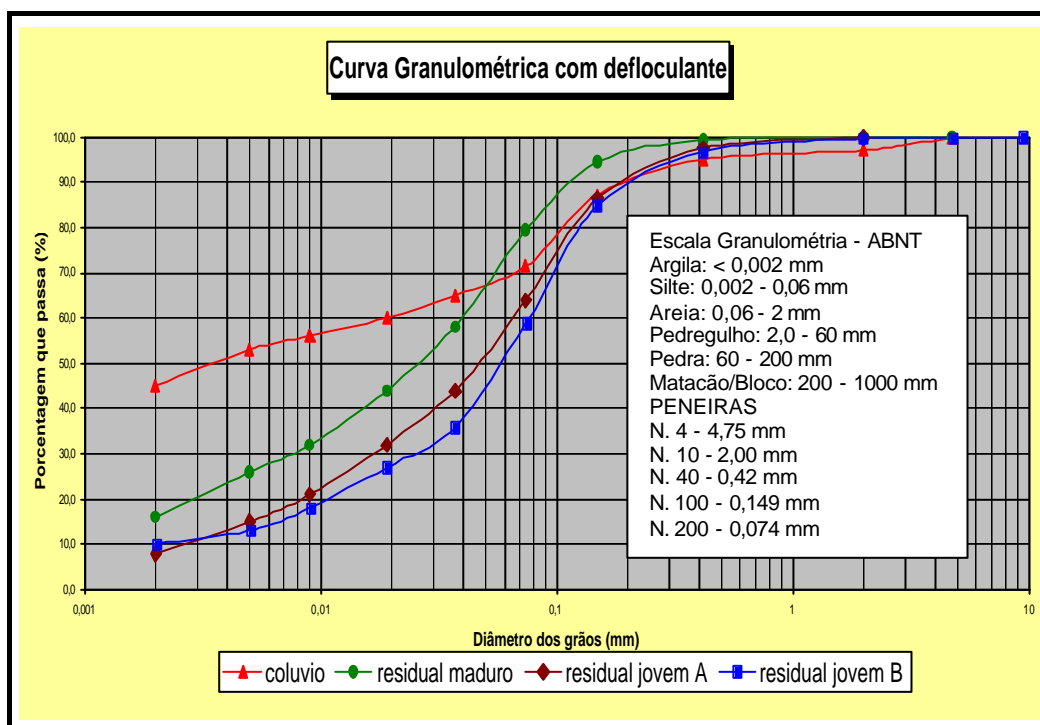


Figura 5.3 – Curva Granulométrica por peneiramento e sedimentação

As tendências de correlações foram obtidas a partir das curvas granulométricas por peneiramento e sedimentação, para os solos ensaiados em

laboratório, conforme mostra a Figura 5.3, cujos valores encontram-se representados na Tabela 5.1.

Com exceção da curva granulométrica representativa do solo coluvionar, que apresenta uma ligeira distorção em relação às demais curvas do solo, obtidas a partir do ensaio granulométrico por peneiramento e sedimentação. As outras curvas apresentam um comportamento bastante semelhante entre si. Revelando de certa forma, uma uniformidade granulométrica entre elas ao longo do perfil analisado.

A influência do meio dispersor na desagregação do solo pode ser observada nas amostras submetidas ao ensaio de granulometria por sedimentação (Figura 5.3), sobre o qual pode-se tecer os seguintes comentários:

- apenas o horizonte da camada superior, solo coluvionar, apresenta uma certa quantidade representativa da fração argila, que pode ser devido à presença de matéria orgânica ou ainda de argilominerais dispersivos na fração fina do solo, o que pode ser justificado por uma curva de forma mais contínua.
- com relação às demais gêneses do solo estudado, essas apresentam curvas granulométricas mais representativas com as condições da distribuição das frações granulométricas presentes.

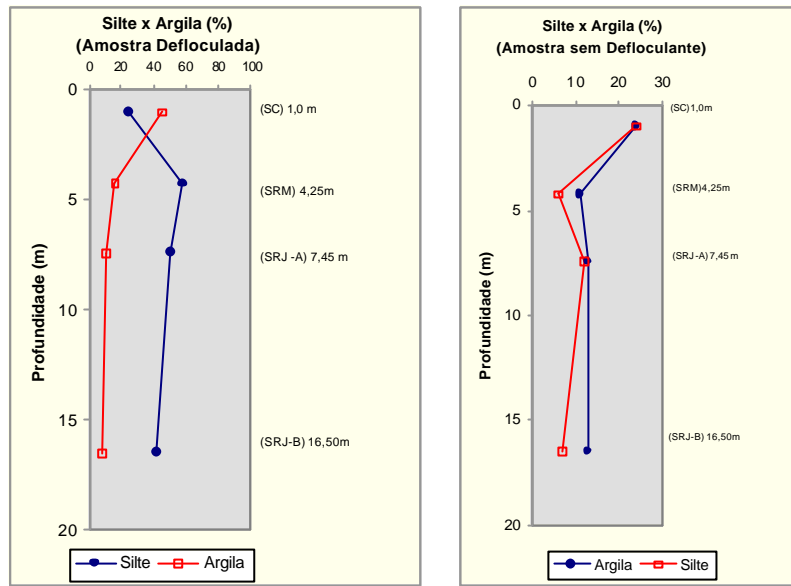


Figura 5.4 – Variação das Frações Silte e Argila por sedimentação

Analisando-se os resultados acima, observa-se no gráfico, que existe uma variação entre esses solos com a profundidade, onde se verifica um comportamento inverso entre as frações argila e silte, devido a decréscimo da fração mais fina.

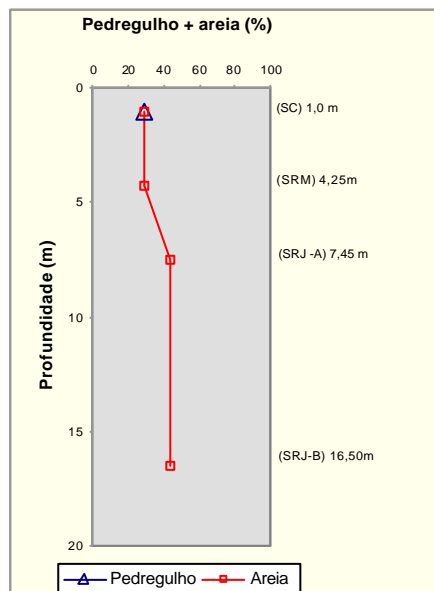


Figura 5.5 – Variação das Frações Pedregulho + Areia

Na análise granulométrica da fração pedregulho mais areia (Figura 5.5), nota-se que a primeira aparece uma única vez em número reduzido na camada referente ao solo coluvionar estudado, o que não ocorre com a fração granulométrica referente a areia, a qual atribui-se um crescimento gradual e proporcional ao longo da profundidade do solo estudado.

5.3.2.2. Limite de Atterberg

A plasticidade é normalmente definida como uma propriedade dos solos, que consiste em uma maior ou menor capacidade de serem eles moldados, sob certas condições de umidade.

Gidigaw (1976), cita como influente na plasticidade dos solos, os seguintes fatores:

- **natureza dos Minerais** – Os argilominerais em formato lamelar ou em placas são aqueles que apresentam maior plasticidade ao contrário dos demais minerais;
- **porcentagem de Fração Argila** – O aumento do grau de plasticidade de um solo está relacionado diretamente a uma maior quantidade de argila presente;
- **natureza dos Cátions Trocáveis** – Os minerais com alta plasticidade como os minerais do grupo da esmectita, estão sujeitos a uma maior influência com o tipo de cátion adsorvido do que minerais que apresentam baixa plasticidade, como por exemplo, a caulinita;
- **quantidade de Matéria Orgânica** – O conteúdo de matéria orgânica altera os limites de plasticidade, sem, contudo, influenciar no índice de plasticidade.

Valores de limite de consistência mais comuns para alguns argilominerais, são apresentados por Mitchell (1993), conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Limites de Atterberg para argilominerais (modificado por Mitchell, 1993)

Mineral	w _l (%)	w _p (%)
Montmorilonita	100-900	50-100
Ilita	60-120	25-60
Caulinita	30-110	25-40

O autor correlaciona os valores apresentados na tabela acima aos seguintes fatores:

- para cada argilomineral a variação nos limites de liquidez é maior do que a variação ao limite de plasticidade;
- a variação no limite de liquidez entre diferentes argilominerais é muito maior do que a variação nos limites de plasticidade.

Os gráficos da Figura 5.6 representam a variação dos limites de Atterberg com a profundidade onde foram extraídas as amostras para ensaios de um modo geral.

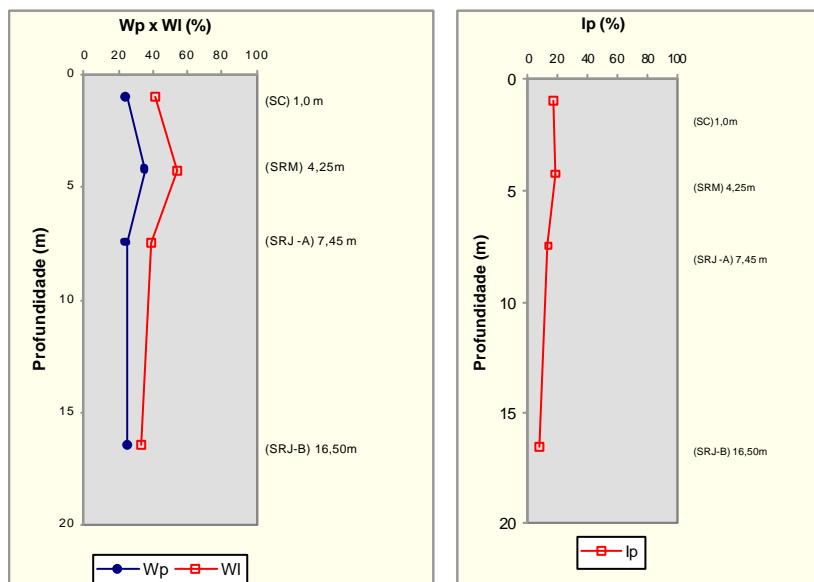


Figura 5.6 - Variação dos Limites de Atterberg

Observando-se as curvas dos gráficos acima, pode-se dizer que a maior variação entre eles é devido ao limite de liquidez, confirmando, portanto estudos realizados por Mitchell (1993).

Verifica-se também que a partir dos 4,25 metros de profundidade, ocorre uma evidente mudança no comportamento do horizonte desses solos, devido ao decréscimo do índice de plasticidade que sinaliza a passagem de um horizonte de solo com maior teor de argila para um subjacente menos argiloso.

5.3.2.3. Umidade Natural e Umidade Higroscópica

Os teores de umidade natural foram obtidos de duas formas, a saber:

- a partir das amostras indeformadas retiradas da parede direita, norte do talude pertencente à Erosão 1.
- da extração de amostras amolgadas do ensaio penetrométrico (SPT) referente ao Piezômetro PZ-46, junto à mesma erosão, cujas umidades são apresentadas no perfil de sondagem SPT do furo (em anexo).

Os teores de Umidade Higroscópica foram determinados após secagem ao ar das amostras numa temperatura ambiente de 25⁰C, para uma umidade relativa do ar de aproximadamente 75%. Estando as variações entre os teores de umidades obtidos, em função da profundidade, representados na Figura 5.7.

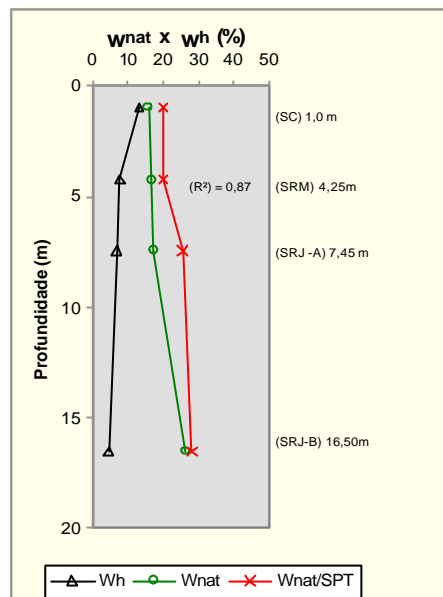


Figura 5.7 – Variação dos teores de Umidade Natural (W_{nat}) e Umidade Higroscópica (W_h)

Analisando-se o gráfico acima, observa-se uma variação crescente entre as duas curvas representativas das umidades naturais em função da profundidade local. Isto pode ser atribuído à proximidade com o lençol freático, encontrado a partir dos 17 metros, no interior da erosão estudada.

Quanto à curva representativa do teor de umidade higroscópica se comparada as duas outras curvas presentes, nota-se um decréscimo com a profundidade o que é perfeitamente aceitável, pelas características apresentadas pela camada de solo analisada em função da sua fração granulométrica crescente para areia e silte, sendo decrescente para argila, em função da profundidade estudada.

Isto indica que os solos de camadas mais profundas apresentam uma maior susceptibilidade à perda da capacidade de retenção do teor de umidade, em relação às camadas de solos mais próximas da superfície.

5.3.2.4. Peso Específico

A Figura 5.8 representa a variação do peso específico seco (γ_d) com o peso específico dos sólidos (γ_s) e o peso específico natural (γ_{nat}) em relação à profundidade de onde foram extraídas as amostras de solo, como pode ser observada a seguir.

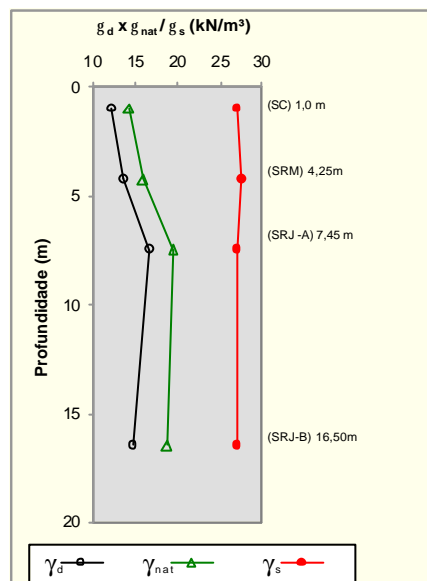


Figura 5.8 – Variação do Peso específico aparente seco (γ_d) com o peso específico natural (γ_{nat}) e o Peso específico dos sólidos (γ_s)

Analisando-se o gráfico acima, observa-se uma correlação crescente até a profundidade de 7,45 metros, para as curvas representativas do peso específico seco (γ_d) e do peso específico natural (γ_{nat}) com valores entre 12,17 kN/m³ a 16,66 kN/m³ e 14,13 kN/m³ a 19,53 kN/m³, respectivamente. A partir da profundidade de 7,45 metros essas curvas apresentam um ligeiro decréscimo até a profundidade estudada, com valores de 16,66 kN/m³ a 14,8 kN/m³ e 19,53 kN/m³ a 18,72 kN/m³, respectivamente.

O aumento e decréscimo desses pesos específicos, representados por suas curvas a partir das profundidades estabelecidas no gráfico, podem ser

atribuídos à presença de alguns argilominerais em escala crescente como: grupos da esmectita, da caulinita e illita, que poderiam levar a um aumento do peso específico aparente seco (γ_d) e do Peso Específico dos Grãos (γ_s), este último representando a média da massa específica dos constituintes da fase sólida de um solo, incluindo os seus minerais, sais precipitados, compostos orgânicos e materiais não cristalinos.

O valor da densidade relativa dos grãos de um solo depende do constituinte mineralógico da partícula, sendo que para a maioria destes, seu valor varia entre 2,60 e 2,85, diminuindo para os solos que contêm elevado teor de matéria orgânica e aumentando para solos ricos em óxidos de ferro.

Dessa forma, tendo a densidade relativa o mesmo valor que a massa específica de um solo, porém adimensional pode-se correlacionar seus valores, com os apresentados na Tabela 5.4, referente a alguns minerais presentes no solo.

Tabela 5.4 – Massa Específica dos Minerais Identificados (modificado – Deer et al, 1981)

Mineral	$r(\text{g/cm}^3)$	Mineral	$r(\text{g/cm}^3)$
Quartzo	2,65	Gibbsita	2,4
Muscovita	2,7 – 3,1	Goethita	4,3
Caulinita	2,61 – 2,68	Hematita	5,2
Illita	2,60 – 2,86	Maghemita	4,23 – 5,5
Montmorillonita	2,75 – 2,78	Rutito	4,23 – 5,5

5.3.2.5. Índice de Vazios, Porosidade e Grau de Saturação

Uma das formas de se correlacionar esses índices físicos pode ser com a profundidade dos horizontes representativos dos solos estudados. Dessa forma, os gráficos da Figura 5.9 mostram uma variação dos índices de vazios, porosidade e do grau de saturação com a profundidade.

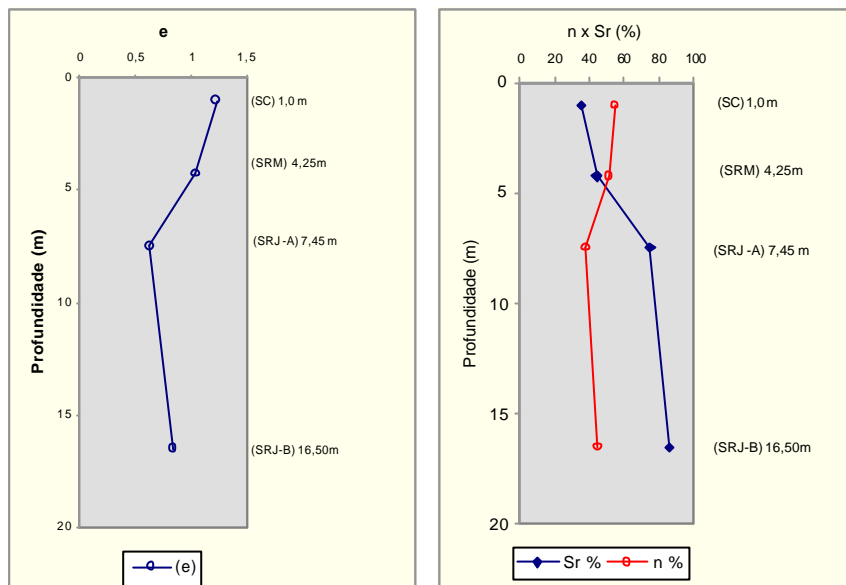


Figura 5.9 - Variação do Índice de Vazios (e), Porosidade (n) e do Grau de Saturação (S)

A análise dos gráficos acima mostra valores altos para índices de vazios e porosidades próximas à superfície, com tendência a diminuir à medida que os horizontes desses solos se tornam mais resistentes com a profundidade, portanto menos susceptíveis a processos erosivos.

Segundo Gidigasu (1976), processos de lixiviação conduzem a um aumento da porosidade dos solos o que pode explicar em parte os altos valores dos índices de vazios nos horizontes superficiais. Sendo que nos horizontes concrecionários, onde ocorre uma maior densificação física dos componentes desses solos, o índice de vazio tende a diminuir. Um outro fator que pode ser correlacionado ao aumento do índice de vazios é a presença da atividade biológica de plantas e animais na estrutura do solo.

Quanto ao grau de saturação até a profundidade de 7,45 metros, observa-se uma correlação inversa quando comparado aos outros dois índices físicos. Isto ocorre devido a uma maior proximidade das camadas dos solos inferiores com o lençol freático, com surgência média, nos períodos secos, a partir dos 15 metros de profundidade da erosão estudada.

5.3.2.6. Índice de Atividade

Independente do tipo e da quantidade dos argilominerais presentes no solo, os limites de Atterberg refletem a influência destes nas propriedades do solo. Mitchell (1993) descreve que para separar a influência destes dois fatores, Skempton (1953) propôs o termo índice de atividade que é definido como sendo a razão entre o índice de plasticidade e o tamanho da fração argila menor que 2μ , $I_a = I_p / (\%)2\mu$. Sendo que quanto maior a atividade, maior será a influência da fração argila nas propriedades do solo.

A Figura 5.10 mostra que os resultados obtidos a partir das amostras de solos ensaiadas, revelam que as argilas estudadas apresentam-se no solo coluvionar como inativas ($I_a < 0,75$), já as amostras pertencentes aos solos residuais maduros e residual Jovem A, apresentam as frações argilas com atividade normal ($0,75 < I_a < 1,25$) e a amostra do solo residual Jovem B apresenta essa fração como ativa ($I_a > 1,25$).

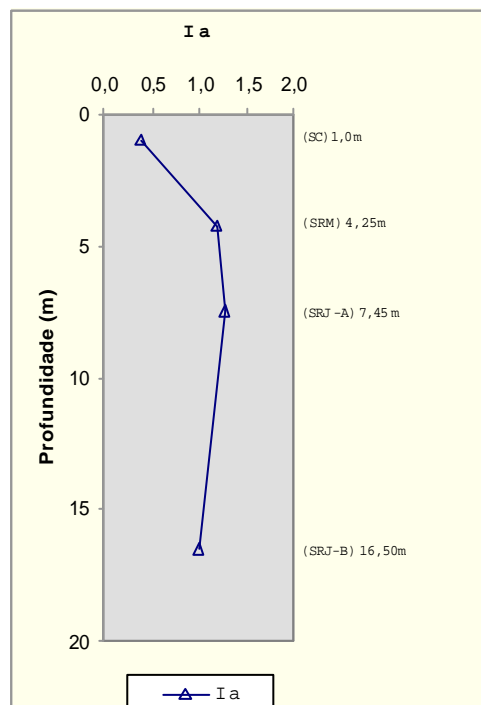


Figura 5.10 – Variação do Índice de Atividade

5.3.3. Correlação entre as propriedades físicas

Como já descrito, somente, a distribuição granulométrica não caracteriza o comportamento dos solos sob o ponto de vista da Engenharia, pois a fração fina destes têm uma importância fundamental nesta etapa.

Uma forma de se estabelecer uma correlação dos resultados obtidos através dos ensaios de caracterização é pela propriedade de consistência (Limites de Atterberg) com as principais propriedades físicas do solo estudado, as quais passam a serem representadas em forma de gráficos, cujo resumo dos resultados constam na Tabela 5.1.

Para elaboração desses gráficos, utilizou-se apenas os resultados representativos das amostras dos horizontes de solos pertencentes a Erosão 1, classificados como solo Coluvionar, solo Residual Maduro e solos Residuais Jovem-A e Jovem-B, onde as características inerentes a cada substrato geológico são melhor preservadas.

Analisando-se os resultados da umidade higroscópica (w_h) em função das propriedades de consistência (w_l , w_p e I_p), para os solos pertencentes à erosão estudada, nota-se uma correlação linear crescente entre o Índice de Plasticidade (I_p) e o teor de umidade higroscópica (w_h), reflexo da própria constituição mineralógica da fração de solo (argila e silte), provavelmente rica em quartzo, não favorecendo a retenção de água nos seus interstícios (Figuras 5.11 e 5.12).

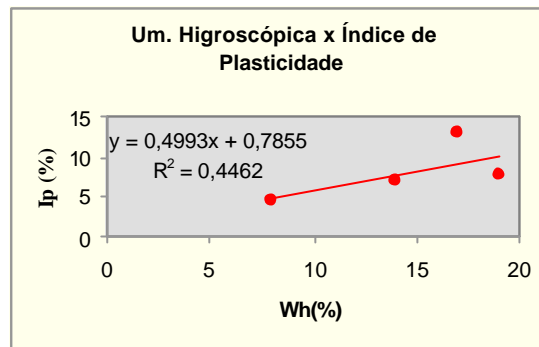


Figura 5.11 – Análise da unidade higroscópica (W_h) em função do Índice de Plasticidade (I_p)

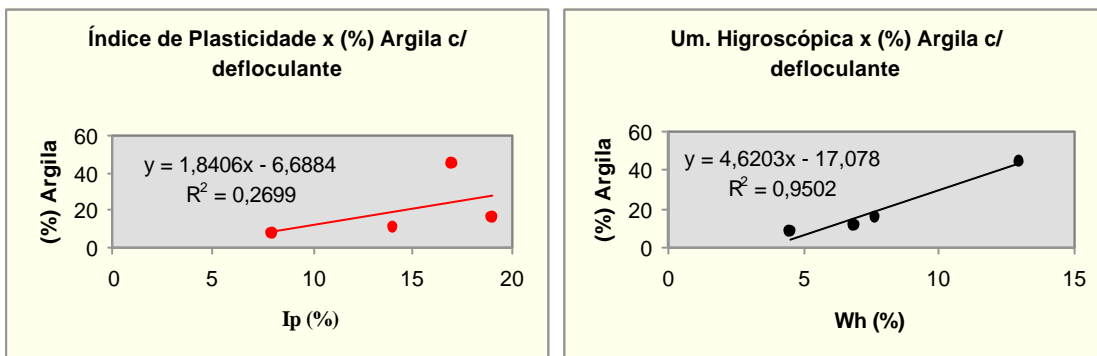


Figura 5.12 – Índice de Plasticidade, Umidade higroscópica versus o percentual de argila.

Com relação aos gráficos acima, observa-se uma tendência linear crescente da umidade higroscópica e do Índice de plasticidade, com os solos mais próximos à superfície. Devendo-se justificar essa ocorrência pelo aumento gradativo da fração argila nesses solos.

Outra forma de se correlacionar esses índices é através da influência do percentual de silte mais argila, ambos obtidos a partir do ensaio granulométrico, conforme representações gráficas constantes da Figura 5.13.

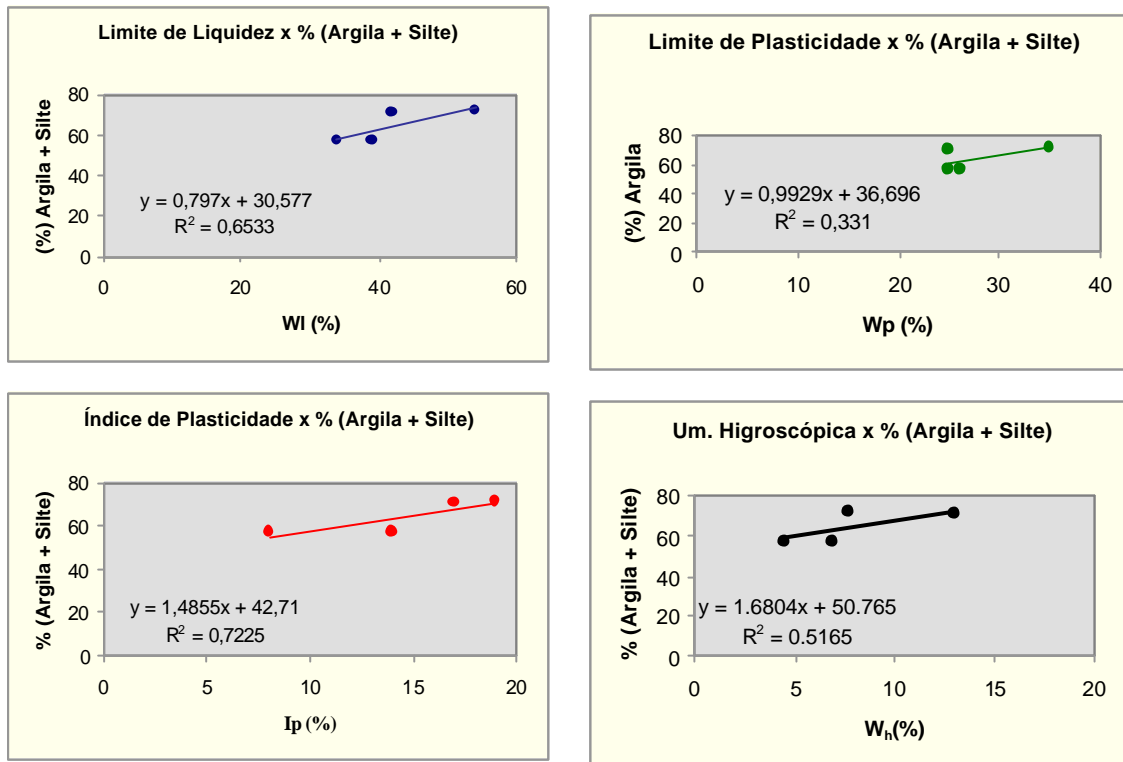


Figura 5.13 – limite de Atterberg e Umidade higroscópica versus Porcentual de argila e silte

Analisando-se os gráficos acima, constata-se que o coeficiente de correlação entre a soma dos percentuais de argila e silte com os limites de consistência e a umidade higroscópica, apresentam uma melhor correlação entre os índices físicos estudados.

Convém ressaltar que, a porcentagem de argila só ocorre em maior escala no solo coluvionar, decrescendo de forma inversa, quando comparada às frações de silte e areia que apresentam um aumento dos seus valores percentuais, com a profundidade.

Os resultados das análises laboratoriais relativas as principais propriedades físicas do solo estudado junto às observações de campo, levam a concluir que as características de correlação representadas pelos índices físicos dos horizontes intermediários pertencentes ao solo Residual Maduro e

Residual Jovem-A mostram uma tendência definida de comportamento a ocorrência de processos erosivos na presença de água, devido principalmente aos altos índices de vazios, porosidades e Limites de Liquidez apresentados, fenômenos esses que facilitam a percolação de fluxo d'água.

Para o solo Coluvionar, esta tendência não se aplica, apesar deste possuir índice de vazios elevado, provavelmente devido a argilominerais presentes na fração argila deste solo. Já para o solo Residual Jovem B, esse se torna mais concrecionário, à medida que seus horizontes se aprofundam, o que pode ser confirmado pela observação de campo e correlação entre os resultados dos índices físicos apresentados, que indicam uma diminuição dos índices de vazios e da plasticidade desse solo e um aumento das frações de areia silte com a profundidade, ocorrendo um decréscimo da fração argila, classificada como de atividade normal, o que pode ser considerado como uma porção cimentante para os agregados componentes deste solo, tornando-o dessa forma, mais estruturado, porém isso não é um condicionante para que se possa afirmar ser este solo menos susceptível a sofrer processos erosivos, pois se verifica que os solos com maior concentração da fração de silte em sua estrutura são os mais susceptíveis a sofrerem erosões, para o caso estudado destaca-se o solo Residual Maduro e o Solo Residual Jovem A.

Com referência ao potencial de perda de solo pelas camadas analisadas, torna-se difícil um estabelecimento direto entre as propriedades físicas estudadas com a susceptibilidade a processos erosivos, já que as características geotécnicas do solo não são capazes isoladamente de identificar o seu potencial de erodibilidade, necessitando, portanto a sua comprovação, de uma complementação através dos ensaios específicos de erodibilidade e de alguns ensaios especiais os quais serão apresentados nos capítulos a seguir.

5.4. Ensaio de Erodibilidade

De acordo com a revisão bibliográfica, Fácio (1991), concluiu que o uso de correlações entre a erodibilidade dos solos e suas características físico-químicas e geotécnicas, ficam comprometidas pelo elevado número de parâmetros que interferem nesse processo, necessitando, portanto, de uma análise sob as condições específicas de cada uma destas para a formulação de um modelo universal.

Foram realizados os ensaios *Crumb Test*, de Desagregação, *Pinhole Test* e *Inderbitzen*, que passam a serem descritos, de forma a terem seus resultados obtidos comparados com as observações feitas em campo, a fim de aferir o grau de compatibilidade entre si. Os ensaios acima foram realizados no Laboratório de Solos, da empresa Furnas Centrais Elétricas S.A.

5.4.1. *Crumb Test*

Este ensaio originalmente proposto por Rallings (1966), e modificado por Sherard et al (1976), proporciona uma forma muito simples de identificação de solos argilosos dispersivos sem a necessidade de requerer um equipamento especial, partindo-se da premissa que argilas dispersivas⁵ possuem preponderância de cátions de sódio dissolvidos na água intersticial, enquanto que as argilas resistentes à dispersão possuem comumente cátions de cálcio e magnésio.

- **Metodologia**

Para o ensaio utilizou-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), na concentração de 1 mili-equivalente por litro de solução (isto é 0,01 normal), ou

⁵ Dispersibilidade – susceptibilidade ao fenômeno do efeito de retroerosão progressiva, ou seja, propriedades que apresentam certos solos argilosos de permitirem que suas partículas sejam desagregadas quando em presença de água.

seja, para 1 litro de solução, foram dissolvidos 0,04 grama de hidróxido de sódio anidro em um becker com capacidade para 1000 ml. Após essa fase, foram colocadas no becker, amostras dos solos estudados na umidade natural e em forma de torrões, com diâmetro efetivo entre 6 e 10 mm, durante um intervalo de tempo variando entre 5 e 10 min. Após a observação das reações das amostras, verifica-se o resultado obtido de acordo com a interpretação proposta por Sherard *et al.* (1976), conforme tabela a seguir.

Tabela 5.5 – Guia de interpretação proposta por Sherard et al (1976)

GRAU 1	Nenhuma reação	Os fragmentos poderão se desmanchar, espalhando-se suavemente pelo fundo do becker, sem, no entanto apresentar sinal de turbidez, causada por partículas coloidais, na suspensão.
GRAU 2	Reação Fraca	Turbidez incipiente ou inexpressiva na solução, na superfície dos fragmentos. Se a turbidez for facilmente visível considerar como GRAU 3.
GRAU 3	Reação Moderada	Nuvem de colóides ⁶ (turbidez) facilmente reconhecível na suspensão, normalmente espalhando-se em camadas tênues pelo fundo do Becker.
GRAU 4	Reação Forte	A nuvem de colóides cobre quase todo o fundo do becker, normalmente como uma fina película. Em casos extremos toda a solução do copo se torna turva.

Segundo Sherard et al, 1976, os resultados verificados como grau 1 e 2, podem ser interpretados como solos de nenhuma ou fraca reação, respectivamente, portanto como não dispersivos, e para os solos com grau 3 e 4 como de reação moderada a forte, respectivamente, portanto consideradas como dispersivos.

Outra maneira de se aferir o comportamento quanto a dispersibilidade de uma determinada amostra de solo, é com a utilização de água destilada, que se apresenta como um inibidor tão bom quanto a solução de Hidróxido de Sódio (NaOH). Ressalta-se, no entanto, que muitas argilas dispersivas não apresentam reação em água destilada, mas reagem na presença da solução.

⁶ Colóides – denotação, muitas vezes utilizada, da fração argila dos solos, constituída por um ou mais argilominerais, sílica coloidal, cristais de quartzo com diâmetro inferior a 0,002mm, microgrãos de óxidos de ferro hidratado ou não, e matéria orgânica.

- **Análise dos Resultados**

Para o ensaio, foram analisadas amostras de solos coletados na campanha de campo da UHE de Itumbiara com os horizontes recebendo as seguintes denominações: Solo Coluvionar (SC), Solo Residual Maduro (SRM), Solo Residual Jovem A (SRJA) e Solo Residual Jovem B (SRJ-B), cujos resultados são os apresentados a seguir e têm como base de interpretação a classificação proposta por Sherard et al, 1976 (Tabela 5.5).

Quanto à interpretação dos resultados do ensaio Crumb Test, com a solução de hidróxido de sódio (NaOH) no becker da esquerda e de água destilada no becker de direita, constam da relação e fotos apresentadas na Tabela 5.7 e discutidas a seguir:

Tabela 5.6 - Resultado do ensaio Crumb Test

Identificação da Amostra	Resultado	Fotos		
		Amostra de solo	Antes	Depois
			NaOH	H ₂ O
SC	Grau 1			
SRM	Grau 2			
SRJ-A	Grau 3			
SRJB	Grau 3			

Os resultados apresentados na Tabela 5.6 do ensaio de Crumb Test definem o Solo Coluvionar como sendo de Grau 1, portanto não apresentando nenhuma reação a dispersibilidade. Quanto ao Solo Residual Maduro este foi

classificado como sendo de Grau 2, portanto apresentando fraca reação a dispersibilidade.

Já o solo Residual Jovem A e B, apresentam classificação como sendo de Grau 3, portanto de reação moderada a dispersibilidade.

Outra forma de se correlacionar o grau de dispersão desses solos, medido em forma de valores porcentuais, é através da equação proposta por Volk (1937) apud Sherard et al (1976), para solos argilosos submetidos ao ensaio de dispersibilidade, classificado como ensaio sedimentométrico comparativo (SCS – NBR 13602/1996), cujos resultados constam da Tabela 5.6, obtidos do gráfico da Figura 5.12, que visa verificar a facilidade com que solos naturais se dispersam sem agitação mecânica e identificar qual a possibilidade do solo analisado apresentar uma maior ou menor tendência de se dispersarem, cuja fórmula e classificação são apresentadas a seguir:

$$P_d (\%) = \frac{(\%) \text{ de partículas } < 5\mu_m, \text{ sem dispersante}}{(\%) \text{ de partículas } < 5\mu_m, \text{ com dispersante}} \quad (2)$$

Valor em porcentual, atribuído a dispersão de solos argilosos, que serão classificados de acordo como seguinte critério:

Classificação da dispersibilidade:

- Média** $\text{D } 20\% < P_d < 25\%$
- Alta** $\text{D } 25\% < P_d < 50\%$
- Muito Alta** $\text{D } P_d > 50\%$

O ensaio sedimentométrico comparativo é aplicável apenas a solos que contenham mais de 12% da fração argila das partículas com diâmetro inferior a 0,005mm, quando ensaiadas pelos critérios da NBR 7181/1984. Se Diferenciado destes, somente pela não utilização de agitação mecânica e o não adicionamento de agentes dispersantes na solução solo-água.

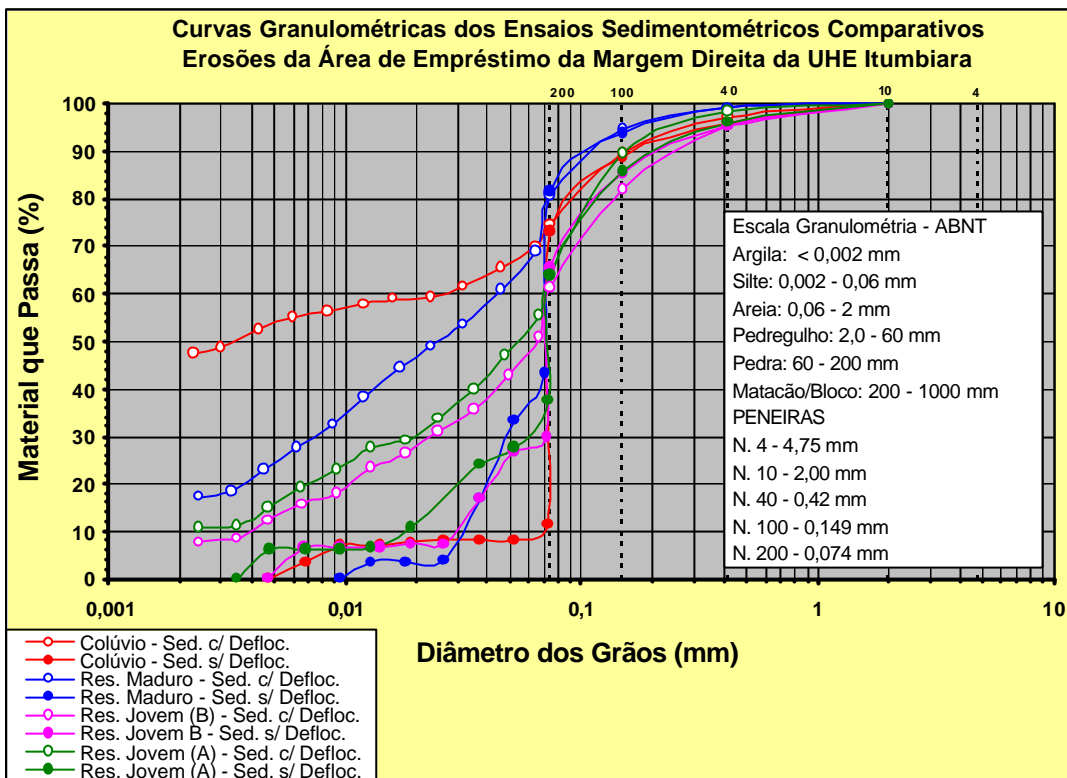


Figura 5.14 - Curvas representativas do Ensaio Sedimentométrico Comparativo

Tabela 5.7 – Resumo dos resultados do ensaio sedimentométrico comparativo (0,002 – 0,05mm)

AMOSTRA		SC	SRM	SRJ-A	SRJ-B	
FRAÇÃO	SILTE (%)	-	17	45	38	36
	(SCS)*		8	32	28	26
	ARGILA (%)	-	47	17	11	8

(SCS)* – sem defloculante

Fazendo-se uma correlação deste ensaio com o percentual de dispersão proposto pela equação (2), obteve-se para os dados analisados o seguinte grau de classificação quanto a dispersibilidade:

Solo Residual Jovem A $\hat{P} P_d = 33\%$ (dispersibilidade alta);

Demais solos $\hat{P} P_d = 0\%$ (não dispersivos).

Em se tratando de solo não argiloso, uma outra proposta de correlacionar a equação (2) é apresentada pelo autor com a utilização do somatório de finos

(argila + silte), o que classifica os solos estudados em relação a dispersibilidade, com:

Solo Residual Maduro e Jovem A $P_d = 52$ e 57% respectivamente,
(dispersibilidade muito alta);

Solo Coluvionar e Residual Jovem B $P_d = 13$ e 18% , respectivamente,
(dispersibilidade baixa).

Comparando-se os resultados apresentados pela equação (2) com os obtidos pelo Ensaio de Crumb Test, pode-se dizer que não há uma correlação aceitável entre os dois métodos quanto ao grau de dispersibilidade desses solos. Isto pode ser explicado pelos resultados do ensaio sedimentométrico comparativo, que indica para o solo estudado como sendo de textura siltosa, Tabela 5.7, e não argilosa como proposto pela equação (2). Podendo ser melhor definida as condições de dispersibilidade desses solos, quando da utilização do somatório de finos, argila+ silte, proposto pelo autor.

5.4.2. Desagregação

A erodibilidade de um solo pode também ser analisada, a partir de observações sobre o comportamento de amostras desses em contato com a água.

De acordo com Fonseca (1981), o ensaio de erodibilidade “é executado com o objetivo de se observar o comportamento relativo de uma amostra de solo sob influência da água”.

O mesmo autor descreve que estudos realizados em áreas de testes do Instituto de Pesquisas Rodoviárias verificaram que a velocidade de desagregação era proporcional a erodibilidade dos horizontes de um solo de gnaíse, submetido ao mesmo ensaio.

Santos (1997) realizou no laboratório de Furnas -GO ensaio com amostras de solos cúbicas, com 6cm de lado, onde foram colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com o nível d'água sendo mantido na altura da base da amostra por um período de 30 minutos. A seguir, a altura d'água foi aumentada sucessivamente para 1/3, 2/3, até a submersão total das amostras, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos. Após a submersão total, o ensaio prosseguiu por um período de 24 horas.

- **Metodologia**

A metodologia adotada objetiva a observação do comportamento de amostras de solos sob a influência d'água. Para tanto, foram utilizadas amostras indeformadas obtidas a partir dos blocos retirados da parede direita do talude da Erosão 1, caso estudado, os quais receberam as seguintes denominações: Solo Coluvionar (SC), Solo Residual Maduro (SRM), Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) e Solo Residual Jovem -B (SRJ-B).

Para a realização dos ensaios de desagregação os corpos de provas, foram moldados com 5 cm de lado e colocados dentro de duas bandejas com água, observando-se em seguida as suas reações ao processo de submersão.

Na primeira bandeja (Figura 5.15), as amostras foram colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com o nível d'água sendo mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos.

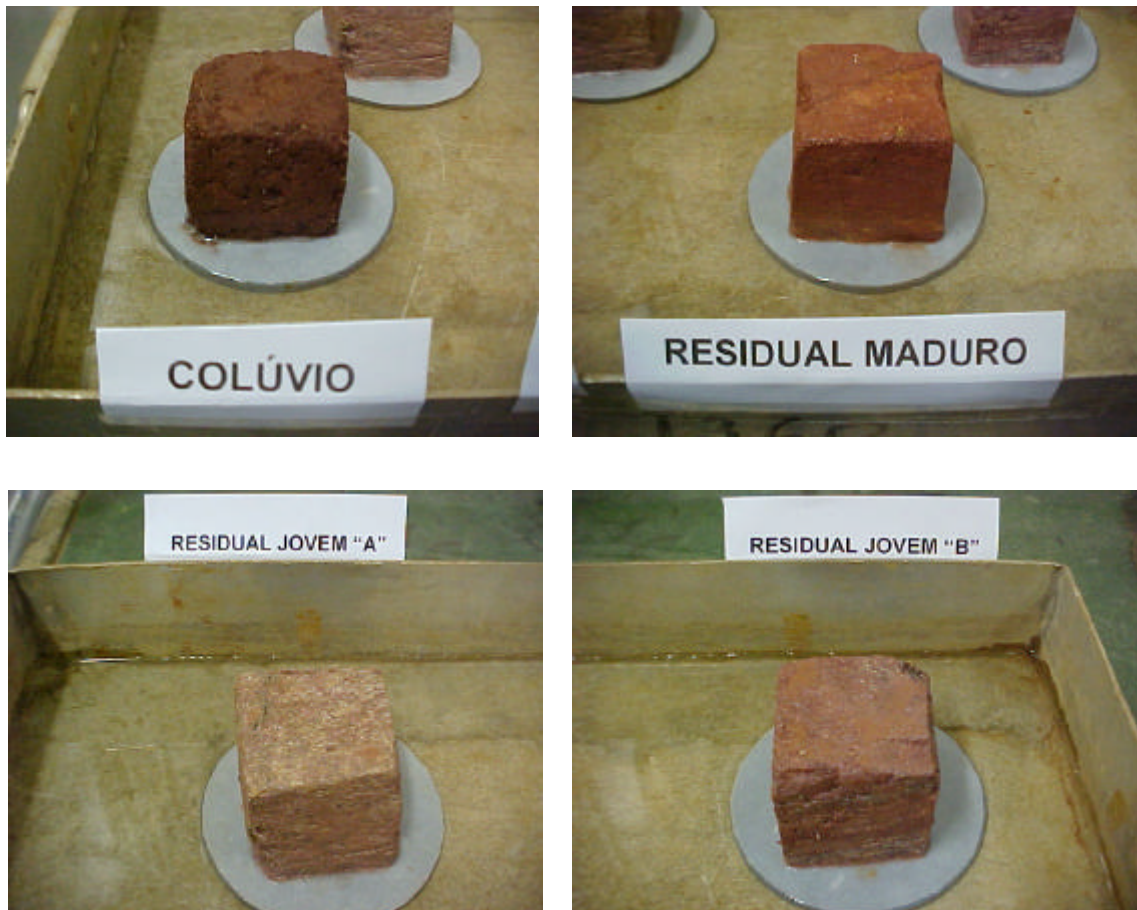


Figura 5.15 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a base – 30 min)

A seguir a altura da água foi sucessivamente aumentada a cada 15 minutos, até atingir 1/3 da altura total da amostra, no tempo de 45 minutos (Figura 5.16).



Figura 5.16 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a 1/3 H – 45 min)

Logo em seguida, a amostra foi imersa até 2/3 de sua altura total, permanecendo a mesma nesta condição até o tempo de 60 minutos.

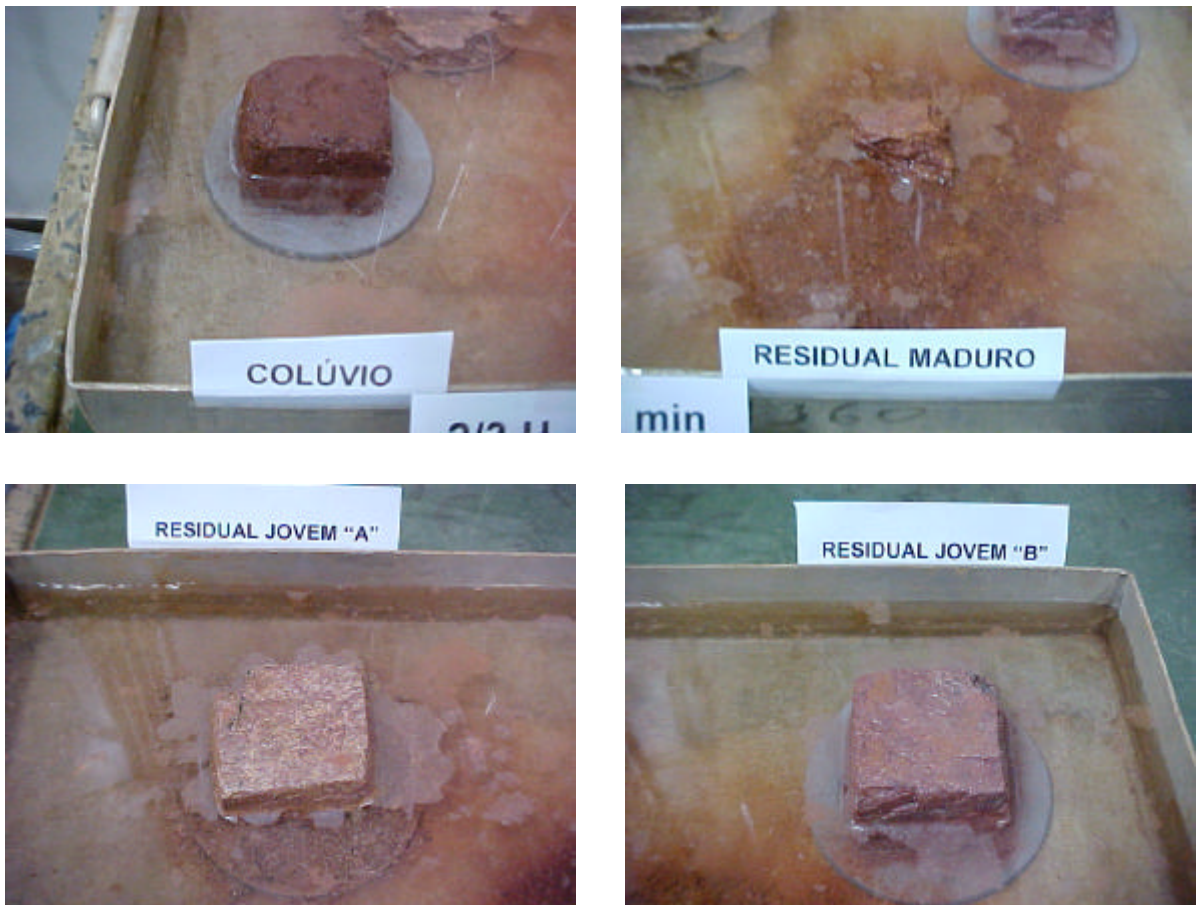


Figura 5.17 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Progressiva (até a 2/3 H – 60 min)

Após as etapas iniciais, descritas anteriormente, prosseguiu-se com o ensaio submetendo as amostras à imersão total por um período de 24 horas.



Figura 5.18 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (período de 24 horas)

Os corpos de prova foram submetidos à imersão total desde o início do ensaio prosseguindo sob esta condição por um período de 24 horas, obedecendo-se as seguintes etapas a seguir:

a) Logo após a inundação



Figura 5.19 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (logo após a inundação)

b) Após 15 minutos decorridos to tempo de inundação



Figura 5.20 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (após 15 min)

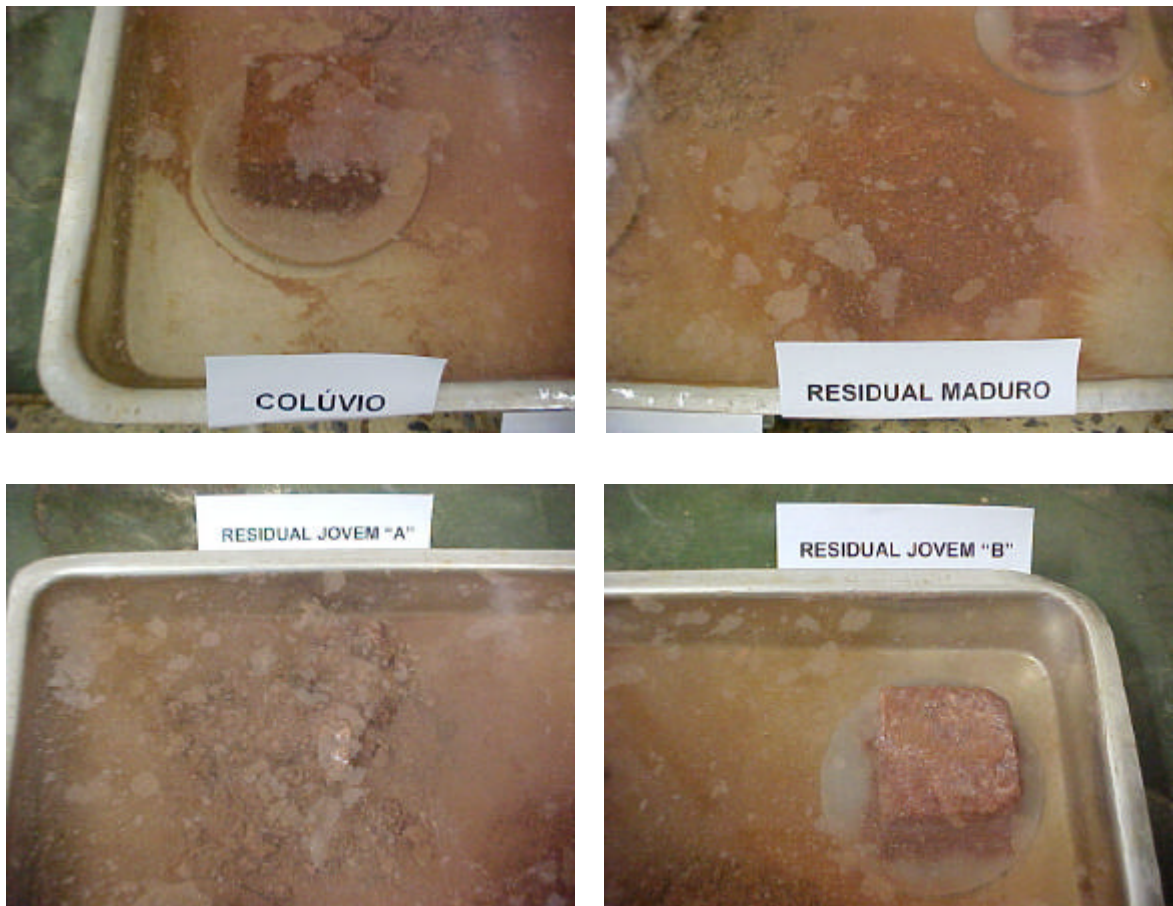
c) Ao término do período de 24h da inundação

Figura 5.21 – Amostras colocadas sobre Pedra Porosa, Ensaio de Imersão Total (após 24 h)

- **Análise dos Resultados**

De uma forma geral, pode-se verificar que as amostras de Solo Coluvionar (SC), não apresentam alterações na sua forma em nenhum estágio dos ensaios realizados. Quanto às amostras de Solo Residual Jovem B (SRJ-B) apresentam apenas uma pequena desagregação em sua base, após esta ter sido totalmente submetida ao processo de inundação.

As amostras de Solo Residual Maduro (SRM) e Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentam um processo de desagregação muito intenso.

No ensaio realizado com imersão progressiva (Figuras 5.15 a 5.18) o processo de desagregação ocorreu da seguinte forma:

- água até a base da amostra (após 30 minutos do início do ensaio): observa-se ascensão capilar nas amostras (Figura 5.15);
- água à 1/3 da altura da amostra (após 45 minutos do início, do ensaio): nota-se uma desagregação intensa do corpo de prova do Solo Residual Maduro (SRM) pelo processo de abatimento. O corpo de prova do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentou o mesmo processo, porém em menor escala (Figura 5.16).
- água à 2/3 da altura da amostra (após 60 minutos do início do ensaio): na amostra de Solo Residual Maduro (SRM) teve continuidade o processo de abatimento. Já na amostra do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) o processo de abatimento ocorreu em menor escala, acompanhado por início de fraturamentos, onde a amostra se quebra em fragmentos seguindo direções preferenciais (Figura 5.17).
- água cobrindo toda a amostra (após 24 horas do início do ensaio): a amostra do Solo Residual Maduro (SRM) apresentou desagregação total pelo processo de abatimento. Já a amostra do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentou desagregação quase total, sendo que a passagem do estágio anterior para este ocorreu fraturamentos (Figura 5.18).

No ensaio realizado com imersão total (Figuras 5.19 a 5.21) dos corpos de prova no tempo zero, o Solo Residual Maduro (SRM) apresentou desagregação total logo após a imersão, por meio do processo de abatimento. É importante salientar que à medida que a amostra foi sendo inundada, esta sofreu um intenso processo de desagregação, a ponto de poder ser comparada a uma pastilha de “sonrisal”.

Já a amostra do Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) apresentou na fase final do ensaio um processo de desagregação quase que total, sendo esta precedida por fraturamentos.

Os resultados ora apresentados fornecem uma boa correspondência com as ocorrências evidenciadas no campo que confirma, com destaque para o Solo Residual Maduro (SRM), ser este o mais susceptível a sofrer processos erosivos, se comparado às demais gêneses submetidas ao mesmo tipo de ensaio.

Este ensaio apesar de sua simplicidade apresenta resultados bastante coerente com os obtidos principalmente nos ensaios de Inderbitzen e Pinhole Test (com amostras indeformadas), que vêm a confirmar mais uma vez uma boa correlação com as observações de campo.

5.4.3. Ensaio *Pinhole Test* (Furo de Agulha)

Este ensaio, idealizado por Sherard et al (1976) tem como objetivo identificar e compreender o comportamento de solos argilosos quanto a sofrerem ou não processos de dispersão, após serem submetidos a carregamentos hidráulicos, pré-estabelecidos.

Uma forma de se observar essa diferença é pelo resultado do ensaio sob carga de 2 polegadas (50mm), que para argilas dispersivas o fluxo emergido da amostra tem coloração visível a uma nuvem coloidal e não clareia com o tempo, sendo que em 10 minutos o furo se alarga para cerca de 3mm, ou mais, e dá-se o ensaio como concluído. Já para argilas não dispersivas o fluxo emergido é completamente limpo, ou se torna limpo em poucos segundos e o furo não erode.

- **Metodologia**

A metodologia deste ensaio foi definida conforme preconiza a NBR 14114/98, como sendo o ensaio de “furo de agulha”, o qual consiste em se fazer percolar água destilada através de um furo de 1mm de diâmetro por 1 polegada (254mm) de comprimento, feito em um corpo de prova cilíndrico de amostra de solo, com diâmetro interno e altura, iguais a 35,7mm e 38,1mm, respectivamente, conforme modelo esquemático do ensaio (Figura 5.20).

O ensaio pode ser realizado, com amostra de solo indeformada e amolgada, sendo a segunda compactada em cinco camadas iguais, com auxílio de pisoteador tipo Harvard (mola calibrada para 6,8kg), aplicando-se um número de golpes necessários para se obter um grau de compactação em torno de 95% em relação ao Proctor Normal (cerca de 16 golpes por camada).

Após moldagem da amostra, crava-se um tronco de cone de metal no centro de uma das faces do corpo de prova, através de pressão exercida pelos dedos, colocando-se em seguida a agulha ao longo do corpo de prova, tendo como guia o tronco de cone. A seguir, prossegue-se com a preparação do material a ser ensaiado, preenchendo-se com cascalho, o espaço entre a base e o topo do corpo de prova com a do cilindro, instalando-se entre esses faceamentos 2 telas de arame, sendo uma na entrada do fluxo e outra na saída.

Por se tratar de solo não saturado e não argiloso, foi introduzido nessa etapa do ensaio, uma fase não prevista na norma, que complementa as etapas anteriores, dando início ao ensaio com a aplicação de uma pressão mínima de saturação sobre a amostra, sem fluxo, deixando-se para isso aberta a saída de ar superior do aparelho de ensaio por um período mínimo de 2 horas, tempo este considerado suficiente para garantir a saturação da amostra ensaiada, evitando-se assim a desestruturação da sua macro-estrutura sob a influência da carga hidráulica inicial. Dessa forma, faz-se percolar água pelo furo sob ação de

cargas hidráulicas de 50, 180, 380 e 1020mm, durante as quais, a vazão é determinada continuamente com auxílio de uma proveta e um cronômetro, devendo a cor da água ser observada na saída do cilindro de percolação e na proveta graduada, destinada a medição dessa.

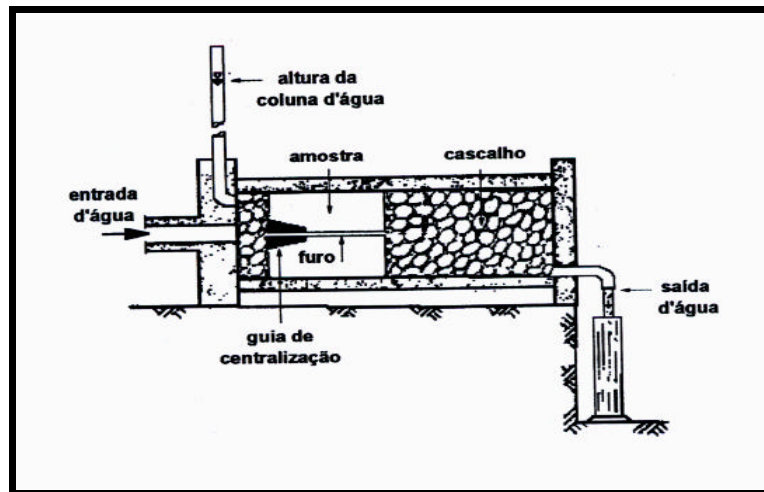


Figura 5.22 – Modelo Esquemático do Ensaio de *Pinhole Test*

A resistência à erosão do solo é estimada pelo diâmetro final do furo, pela coloração da água que sai e pela vazão de percolação medida. É apresentada a seguir uma tabela resumo dos critérios interpretativos desse ensaio, para classificação dos solos quanto ao grau de dispersibilidade.

Tabela 5.8 – Resumo dos critérios interpretativos do Ensaio Pinhole Test (Furo de Agulha)
ASTM· D 4647-(93) adaptado a NBR 14114-98 sob forma de texto

RESUMO DOS CRITÉRIOS INTERPRETATIVOS DO ENSAIO PINHOLE TEST (FURO DE AGULHA)					
Classificação	Carga (mm)	Tempo de Ensaio para uma dada em min.	Vazão do Final de uma etapa em ml/s	Coloração do Fluxo ao Final de uma Etapa	Diâmetro do furo ao final de uma etapa (Ø inicial)
D1	50	5	>1,5	Distinta	(2 x)
D2	50	10	>1,0	De distinta a leve	(2 x)
ND4	50	10	>0,8	Leve, mas facilmente visível.	(1,5 x)
ND3	180-380	5	>2,5	Leve, mas facilmente visível.	(2 x)
ND2	1020	5	>3,5	Clara ou levemente visível	(2 x)
ND1	1020	5	>5,0	Cristalina	Sem alteração visual
D1 – ARGILAS ALTAMENTE DISPERSIVAS D2 – ARGILAS DISPERSIVAS ND4 – MODERADAMENTE DISPERSIVA			ND3 – LEVEMENTE DISPERSIVA ND2 – INCIPIENTEMENTE DISPERSIVA ND1 – NÃO DISPERSIVA		

- **Análise dos Resultados**

Pelas características do solo local, predominantemente constituído de silte arenoso a areno-argiloso, portanto com caracterização física diferenciada da proposta inicial para o ensaio, e visando uma melhor avaliação quanto à susceptibilidade desses solos em se dispersarem, optou-se pela realização de ensaio com amostras de solos amolgadas e indeformadas, cujos resultados passam a ser discutidos.

a) Ensaio com Amostra Amolgada

Solo Coluvionar

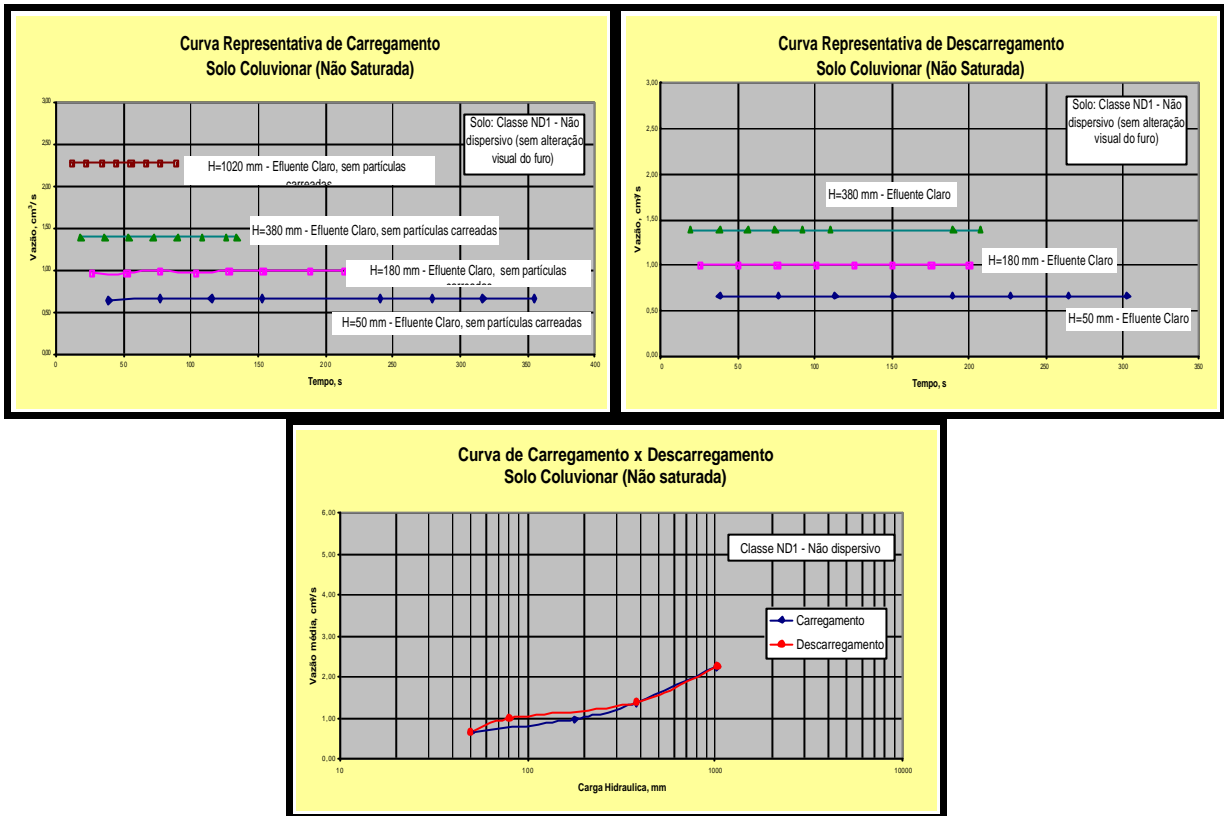


Figura 5.23 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão. (Solo Coluvionar)

Tabela 5.9 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SC)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia. Nº de camadas = 05 Grau de compactação = 95% Altura do corpo de prova = 4cm Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm (h-h_{OT}) = 3,3% h_{final} = 23,3% 	<ul style="list-style-type: none"> $\delta r = 2,717 \text{ g/cm}^3$ $h_{OT} = 19,5\%$ $g_{sm\acute{a}x} = 1,674 \text{ g/cm}^3$ $g_s = 1,590 \text{ g/cm}^3$ $h = 23,0\%$ 	
		<p>Classificação quanto a dispersibilidade</p> <p>ND1 (sem alteração visual do furo) Não dispersiva</p>

Analisando-se os dados referentes à Tabela 5.9, verifica-se que o solo ensaiado apresentou as seguintes características de moldagem:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótica $h_{OT} = 19,5\%$ para uma densidade seca dos grãos de $1,674 \text{ g/cm}^3$, ficando os valores para o teor de umidade higroscópica em 11% e para umidade inicial e final em 23%, respectivamente, sendo este último valor próximo ao limite de plasticidade deste solo, que é de 25%.

Nos gráficos da Figura 5.23, tempo e carga hidráulica versus vazão, observa-se que a carga hidráulica inicial de 50mm, atuante sobre a amostra do solo com uma razão de fluxo constante de 25ml/seg, tempo esse em função de cada estágio de carregamento, gerou uma vazão média para o efluente de 0,66 ml/seg, que nos primeiros 5 minutos apresentou coloração completamente clara, sem a presença de partículas carregadas.

Situação esta, mantida até o final da aplicação das cargas de 180mm, 380mm e 1020mm, tendo estas cargas apresentado como vazão média observada os seguintes valores, 0,98 ml/seg, 1,39 ml/seg e 2,27 ml/seg, respectivamente, com tempo total de duração para o ensaio nesta fase de 30 minutos.

Na fase de alívio de carga do ensaio até o retorno à carga inicial (50mm), o tempo de duração foi de 20 minutos, não sendo notado neste período nenhuma anormalidade quanto a vazão, mantendo-se essa nos níveis aceitáveis para cada etapa do ensaio, quais sejam: cargas de 380mm, 180mm e 50mm, com vazões médias de 1,39ml/seg, 1,00ml/seg e 0,66ml/seg, respectivamente.

Após análise e interpretação dos resultados, pode-se classificar o solo como sendo de classe (ND1), sem alteração visível do furo, portanto de

comportamento não dispersivo, conforme interpretação dos valores constantes da Tabela 5.9 e da interpretação da Figura 5.24.

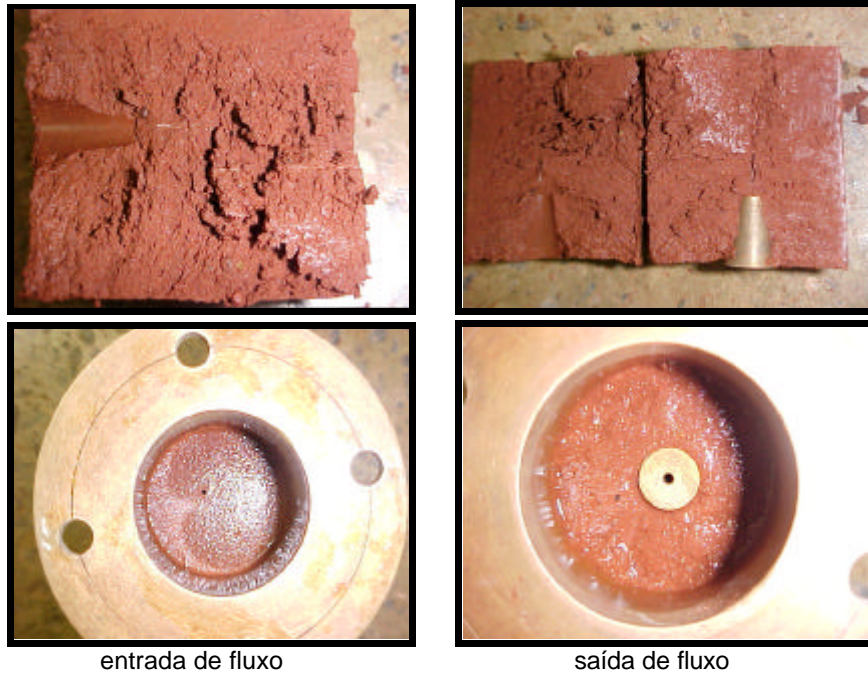


Figura 5.24 – Fotos Representativas da amostra de Solo Coluvionar após o ensaio

Solo Residual Maduro

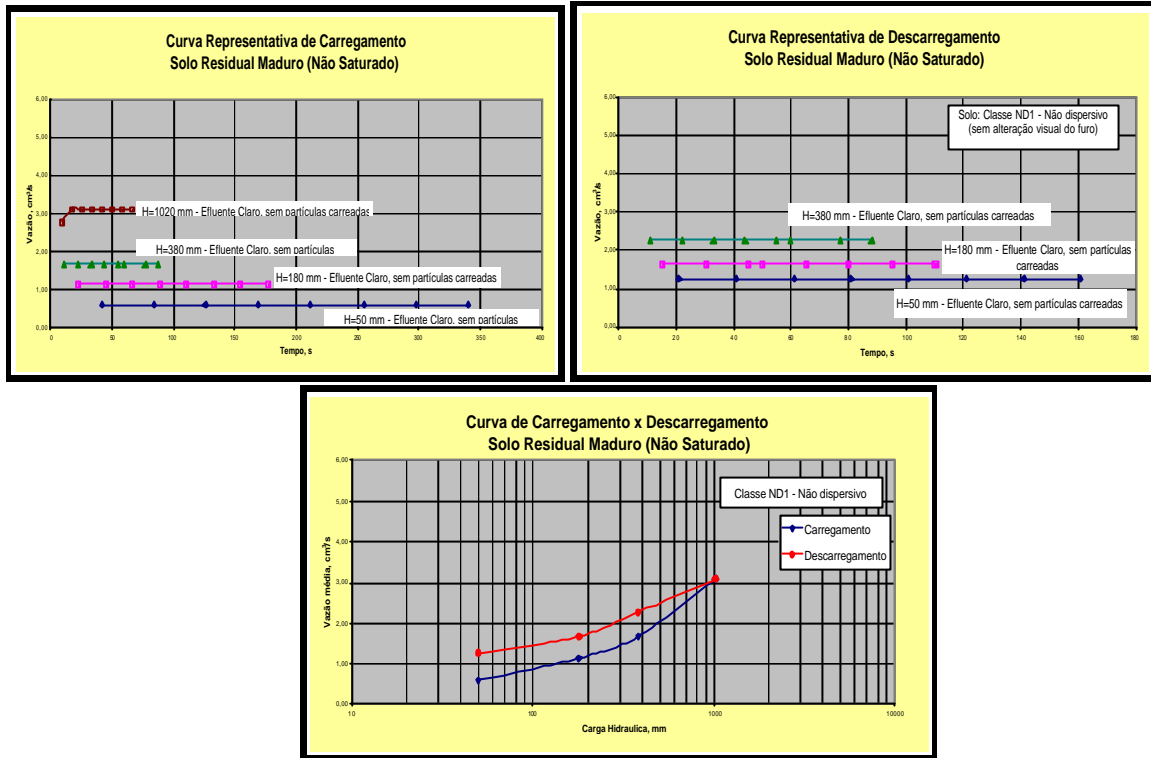
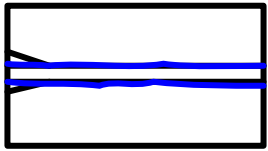


Figura 5.25 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRM)

Tabela 5.10 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRM)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> • Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia. • N° de camadas = 05 • Grau de compactação = 95% • Altura do corpo de prova = 4cm • Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm • $(h-h_{OT}) = 5,3\%$ • $h_{final} = 32,9\%$ 	$\delta_r = 2,770g/cm^3$ $h_{OT} = 21,2\%$ $g_{smáx} = 1,561g/cm^3$ $g_s = 1,483g/cm^3$ $h = 26,4\%$	 <p>Classificação quanto a dispersibilidade</p> <p>ND1 (sem alteração visual do furo) Não dispersivo</p>

Após a observação dos dados referentes à Tabela 5.10, verifica-se as seguintes características de moldagem para o solo ensaiado:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótima $h_{OT} = 21,2\%$ para uma densidade seca dos grãos de $1,561 \text{ g/cm}^3$ ficando os valores referentes ao teor de umidade higroscópica em $6,9\%$ e para umidades inicial e final em $26,4\%$ e $32,9\%$, respectivamente, estando o último valor próximo ao limite de plasticidade deste solo, que é de 35% .

Para os gráficos da Figura 5.25, tensão e carga hidráulica versus vazão, conclui-se que para carga inicial de 50mm sobre um regime de fluxo constante de 25ml/seg incidente sobre a amostra, a percolação média do efluente foi de 0,59ml/seg para os primeiros 5 minutos, onde a água observada apresentou coloração completamente clara sem a presença de partículas carregadas. Situação esta, mantida até o final da aplicação das cargas de 180mm, 380mm e 1020mm, tendo estas cargas apresentando como vazão média os seguintes valores, 1,14ml/seg, 1,67ml/seg e 3,08ml/seg, respectivamente, com tempo de duração nessa fase de 30 minutos.

Para a fase de alívio do ensaio, até o retorno a carga inicial de 50mm, o tempo de duração foi de 20 minutos, não sendo notado neste período nenhuma anormalidade quanto a vazão, mantendo-se essa nos níveis aceitáveis para cada etapa do ensaio, quais sejam: cargas de 380mm, 180mm e 50mm, com vazões médias de 0,59ml/seg, 1,14ml/seg e 1,67ml/seg, respectivamente. Desta forma, o solo pode ser classificado como (ND1), sem alteração visual do furo, portanto de comportamento não dispersivo, conforme Tabela 5.10 e Figura 5.26.

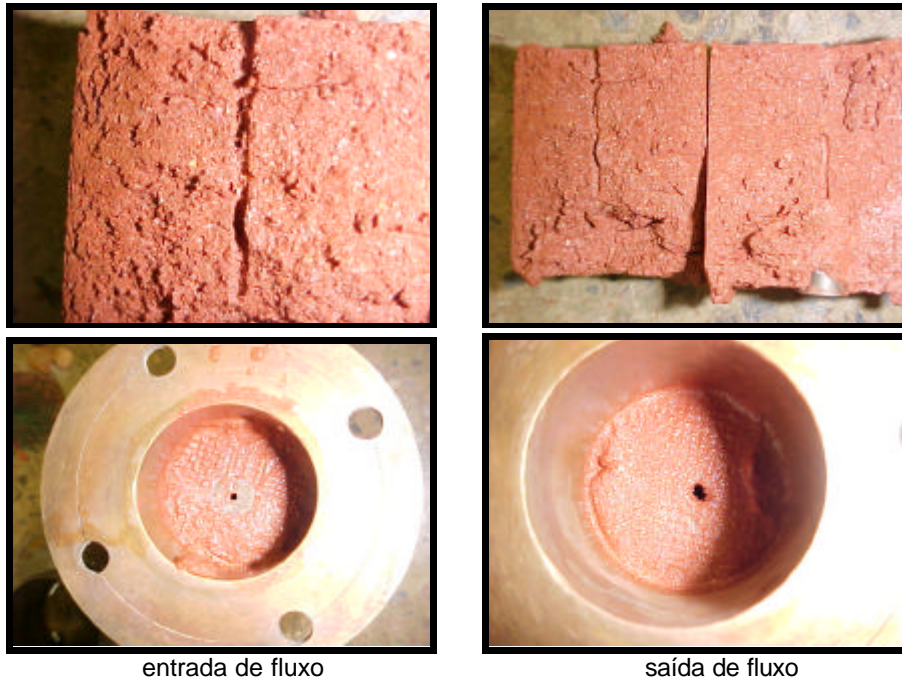


Figura 5.26 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Maduro após o ensaio

Solo Residual Jovem A

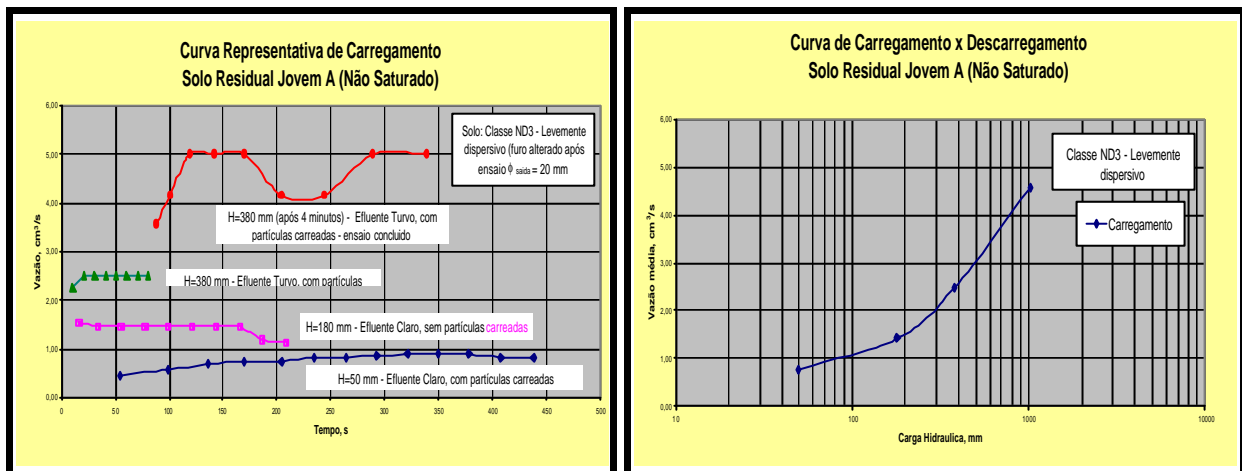
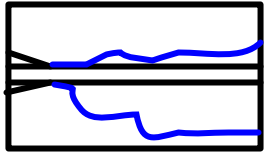


Figura 5.27 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJA)

Tabela 5.11 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRJ-A)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia Nº de camadas = 05 Grau de compactação = 95% Altura do corpo de prova = 4cm Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm $(h-h_{OT}) = 6,0\%$ $h_{final} = 35,5\%$ 	$\delta r = 2,703g/cm^3$ $h_{OT} = 21,2\%$ $g_{smáx} = 1,625g/cm^3$ $g_s = 1,544g/cm^3$ $h = 26,4\%$	
		Classificação quanto a dispersibilidade
		D1 (furo alterado após ensaio, diâmetro com ~ 20mm na saída) Altamente dispersiva

Observando-se os dados constantes da Tabela 5.11, conclui-se que as seguintes características técnicas de moldagem para o solo são as que seguem:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótima $h_{OT} = 17,8\%$ para um valor de densidade seca máxima dos grãos de $1,625 g/cm^3$ ficando, os valores referentes ao teor de umidade higroscópica em 9,2% e para umidades inicial e final em 24,1% e 35,5%, respectivamente, estando o último valor acima do limite de plasticidade do solo, que é de 25%.

Para os gráficos da Figura 5.27, tempo e carga hidráulica versus vazão, conclui-se que para carga inicial de 50mm sobre um regime de fluxo constante de 25ml/seg, incidente sobre a amostra, a percolação média do efluente foi de 0,73ml/seg para os primeiros 5 minutos, onde a água observada apresentou nos primeiros 90 segundos, uma pequena a média variação de coloração com poucas partículas carregadas, mantendo-se a partir deste ponto, até a etapa final deste estágio, em condições de coloração completamente clara sem ter sido observado carregamento de partículas, permanecendo nesta condição até o final da carga hidráulica de 180mm, que apresentou vazão média de 1,22ml/seg.

Para a carga hidráulica de 380mm, com vazão média de 2,47ml/seg, após aproximadamente 4 minutos do início deste estágio, a água começou a sair turva, com poucas partículas carregadas. Dessa forma, optou-se por manter a mesma carga aplicada, onde se puderam observar as mesmas condições ocorridas no estágio anterior, sendo que após decorridos aproximadamente 5 minutos, a vazão média aumentou para 4,56 ml/seg sinalizando um aumento do diâmetro do furo da amostra, dando-se o ensaio como concluído.

Sendo assim, classifica-se o solo como sendo altamente dispersivo (D1), com alteração visual no diâmetro de saída do furo de 20mm, o que corresponde a aproximadamente duas vezes o diâmetro inicial do furo da amostra conforme croqui do ensaio constante da Tabela 5.11 confirmado pela visualização da Figura 5.28.

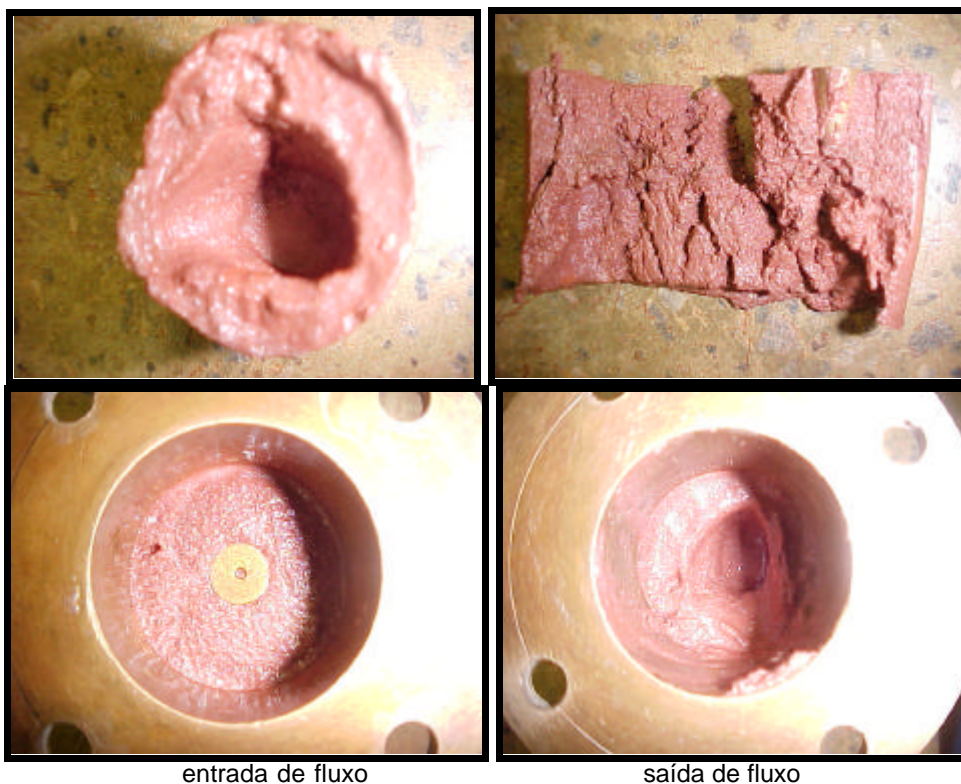


Figura 5.28 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Jovem A após o ensaio

Solo Residual Jovem B

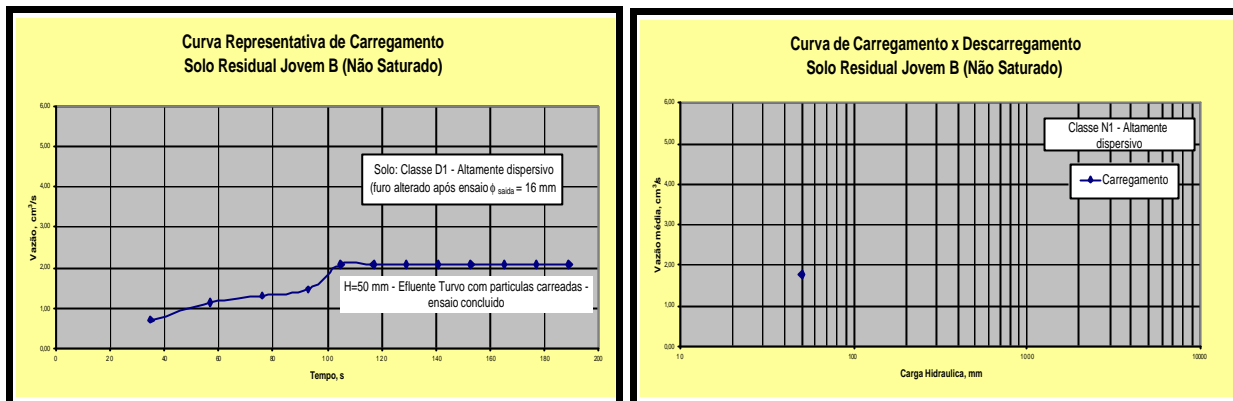
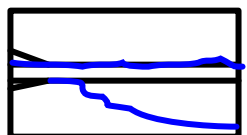


Figura 5.29 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJ-B)

Tabela 5.12 – Condições de moldagem do Corpo de Prova para o ensaio (SRJ-B)

Condições de Moldagem do corpo de prova	Índice físico inicial	Croqui do corpo de prova
<ul style="list-style-type: none"> Corpo de Prova: compactado, sem secagem prévia. Nº de camadas = 05 Grau de compactação = 95% Altura do corpo de prova = 4cm Diâmetro do corpo de prova = 3,71cm $(h-h_{OT}) = 4,0\%$ $h_{final} = 34,6\%$ 	$\bar{\alpha} = 2,715g/cm^3$ $h_{OT} = 16,5\%$ $g_{s\max} = 1,717g/cm^3$ $g_s = 1,631g/cm^3$ $h = 20,6\%$	
		Classificação quanto a dispersibilidade D1 (furo alterado após ensaio, diâmetro com ~ 16mm na saída) Altamente dispersivo

Para a amostra analisada, foram obtidas as seguintes características de moldagem do solo, constantes da Tabela 5.12:

- grau de compactação igual a 95%, em relação ao Proctor Normal;
- umidade ótima $h_{OT} = 16,5\%$ para um valor de densidade seca dos grãos de $1,631g/cm^3$ ficando os valores referentes ao teor de umidade higroscópica em 5,12% e para umidades inicial e final em 20,6% e 34,6%, respectivamente, estando o último valor acima do limite de plasticidade do solo, que é de 25%.

Para os gráficos da Figura 5.29, tempo e carga hidráulica versus vazão, conclui-se que para carga inicial de 50mm sobre um regime de fluxo constante

de 25ml/seg incidente sobre a amostra, a percolação do efluente subiu no primeiro minuto de 0,71ml/seg para 2,08ml/seg, onde a água apresentou coloração escura com poucas partículas carregadas, permanecendo assim com o tempo, o que caracteriza que a amostra foi erodida, notando-se assim, a presença de argila dispersiva na composição desse solo.

Neste caso, deu-se prosseguimento ao ensaio até atingir o período de 10 minutos, sendo mantida as condições iniciais do ensaio ao fim deste tempo, o que por imposição da norma deu-se o ensaio como concluído. Dessa forma, classifica-se este solo como altamente dispersivo (D1), ficando o furo da amostra de solo após o ensaio, com diâmetro de saída de aproximadamente 16mm, ou seja, o que corresponde à aproximadamente duas vezes o diâmetro inicial do furo da amostra, conforme representação esquemática e fotográfica constantes da Tabela 5.12 e Figura 5.30.

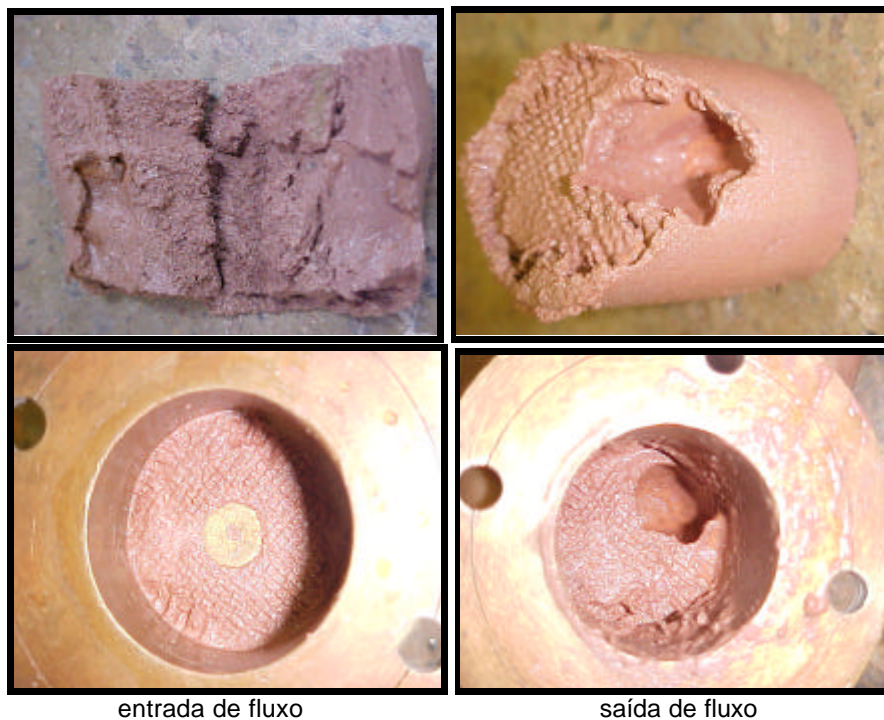


Figura 5.30 – Fotos Representativas da amostra de Solo Residual Jovem B após o ensaio

b) Ensaio com Amostra Natural

Neste ensaio, utilizou-se a mesma metodologia para amostra amolgada, com diferença somente quanto às condições de moldagem do corpo de prova.

A seguir, procedeu-se aos ensaios, cujos resultados foram analisados em função dos gráficos apresentados e comparados com os valores obtidos pelo ensaio com amostra compactada, a fim de se definir qual dos dois métodos melhor se aplica ao solo estudado.

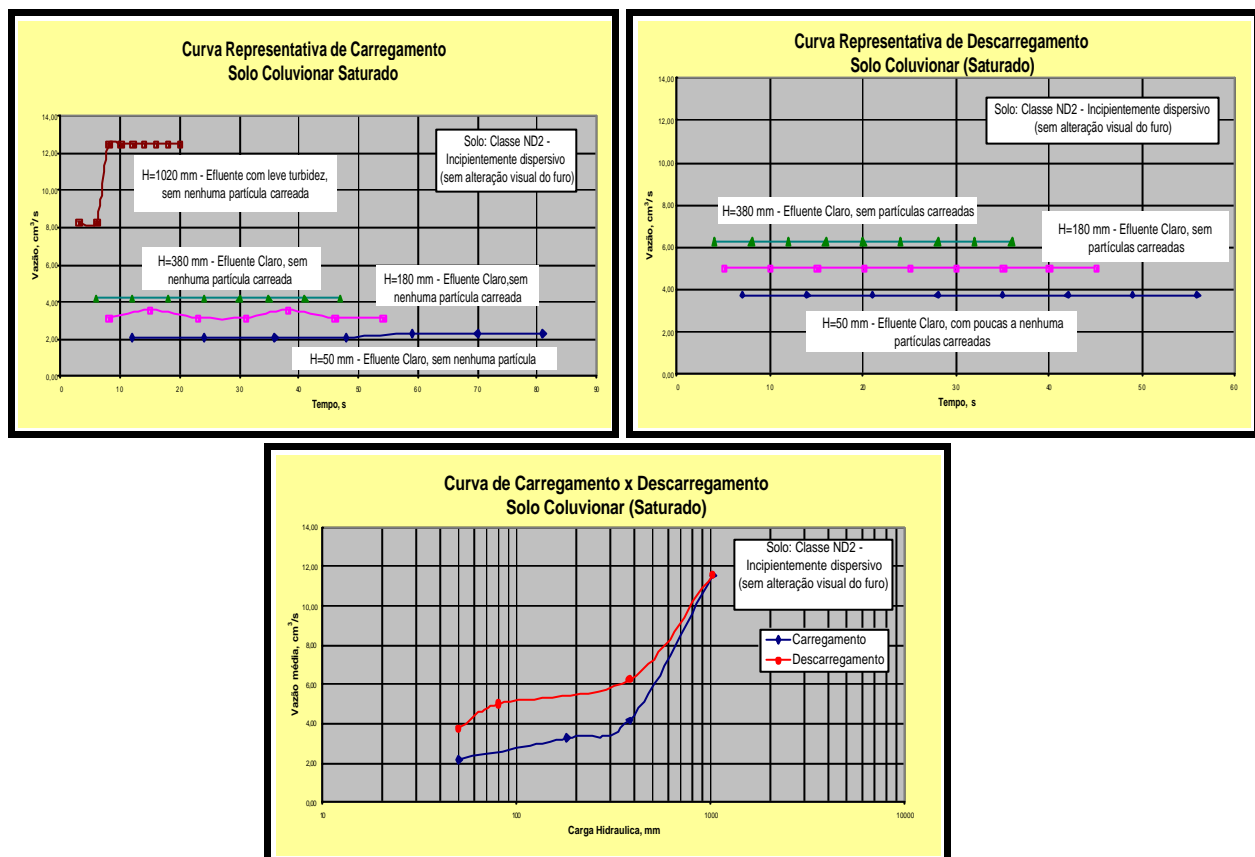


Figura 5.31 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SC)

Dos gráficos acima, obteve-se as vazões médias de 2,16 cm³/seg, 3,26 cm³/seg, 4,17 cm³/seg e 11,57 cm³/seg, para cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e 1020mm, respectivamente. O que corresponde, em média, a

cerca de três vezes dos valores das vazões sob influência das cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e cinco vezes para a carga hidráulica de 1020mm, para o mesmo solo no estado compactado.

Já para a fase de descarregamento, os valores obtidos para as vazões foram de 1,39 cm³/seg, 1,0 cm³/seg e 0,66 cm³/seg, para as cargas hidráulicas de 380mm, 180mm e 50mm, respectivamente. O que representa em média cinco vezes dos valores das vazões submetidas às mesmas condições de carregamento hidráulico no ensaio, com amostra compactada.

Solo Residual Maduro

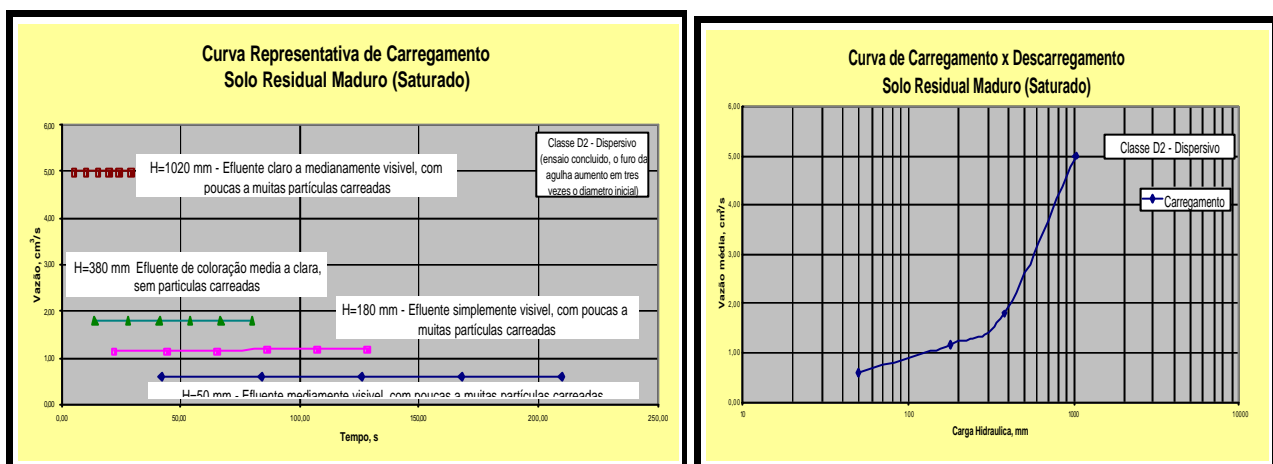


Figura 5.32 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRM)

Para esse solo, foram encontrados na fase de carregamento vazões médias de 0,60 cm³/seg, 1,79 cm³/seg e 5,0 cm³/seg, decorrentes das cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e 1020mm, respectivamente, sendo o ensaio dado como concluído nesta fase, em razão do diâmetro final do furo da agulha na amostra ter ficado duas vezes maior do que o seu diâmetro inicial.

Já para o solo compactado, submetido às mesmas condições de carregamento, não foram observadas alterações na amostra durante as fases

desse ensaio. Além disso, pôde-se observar que este solo foi o que apresentou maior grau de alterabilidade nos ensaios de erodibilidade a que foi submetido. Portanto, optou-se pelo resultado apresentado por este método, em função de ser o que melhor representa as condições de dispersibilidade apresentadas por este solo.

Solo Residual Jovem A

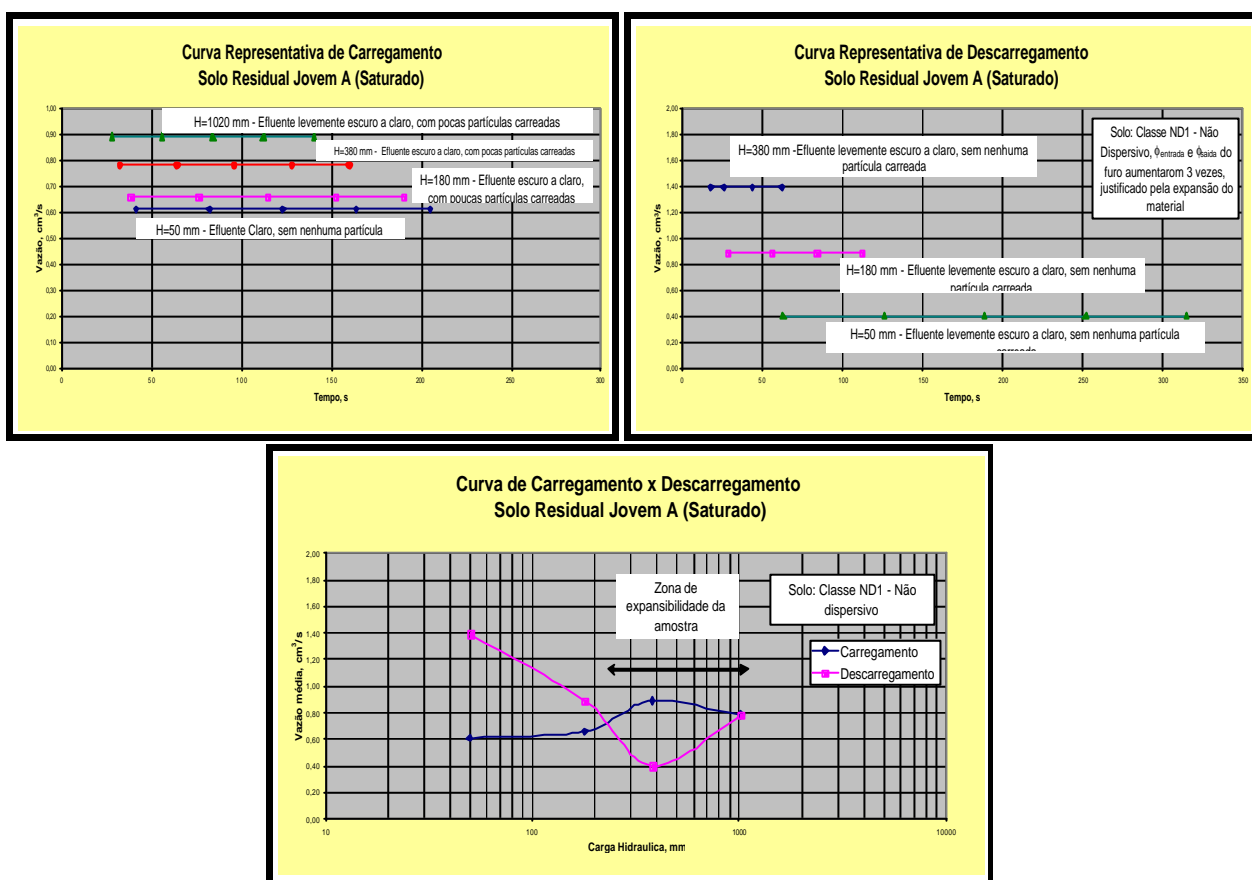


Figura 5.33 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJA)

As vazões obtidas nos gráficos acima são de $0,61 \text{ cm}^3/\text{seg}$, $0,89 \text{ cm}^3/\text{seg}$ e $0,78 \text{ cm}^3/\text{seg}$, para cargas hidráulicas de 50mm, 180mm, 380mm e 1020mm, respectivamente. Obtendo-se na fase de descarregamento vazões médias de $0,40 \text{ cm}^3/\text{seg}$, $0,89 \text{ cm}^3/\text{seg}$ e $1,39 \text{ cm}^3/\text{seg}$, para cargas hidráulicas decrescentes de 380mm, 180mm e 50mm. O que classifica esse solo como não dispersivo,

contrariando o resultado encontrado para o mesmo ensaio, com solo compactado, que apresentou uma vazão média (6x) superior a vazão encontrada para o último estágio de carregamento hidráulico (1020mm), onde o ensaio foi concluído.

Pelas evidências apresentadas nos ensaios correlatos a erodibilidade desse solo, este método é o que melhor representa as condições de dispersibilidade do solo, mostrando inclusive no gráfico carga hidráulica versus vazão, uma zona de expansibilidade desse solo.

Solo Residual Jovem B

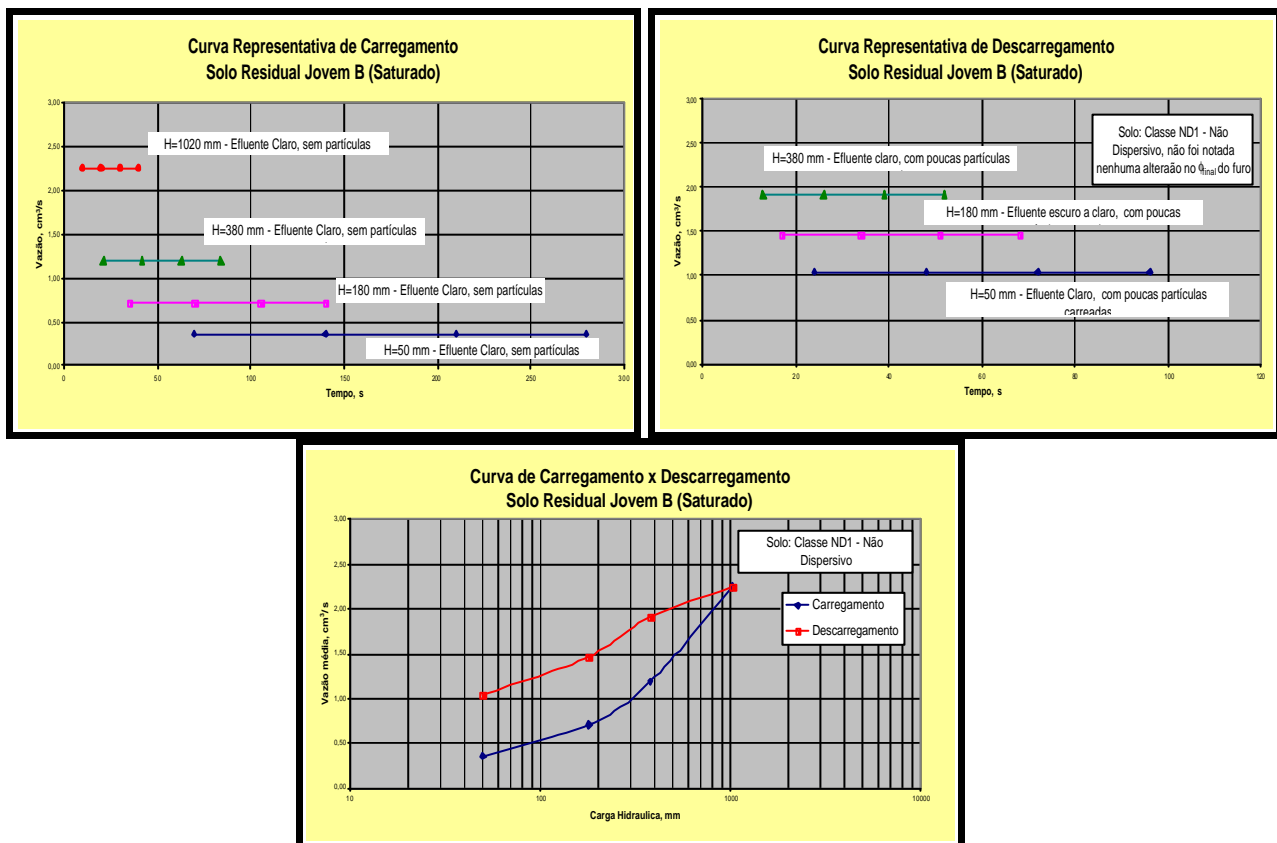


Figura 5.34 – Resultados do Ensaio, tempo e carga hidráulica em função da vazão (SRJB)

Foram obtidas neste ensaio, vazões médias de $0,36 \text{ cm}^3/\text{seg}$, $0,75 \text{ cm}^3/\text{seg}$, $1,19 \text{ cm}^3/\text{seg}$ e $2,25 \text{ cm}^3/\text{seg}$, para cargas hidráulicas de 50mm, 180mm,

380mm a 1020mm, respectivamente. Ficando os valores médios de vazões, na fase de descarregamento, em 1,92 cm³/seg, 1,47 cm³/seg e 1,04 cm³/seg, para cargas de 380mm, 180mm e 50mm, respectivamente.

Uma comparação desses resultados com os do solo compactado, mostra uma grande diferença entre os dois métodos, principalmente por ter o primeiro atingindo somente a primeira fase, onde o ensaio foi dado como concluído.

As comparações dos resultados entre as duas metodologias para os ensaios a que este solo foi submetido mostram ser este o método que melhor resultado apresenta para caracterização deste solo com relação a dispersibilidade.

Um comentário geral sobre os resultados obtidos entre os dois métodos utilizados neste ensaio, é apresentado no capítulo seis desta dissertação.

5.4.4. Ensaios de *Inderbitzen*

Para um melhor entendimento e quantificação do grau de erodibilidade ocorrido nos quatro tipos de solos estudados, foram moldados corpos de provas referentes aos solos, que receberam as seguintes classificações, a saber: Solo Coluvionar (SC), Solo Residual Maduro (SRM), Solo Residual Jovem-A (SRJ-A) e Solo Residual Jovem-B (SRJ-B), cujas profundidades e caracterização constam da Tabela 5.1, e as perdas totais de solos são representadas pelos gráficos e tabelas descritos na análise dos resultados a seguir.

- **Metodologia**

Originalmente este ensaio foi proposto por Inderbitzen (1961), que consiste em simular um escoamento superficial de água sobre a superfície transversal de um corpo de prova, sujeito a uma dada vazão imposta, umidade da amostra e inclinação da rampa, qualificando-se dessa forma a perda de solo

em função de um tempo pré-determinado. Para tanto, utiliza-se uma rampa com um furo circular central, no qual coloca-se a amostra de solo com a sua superfície nivelada com o topo do plano da rampa, concebida de forma a sofrer variações angulares, sendo o material carregado pelo fluxo e coletado por um conjunto de peneiras colocadas na base da rampa (Figura 5.35).



Figura 5.35 – Ensaio de Inderbitzen em andamento

No Brasil, Rego (1978) foi precursor na introdução do ensaio de Inderbitzen, para o estudo de erosões superficiais de taludes em solos residuais de gnaiss no estado do Rio de Janeiro, definindo o potencial de erodibilidade, a partir da perda de solo, como sendo dada pelo peso do solo acumulado, coletado nos respectivos tempos, dividido pela área da amostra de solo. Ferreira (1981) *apud* Fácio (1991), “o ensaio de Inderbitzen tem por finalidade medir a erosão de uma amostra de solo indeformadas ou compactada sob diversas condições de vazão, inclinação do topo da amostra e umidade”.

Fácio (1991), estudando solos do Distrito Federal procurou estabelecer uma metodologia padrão para este ensaio, buscando uma melhor maneira na “determinação da vazão, do tempo e da rampa ideal de trabalho”. A partir de

uma série de ensaios com avaliação de valores de vazão, declividade da rampa e tempo de duração, o autor propôs uma rampa com 0,33 metros de largura por 1,30 metros de comprimento e declividade de 10°, sobre a qual fez percolar um fluxo de água com uma vazão pré-estabelecida de 50 ml/s, atuando sobre a seção transversal de uma amostra de solo indeformada, com 100 mm de diâmetro, sendo esta nivelada com a superfície da rampa, após ter sido submetida ao tempo de embebedimento de 15 minutos, que visa anular eventuais forças de sucção presentes nesta no seu estado natural, sendo o tempo de duração do ensaio estabelecido em 20 minutos.

O solo erodido pelo fluxo superficial foi retido nas peneiras de nºs. (# 50), (# 100) e (# 200), sendo o conjunto lavado e o solo recolhido em beakers, para serem secos em uma estufa a uma temperatura de 110°C e depois pesados, repetindo-se essa operação a cada troca de peneiras. O autor propôs ainda, que os resultados obtidos fossem apresentados sobre a forma de gráficos de perda acumulada de solo expressa em (g/cm²) em função do tempo de duração (em minutos), facilitando deste modo uma análise comparativa dos resultados encontrados.

Santos (1997), descreve que “visando melhorar a qualidade dos resultados obtidos foram feitas algumas modificações no aparelho utilizado por Fácio (1991)”. Sendo assim, o autor prossegue descrevendo que a rampa sobre a qual insidi o fluxo d’água teve sua largura reduzida para 100 mm, assegurando que todo fluxo d’água gerado fluísse unicamente sobre a amostra e não ao seu lado, como às vezes ocorria (Figura 5.35), diminuindo dessa forma a vazão para 17,5 ml/seg sem, contudo alterar as condições de ensaio proposta por Fácio (1991). Com as modificações sugeridas, o tempo de duração do ensaio passou de 20 para 30 minutos, resultando uma melhor caracterização do comportamento entre a curva de perda de solo com o tempo de duração previsto para o ensaio.

Com relação à apresentação dos resultados, os autores mantêm a proposta inicial, com os valores de perda de solo sendo medidas em g/cm^2 e o tempo em minutos. Quanto à avaliação da erodibilidade deste ensaio, os autores consideram os resultados bastante representativos com as observações da ocorrência desses fenômenos no campo e verificam também uma boa correlação entre os seus resultados com os ensaios de desagregação dos solos.

- **Análise dos Resultados**

Para os ensaios realizados, foram utilizadas as condições propostas por Santos (1997), com exceção da vazão, que para o ensaio foi mantida a proposta por Fácio (1991), 50ml/s, que visa melhorar a qualidade dos resultados a serem obtidos. O material carregado pelo fluxo superficial foi coletado em peneiras com aberturas de 0,297 mm (# 50), 0,149 mm (# 100) e 0,0074 mm (# 200), com intervalos de tempo pré-fixados a cada 5 minutos na parte inicial de cada ensaio, passando por mais três estágios consecutivos de 10 minutos cada, até atingir o tempo máximo de duração de 30 minutos, estabelecido para cada ensaio.

Os resultados obtidos foram plotados em gráficos sobre a forma de curvas de perda de solos, cujos valores são expressos em (g/cm^2) com o tempo medido em segundos. Nota-se nos gráficos apresentados, que a maior quantidade de perda de solo ocorre nos 5 minutos iniciais de cada ensaio, onde as curvas apresentam-se de forma mais acentuada, tendo sido esta tendência observada também por Fonseca e Ferreira (1981), ao realizarem ensaios do mesmo tipo.

Para uma melhor visualização e entendimento desse ensaio, passase a análise dos resultados de acordo com os gráficos e tabelas originados, levando-se em conta a ordem crescente dos valores de perda de solo em função do

tempo previsto para cada ensaio. De forma complementar ao estudo de perda de solo, acrescentou-se uma capa de solo superficial laterítico com aproximadamente 10 centímetros de espessura, que ocorre praticamente em toda região estudada sobre a camada de solo desprovida de vegetação.

A seguir, para um melhor entendimento deste ensaio, apresenta-se sobre forma de gráfico a quantidade de perda total de solo acumulada de amostras indeformadas, cujos resultados obtidos constam em tabelas anexas, os quais passa-se a comentar (Figura 5.36).

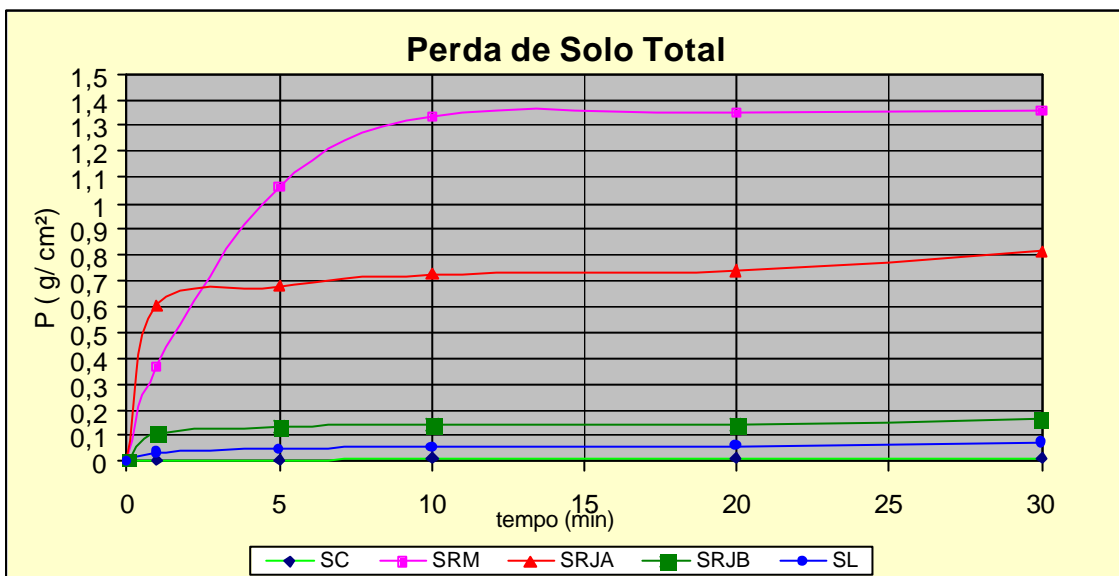


Figura 5.36 – Resultado da perda de solo total das amostras

Para exemplificar, uma primeira análise é feita sobre o comportamento das curvas que representam a perda do solo Coluvionar em função do tempo previsto para esse ensaio, conforme Tabela 5.13, que deu origem ao gráfico constante da Figura 5.37.

Tabela 5.13 – Quadro resumo da quantidade de perda do Solo Coluvionar

PENEIRAS # 50	Material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	0,19	0,19	0,002419155
5 min	0,09	0,28	0,003565071
10 min	0,08	0,36	0,004583662
20 min	0,04	0,4	0,005092958
30 min	0,02	0,42	0,005347606
# 100	Material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	0,17	0,17	0,002164507
5 min	0,05	0,22	0,002801127
10 min	0,03	0,25	0,003183099
20 min	0,02	0,27	0,003437747
30 min	0,01	0,28	0,003565071
# 200	Material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	0,11	0,11	0,001400563
5 min	0,04	0,15	0,001909859
10 min	0,06	0,21	0,002673803
20 min	0,02	0,23	0,002928451
30 min	0,01	0,24	0,003055775
TEMPO	Total acumulado/ área (g/cm²)		
0 min	0		
1 min	0,005984226		
5 min	0,008276057		
10 min	0,010440564		
20 min	0,011459156		
30 min	0,011968452		

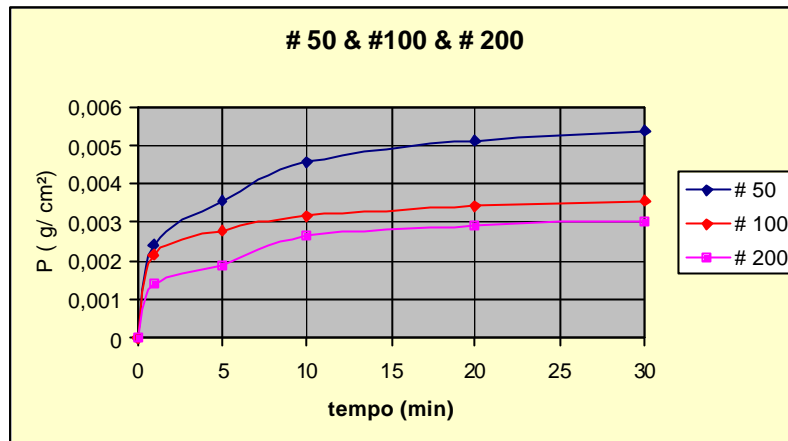


Figura 5.37 – Resultado da perda de Solo Coluvionar

Analisando-se o comportamento não linear das curvas representadas pelo gráfico acima (Figura 5.37), verifica-se que a quantidade de material erodido sob uma vazão constante estabelecida em 50 ml/s, incidente sobre a seção transversal de um corpo de prova com 100 mm de diâmetro e área de $78,54 \text{ cm}^2$, colocado em um furo central e nivelado com a superfície de uma rampa sujeita a uma inclinação de $\alpha = 10^\circ$ (Figura 5.33), ocorre com maior frequência nos primeiros 5 minutos iniciais deste ensaio, que apresenta um valor total de material erodido acumulado de $(0,008276057 \text{ g/cm}^2)$ representado pelos gráficos acima, que após esse tempo passam a ter um comportamento com tendência de crescimento constante, porém de forma contínua e acentuada, até o término de cada ensaio, com tempo previsto de 30 minutos, cuja perda de solo total é de $(0,011968452 \text{ g/cm}^2)$.

Para uma capa do solo laterítico com ocorrência sobre o solo coluvionar, adotou-se o mesmo procedimento de forma a aferir a resistência desse solo quanto a processos erosivos, conforme representado a seguir.

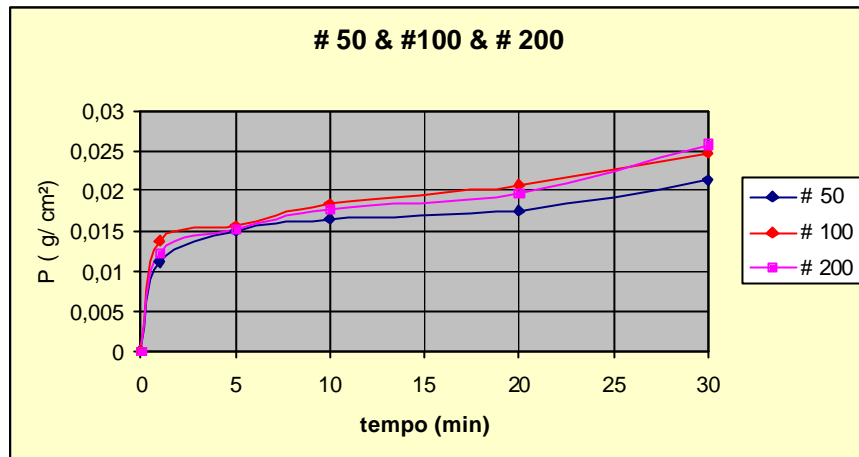


Figura 5.38 – Resultado da perda de Solo Laterítico

Observa-se no gráfico acima, uma rápida perda de solos nos 5 minutos iniciais deste ensaio, onde as curvas apresentam-se de certa forma bem homogêneas e com uma inclinação bastante acentuada, apresentando uma perda de solo total de (0,045963948 g/cm²), após o que, essas curvas tendem a se comportarem de uma forma mais harmônica até a conclusão deste ensaio, no tempo pré-estabelecido de 30 minutos, apresentando ao fim deste tempo uma perda total de solo de (0,07181071g/cm²), ficando este valor acima da perda total de solo atribuída ao solo coluvionar, para o mesmo período de tempo.

Seguindo-se uma cronologia dos solos estudados, passa-se a analisar as condições do solo Residual Jovem-B, terceiro na ordem de classificação de perda de solo, conforme o resultado apresentado no gráfico a seguir (Figura 5.39).

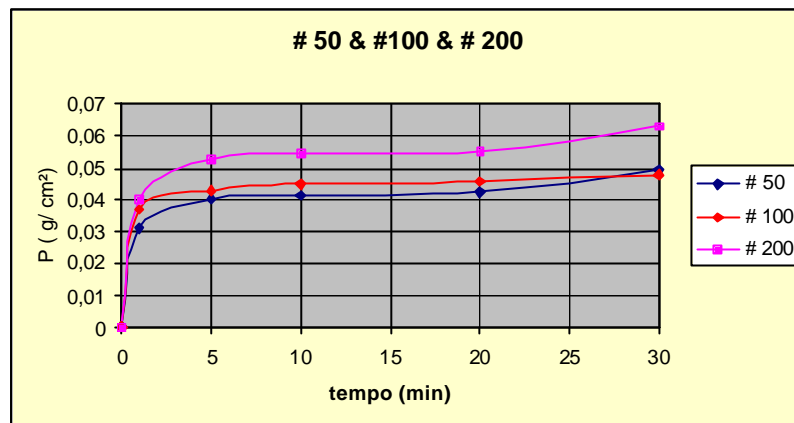


Figura 5.39 – Resultado de perda de solo (SRJ-B)

Analisando-se o gráfico acima, observa-se mais uma vez uma rápida perda de solo durante os cinco primeiros minutos iniciais do ensaio, onde as curvas apresentam uma inclinação fortemente acentuada, com perda de solo total de $(0,136363955\text{g/cm}^2)$, ficando este valor bem acima do atribuído ao solo coluvionar que é de $(0,008276057\text{g/cm}^2)$, para o mesmo tempo de ensaio, após o que, observar-se um comportamento crescente e harmônico com tendência a estabilização para a maioria das curvas, com exceção para a curva que representa o material retido na primeira # 200, que se distancia das demais curvas, devido à constatação de uma maior ocorrência da erodibilidade do solo nesta fase do ensaio. Sendo apresentando como perda total de solo, ao final dos 30 minutos, o valor de $(0,160173535\text{g/cm}^2)$.

Quanto ao solo Residual Jovem-A, situado no terço médio da erosão estudada, foi classificado como sendo o quarto na ordem crescente de erodibilidade para os solos submetidos a este tipo de ensaio. Dessa forma, foram plotadas as curvas representativas de perda de solo (em g/cm^2) em função do tempo (em minutos) previsto para realização desse ensaio, conforme gráfico constante da Figura 5.40.

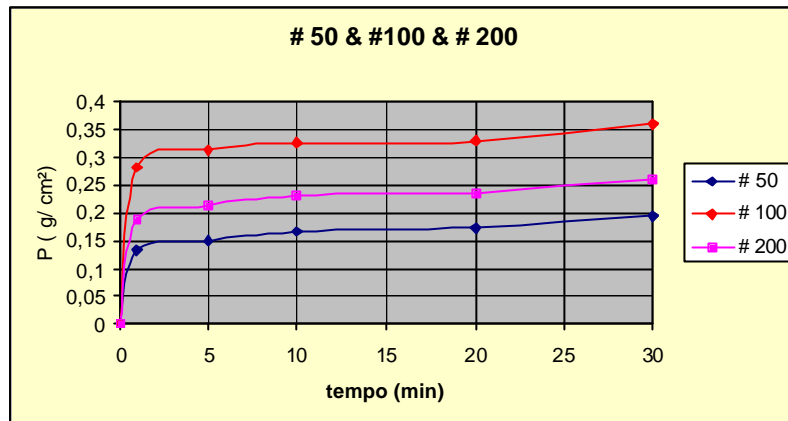


Figura 5.40 – Resultado da perda de solo (SRJ-A)

Observando-se o gráfico acima, nota-se uma tendência elevada de perda de solo no primeiro quarto de minuto, após o que essas curvas tendem a se separar de modo a apresentar, nos 5 minutos iniciais do ensaio, uma maior perda de solo total correspondente a $(0,678636677\text{g/cm}^2)$, em relação ao Solo Coluvionar e Residual Jovem-B, para o mesmo tempo de ensaio, cabendo a este uma maior quantidade de perda de solo total, na peneira # 100. Ficando a perda de solo total ao final do ensaio com o valor de $(0,814873309\text{g/cm}^2)$.

Por último passa-se a analisar o comportamento do solo Residual Maduro, que comprova ser este solo o de maior susceptibilidade a sofrer processos erosivos, dentre os solos analisados nesse ensaio. Para tanto, foram plotadas as curvas de perda de solo (em g/cm^2) em função do tempo (em minutos) previsto para a sua realização, de acordo com o gráfico e as respectivas curvas de perda de solo constantes da Figura 5.41.

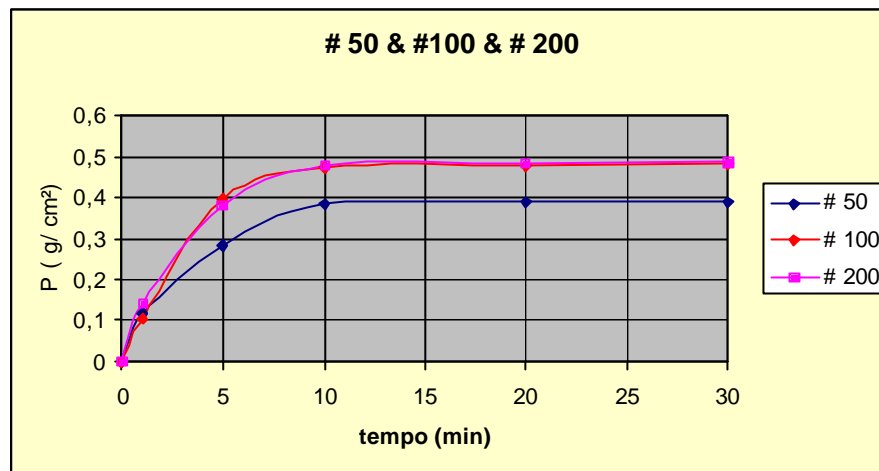


Figura 5.41 – Resultado da perda de solo (SRM)

A análise das curvas de perda de solo, em função do tempo, revela também, para o gráfico da Figura 5.41, uma tendência acelerada de perda de solo nos primeiros 5 minutos iniciais ficando este valor na ordem de $(1,063536992\text{g/cm}^2)$ bem acima dos demais solos até aqui estudados, para o mesmo tempo de ensaio. Nota-se uma maior quantidade de solo erodido acumulado na peneira # 200, ou seja, $0,487396098\text{g/cm}^2$ para o tempo de 30 minutos. Sendo que ao final do ensaio a perda de solo total acumulada, ficou em $(1,358546\text{g/cm}^2)$, bem acima dos resultados apresentados para os demais solos.

5.5. Ensaios Especiais

5.5.1. Análise Química do Solo e da Água Intersticial

Para análise, além dos solos estudados, optou-se por incluir uma camada de solo superficial laterítico, desprovida de cobertura vegetal, sujeita à elevada concentração e distribuição de fluxo de água, durante os períodos de precipitações pluviométricas, resultando num processo de dinâmica erosiva diferencial, denominou-se de solo erodido e não erodido, localizada ao longo das erosões, destacando-se uma área próxima à cabeceira da erosão estudada.

Dessa forma, foram realizadas análises químicas do solo e da água, cujos resultados e comentários constam a seguir.

Tabela 5.14 – Caracterização Química do Solo

Horizonte	pH (1:2,5)		Complexo Sortivo (cmol _c /kg)						
	H ₂ O	KCL 1N	Ca ²⁺ Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (S)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T (S)
SC	5,5	5,3	0,7	0,03	0,00	0,73	0,6	0,9	1,93
SRM	4,5	4,2	0,7	0,03	0,01	0,74	0,9	0,4	1,64
SRJ-A	5,3	4,3	0,4	0,03	0,01	0,43	1,3	1,3	3,34
SRJ-B	5,4	4,3	0,3	0,03	0,01	0,34	0,0	1,5	1,73
SNE	4,9	5,5	0,2	0,02	0,01	0,23	1,4	1,2	3,23
SE	5,3	4,3	0,6	0,03	0,00	0,63	0,0	2,0	2,73

SE – solo erodido; SNE – solo não erodido; S – soma das bases; (T = S + Al³⁺ + H⁺)

Horizonte	Ataque sulfúrico (g/kg) H ₂ SO ₄ (1:1) – NaOH (0,8%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K _i	K _r
SC	106	189	88	18,2	0,95	0,73
SRM	174	182	61	7,8	1,63	1,34
SRJ-A	139	134	54	5,0	1,76	1,04
SRJ-B	126	114	30	3,7	1,88	1,61
SNE	96	214	124	22,4	0,76	0,56
SE	186	180	85	12,3	1,76	1,35

SE – solo erodido; SNE – solo não erodido

K_i = SiO₂. 1,70/Al₂O₃; K_r = (SiO₂/0,60)/(Al₂O₃/1,02) + (Fe₂O₃/1,60)

Tabela 5.15 – Análise Química da Água

Cátions		Características	
Potássio	1,03 mg/L	pH	5,5
Sódio	1,60 mg/L	Temperatura da água	21 graus
Magnésio	0,08 mg/L	Condutividade Elétrica	14,7 uS/cm
Cálcio	0,66 mg/L	Resistividade	0,07

As análises químicas das seis amostras de solos estudadas foram realizadas no laboratório de química do CNPS da EMBRAPA⁷-RJ. A metodologia adotada visa somente caracterizar a fração coloidal do solo,

⁷ Centro Nacional de Pesquisa de solos da Empresa Brasileira de Pesquisas Agrárias.

abrangendo argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, além de materiais amorfos.

Os resultados obtidos constam da Tabela 5.14, onde são apresentados os teores de cátions, SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 e pH em H_2O e KCL e os valores de S (soma de bases), T (troca iônica), K_i e K_r (relação molecular).

Os valores de cátions e, portanto de S, são muito baixo, mostrando tratar-se de solos muito lixiviados, ácidos, etc., como mostram os valores de pH nas tabelas 5.14 e 5.15.

Os baixos valores de T, são típicos de solos de baixa atividade com relação a retenção de cátions, o que está coerente com os valores de K_i e K_r .

Para o solo não erodido e coluvionar, os valores de K_i mostram que as respectivas frações argila são representadas por argilominerais, óxidos e hidróxidos de (Fe) e (Al) sendo essa uma característica comum dos solos lateríticos.

De acordo com a Tabela 5.15, a água coletada no interior da erosão estudada, apresenta valor de acidez e/ou alcalinidade, compatível com a água intersticial do solo. Todavia, a água com pH de 5,5 não é extremamente ácida, porém é suficiente para acelerar o processo de erosão em solos com as características químicas do estudado, principalmente aqueles que apresentam uma maior concentração em óxido de ferro (Fe_2O_3).

Com relação à condutividade elétrica da água, quanto maior ela for, menor será a sua resistividade e maior é a quantidade de íons em suspensão, sais em solução, tais como os a base de sódio, cálcio, potássio, dentre outros, presentes no solo estudado.

5.5.2. Caracterização Mineralógica (Difração de Raios-X)

O tipo de argilomineral constituinte de um solo, principalmente, tropical, é um dos principais fatores de influência quanto a uma maior ou menor susceptibilidade desse a sofrer processo erosivo. Mitchell (1993) descreve que essa ocorrência é um controlador do tamanho, forma e características superficiais da partícula de um solo e que juntos, estes atributos, determinam, entre outros, a plasticidade, expansibilidade e a resistência do solo.

Segundo Morgan (1986), a illita e esmectita apresentam maior expansibilidade e contração que a caulinita, conferindo dessa forma, uma menor estabilidade aos seus agregados do que os formados por este último argilomineral. O mesmo autor descreve ainda que: a estabilidade dos agregados determina a resistência dos solos.

- **Metodologia**

Mitchell (1993) observa que a análise quantitativa dos minerais com evidências nos picos dos difratogramas de raios-X gera incertezas devido a diferença no coeficiente de absorção, orientação das partículas, textura da superfície da amostra, cristalinidade dos minerais e hidratação, entre outros fatores.

Para o ensaio, a simples identificação dos argilominerais predominantes nas gêneses dos solos já é satisfatória para indicar uma possível tendência de diferença entre o comportamento desses solos. Em decorrência, a análise realizada para o ensaio foi apenas qualitativa.

Em decorrência, o ensaio de análise mineralógica por difratometria de raios-X, foi executado pelo método do pó, sem tratamento das amostras, de modo a submetê-las na forma pulverizada a um feixe de raios-X, que se difrata

ao atingir a sua superfície plana. Sendo este captado por um defletor que se movimenta a uma velocidade constante num arco de circuito centrado ao redor da amostra.

Os procedimentos adotados para caracterização das amostras dos solos Coluvionar (SC), Residual Maduro (SRM), Residual Jovem A (SRJA), Residual Jovem B (SRJB) e de uma camada de solo laterítico e desprovida de cobertura vegetal ao longo das erosões, sendo esta atingida por erosão diferencial caracterizada por uma parte de solo erodido -SE e solo não erodido-SNE, as quais se restringiram apenas às frações passadas nas peneiras #200 (0,074mm) e #400 (0,037mm).

Torna-se importante mencionar a caracterização da camada de solo não erodida e erodida, em razão das características peculiar inerentes a estes, tais como: ausência de camada vegetal e a sua extensão ao longo das erosões, os quais servem como grandes áreas de contribuição de água de chuva para o avanço do dinamismo dos processos erosivos.

- **Análise dos Resultados**

As análises foram executadas no laboratório de difração de raios-X do Departamento de Ciências de Materiais e Metalurgia (DEMM) da PUC-Rio, utilizando-se para tanto, um aparelho de difração modelo D5000, marca Siemens. Adotando-se para o ensaio uma velocidade de varredura de 0,02° por segundo, no intervalo entre 2° a 30° de 2 θ .

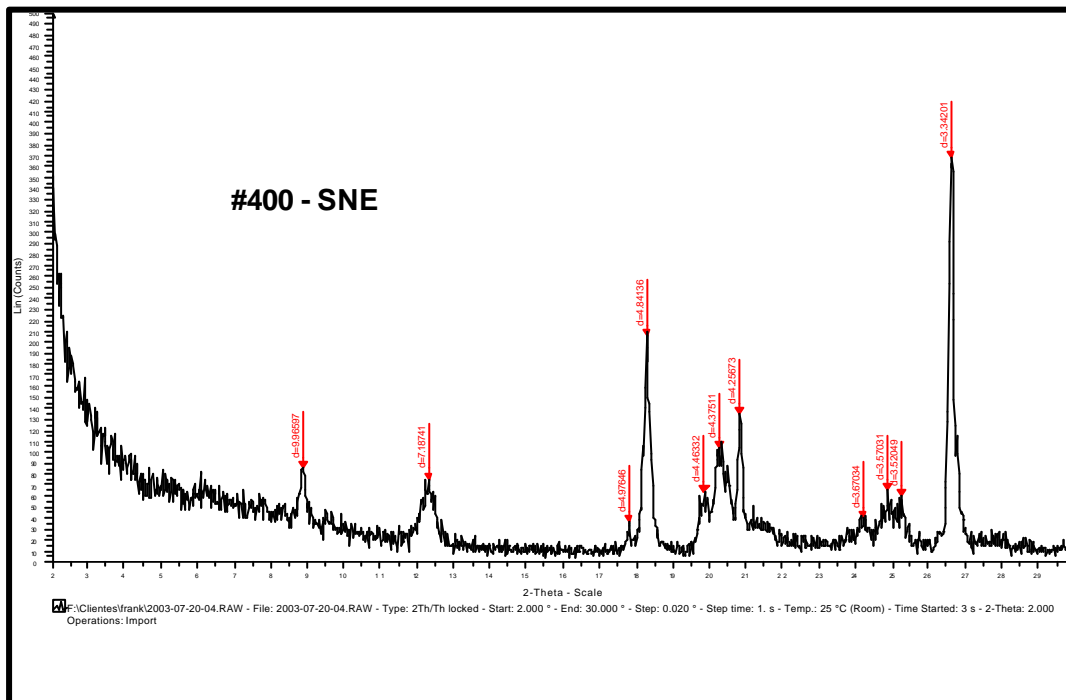
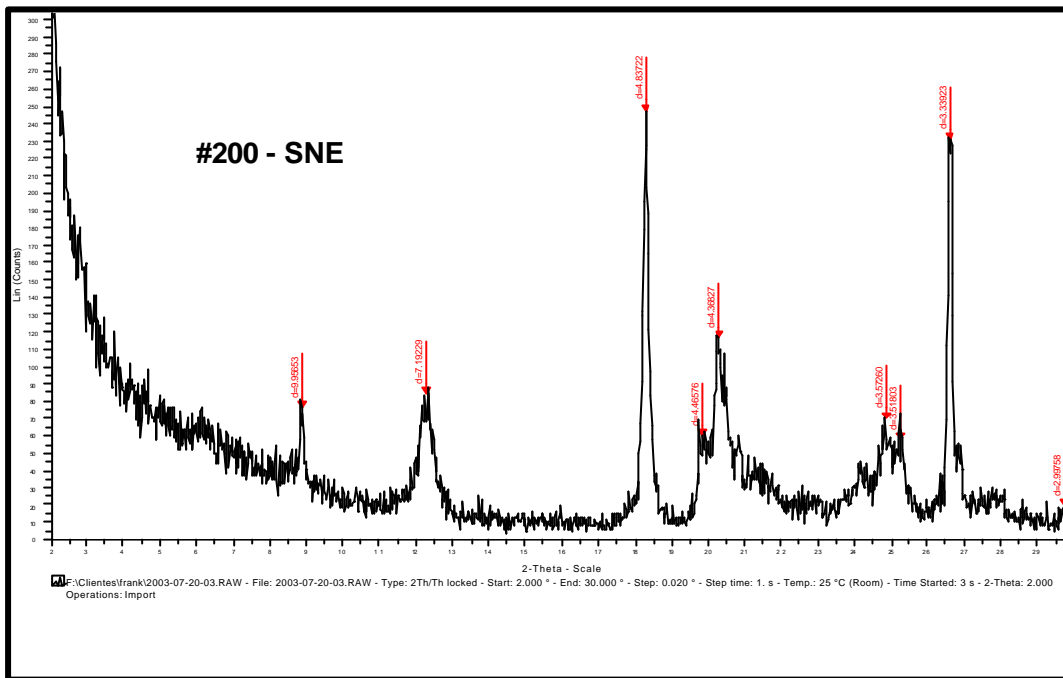
As condições de análise dos resultados constam dos difratogramas, e as composições mineralógicas das duas frações, por serem semelhantes, encontram-se representadas na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Análise Mineralógica pela difração de Raios -X

Amostras	Fração (Silte + Argila)
SNE	Ilita, Caulinita, Gibbsita ⁺⁺ , Quartzo, Feldspato
SE	Quartzo ⁺⁺ , Mica ⁺⁺ , Caulinita
SC	Mica ⁺⁺ , Quartzo ⁺⁺ , Caulinita ⁺ , Feldspato, Hematita
SRM	Mica / Ilita ⁺ , Caulinita ⁺ , Quartzo, Feldspato
SRJ-A	Mica / Ilita ⁺⁺ , Caulinita ⁺ , Quartzo, Feldspato
SRJ-B	Mica / Ilita ⁺⁺ , Caulinita ⁺⁺ , Quartzo, Feldspato

(++) - dominante

Analisando-se os resultados constantes da Tabela 5.15, obtidos a partir de uma avaliação semiquantitativa dos solos estudados, com base nos valores de d (distância interplanar basal) de cada mineral presente nos difratogramas (Figuras 5.40 a 5.42), verifica-se a presença dominante dos minerais argílicos e mica em todos os solos estudados, com exceção de mica na estrutura do solo não erodido e pelo aparecimento da gibbsita, como um mineral dominante na estrutura deste solo.



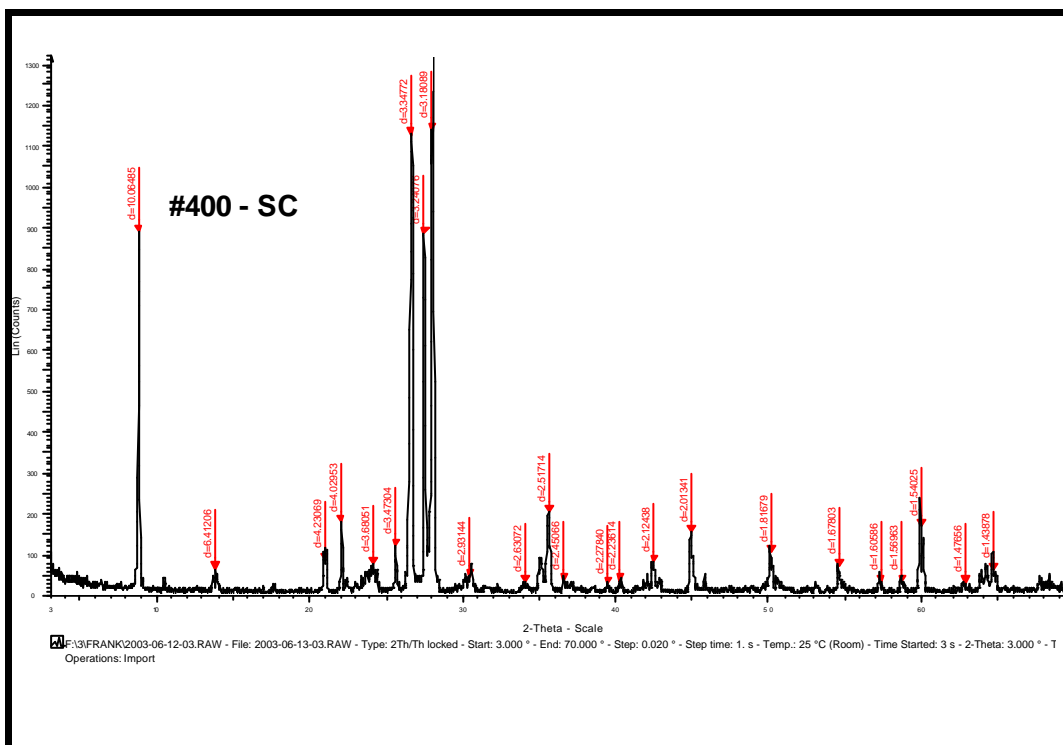
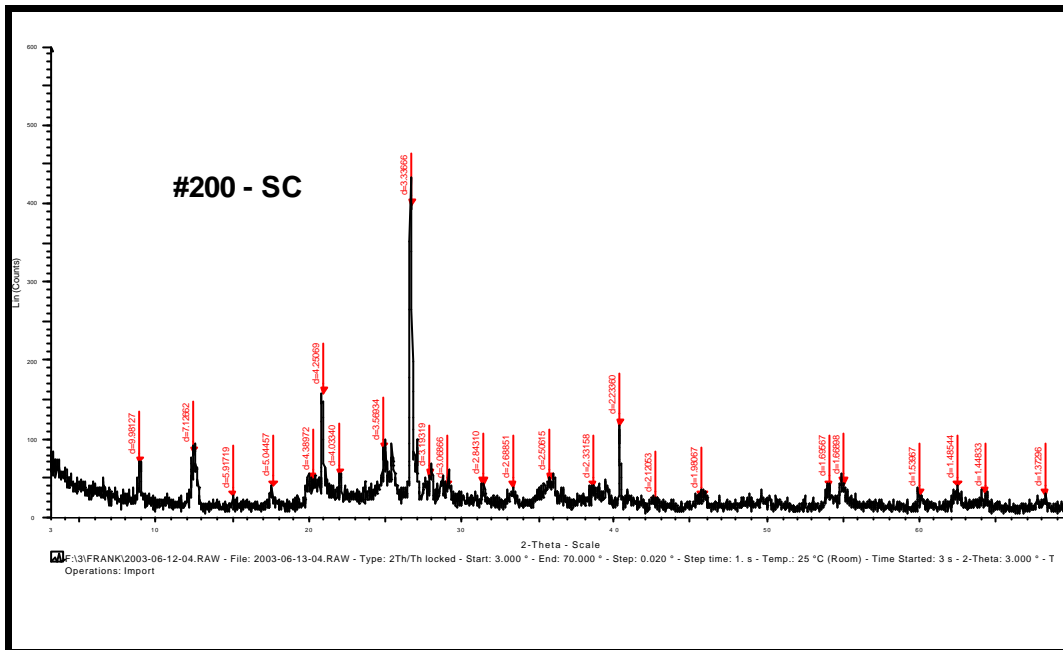
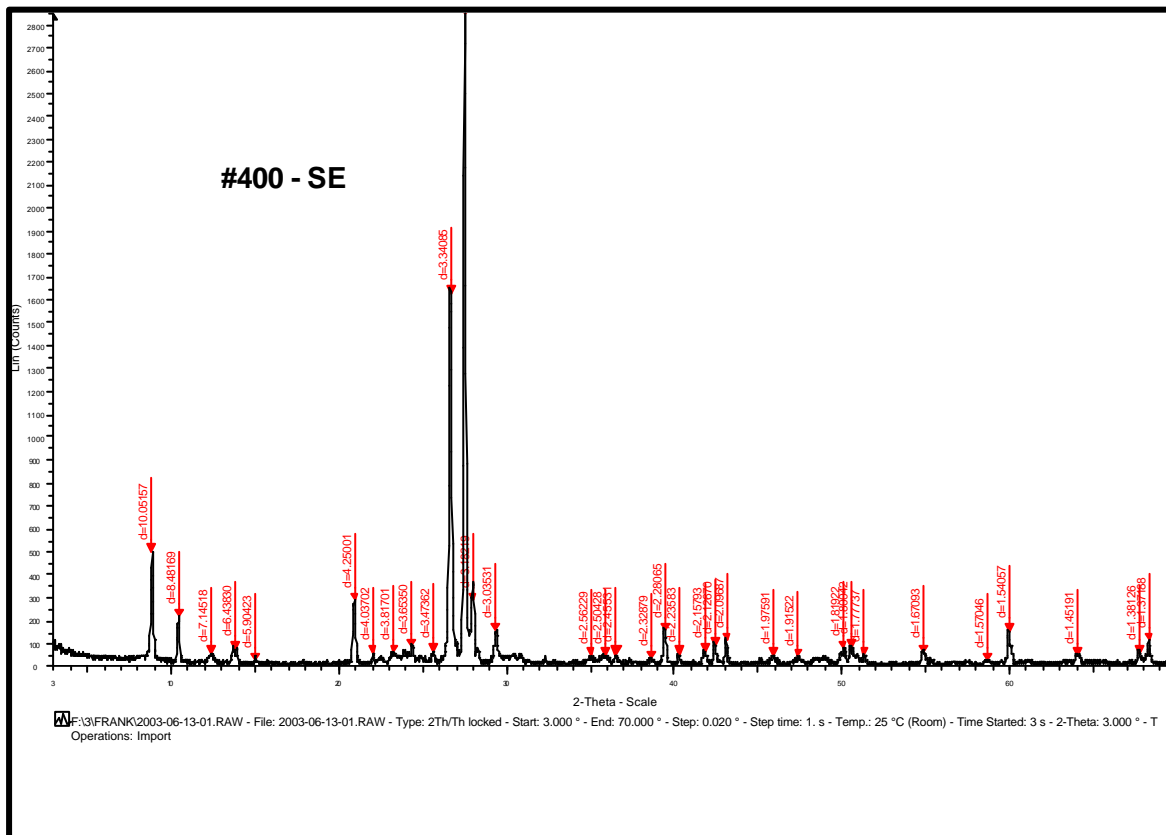
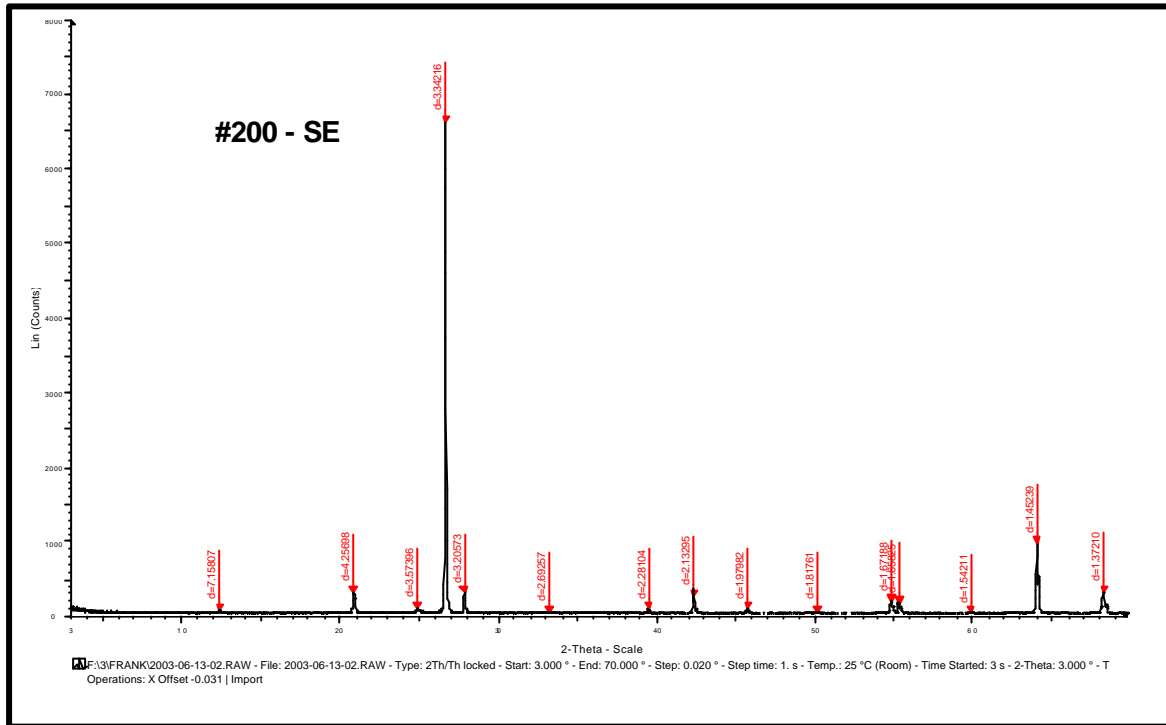


Figura 5.42 – Difratomogramas de Raios-X (SNE e SC)



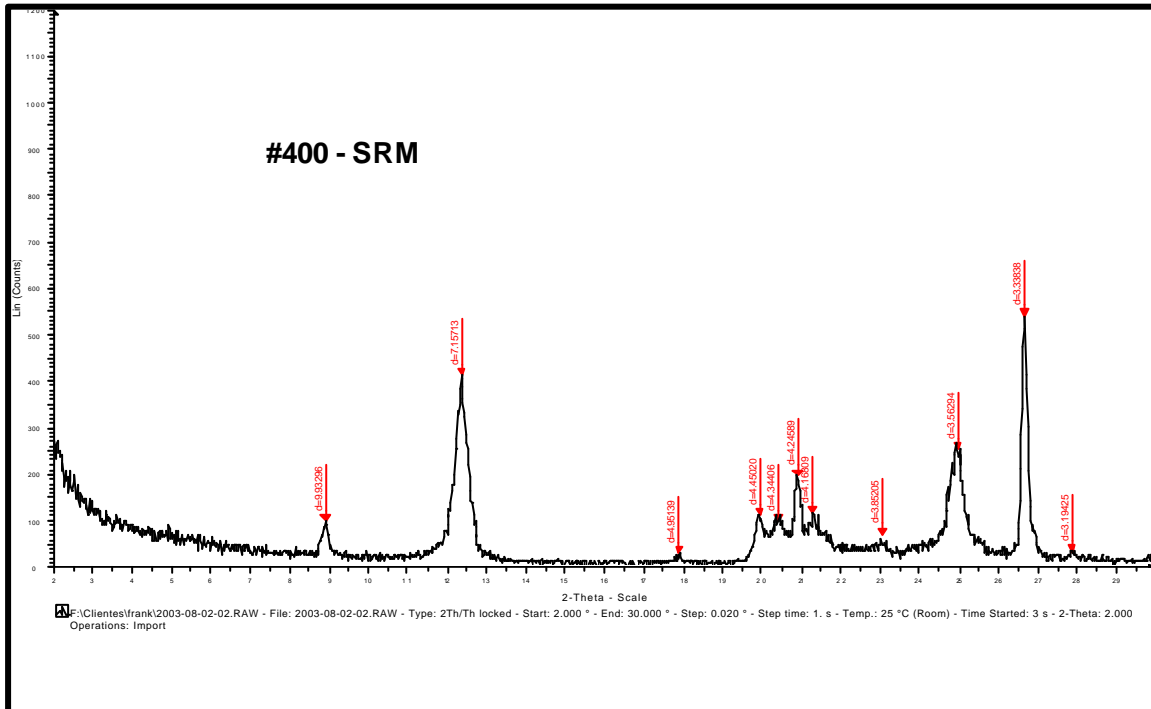
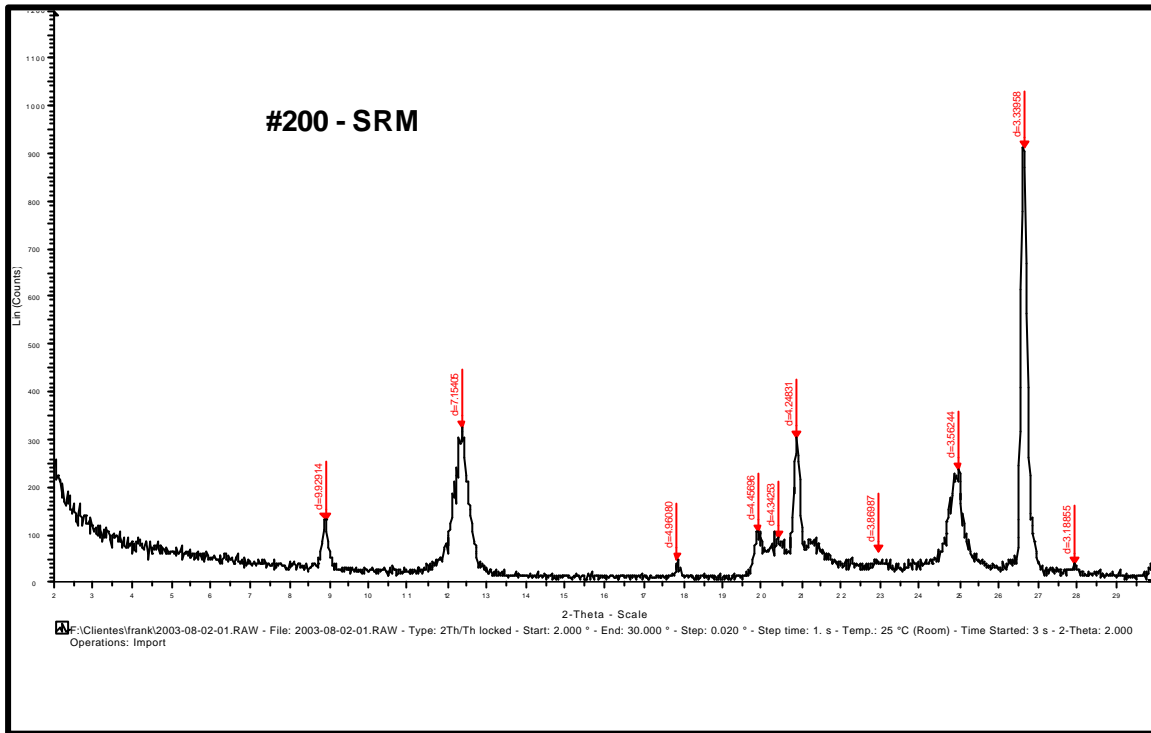
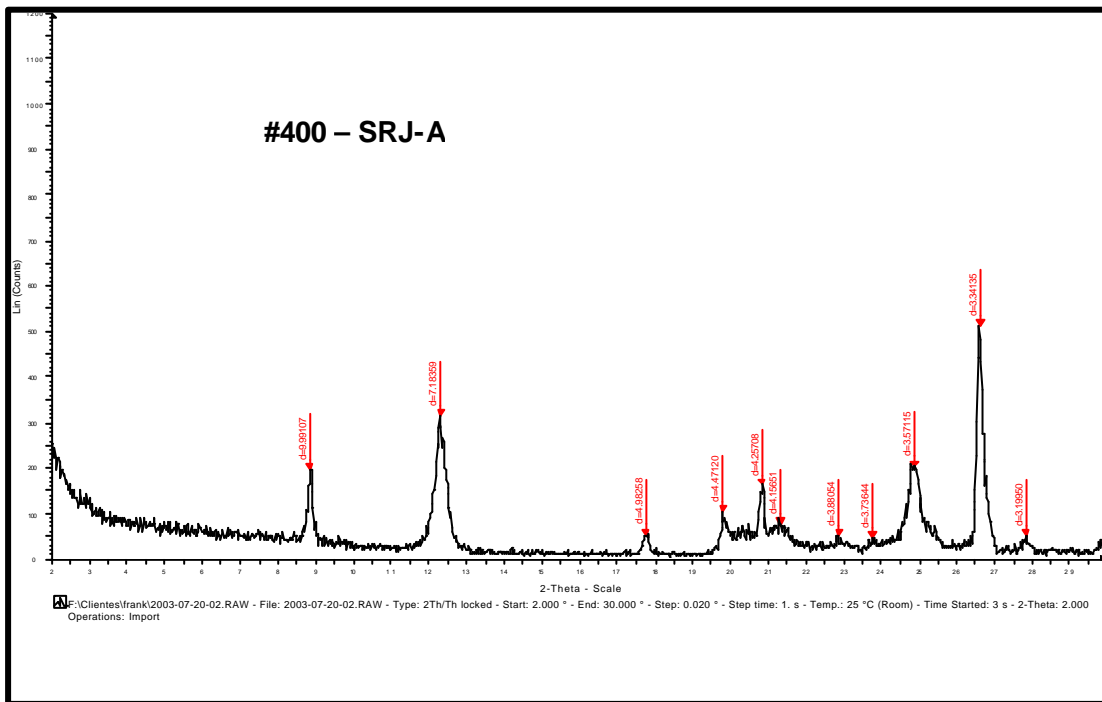
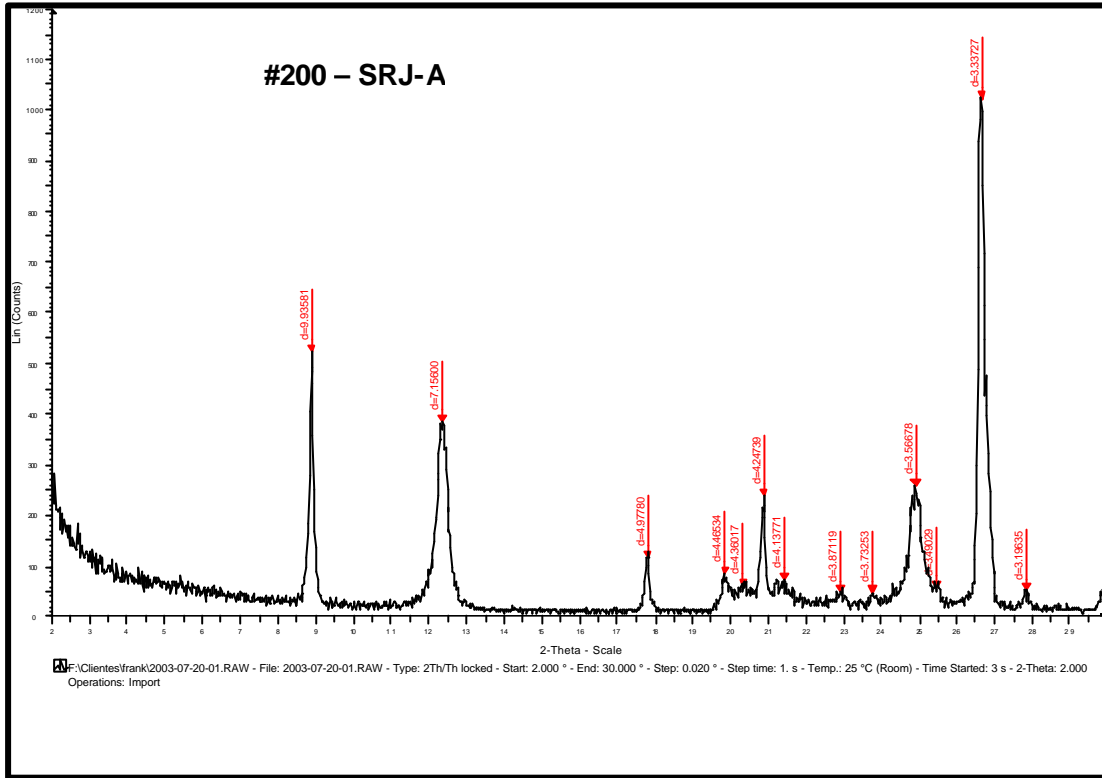


Figura 5.43 – Difractogramas de Raios-X (SE e SRM)



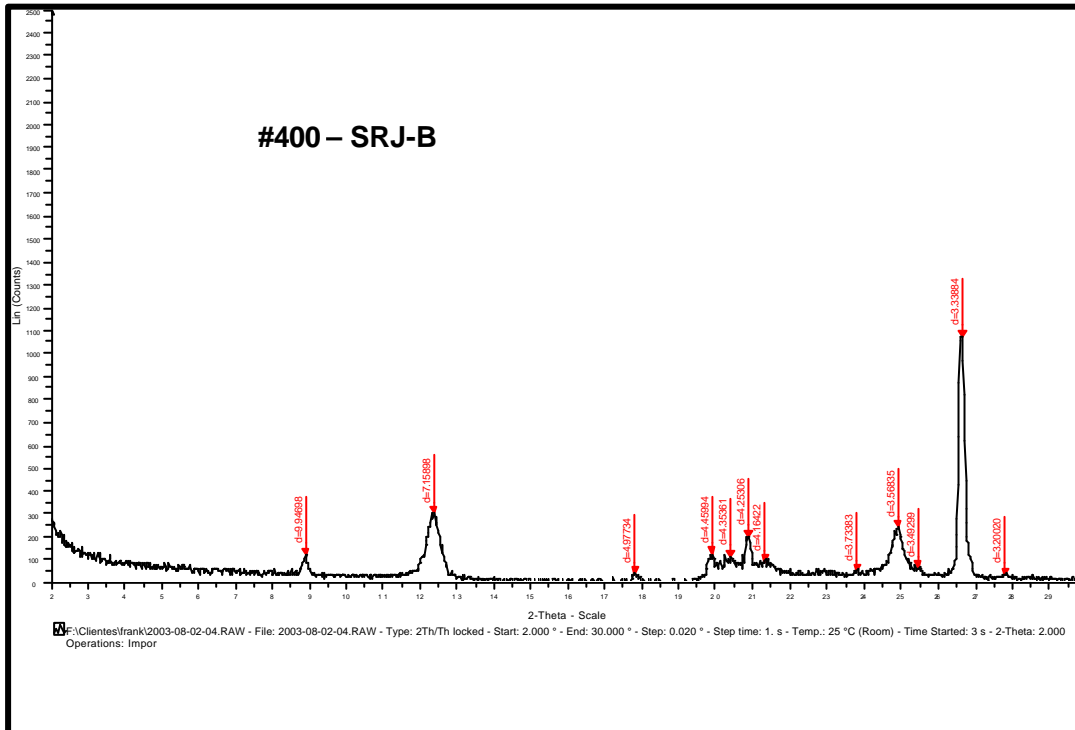
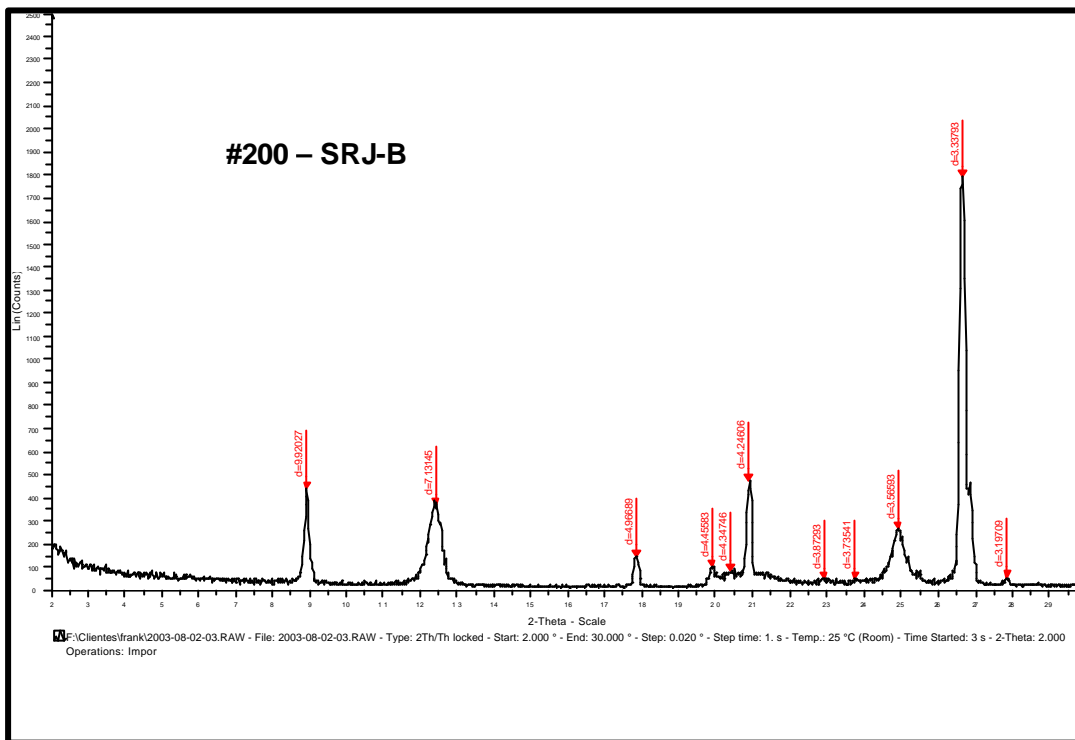


Figura 5.44 – Difractogramas de Raios-X (SRJ-A e SRJB)

Apesar de terem sido obtidos dados semiquantitativos para a análise em questão, a difratometria de raios-x, fornece dados importantes com relação à gênese do perfil de intemperismo, sua variação em função da profundidade e de suas características morfológicas e físicas.

Conclui-se que a classificação desses solos quanto ao mecanismo de erosão atuante, mediante a identificação dos argilominerais presentes em sua estrutura, fornecem parâmetros necessários ao esclarecimento do desenvolvimento desses processos erosivos.

5.5.3. Ensaio de Caracterização MCT (mini-MCV)

O sistema de classificação para solos tropicais MCT (Miniatura, Compactada Tropical) proposto por Nogami e Villibor (1981), veio a partir da verificação pelos autores, das limitações geotécnicas tradicionais a que esses solos estão sujeitos.

Essa nova classificação para os solos tropicais separa o solo, em 7 (sete) grupos e em 2 (duas) grandes classes, conforme apresentado pelo ábaco classificatório dos solos pela metodologia MCT (Figura 5.48).

Inicialmente desenvolvida para estudos rodoviários, essa metodologia passou a ser utilizada para outros fins, como o ensaio de compactação do procedimento de mini-MCV (Moisture Condition Value), que é uma adaptação daquela desenvolvida por Parsons (1976) do “Transport and Road Research Laboratory” da Grã-Bretanha, e do ensaio de perda de massa por imersão em água, sendo este último parte integrante da metodologia (Nogami e Villibor, 1995), representado esquematicamente na Figura 5.45, que em conjunto permitem distinguir os solos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não laterítico.

- **Metodologia**

Para o ensaio preconizado pela Norma Técnica, DNER – ME 258/94, utilizou-se amostras dos solos estudados, que foram previamente secas ao ar e passadas na peneira de # 2,00mm de abertura, rejeitando-se a fração retida na mesma, sendo em seguida preparadas porções com diversos teores de umidade.

- **Ensaio de compactação segundo mini-MCV (Moisture Condition Value)**

Nesse ensaio, utilizou-se equipamento de compactação miniatura, com um dispositivo que permite determinar a altura do corpo de prova compactado com resolução de 0,01mm, através da medida da posição da haste do soquete, referente a um ponto determinado que pesa 2270 g e tem como altura de queda 305mm, sendo o diâmetro interno do molde igual a 50mm (Figura 5.45).

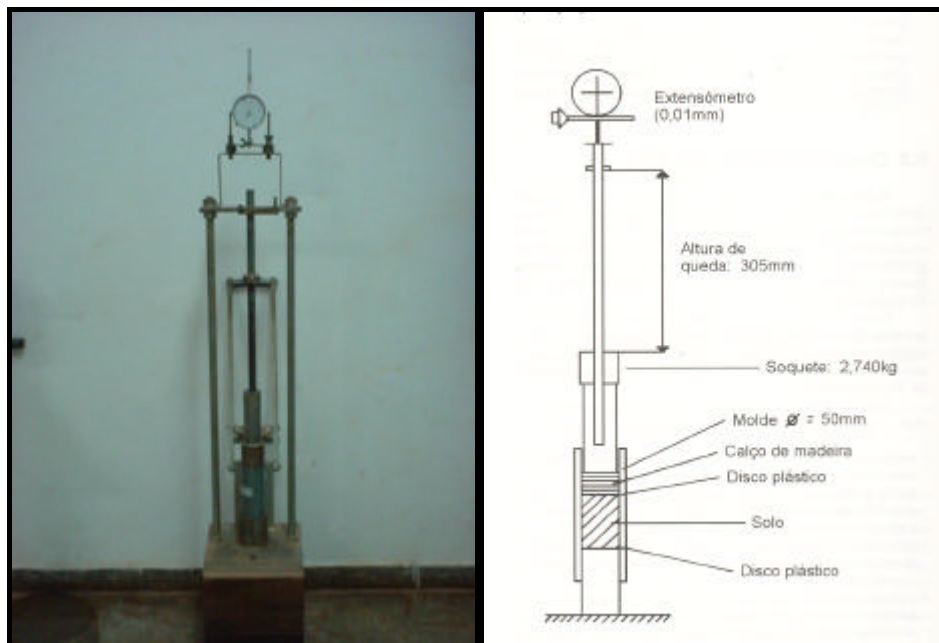


Figura 5.45 – Aparelho com Ensaio de Classificação MCT em andamento e esquema representativo

Dependendo do tipo de solo, o molde é preenchido com uma quantidade de material que varia de 200 a 220g, sendo determinado o teor de umidade (w_i), para cada amostra ensaiada. Em seguida, aplica sucessivos golpes, registrando-se as medidas de alturas (A_i) do corpo de prova correspondente, conforme a série proposta pela norma DNER-ME 258/94, que no subitem 8.8.3, define a seguinte série de golpes: 2,3,4,6,12,16,.....n, n+1,..... 4n interrompendo-se o processo quando:

- a diferença entre a “leitura” obtida após 4n golpes e a obtida após n golpes for menor que 2mm;
- houver intensa exsudação de água, no topo e na base do corpo de prova;
- o número de golpes atingir 256, ou excepcionalmente 64, quando o teor de umidade for muito baixo.

A obtenção da curva característica para cada teor de umidade, parte do valor “a” em ordenada, obtido pela diferença de altura ($A_n - A_{4n}$), onde A_n é a altura do corpo de prova após o número de golpes n, e A_{4n} a altura do corpo de prova após 4n golpes, em abcissa pelo número de golpes n em escala logarítmica.

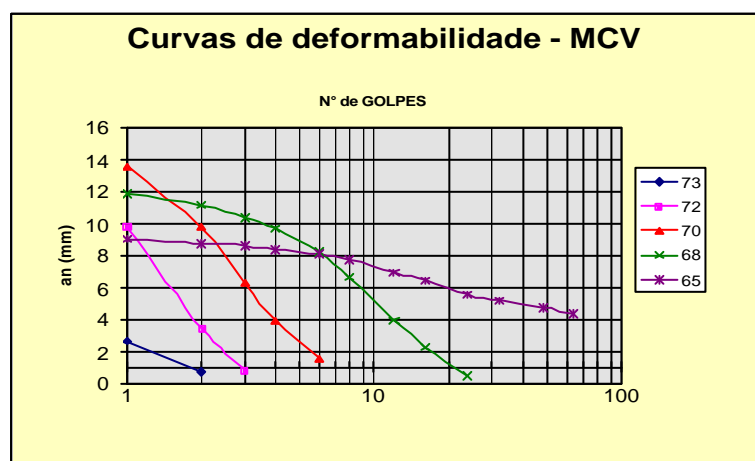


Figura 5.46 – Exemplo de curvas de deformabilidade - MCV

A interseção de cada uma dessas curvas com a reta de ordenada $a_n=2\text{mm}$ determina um valor n_i (número de golpes), correspondente a um teor de umidade (w_i).

O mini-MCV é definido pelo valor $10 \log n_i$, onde o \log é o logaritmo de base decimal e n_i é o número de golpes que resulta na interseção da curva mini-MCV com a reta de ordenada $a_n=2\text{mm}$, havendo um mini-MCV para cada teor de umidade de compactação. O coeficiente c' é determinado pela inclinação da parte retilínea da curva que define o mini-MCV=10.

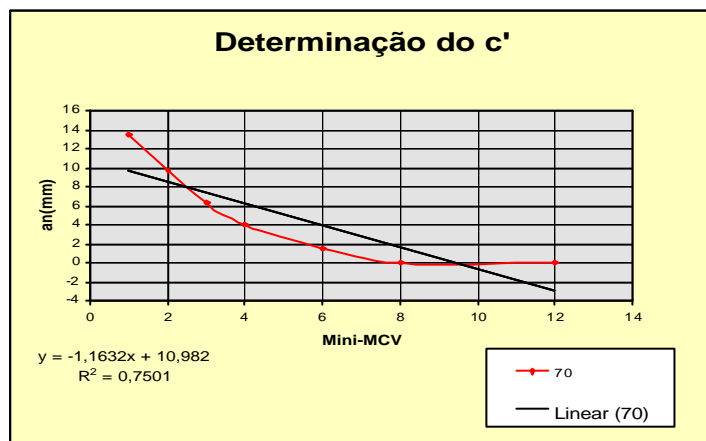


Figura 5.47 – Exemplo de Curva para determinação de c'

Determinados os valores do teor de umidade e da altura dos corpos de prova, obtêm-se as densidades aparentes secas inerentes a cada número de golpes e, a partir desses dados, a curva de compactação correspondente (Figura 5.47). A indicação da parte retilínea do ramo seco da curva, correspondente a 12 golpes é responsável pelo fornecimento do parâmetro d' , representado pela equação a seguir:

$$d' = 1000 \cdot \Delta \text{Das} / \Delta w \quad (3)$$

Onde ΔDas é igual à diferença de densidade aparente seca correspondente a uma variação de teor de umidade Δw .

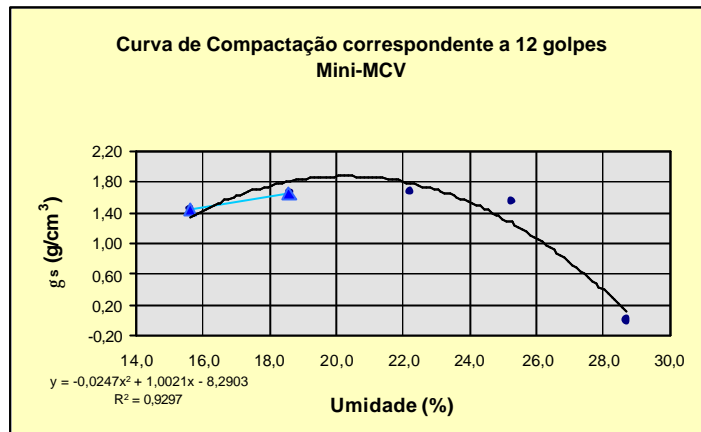


Figura 5.48 – Exemplo de Curva de Compactação para determinação de d'

- **Ensaio de Perda de Massa por Imersão de Solos Compactados**

Esse ensaio, preconizado pela norma técnica, DNER-ME 256/94, utiliza corpos de prova resultantes da compactação, segundo o método mini-MCV. Sendo assim, os corpos de prova são submetidos a um deslocamento axial, em relação ao eixo longitudinal do cilindro, de forma a ficarem 10mm para fora do corpo do mesmo (Figura 5.49).

Em seguida, coloca horizontalmente os moldes cilíndricos contendo as amostras em um recipiente com água, de forma a emergi-las completamente. Sendo o material saliente eventualmente desprendido, recolhido e seco em estufa, com temperatura variando entre 105 e 110°C a fim de se obter o peso seco desprendido de cada corpo de prova.

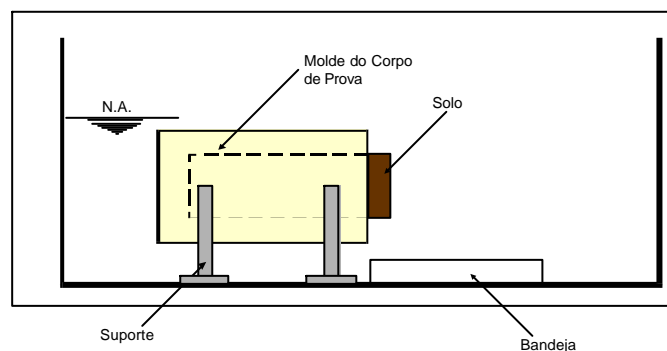


Figura 5.49 – Representação Esquemática do Ensaio de Perda de solo por Imersão

Dessa forma a perda de solo por imersão “Pi” é obtida pela equação a seguir:

$$Pi = 10 \cdot Md \cdot a / Ms \quad (5)$$

onde (**Md**) é a massa seca da parte desprendida expressa em gramas e (**Ms**) a massa seca em estufa do corpo de prova obtida pela fórmula: **Ms = 100·Mu/100+w_c**, onde **Mu** é a massa úmida do corpo de prova expressa em gramas e w_c o teor de umidade de compactação expresso em porcentagem. Sendo a perda de massa por imersão, obtida por cálculo para cada corpo de prova, devendo-se observar que, quando a parte desprendida preserva a forma cilíndrica, sem deformações apreciáveis o valor de **Md** deve ser multiplicado pelo fator de redução a=0,5.

Partindo-se de um gráfico (Pi x mini-MCV) de cada corpo de prova, encontra-se o valor de Pi correspondente ao mini-MCV = 10 ou 15, que será utilizado na classificação do solo estudado em função da altura final do corpo de prova se menor ou maior que 53mm, sendo o valor da massa específica aparente úmida, considerado baixo ou alto em função de um maior ou menor valor da altura estabelecida para amostras submetidas a esse ensaio. A partir dos valores de Pi e d', calcula-se o coeficiente e', dado pela fórmula:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{20/d' + Pi/100}{1}} \quad (6)$$

Obtidos os valores de c' e e', classifica-se o solo a partir do ábaco proposto pelos autores (Figura 5.50). Sendo apontadas na Tabela 5.17, as tendências de comportamento da erosão dos solos representativos dos diversos grupos, de acordo com as condições físicas de São Paulo (modificado por Nogami e Villibor, 1995).

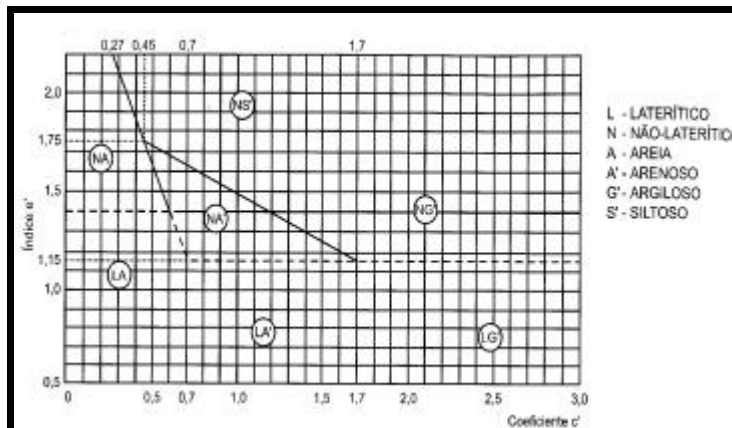


Figura 5.50 – Âbaco classificatório dos solos pela metodologia MCT

Tabela 5.17 – Quadro característico de solos dos grupos MCT, quanto à erodibilidade hídrica e propriedades de interesse à sua previsão (condições típicas do Estado de São Paulo) – modificado por Nogami e Villibor, 1995

Grupo MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Resist. Agreg. ou Torrões (1)		N	N	N, B, M, E, (2)	B	B	B	B
Coef. Sorção	Natural	E/M/B	B/M/E	E/M, E	B	E	E/B,E	M,E
	Compactado	E	B,M	E	M, E	B	B	B
Perda de Massa por imersão	Natural (3)	E	B/E,M	B,M, E	M, E	E,M	B,M	B
	Compactado	E	E,M	E	B,M	E	N/B,M	N,B
Erosão em valetas não revestidas	Natural	E	E	B,M, E	B,M	E	E	M, E
	Compactado	E	E,M	E	B,M	M, E	B	B
Erosão em cortes solos "in situ" (4)	Erodibilidade	B,M, E	B,M, E	B,M, E	M, E	B	B	B
	Formas	desag. E	desag. M	Sulcos E	Sulcos desag. E	firme	desag. B	desag. E
Erosão em saias de aterros	Solto	E	E	B,M, E	M, E	E	M	B
	Compactado	E	E	E	M, E	E	M, E	M
Abreviaturas: N-nulo(a); B-baixo(a); M-médio(a); E-elevado(a); desag.- desagregações / - freqüência decrescente; , - freqüência equivalente								

- (1) Resistência dos agregados ou torrões, naturais ou produzidos por escavação do solo natural (não-compactado), à imersão em água;
- (2) Apenas torrões resultantes da escavação do solo natural (não-compactado);
- (3) Determinada em corpos de prova não deformados ou pouco deformados, de altura igual à metade do diâmetro;
- (4) Apenas taludes de solos isotrópicos e homogêneos, em condições naturais, com inclinações entre 45° e 60°, nas condições climáticas prevalentes no planalto paulista, com exclusão de áreas serranas.

- **Análise dos resultados**

Os resultados referentes aos ensaios de compactação e de perda de massa por imersão de solos compactados da forma mini-MCV estão representados nas Figuras 5.51 a 5.54, sendo os dados referentes a esses ensaios, constantes das Tabelas 5.18 a 5.21.

Para os quatro tipos de solos estudados, foram coletadas 05 (cinco) amostras, de cada um, as quais apresentaram os seguintes resultados:

a) Solo Coluvionar (SC)

Tabela 5.18 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Coluvionar

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS – mini-MCV						
Determinação da massa seca desprendida						
Cilindro de compactação	n°	19	73	72	70	68
Cápsula	n°	G220	G128	G191	G170	G07
Massa seca + Tara	(g)	103,81	83,59	81,96	67,68	66,82
Tara	(g)	48,03	48,73	49,64	45,37	49,05
Massa seca desprendida - Md	(g)	55,78	34,86	32,32	22,31	17,77
Fator de Redução- a = 0,5		-	-	-	0,5	-
Perda de Massa por Imersão - PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		202,4	118,9	105,0	34,1	50,7

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
c' =	1,5	d' = 31,25 e' = 1
Pi =	34	Classificação mini-MCV = LA/LG'

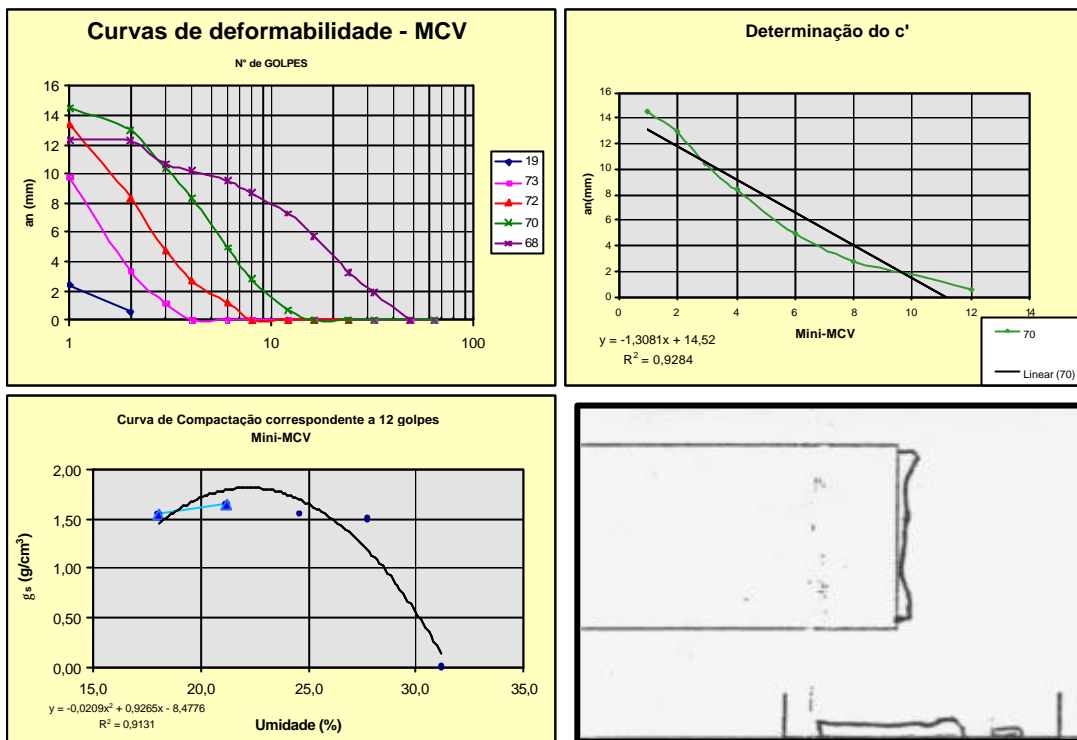


Figura 5.51 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SC)

Com os valores encontrados para c' e e' , Tabela 5.18, plotados no ábaco para obtenção de classificação de solos pela metodologia MCT (mini-MCV), Figura 5.50, constata-se que o solo situa-se no limite entre a zona LA' (solo laterítico arenoso) e LG' (solo laterítico argiloso), o que indica estar o solo em uma zona de transição, qual seja, passando de um estado mais argiloso para um mais arenoso, ou vice-versa, podendo esta característica física, ser confirmada pelo ensaio de caracterização deste solo, Tabela 5.1, que indica uma maior predominância da fração argila, seguida das frações silte e areia, podendo o solo ser classificado como sendo argilo-arenoso a areno-siltoso, de coloração marrom a marrom avermelhada.

O ensaio de perda de massa por imersão, cujos valores constam da Tabela 5.18 e que junto ao modelo esquemático representativo da perda de solo, Figura 5.51, ajudam na interpretação e enquadramento deste solo, quanto à susceptibilidade a sofrer uma maior ou menor resistência a processos

erosivos. A Tabela 5.17, confirma o enquadramento deste solo quanto a perda de massa por imersão devido a erodibilidade hídrica, como sendo de nula a baixa, estando essa característica condizente com os padrões de classificação para solos lateríticos, que apresentam uma maior resistência a processos erosivos se comparado a outras gêneses de solos submetidas às mesmas condições deste ensaio. Outro fato que vem a confirmar a classificação deste solo como laterítico, além das observações de campo, são os ensaios de Inderbitzen, Desagregação e Mineralógico que juntos confirmam ser este solo menos sujeito a sofrer processos erosivos, dentre os outros solos analisados.

Pelas características inerentes a este solo, pode-se atribuir a sua resistência a processos erosivos, a presença de argilominerais presentes na sua estrutura, que funcionam como elemento cimentante das partículas sólidas que compõem o seu esqueleto, preservando dessa forma, as características físico-químicas inerentes a ele.

b) Solo Residual Maduro (SRM)

Tabela 5.19 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Maduro

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS – mini MCV						
Determinação da massa seca desprendida						
Cilindro de compactação	n°	73	72	70	68	65
Cápsula	n°	G105	G147	G198	G216	G42
Massa seca + Tara	(g)	122,54	128,23	133,80	149,2	157,78
Tara	(g)	48,20	52,44	45,73	50,14	49,2
Massa seca desprendida - Md (g)		74,34	75,79	88,07	99,06	108,58
Fator de Redução – a = 0,5		-	-	-	-	-
Perda de Massa Por Imersão – PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		283,6	269,5	288,9	300,1	327,1

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
c' =	1,2	d' = 3,92
PI =	282	Classificação mini-MCV = NS'

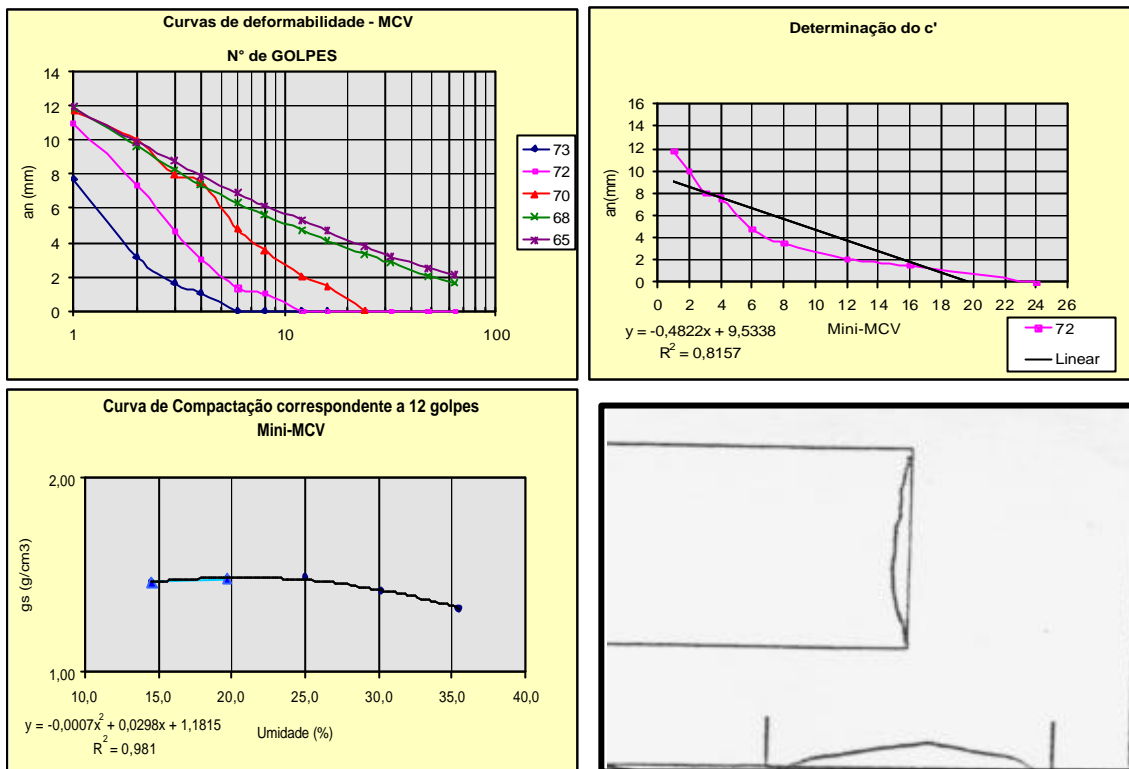


Figura 5.52 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRM)

Os valores obtidos c' e e' , Tabela 5.19 e Figura 5.52, após plotados no ábaco para classificação de solos pela metodologia MCT (Figura 5.50), enquadram este na zona NS' , portanto classificando-o como Solo Não Laterítico Siltoso, Entrando, com essa classificação na Tabela 5.19, que caracteriza os solos dos grupos MCT, quanto a erodibilidade hídrica e as propriedades de interesse à sua previsão, conclui-se como sendo elevada a perda de massa por imersão para a amostra de solo. Portanto, solo este que apresenta uma maior tendência a sofrer processos erosivos.

No ensaio de Caracterização, este solo foi o que apresentou a maior fração silte, dentre os outros solos analisados, e se correlacionado com os ensaios de Inderbitzen, Desagregação e Pinhole Test, este aparece como sendo o solo mais erodível, dentre os demais solos estudados.

• Solo Residual Jovem A (SRJ-A)

Tabela 5.20 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Residual Jovem A

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS - mini MCV						
Determinação da massa seca despreendida						
Cilindro de compactação	nº	73	70	72	68	65
Cápsula	nº	G197	G33	G92	G62	G202
Massa seca + Tara	(g)	142,9	146,1	155,6	158,42	165,14
Tara	(g)	47,36	48,09	51,72	48,56	46,62
Massa seca despreendida - Md (g)		95,54	34,86	103,88	109,86	118,52
Fator de Redução – a = 0,5		-	-	-	-	-
Perda de Massa Por Imersão - PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		365,9	122,5	341,2	331,6	339,3

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
c' =	0,8	d' = 1,89
ei =	337	Classificação mini-MCV = NS'

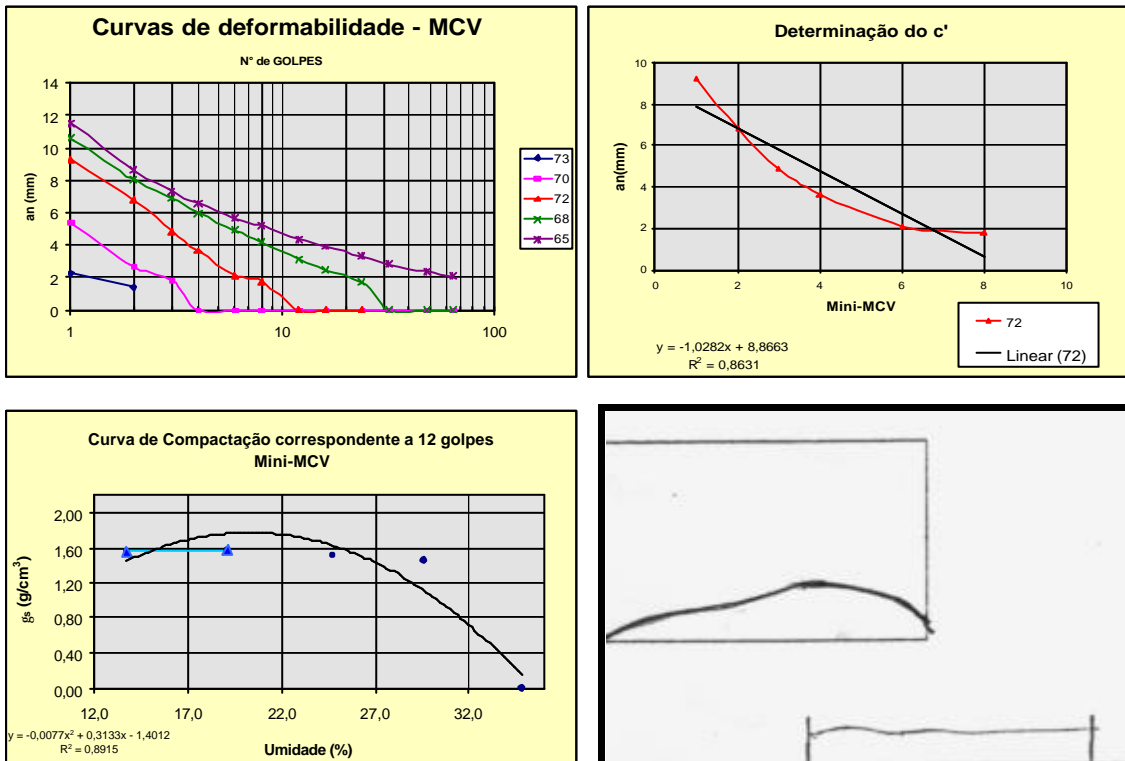


Figura 5.53 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRJ-A)

Os valores de c' e e' constantes da tabela acima quando plotados no ábaco para classificação de solos pela metodologia MCT, Figura 5.50, constatam estar este solo na zona NS', portanto sendo ele classificado como Solo Não-Laterítico siltoso, sendo o seu valor de perda de massa por imersão quanto a erodibilidade hídrica, Tabela 5.17, considerado elevado, estando este dentro dos padrões de classificação para Solos Não-Lateríticos, apresentando uma menor resistência a processos erosivos.

Correlacionando este ensaio com o de Inderbitzen e desagregação, conclui-se ser este solo o segundo em grau de erodibilidade, dentre os solos analisados.

- **Solo Residual Jovem B (SRJ-B)**

Tabela 5.21 – Valores para classificação mini-MCV do Solo Residual Jovem B

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DE SOLOS COMPACTADOS - mini MCV						
Determinação da massa seca desprendida						
Cilindro de compactação	Nº	73	72	70	68	65
Cápsula	Nº	G13	G88	G61	G225	G79
Massa seca + Tara	(g)	128,83	134,98	144,82	154,36	159,7
Tara	(g)	49,8	49,05	49,51	49,74	48,49
Massa seca desprendida – Md	(g)	79,03	85,93	95,31	104,62	111,21
Fator de Correção – a = 0,5		-	-	-	-	-
Perda de Massa Por Imersão - PI PI=10 x Md x a / Ms (%)		274,5	279,3	286,0	290,2	308,1

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Dados para classificação do solo		
$c' =$	1	$d' =$ 1,96
$e' =$	2,4	
PI =	286	Classificação mini-MCV = NS'

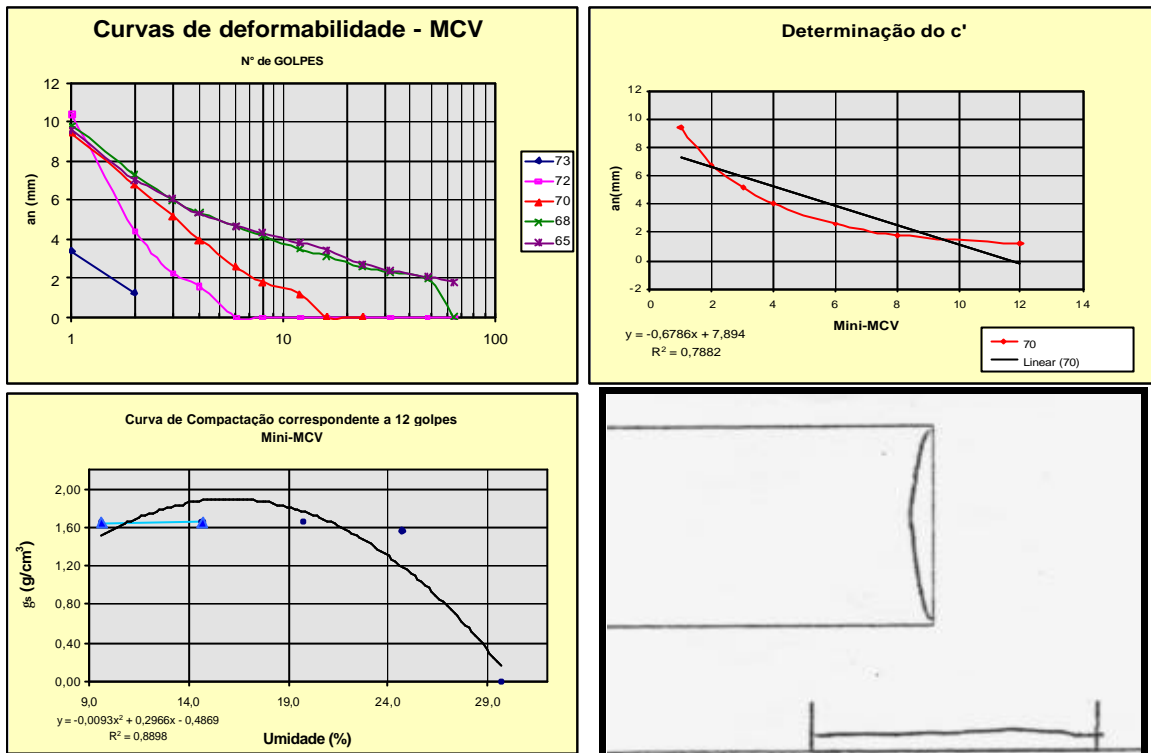


Figura 5.54 – Gráficos e representação esquemática do ensaio mini-MCV (SRJ-B)

Para o Solo Residual Jovem B, os valores de c' e e' , constantes da Tabela 5.21 e representados na Figura 5.54, após serem analisados e plotados no ábaco para classificação de solos pela metodologia MCT, Figura 5.50, enquadram este solo na zona NS', portanto classificando-o como sendo um solo não laterítico siltoso. Entrando-se com essa classificação na Tabela 5.17, que caracteriza os solos do grupo MCT, quanto à ocorrência de perda de massa por imersão para amostra compactada e erodibilidade hídrica e as propriedades de interesse à sua previsão, conclui-se como sendo elevada para o solo estudado.

Correlacionando-se este ensaio com os ensaios de Inderbitzen e Desagregação, conclui-se ser o solo, o terceiro em grau decrescente de erodibilidade, na classificação geral dos solos estudados.

5.5.4. Ensaio de sucção (curva característica)

Em geral os espaços entre as partículas de um solo são normalmente preenchidos por uma quantidade de ar e água. De acordo com Marinho (1994), quando a água está presente apenas nos poros menores, o solo é denominado não saturado sendo a pressão da água do solo, abaixo da pressão atmosférica, denominada de sucção. Embora a sucção esteja intimamente ligada aos solos não saturados, ela também pode ocorrer, em valores elevados nos solos saturados.

A sucção é normalmente dividida em duas componentes, a matricial “relacionada com a matriz do solo, isto é, a combinação do tipo de partícula e seu arranjo estrutural” e a osmótica “devido à composição química da água do solo”. Segundo o mesmo autor, as características mecânicas nos solos não saturados :

“São controladas, entre outras coisas, pela pressão (relativa) negativa que se desenvolve na água intersticial, devido a capilaridade e as forças de adsorção. Esta pressão é determinada pela diferença entre a pressão atmosférica ou pressão do ar, e a pressão na água, sucção natural”.

- **Metodologia**

Para se obter uma melhor avaliação dos solos estudados, optou-se pela realização desse ensaio, utilizando-se os métodos do papel filtro (umedecimento e secagem) e Panela de Richard (secagem), ambos por permitirem que o fluxo de água ocorra através de fluxo capilar, onde no primeiro caso poderá ocorrer fluxo de vapor, sendo a sucção medida a total⁸, enquanto que para o segundo, a sucção encontrada é a matricial.

⁸ A sucção total é obtida utilizando-se um disco de plástico perfurado separando o papel filtro do solo. O espaço de ar formado entre o papel filtro e o solo estabelecem uma barreira para os sais, permitindo apenas a ocorrência de fluxo de vapor d'água, o que possibilita a determinação da pressão total.

O ensaio de Sucção utilizando-se a técnica do papel filtro foi realizado no laboratório de solos da PUC-Rio, sendo o ensaio com a utilização da Panela de Richards executado no laboratório de solos de Furnas Centrais Elétricas S.A - GO.

A técnica do papel filtro para medição da sucção consiste no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel passa a absorver uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção, sendo que, a sucção obtida depende do tipo de transferência da água do solo para o papel filtro, que pode se dar por capilaridade ou através de vapor, num prazo mínimo de 7 dias.

Marinho (1994) descreve que o papel filtro “ao ser colocado em contato com a água do solo, tanto através de um contato físico ou através do vapor de água, o papel absorve água do solo”. Esta absorção se dá ao longo do tempo até que um equilíbrio de pressão seja atingido. No estado de equilíbrio assume-se que não há fluxo entre o solo e o papel filtro, fornecendo a mesma sucção tanto no solo como no material poroso, porém com umidades diferentes. O tempo de equilíbrio é considerado um fator de extrema importância para obtenção da correta sucção, devendo-se obter nesta fase, no mínimo, duas medidas de sucção por cada amostra do solo estudado.

- **Método do Papel Filtro**

Para o ensaio, optou-se pela utilização do papel filtro da marca Whatman nº 42, sendo o mesmo manipulado diretamente da caixa com luvas cirúrgicas e pinça, ou seja, com umidade higroscópica preservada, adotando-se para aferição do mesmo uma curva de calibração da literatura, mais especificamente, proposta por Chandler et al (1992). Dessa forma, o papel filtro foi colocado diretamente em contato físico com o solo, sendo assim, a sucção

medida foi a matricial, a qual exige, para o ensaio, um tempo de equilíbrio de 10 dias, tempo este, padronizado para todas as amostras.

Utilizou-se como amostra para este ensaio, os blocos indeformados representativos do solo coluvionar (SC), solo residual maduro (SRM), solo residual jovem A (SRJ-A) e do solo residual jovem B (SRJ-B), os quais encontravam-se lacrados com parafina e mantidos em câmara úmida.

De cada amostra de solo, foram extraídos 10 copos de prova, através de cravação de anéis de metal com 50,5mm de diâmetro e 19,8 mm de altura, determinando-se, antes, a massa específica do anel mais solo.

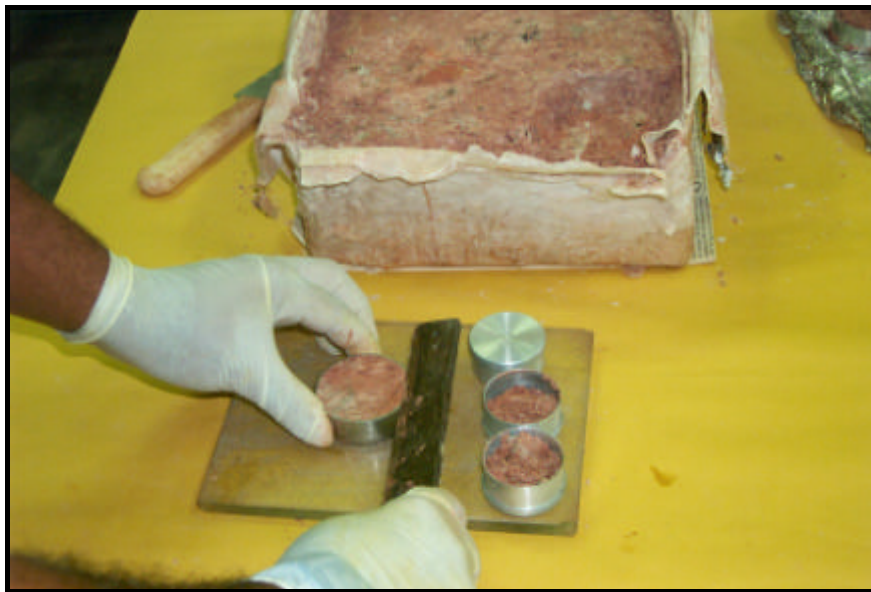


Figura 5.55 – Extração da amostra de solo com anel de metal

Para obtenção da curva característica, foram ensaiados 10 pontos em cada amostra de solo estudada. Sendo os seus valores representados na forma de gráficos.

Para o primeiro ponto ensaiado, foram retirados 150g de solo, para obtenção da umidade natural, decorrente do nivelamento da superfície da

amostra com as bordas do cilindro, tendo sido este pesado, em balança com acurácia de 0,0001g, e distribuído igualmente em 3 cápsulas de alumínio, com capacidade de 50g cada, sendo em seguida levadas a uma estufa com temperatura variando de 100 a 110°C durante o período de 24 horas. Após este período, as cápsulas com os solos foram submetidas a nova pesagem, sendo o percentual de umidade natural do solo, obtido pela diferença entre esses valores.

Com relação ao primeiro anel contendo a amostra de solo extraída dos blocos indeformados, este foi pesado e em seguida, uma de suas faces foi envolvida com papel filtro de mesmo diâmetro.

Os demais pontos foram subdivididos em dois ramos, a saber: o primeiro chamado de ramo molhado, em que o papel filtro foi colocado em contato com uma das faces das amostras de solo obtida do 2º ao 5º ponto, para as quais adotou-se, após a pesagem do anel mais solo, o critério de distribuição proporcional de água destilada, através de uma fonte graduada fazendo-se percolar água sobre uma das faces de cada amostra de solo, aplicando-se a seguir o papel filtro sobre a mesma, deixando-as, em seguida, repousando por um período de 24 horas. Essa distribuição de água, foi feita de forma gradual, sendo que para o 2º ponto utilizou-se 1,0 ml, já para o 3º ponto 2,0 ml, para o 4º ponto 4,0 ml e para o 5º ponto 6,0 ml, finalizando-se esta etapa, as amostras foram pesadas.

O segundo ramo, chamado de ramo seco, adotou-se, após a pesagem do anel mais solo, o critério de secagem natural ao ar, nos períodos de 2 horas para o 6º ponto, 4 horas para o 7º ponto, 8 horas para o 8º ponto, 12 horas para o 9º ponto e 24 horas para o 10º ponto. Sendo que, respeitados os intervalos de tempo, as amostras foram pesadas tendo em seguida uma de suas faces envolvidas com papel filtro.

Após cada procedimento acima descrito, as amostras foram finalmente envolvidas, uma a uma, com duas camadas de filme plásticas, presas ao final com fita adesiva. Sendo estas, em seguida, colocadas em uma caixa de isopor lacrada com fita adesiva, de forma a se garantir um ambiente com pouca variação térmica. O tempo de permanência destas na caixa foi estipulado em 10 dias, tempo esse considerado suficiente para que as amostras atingissem o equilíbrio de sucção (Figura 5.56).

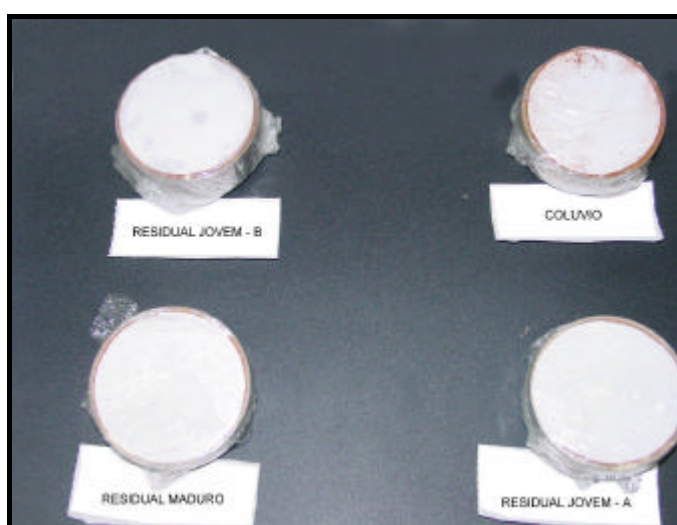


Figura 5.56 – Amostras de solos envolvidos com filmes plásticos

Decorrido o tempo de equilíbrio, os papéis filtro foram retirados das amostras com o uso de uma pinça e colocados em pequenos sacos plásticos auto-selantes, procurando-se atender a recomendação de que essa operação fosse realizada no máximo em cinco segundos, evitando-se assim, a evaporação de água do papel.

Em seguida os sacos plásticos com os papéis úmidos foi pesada em balança, Figura 5.57, sendo que os processos de pesagem tiveram como tempo de duração 3 minutos e, com intervalos a cada 10 segundos.



Figura 5.57 – Balança para pesagem de papel filtro

Concluindo, os papéis filtro são removidos dos sacos plásticos e colocados em cápsulas, sendo estes, secos em estufa a 105°C, por pelo menos duas horas, tempo considerado suficiente por Marinho (1994). Após este tempo determinou-se a massa seca de cada papel filtro, recolocando-os nos respectivos sacos, utilizando-se novamente o tempo máximo de cinco segundos, desta vez, evitando que os papéis absorvessem umidade. Com a diferença de pesos obteve-se a umidade seca do papel filtro e pela calibração desse determinou-se a sua sucção, obtendo-se assim, as curvas características de cada amostra dos solos ensaiados, os quais, foram representados em forma de gráfico cartesianos (Figura 5.58).

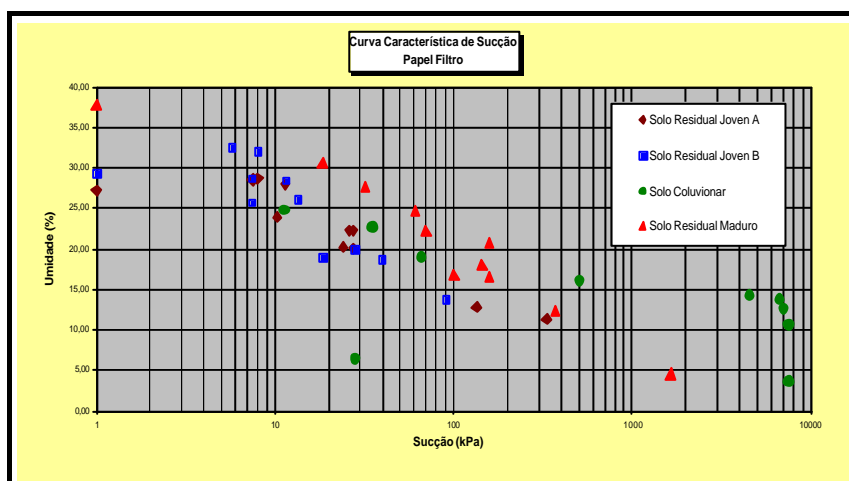


Figura 5.58 – Curvas Características pelo método do Papel Filtro

- **Curva característica - Câmara de Pressão de Richards**

Para determinação da curva característica recorreu-se às mesmas amostras de solos do método anterior, sendo, portanto, utilizado um equipamento denominado Extrator de Umidade de Placa Cerâmica, também conhecido como Câmara de Pressão de Richards (Panela de Richards), pertencente ao laboratório de solos de Furnas Centrais Elétricas S.A. – GO (Figura 5.59)



Figura 5.59 – Câmara de Pressão de Richards

O extrator de umidade de placa cerâmica é do modelo Cat. 1500 fabricado pela Soilmoisture Equipment Corporations. Esse equipamento permite a extração de umidade de solos pelo processo de secagem com uma pressão de até 1500 kPa.

- **Procedimentos utilizados durante o ensaio**

Inicialmente colocou-se a célula de placa cerâmica de 1 bar imersa em uma bandeja com água destilada por 24 horas para que esta fosse completamente saturada.

Estando saturada, a célula de placa cerâmica foi colocada sobre o suporte triangular, dentro da Câmara de Pressão de Richards e foi conectada ao tubo de escoamento.

Para o ensaio extraíram-se 4 amostras indeformadas de cada bloco, com o auxílio de anéis medindo 2 polegadas de diâmetro por 20mm de altura, obtendo-se inicialmente o valor correspondente à massa do anel mais solo.

Durante a moldagem dos anéis, foram utilizadas amostras deformadas, para a determinação do teor de umidade em que o solo se encontrava.

Do total das amostras, três foram, levadas para a Câmara de Pressão de Richards sendo colocados sobre a célula de placa cerâmica, em seguida aspergiu-se água sobre a placa cerâmica, deixando-a com excesso de água até a saturação das amostras, por capilaridade (Figura 5.60).

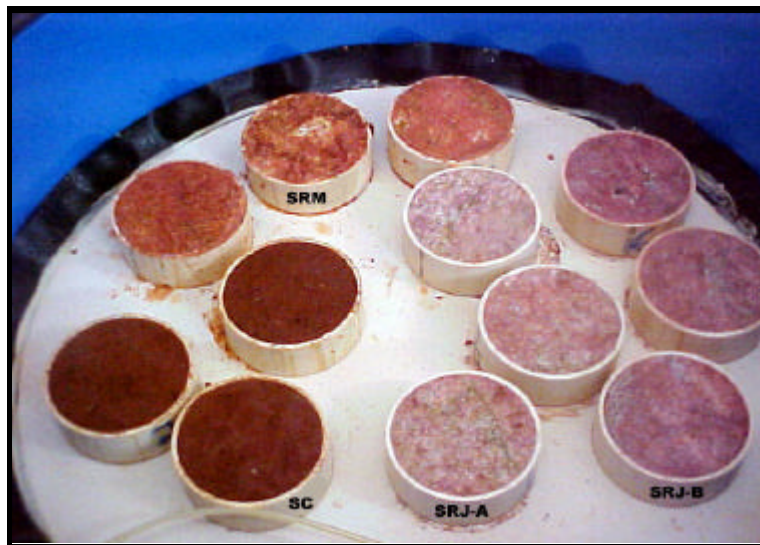


Figura 5.60– Saturação de amostras de solos por capilaridade sobre placa cerâmica

Observou-se que ao serem saturadas, as amostras de Solo Residual Maduro (SRM) sofreram expansão e perda de solo (Figura 5.61).

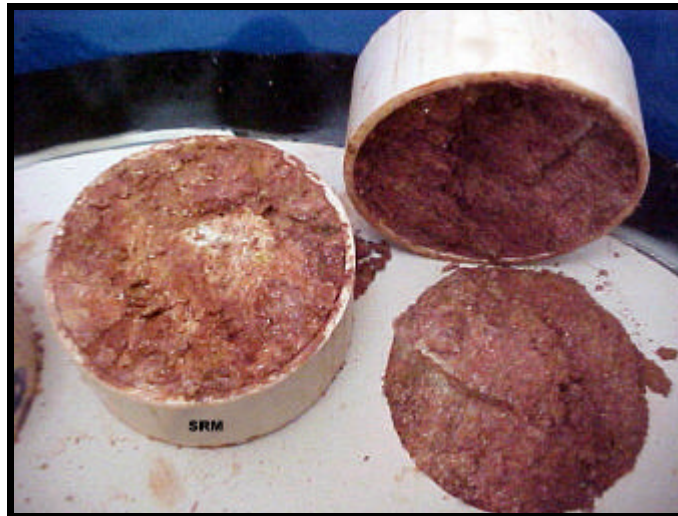


Figura 5.61 – Expansão da amostra de Solo Residual Maduro (SRM)

O outro anel foi colocado sobre uma pedra porosa mais papel filtro, dentro de uma bandeja, onde foi acrescentada água mantendo-se o nível na base da amostra, até que essa ficasse saturada por capilaridade, após o que foi determinado o seu teor de umidade (Figura 5.62).



Figura 5.62 – Saturação de amostras de solo por capilaridade

A seguir, colocou-se a tampa do extrator de placa cerâmica de modo que esta permanecesse em contato com o sistema de vedação, garantindo um perfeito fechamento.

Aplicaram-se as pressões desejadas, medindo com o auxílio de uma bureta conectada ao tubo de escoamento, a quantidade de água expelida pela amostra até que o equilíbrio fosse atingido.

Atingido o equilíbrio, retirou-se a bureta, desligou-se a pressão aplicada e pesou-se cada anel rapidamente (para evitar a evaporação), colocando-os de volta na Panela de Richards, aplicando-se nova pressão. Este procedimento foi repetido para todas as pressões desejadas, até a obtenção dos valores de sucção versus umidade do solo plotados no gráfico da Figura 5.63.

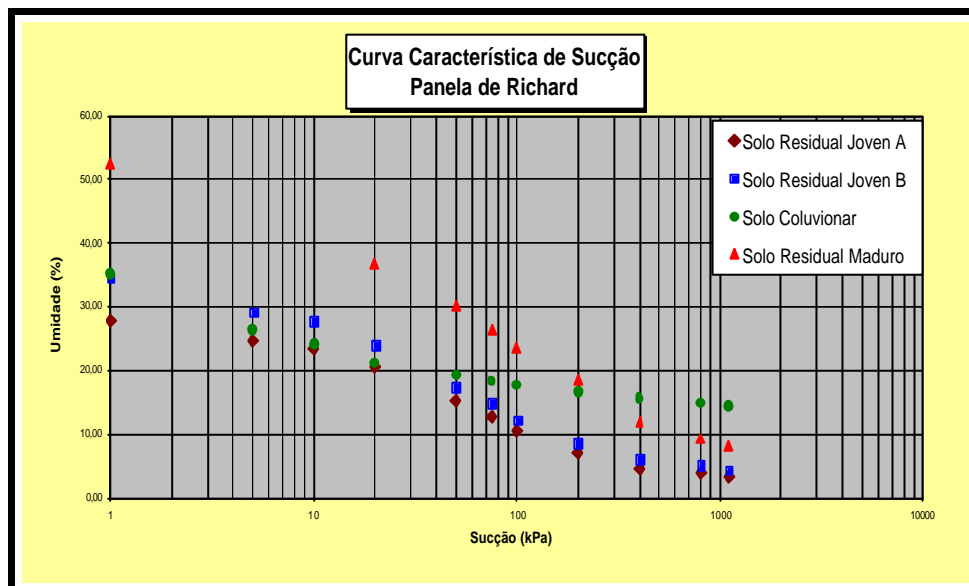


Figura 5.63 – Curva de sucção pelo método de Panela de Richards

Após a aplicação das pressões de 5 e 10 kPa, observou-se que as amostras encontravam-se bem moles, ocorrendo perda de material e deformação dos corpos de prova, não apresentando condições de serem retiradas para a pesagem por correrem risco de perda total do material.

Na pressão de 20 kPa, um dos anéis, contendo Solo Residual Maduro, sofreu perda significativa de solo, devido à retração diametral e expansão longitudinal, sendo desprezado os outros dois que também sofreram perdas, entretanto, em quantidades menores, portanto, sendo essas perdas desconsideradas.

Durante a realização do ensaio, tomou-se o cuidado de utilizar célula de placa cerâmica compatível com a pressão aplicada, como pode ser verificado na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Célula de placa cerâmica e suprimento de gás utilizado no ensaio

Pressão aplicada (kPa)	Célula de placa cerâmica (kPa)	Suprimento de gás	Dias gastos para atingir o equilíbrio
5	100	CA	2
10	100	CA	2
20	100	CA	2
50	100	CA	4
75	100	CA	8
100	100	CA	6
200	300	CA	2
400	1500	TN	9
800	1500	TN	5
1100	1500	TN	2

CA – Compressor de ar TN – Tanque de Nitrogênio

- **Análise dos Resultados pelos dois métodos**

Para uma melhor visualização e avaliação dos resultados do ensaio, estes são apresentados nas Tabelas 5.23 e 5.24 e plotados em forma de gráficos cartesianos com as curvas características de sucção obtidas segundo os dois métodos empregados (Figura 5.64).

Destaca-se para os ensaios que, quando a técnica requer uma fase de saturação preliminar dos corpos de prova, como é o caso do ensaio pelo método de Panela de Richards que parte de uma condição inicial próxima a saturação das amostras de solo, implicando em dizer que a presença de finos

nesses solos possa vir a influenciar nos resultados obtidos, pelas características inerentes desses materiais, quando da presença de água.

Tabela 5.23 – Valores obtidos pelo método do Papel Filtro

Solo Residual Jovem A		Solo Residual Jovem B		Solo Coluvionar		Solo Residual Maduro	
Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)
20,17	24,19	13,80	90,79	16,15	509,71	17,99	144,64
22,33	26,23	26,06	13,50	18,93	66,49	16,90	101,04
22,28	27,51	25,79	7,46	10,68	7531,45	20,81	158,45
20,12	27,51	28,73	7,46	3,59	7531,45	16,56	158,45
12,79	134,05	32,08	8,04	13,73	6636,33	12,46	370,35
11,37	331,56	32,55	5,70	22,67	35,12	4,56	1643,88
28,52	7,51	18,78	39,63	14,21	4539,77	22,15	69,97
28,72	8,04	18,94	18,57	12,68	7018,60	24,67	61,21
23,94	10,30	28,47	11,54	24,83	11,29	27,57	31,97
28,01	11,50	20,04	27,95	6,53	27,95	30,53	18,46
27,23	1,00	29,34	1,00			37,83	1,00

Tabela 5.24 – Valores obtidos pelo método da Panela de Richards

Solo Residual Jovem A		Solo Residual Jovem B		Solo Coluvionar		Solo Residual Maduro	
Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)	Umidade (%)	Sucção (Kpa)
27,86	1	34,54	1	35,16	1	52,58	1
24,63	5	29,25	5	26,43	5	36,81	20
23,39	10	27,78	10	24,11	10	30,18	50
20,63	20	24,03	20	21,25	20	26,43	75
15,34	50	17,33	50	19,31	50	23,44	100
12,66	75	14,92	75	18,41	75	18,64	200
10,64	100	12,26	100	17,76	100	11,99	400
7,08	200	8,60	200	16,67	200	9,33	800
4,64	400	5,98	400	15,57	400	8,11	1100
4,03	800	5,08	800	14,83	800	-	-
3,33	1100	4,37	1100	14,44	1100	-	-

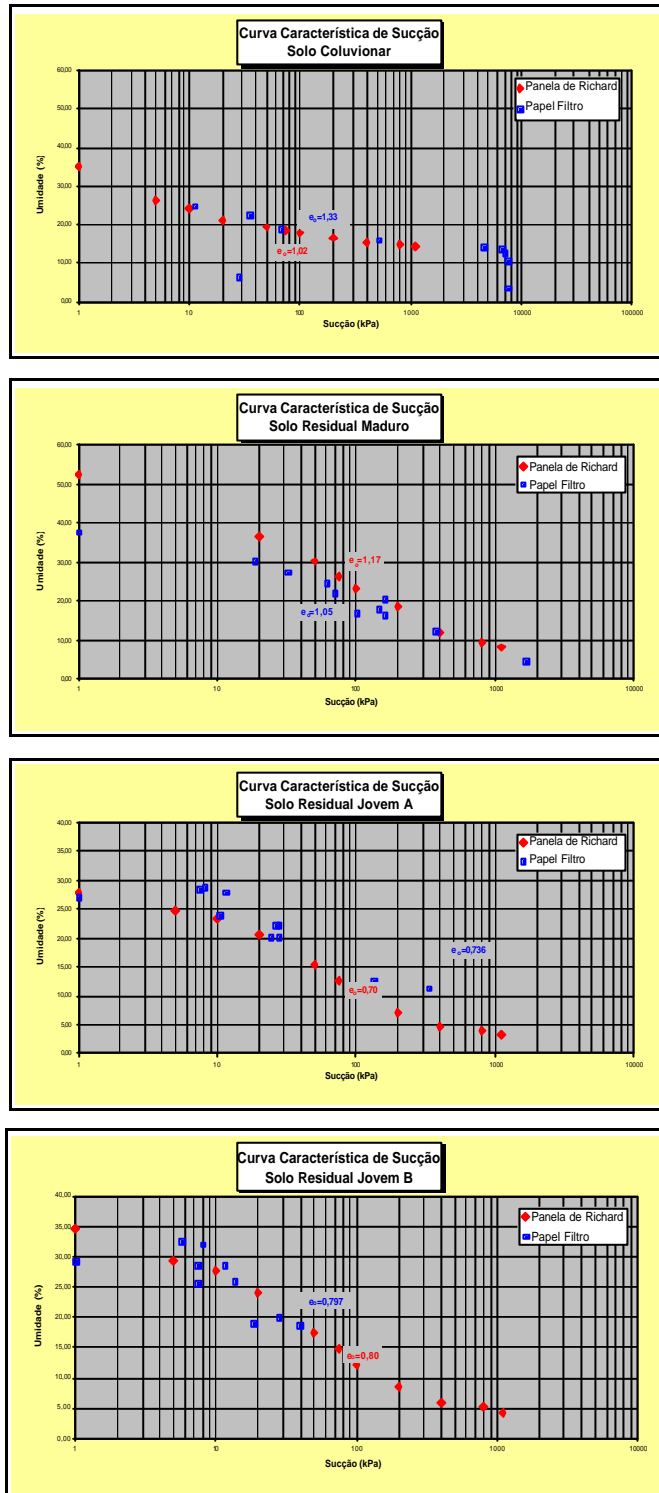


Figura 5.64 – Curvas características de sucção versus umidade, obtidas segundo os métodos de Papel Filtro e da Panela de Richards

Solo coluvionar

Dentre os solos ensaiados, o solo coluvionar é o que possui a maior fração argila em sua composição estrutural (Tabela 5.1).

Segundo Campos et al. (1992):

“solos argilosos, além das forças capilares, as forças de adsorção são parcelas significativas da sucção mátrica devido à natureza das partículas. Assim sendo, é de se esperar que quanto maior a atividade dos minerais que constituem o solo, maior seja o volume de água retida por adsorção para um determinado nível de sucção”.

Observa-se nos gráficos acima descritos, que para o solo coluvionar a variação entre as curvas obtidas pelos métodos do papel filtro e panela de Richards é pequena, não sendo observado entre elas, efeito de histerese⁹ durante a trajetória de secagem e umedecimento das amostras de solo.

A curva característica de sucção pelo método do papel filtro (umedecimento e secagem), apresenta valores superiores de sucção, quando comparada a outra curva pelo método da panela de Richards. Isto pode ser entendido pela diferença à maior do índice de vazio ou macroporosidade apresentada pelo solo, o que pode vir a contribuir para acelerar a trajetória de secagem dessa curva, fazendo com que apresente níveis de sucção elevado, próximo a 10.000 kPa, para teores de umidades médias de aproximadamente 12%, o que vem a proporcionar uma curva com tendência diferenciada das demais curvas neste trecho do gráfico.

Já para o intervalo de sucção entre 10 e 1.000 kPa, essas curvas mantêm um comportamento coerente, em função das variações da sucção com

⁹ Histerese, de acordo com Tácio et al. (1992), “tem sido verificado experimentalmente que a curva característica de sucção de uma amostra de solo é dependente da trajetória de secagem ou umedecimento seguida, ou seja, sucções diferentes podem ser esperadas caso o solo tenha aumentado ou diminuído seu grau de saturação”.

a umidade atribuída a cada ponto do ensaio. Ocorrendo somente uma discrepância entre elas, quanto a variação da sucção de 0 a 10 kPa em função da saturação dessas amostras, podendo esse fato ser atribuído a diferença entre os métodos.

Solo Residual Maduro

Para o ensaio, a amostra de solo Residual Maduro é a que apresenta um maior teor de finos, se comparada às demais amostras de solos submetidas aos mesmos métodos deste ensaio, com destaque para a fração silte presente na sua composição estrutural.

Analisando-se o gráfico pertencente ao solo Residual Maduro pode-se dizer que as curvas de sucção entre os dois métodos (panela de Richards e papel filtro) apresentam uma boa correlação para sucções acima de 300 kPa e umidades abaixo de 12%. Sendo que, para valores inferiores a estes, há um comportamento diferenciado entre elas, se comparadas, de uma forma geral, as demais curvas obtidas para os diferentes tipos de solos submetidos aos mesmos ensaios. Isto pode ser explicado pelo surgimento de planos de fraqueza e perda de solo ocorrido durante o ensaio com a utilização do método da panela de Richard, sendo esses decorrentes dos esforços de retração diametral e expansão longitudinal atuantes nas amostras, fato este constatado logo após a sucção ter atingido valores de 20kPa para uma umidade média de 37% na amostra (Figuras 5.59 e 5.62).

Não foi observado nas curvas características de sucção do solo, efeito de histerese, durante a trajetória das curvas de umedecimento e secagem pelos dois métodos.

Pelas ocorrências evidenciadas, tanto no gráfico como nas amostras, pode-se dizer que este solo pode vir a sofrer processo inicial de

desestruturação a partir de valores de sucção inferiores a 300kPa e umidades crescentes até a sua saturação.

Solo Residual Jovem A

Essa amostra de solo apresenta valores expressivos para teores de finos, com destaque para a fração silte.

As curvas características referentes aos ensaios realizados (Figura 5.64) apresentam-se de certa forma, coerentes para o intervalo de sucção entre 10 a 330 kPa. Sendo que, a partir desses limites observa-se para sucções acima de 300 kPa, somente a trajetória da curva representativa do ensaio referente à panela de Richards. Já para o outro extremo desse limite, sucções menores do que 10 kPa, onde foi observada uma pequena tendência de inversão dessas curvas em relação aos teores de umidades obtidas pelos dois métodos. Embora muito próxima esta tendência de inversão pode ser interpretada como sendo um indício de ocorrência de expansibilidade dessa amostra de solo, se comparadas com o mesmo comportamento das curvas características para o solo residual maduro, que apresentam essa tendência, porém de uma forma mais atuante, para valores abaixo de 20kPa quando submetida às mesmas condições desses ensaios (Figura 5.64).

Convém observar que, não foi apresentado pelas curvas características, efeito de histerese durante as trajetórias de umedecimento e secagem das amostras.

Mediante as observações, pode-se concluir que o solo ora ensaiado mostra-se susceptível a sofrer processos de desestruturação para valores de umidades superiores a 27% e sucções inferiores a 10 kPa.

Solo Residual Jovem B

Este solo se comparado aos demais solos submetidos aos mesmos métodos deste ensaio, é o que apresenta a menor quantidade de finos. Com ocorrência em maior proporção da fração silte em sua estrutura.

Para um melhor entendimento do comportamento da trajetória das curvas características deste solo, procurou-se dividi-las em três trechos. O primeiro refere-se ao intervalo que registra valores de sucções compreendidos entre 10 e 50 kPa com teores de umidades entre 27 e 17%, respectivamente. Onde se pode observar uma tendência de aproximação dessas curvas. Para o extremo, com sucção acima de 50 kPa, somente evidencia-se a trajetória da curva característica de sucção da panela de Richards, com valor para sucção de 1100 kPa para um teor de umidade de 4%. Já para o terceiro extremo, com sucção abaixo de 10 kPa, essas curvas tendem a se inverterm passando a trajetória da curva característica da panela de Richards a sobrepor a apresentada pelo método do papel filtro (Figura 5.64). Embora para o ensaio com o método da panela de Richards o solo parta de uma condição de umedecimento para uma condição de secagem, os ensaios com os solos envolvidos com a aplicação das duas metodologias, mostram de um modo geral, que a inversão dessas curvas para uma determinada sucção e umidade correspondente, pode ser considerada como um indício de ocorrência de processos de retração e expansibilidade, para as amostras ensaiadas.

Levando-se em conta as observações acima, pode-se concluir mais uma vez ser este solo, susceptível a sofrer processos de expansão para valores de sucções inferiores a 10 kPa, com ocorrência para teores de umidades acima de 27%, até a saturação total da amostra (sucção nula). Fato este, que provavelmente condiciona o solo a atingir o início do estado de desagregação. Evidenciado durante o processo de saturação dessa amostra de solo no ensaio com o método da panela de Richards. Cabe observar que, para o ensaio não foi

evidenciado nas curvas características efeito de histerese durante as trajetórias de umedecimento e secagem das amostras.

5.5.5. Ensaio de Resistência a Tração – Método Brasileiro

Uma das formas de se avaliar o “destacamento” das partículas de um solo é através da realização de ensaios de resistência à tração, devido a facilidade apresentada pelos solos em terem suas partículas destacadas umas das outras em função das umidades apresentadas por estes. Como a variação de umidades implica em diferentes níveis de sucção, responsável direta pela resistência do solo, optou-se por realizar este ensaio com as amostras na umidade natural, e secas ao ar.

- **Metodologia**

O ensaio consiste na aplicação de cargas de compressão em duas posições diametralmente opostas, sobre um corpo de prova cilíndrico, conforme mostrado na Figura 5.65.

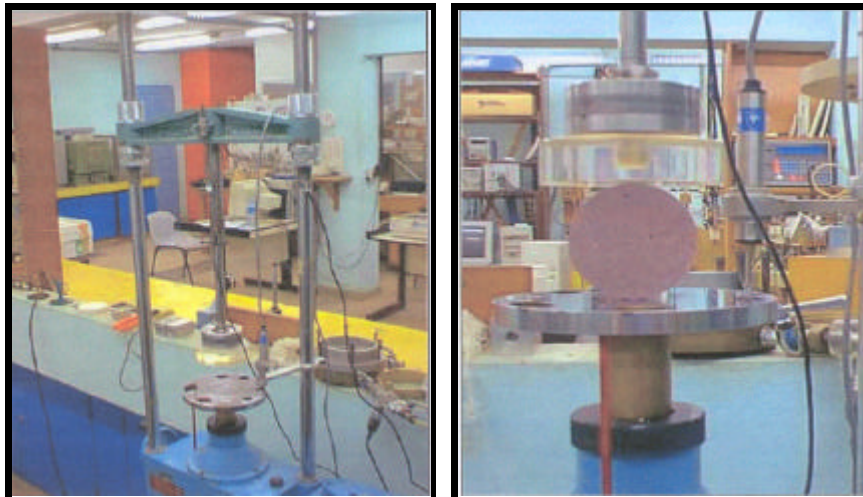
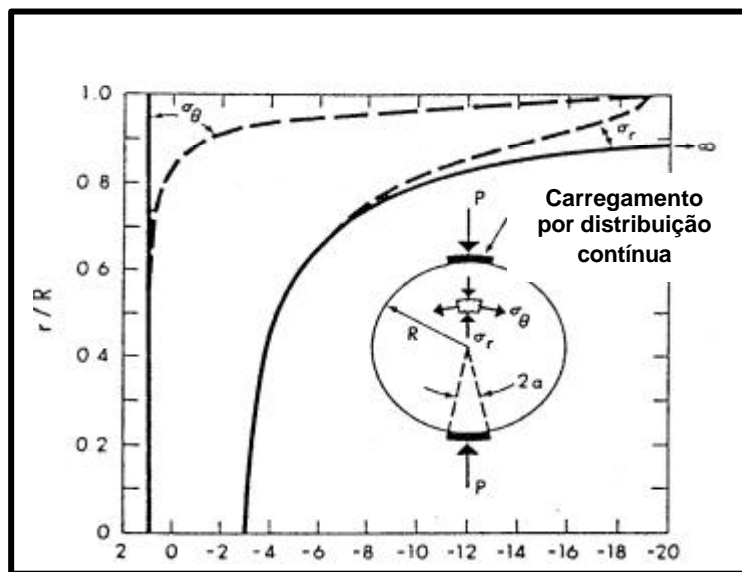


Figura 5.65 – Ensaio de tração (equipamento e ensaio em andamento)

Krishnaya e Eisenstein (1974), descrevem que o ensaio brasileiro de resistência à tração, apresenta diversas vantagens em relação a outros métodos de avaliação da resistência à tração:

- Facilidade da preparação das amostras;
- Utilização de equipamento similar ao ensaio de compressão simples;
- Ruptura relativamente insensível às condições de superfície e planos de compactação da amostra, iniciada em uma região de tensões de tração, relativamente uniformes (Figura 5.66).



---- Solução por carregamento distribuído continuamente (Fracht, 1957)
 — Solução por carregamento pontual (Hondros, 1959)

Figura 5.66 - Soluções teóricas das tensões ao longo do diâmetro vertical de uma amostra de solo submetida a compressão diametral

Teoricamente, o ensaio de compressão diametral é executado em corpos de prova cilíndricos, ao longo dos eixos verticais de simetria, que passa pelos pontos de aplicação da carga, e na direção normal a esse eixo, na qual a tensão exercida é a de tração e considerada constante, sendo dada por:

$$s_t = 2P / p \quad hd \quad (7)$$

Onde P é considerado como a carga máxima de compressão diametral, uniformemente distribuída ao longo da geratriz do corpo de prova, sendo h e d, respectivamente, a altura e o diâmetro inicial da amostra de solo.

Krishnayya e Eisenstein (1974), descrevem que a relação acima representada pela equação (7), “não é rigorosamente adequada para materiais que apresentam diferentes módulos de elasticidade na compressão e na tração, como é o caso de solos”. Portanto, sendo o objetivo principal deste trabalho qualitativo, de forma a relacionar os resultados encontrados para os diferentes tipos de solos com seus comportamentos à erosão observada em campo, optou-se pelo uso desta metodologia.

Assim sendo, para os ensaios realizados no laboratório de solos da PUC - Rio, foram adotados os mesmos procedimentos utilizados por Maciel (1991). Portanto, utilizaram-se amostras de solos com 7,15 cm de diâmetro por 2,0 cm de espessura, levadas a ruptura nas umidades natural e seca ao ar.

Este ensaio, com velocidade de carregamento igual a: 0,2 mm/ min, possibilitou a obtenção da carga máxima de compressão “P” através da curva de calibração da célula de carga com a placa acrílica e o equipamento de leitura, até o rompimento da amostra.

- **Análise dos Resultados**

Esta análise objetiva avaliar o comportamento mecânico dos solos estudados, estabelecendo-se de certa forma, uma correlação entre a resistência à tração do solo versus o seu deslocamento diametral, levando-se em conta a sua umidade e o grau de saturação das amostras, estando esses valores representados nas Tabelas 5.25 e 5.26 e gráficos constantes da Figura 5.67.

Tabela 5.25 – Amostra de solo na umidade natural

Amostra	γ_s (g/cm ³)	g_{topo} (kN/m ³)	e_o	S (%)	w_i (%)	w_f (%)	Resistência a Tração (kPa)
SNE	2,7805	17,88	0,8	63,3	18,29	17,79	1,4
Colúvio	2,7051	11,77	1,57	24,4	14,22	13,7	9,0
SRM	2,7476	15,62	1,09	53,4	21,15	19,36	23,5
SRJB	2,7214	19,06	0,72	86,9	23,09	24,39	19,5
SRJA	2,7506	18,82	0,77	83,9	23,44	21,73	20

Tabela 5.26 – Amostra de solo seca ao ar

Amostra	γ_s (g/cm ³)	g_{topo} (kN/m ³)	e_o	S (%)	w_i (%)	w_f (%)	Resistência a Tração (kPa)
SNE	2,7805	14,81	0,87	5,3	19,68	1,68	12,8
Colúvio	2,7051	9,66	1,78	2,0	14,4	1,33	2,5
SRM	2,7476	13,23	1,05	2,4	19,92	0,91	37,8
SRJB	2,7214	15,01	0,79	1,5	24,53	0,43	24,0
SRJA	2,7506	14,9	0,82	2,0	26,97	0,60	10,0

Uma análise desses resultados pode ser feita comparando-se os valores de resistência a tração (s_t), com amostras na umidade natural e seca ao ar.

Dessa forma, verifica-se nas tabelas acima que para o ensaio com amostras na umidade natural quando comparadas às condições das amostras na umidade seca ao ar, não se observa mudanças significativas referentes aos índices de vazios, porém, como já era esperado, verifica-se um decréscimo desses valores relativos aos outros índices físicos apresentados nas tabelas acima.

Para o ensaio, com as amostras de solos secas ao ar, foram observados valores elevados de resistência à tração para os solos Residual Maduro e Jovem-B, tendo sido verificada essa ocorrência, em menor escala, no solo laterítico (SNE). Para os solos Coluvionar e Residual Jovem-A, observa-se um

decréscimo desses valores, provavelmente atribuído à perda de água intersticial na microestrutura desses solos.

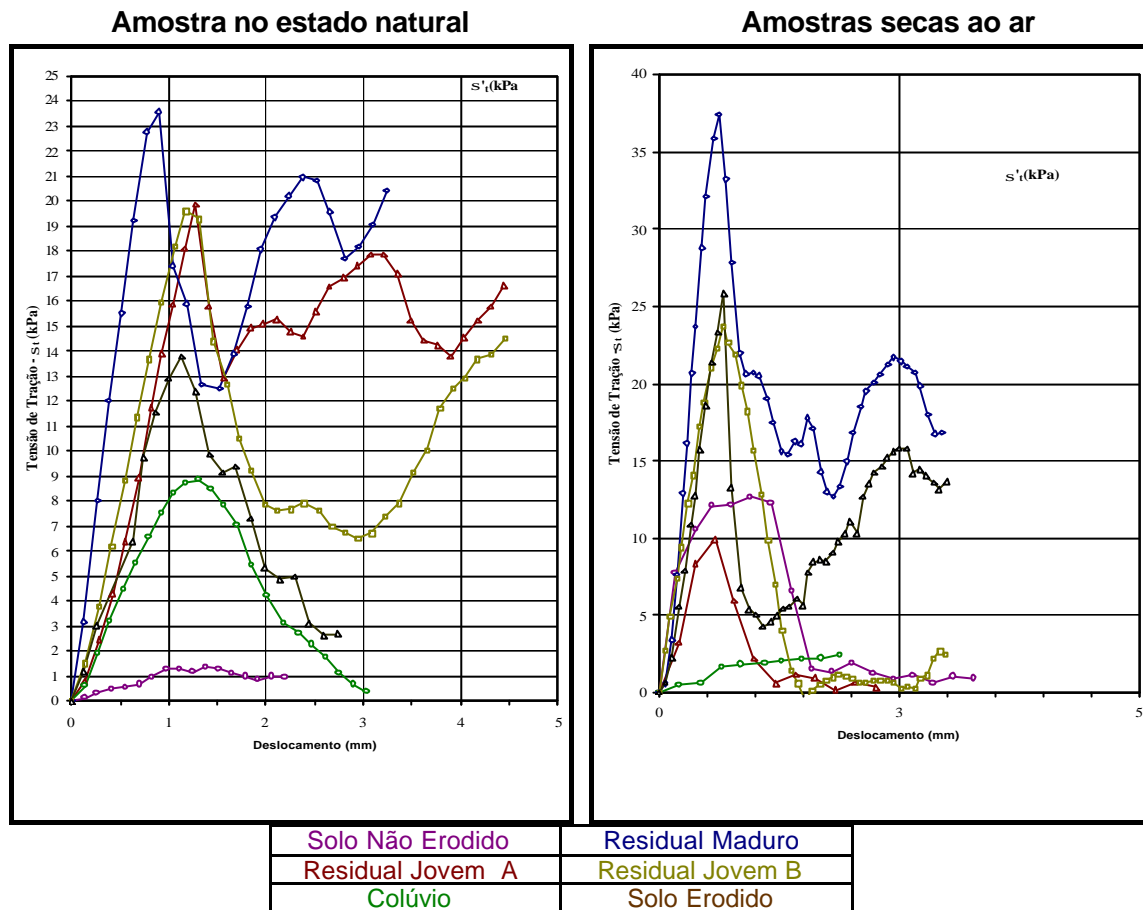


Figura 5.67 – Representação gráfica das amostras natural e seca ao ar

Os valores elevados podem ser justificados pela predominância de componentes cimentantes na microestrutura desses solos, cujas componentes das forças resistentes a esforços de tração, aumentam a medida em que o processo de secagem desses solos evolui. Sugere-se assim, uma maior investigação na ocorrência desse fenômeno em pesquisas futuras.

6

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para o caso estudado (Erosão 1), procurou-se estabelecer de certa forma, uma correlação entre o comportamento físico-químico dos solos, submetidos aos diversos tipos de ensaios apresentados nesta dissertação.

Em decorrência, passa-se a comentar resumidamente os resultados dos ensaios realizados, objetivando correlacioná-los com os processos erosivos existentes na região de estudo.

Os resultados das análises laboratoriais relativas ao ensaio de caracterização física dos solos foram conclusivos em mostrar que o solo Residual Maduro e Residual Jovem-A apresentaram uma tendência definida de comportamento a ocorrência de processos erosivos, devido principalmente, a valores elevados dos índices de vazios e das frações de silte presentes nestes solos.

Já para o solo Coluvionar, essa tendência não se aplica, devido ao elevado valor da fração argila encontrada neste solo, que embora tenha apresentado valor alto para índice de vazios e $I_a < 0,75$, apresentou nos ensaios químico e de caracterização mineralógica, elemento cimentante na sua micro-estrutura (óxido de ferro).

O solo Residual Jovem-B apresentou decréscimo em seus índices de vazio e de plasticidade, conservando em sua estrutura uma pequena porção da fração argila, com presença de illita e caulinita como

minerais dominantes. Características essas, que juntas as observações de campo, confirma uma maior resistência desse solo a processos erosivos.

O ensaio de dispersibilidade, Crumb Test, a que os solos foram submetidos, não apresentou uma boa correlação entre os demais ensaios realizados e as observações de campo. Sendo obtida para o solo Coluvionar a classificação de não dispersivo, para o solo Residual Maduro de fraca reação a dispersibilidade e para os solos Residuais Jovem A e B de moderada reação a dispersibilidade.

Uma comparação para confirmação da classificação apresentada pelo ensaio de dispersibilidade foi por intermédio da equação proposta por Volk (1937), utilizando-se para tal, os valores dos resultados obtidos através do ensaio sedimentométrico comparativo (SCS), que atribuiu para o solo Residual Jovem A, dispersibilidade alta e para os demais solos resultados nulos, classificando-os como não dispersivos.

Portanto, em uma análise geral, pode-se dizer mais uma vez que não há uma correlação aceitável entre as classificações apresentadas pelo ensaio de dispersibilidade e a equação proposta por Volk (1937), em razão de tratar-se de solos siltosos e não argilosos, conforme comprovado pelo ensaio sedimentométrico comparativo.

Uma proposta mais realista seria utilizar o somatório dos valores de finos que passaria a classificar esses solos da seguinte forma: solos Residual Maduro e Jovem A, como sendo de dispersibilidade muito alta. Enquanto que para os solos Coluvionar e Residual Jovem B, seriam classificadas como solos de baixa dispersibilidade.

Sendo esta última proposta mais compatível com os resultados dos demais ensaios apresentados neste trabalho, que comprova o grau de

dispersibilidade desses solos, de acordo com a sua gênese, a sofrerem maior ou menor influência do meio físico-químico quanto a processos erosivos.

Os ensaios de desagregação e de Inderbitzen foram os que melhores correlações apresentaram entre si em termos de classificação para os solos estudados, quanto a sofrerem uma maior ou menor influência a processos erosivos. Sendo obtidos resultados semelhantes para a mesma gênese dos solos ensaiados proporcionaram uma classificação crescente quanto ao grau de erodibilidade, na seguinte ordem: solos Coluvionar, Residual Jovem-B, Residual Jovem-A e Residual Maduro.

Para dirimir possíveis dúvidas quanto à resistência a fluxos atuantes sobre uma camada de solo laterítico, presente sobre toda a área estudada desprovida de cobertura vegetal, achou-se por bem submeter o solo ao ensaio de Inderbitzen, o qual apresentou resultado muito próximo ao do solo coluvionar.

Os resultados do ensaio de Pinhole Test foram obtidos mediante a utilização de duas metodologias, para amostras amolgadas e indeformadas. Não será aqui comentado o método referente ao primeiro ensaio, por ser o segundo o que melhor resultado apresentou, atribuindo aos solos a seguinte classificação: solo Coluvionar (incipientemente dispersivo); solo Residual Maduro (dispersivo); solos Residual Jovem-A e B (não dispersivos).

Cabe ressaltar que o solo Residual Jovem-A apresentou expansibilidade numa faixa de carga e recarga, fato esse que pode ser observado na Figura 5.33, conferindo a este solo uma maior tendência a sofrer dispersibilidade. Portanto, observa-se para este ensaio uma boa correlação com o ensaio de Inderbitzen e desagregação dos solos.

A análise química do solo e da água intersticial, mostra para soma de cátions valores muito baixos, o que indica tratar-se de solos muito lixiviados, ácidos, etc., para os valores de pH apresentados.

Para os solos Coluvionar e Não Erodido, os valores de K_f mostram que a fração argila tem como componentes químicos, em sua estrutura, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, (Fe_2O_3) e (Al_2O_3), sendo os valores atribuídos a esses índices químicos, típicos de solo laterítico.

Para o ensaio de caracterização mineralógica por difração de raios-X, foram consideradas as frações silte mais argila pela semelhança entre os seus componentes, sendo ambas ricas em mica e ilita.

Os solos Coluvionar, Residual Maduro, Residual Jovem-A e B e o solo Não Erodido, apresentaram em suas frações granulométricas a ilita e caulinita, como minerais principais. Já o solo Erodido, apresentou como minerais dominantes a mica e o quartzo.

A classificação de campo é morfológica e, portanto limitada, que pode ser retificada ou ratificada pelos ensaios de laboratório e observações minuciosas à camada mais interna de uma determinada amostra de solo.

Dessa forma, contrariando a classificação de campo obtida através do ensaio penetrométrico (SPT) e observação visual dos solos estudados, as análises química e mineralógica indicaram para o solo Residual Maduro a classificação de solo Residual, devendo ser excluída a denominação madura em função dos minerais presentes em sua estrutura, confirmadas por uma análise tátil-visual na camada mais interna da amostra deste solo.

Os ensaios de compactação e de perda de massa de solo por imersão MCT (Mini-MCV), apresentam para os solos ensaiados os seguintes resultados, comentados a seguir:

Entre os solos analisados o solo Coluvionar foi o que apresentou o menor valor de perda de massa por imersão, ($P_i = 34\%$), sendo este classificado como solo laterítico de textura argilo-arenoso a areno - siltoso, com boa resistência a perda de massa por imersão. Estando este resultado condizente com os padrões de classificação para solos lateríticos, que apresentam uma maior resistência a processos erosivos. Outros ensaios como os de Inderbitzen, desagregação, análise química e mineralógica dos solos, juntos confirmam as características de resistência apresentadas por este solo.

Os demais solos receberam a classificação de não-lateríticos, com textura siltosa, tendo sido atribuído a eles elevada perda de massa de solo por imersão. Resultado este confirmado pelo ensaio de desagregação somente para os solos Residual Maduro e Jovem-A. Sendo para o solo Residual Jovem B, notado apenas uma pequena desagregação em sua base.

Para os ensaios de curvas características utilizando-se os métodos do papel filtro e da panela de Richards, o solo Coluvionar quando submetido ao ensaio pelo método do papel filtro foi o que apresentou valor máximo para sucção de 7531 kPa, sendo este proporcional a um valor médio de umidade de solo igual a 7%. Atribui-se essa característica ao solo ensaiado, devido às propriedades físico-químicas e mineralógicas presentes na sua fração argila.

O solo Residual Maduro apresentou planos de fraqueza e perda de massa de solo, logo após ser submetido à sucção de 20kPa para uma umidade média de 37%, tendo as trajetórias das curvas de sucção

apresentadas pelos dois métodos, uma boa correlação para sucções acima de 300kPa e umidades abaixo de 12%.

Em geral, os valores máximos obtidos pelo método do papel filtro relativos aos solos Residuais Jovem-A e B, são considerados baixos. Provavelmente por apresentarem no ensaio de caracterização física, uma menor microporosidade em relação aos demais solos estudados.

Para o ensaio de compressão diametral, procurou-se avaliar os solos, quanto a esforços de tração atuantes devido a um carregamento distribuído continuamente, sobre uma seção diametral das amostras representativas desses solos. Foi observada durante o ensaio, uma maior ou menor resistência das partículas componentes da estrutura dos solos a esforços de tração, mediante a análise dos resultados os quais passa-se a comentar.

Constata-se nas tabelas 5.25 e 5.26, que não houve mudanças significativas nos índices físicos desses solos, a não ser para os valores de umidades como já era esperado.

As resistências à tração tanto para os ensaios com amostras de solo natural quanto para amostras de solos secas ao ar, apresentaram valores elevados para o solo Residual Maduro, Jovem-B e Laterítico (SNE), que ainda mostraram ser maior para as amostras secas ao ar. Já para os solos residuais Jovem-A e Coluvionar houve uma queda entre esses valores, provavelmente por apresentarem maior perda de água intersticial em sua estrutura.

Uma complementação ao ensaio está em andamento no laboratório de solos da PUC-Rio, onde se pretende obter resultados mais expressivos, associando-se os valores de sucção desses solos aos de resistência à tração, para futuras pesquisas.

7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

- **Definição do Mecanismo de Erosão atuante**

Para um melhor entendimento da evolução desses processos erosivos, foram apresentados no início desta dissertação modelos representativos dessas ocorrências, com vistas a associá-los as condições antrópicas registradas na área de estudo; remoção da camada de solo argiloso com aproximadamente 5,0 metros de espessura para a construção de barragem de terra homogênea da UHE de Itumbiara, que resultou na remoção da cobertura vegetal da área, expondo o solo a intenso processo de intemperismo, decorrente de uma presença mais dinâmica, dos ciclos hidrológicos atuantes na região, que contribuíram de forma direta para o desenvolvimento acelerado desses processos erosivos.

Como já citado, a área atingida direta e indiretamente por essa erosão, totaliza aproximadamente 70 hectares, sendo 10 hectares degradados por erosões de forma lineares como sulcos, ravinas e voçorocas, ficando os 60 hectares restantes, desprovidos de cobertura vegetal, sujeitos a gênese à evolução de erosões laminares.

Conclui-se que o processo erosivo para o caso estudado (Erosão 1), foi originado principalmente por fluxos de águas superficiais provenientes de precipitações pluviométricas durante o período de recorrência de 23 anos, conforme constatado nos gráficos representativos desses eventos, figuras 3.3 a 3.4, com alguma contribuição das águas de sub-superfícies, responsáveis de certa forma pelo aumento das solicitações nas bases das

paredes desta erosão, devido ao avanço em profundidade de uma frente de umedecimento, decorrente da presença do lençol freático, com variações durante os períodos de chuvas, figuras 4.11 e 4.12, ocasionando de certa forma uma diminuição da coesão aparente do solo e conseqüentemente da sua resistência.

Outro fator que vem a contribuir para a instabilidade e erodibilidade do solo, diz respeito à declividade local que associada a gênese de um solo não saturado, com características que favorecem a percolação de fluxo de água superficial de forma a desestruturar as partículas sólidas que compõem o seu esqueleto, originando assim, processos erosivos em forma de sulcos, ravinas e voçorocas, levando a área a um estado de desequilíbrio ambiental, em função principalmente do destacamento e deslocamento de grande quantidade de partículas sólidas, que contribui para o assoreamento de recursos hídricos e áreas onde a topografia contempla regiões mais baixas. Descaracterizando assim, a geomorfologia local ao longo dos anos, como exemplo do caso estudado deve-se destacar a lagoa assoreada situada à jusante da Erosão 1 (Figura 3.2).

Com base no diagnóstico sobre a área de empréstimo estudada, define-se a geometria das feições erosivas ali existentes, através das observações de campo em conformidade com a base de dados do levantamento topográfico e hidro-geológicos, apresentados neste trabalho, como sendo de forma linear, com desenvolvimento principal de mecanismos de erosão de cabeceira ativa, devido a grande intensidade fluxos superficiais direcionados pelas declividades locais apresentadas, provenientes de água de chuvas e da surgência do lençol freático no interior das voçorocas, com variações de ocorrência de até 13 metros de profundidade, que vem a contribuir de certa forma, para a aceleração do intemperismo das camadas dos solos de base, proporcionando nestes, em menor escala, a desenvolverem processos erosivos em épocas distintas.

- **Proposta de Alternativa de Solução para o Problema**

Um amplo trabalho de pesquisa de campo e laboratório, associados a estudos realizados pelo autor com base nos dados disponibilizados por Furnas e de pesquisas bibliográficas, permitiram que fossem levantados dados geológico - geotécnicos necessários à definição de propostas de soluções mais adequada para mitigarem ou mesmo eliminarem os impactos causados pela degradação ambiental atuante sobre a área de estudo.

Próximo e ao longo das paredes dessas fossas erosivas, com destaque para o caso estudado-Erosão 1, o lençol freático possibilita um estado de umedecimento das camadas de solos mais profundas, quais sejam: solo Residual Jovem A e B, devido a surgência de uma franja capilar ao longo do perfil destes solos.

Pelo modelo apresentado na Figura 4.14, pode-se atribuir um avanço médio do mecanismo da voçoroca estudada, como sendo da ordem de 30 metros por ano. O que pode ser considerado como um parâmetro de medida para fins de estudo de análise de estabilidade de risco para projeções futuras.

Como propostas de alternativas para a solução do problema a ser alcançada propõe-se à utilização preferencial de técnicas que ofereçam a melhor relação custo benefício, com a garantia de resultados efetivos, e que possibilite menores impactos ao meio ambiente, as quais passase a descrever.

Uma das soluções poderá ser através da aplicação de técnicas de bioengenharia localizadas, recomendada para os pontos onde a ocorrência de movimentação maciça de solo se fará necessária para obras de estabilização.

É de grande importância para o sucesso do projeto, a implantação de medidas mitigadoras e corretivas por intermédio de soluções bem definidas, através de sistemas de drenagens superficiais e subterrâneas, estabilização de taludes considerados críticos (pelos condicionantes geológico - geotécnicos local) quanto a deslizamentos futuros, preparo do solo e recomposição da camada vegetal, dentre outras.

A primeira fase do projeto deverá estar voltada para proteção do interior das erosões, mediante a implantação de um sistema de drenagens de superfície que deverá ser composto por terraços, canaletas verdes e revestidas de concreto, com seções geométricas e declividades a serem definidas pela topografia.

Para uma segunda etapa, sugere-se um sistema de drenagem subterrânea, cujo material empregado deverá possuir coeficiente de permeabilidade compatível com a maior vazão média medida, sendo esse recoberto por camada selante de baixa permeabilidade (material argiloso, devendo ser obtido para esse um grau de compactação = 95% e desvio de umidade de ± 2 % em relação ao Proctor Normal).

Para a terceira fase do projeto, sugere-se a execução de diques com um sistema de drenagem dupla, onde se possa garantir, uma condição de permeabilidade local independente da retenção de sedimentos no interior das fossas erosivas, com seções e dimensões a serem definidas no projeto. Devendo estes, serem localizados em pontos pré -estabelecidos, seguindo a essa etapa, um plano de remodelamento mecânico das áreas afetadas por mecanismos de erosão, sendo os critérios de cortes e aterros estabelecidos no projeto.

Concluindo-se, deverá ser executado um projeto de revegetação para as áreas planas e semiplanas, desprovidas de cobertura vegetal, no interior e ao longo de todas as feições erosivas, devendo antes, serem essas precedidas de trabalhos relativos à restituição das propriedades físicas e químicas do solo. Como continuidade a essa fase, sugere-se uma complementação à instrumentação existente, com vistas ao estudo do comportamento das águas subterrâneas e superficiais em função da tendência de estabilidade dessas erosões, gerando com isso um modelo de avaliação e desempenho do projeto como um todo, proporcionando dessa forma a sua adaptação em outras áreas.

- **Sugestões para Pesquisas Futuras**

A intenção inicial da escolha desse tema, direcionado para o estudo de processos erosivos na UHE de Itumbiara - GO, era propor uma nova metodologia denominada Análise de Regressão Temporal, com a qual seria possível diagnosticar de uma forma ampla e objetiva o surgimento de feições erosivas de naturezas diferenciadas.

Para isso, faz-se necessário uma continuidade desse estudo, com ênfase em um programa de desenvolvimento científico nas áreas de avaliação e monitoramento da degradação ambiental em ocorrência na região. Essa nova proposta de metodologia consiste na elaboração e execução de duas etapas de estudos, a saber:

A primeira direcionada para apoio de campo na área de cartografia, com o seguinte escopo de trabalho: execução dos serviços de cobertura aerofotogramétrica; apoio terrestre; aerotriangulação analítica ; interpretação do uso do solo e restituições;

A segunda, no campo experimental, apoiada por uma base cartográfica sólida, visa o aprofundamento dos estudos geológico - geotécnicos com vistas à caracterização dos mecanismos de erosão existentes, onde propõem -se um amplo sistema de instrumentação de campo e ensaios de laboratórios, auxiliados por uso de programas de interação de modelagens numéricas em 3D, existentes ou a serem desenvolvidos para estudos dessa natureza, com vistas à avaliações futuras de riscos e de soluções de remediações, para as áreas de abrangência das usinas de Furnas, dentre outras.

Dentro dessa linha de estudo, sugere-se também a automação do ensaio de Inderbitzen, visando um maior rigor e interação com os dados obtidos, procurando-se estabelecer de certa forma, uma correlação bem próxima das ocorrências erosivas vivenciadas no campo, por fluxo atuante, devendo ser adaptado a esse novo modelo, um sistema para extração de amostras indeformadas no campo.

Faz-se necessário para a primeira etapa dessa proposta, um breve resumo, por se tratar de assunto específico da área de cartografia, com enfoque para os principais itens.

- **Cobertura Aerofotogramétrica**

Deverá ser utilizado nos vôos, filme colorido em duas escalas distintas, a saber: um vôo em escala 1:8000 de área e outros dois em escala 1:4000, cobrindo as áreas erodidas, de acordo com plano de estudo para vôo, a ser detalhado. Quanto ao vôo na escala 1:8000, deverá ser realizado na área total do polígono definido para o estudo, no sentido Norte-Sul, sendo representado por duas faixas de vôos paralelos, com recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 30%. O outro vôo na escala 1:4000 deverá

ser direcionado no local mais específico das erosões, devendo ser realizado em dois sentidos, com recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 70%.

- **Apoio Terrestre e Aerotriangulação Analítica**

Para esses serviços, deverão ser implantados marcos de concreto, visando não só a pré-sinalização para o vôo como também o monitoramento dessas áreas, a partir da rede de 1ª ordem de nivelamento do IBGE, permitindo a geração de ortofotos em escala 1:500 e 1:2000, a partir dos vôos nas escalas 1:4000 e 1:8000 respectivamente.

As ortofotos deverão ser produzidas na escala de 1:2000 para toda área, com curvas de nível com equidistâncias vertical de 1(um) metro, sendo na área de cobertura de cada erosão, essas ortofotos produzidas na escala 1:500, com curvas de nível com equidistâncias vertical de 0.50 m.

Esse apoio deverá ser realizado a partir de pontos pré-estabelecidos, sendo suas coordenadas e cotas determinadas por rastreamento de satélites GPS, diferencial pós-processado. Considerando também que a modelagem do terreno, deverá ser referenciada ao Datum planimétrico SAD - 69 e o altimétrico ao Marégrafo de Imbituba - SC, sendo que no mapeamento na escala 1:500 as altitudes deverão ser determinadas por nivelamento geométrico com precisão de 2ª ordem, encaixando todos os marcos anteriormente implantados.

- **Interpretação do uso do solo**

Para a área específica de estudo, UHE de Itumbiara-GO, a interpretação do uso do solo deverá ser feita a partir de imagens dos satélites LANDSAT M - 5 e LANDSAT M - 7, com resolução geométrica de 30

e 15 metros, respectivamente, em períodos e épocas com intervalos de 5 anos a partir de 1980, mais especificamente: 1980, 1985, 1990, 1995 e 2001.

Para cada ano, serão utilizadas duas cenas, uma no período seco e outra no período chuvoso, devendo o mapeamento do uso do solo ser elaborado com intervalos de tempo regulares, de forma a permitir o acompanhamento da evolução do processo erosivo, bem como, de auxiliar na identificação de seus agentes causais.

Este monitoramento, quando acrescido de momentos sazonais distintos (período seco e período chuvoso), contribui enormemente para a análise das áreas fragilizadas, uma vez que o comportamento de fatores tais como: vegetação, agricultura, entre outros, é bastante distinto nessas duas épocas do ano.

Para o estudo, será necessário o mapeamento de 8 (oito) cenas, ortofotos na escala 1:4000 e 1:8000, considerando-se as cenas no momento presente, resultando na totalização de 10 (dez) mapas de uso do solo em diferentes momentos.

- **Restituições**

Quanto às restituições, deverão ser obtidas em 3(três) níveis distintos, quais sejam:

Restituição planimétrica digital - será realizada na escala 1:2000 e 1:500 com suas coordenadas referenciadas ao sistema Geodésico Brasileiro (Datum SAD-69 e referenciada ao marégrafo de Imbituba - SC) e sistema métrico UTM.

Restituição Planimétrica – deverá ser restituída, em níveis individualizados, os rios, as estradas, caminhos, limites de propriedades e acidentes geográficos.

Restituição Altimétrica - Os elementos altimétricos deverão ser referenciados a 3D, e a equidistância da curva de nível deverá ser de 1m, para ambas as escalas do mapeamento, a ser realizado em aparelhos de 1ª ordem.

Cabe destacar que, esta dissertação não pretende esgotar o tema em si, até mesmo, pela dimensão do tema proposto e pelas condições regionais, assim como, as peculiaridades e características geológica-geotécnicas a que estão sujeitos esses mecanismos de erosão. Espera-se, no entanto, que o tema desenvolvido tenha atingido o seu pleno objetivo e que seja dado prosseguimento às propostas sugeridas na fase conclusiva deste trabalho.

Como finalização ressalta-se que tamanha a importância desse tema, que já foi encaminhado um projeto neste sentido, com parcerias entre Furnas e PUC-RJ, para análise e parecer junto a ANEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) / CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Órgãos a fins.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR's 2887/1988, 6457/1986, 6459/1984, 6508/1984, 6502/1996, 7180/1984 e 7181/1984.** Rio de Janeiro.

BASTOS, C. A. B., MILITITSKY, J & DIAS, R. D., **Avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais da região metropolitana de Porto Alegre.** VI Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE. Presidente Prudente, SP, 1998.

BATISTA, G.M.M., **Diagnóstico Ambiental da Pedra Laminar de Solos do Distrito Federal por meio de geoprocessamento.** Dissertação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 112p., UnB, Brasília, DF, 1997.

BERRY, L., **Some erosional features due to piping and subsurface wash with special reference to the Sudan.** Geografiska Annaler, v. 52-A, p. 113-119, 1970.

BERTONI, J. & NETO, F., **Conservação dos Solos.** Livroceres, São Paulo, 1985.

BIGARELLA, J. J. & MAZUCHOWSKI, J. Z., **Visão integrada da problemática da erosão.** ABGE, Paraná, 1985.

BOARDMAN, J., **Soil Erosion at Auborne.** West Sussex, Applied Geography, v.3, p. 317-329, England, 1983.

BOARDMAN, J. & ROBINSON, D. A., **Soil Erosion**. Applied Geography, v.5, p. 243-258, 1985.

BRADY, N. C., **Natureza e propriedades dos solos**. 7 ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BRYAN, R. B., **The efficiency of aggregation indices in the comparison of some English and Canadian soils**. Journal Soil Science, v. 22, p. 166-178, 1971.

BRYAN, R. B., **Knickpoint evolution in rillwash**. Catena Supplement, 17, 111-132, 1990.

CADUJO, M. P., **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 3 ed., Rev. Rio de Janeiro, 1983.

CAMARGO, O. A. de., **Aeração**. In: MONIZ, A. C. (Coord.) Elementos de Pedologia. Ed. Livros Técnicos e Científicos, p.85-90, Rio de Janeiro, 1975.

CAMPOS, T. M. P. de., **Determinação da curva característica de sucção em laboratório**. I Conferência Brasileira sobre Estabilidade em Encostas – COBRAE. Rio de Janeiro, 1992.

CAMPOS, T.M.P. de. & VARGAS Jr., E. A ., Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados V.2 – Ñ SAT'97, p.21-25, Rio de Janeiro, Abril de 1997.

CARTA DE SOLOS., **Levantamentos gráficos do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itumbiara**, 1976.

CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S. & MONTGOMERY-SMITH, G., **A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings**. Proc. Of the Institute of Civil Engineering, 92, n. 2, 1992.

CHAVES, H.M.L., **Aplicação de modelos na previsão de erosão**. V Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, p. 48-54, Bauru, SP, 1995.

COZZOLINO, V. M. N., NOGAMI, J. S., **Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. Solos e rochas**. Revista Brasileira de Geotecnia. ABMS/ABGE, v. 16(2): 77-91, 1993.

CUNHA, S. B. & GUERRA, A. J. T., **Degradação Ambiental**. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (Orgs.) Geomorfologia e Meio Ambiente. Ed. Bertrand Brasil, p.337-379, Rio de Janeiro, 1999.

DAEE/IPI., **Controle de Erosão**. Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, 1990.

DEER, W. A., HOWLE, R. A. & ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas – uma introdução**. Fundação Calouste Gulbenkan. Lisboa, 1981.

DE PLOEY, J. POESEN, J., **Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. Geomorphology and Soils**. Ed. George Allen & Unwin, p. 99-120, London, 1985.

ELLISON, W. D., **Studies of raindrops erosion**. Agricultural Engineering, v. 28, p.45-146, 1963.

ELLISON, W. D., **Estudios sobre erosion del suelo**. INTA Serie Informes Técnicos n. 62, Buenos Aires, 1963.

ELWELL, H. A. & STOCKING, M. A., **Rainfall parameters for soil loss estimation in a subtropical climate**. Journal of Agricultural Engineering Research, v.18, p.169-177, 1973.

EVANS, R., **Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint** John Wiley and Sons Ltda., Cambridge, 1980.

EVANS, R., **Water erosion in British Farmer's fields: some causes, impacts, predictions**. Progress in Physical Geography, v. 14, n.2, p. 199-219, 1990.

FÁCIO, J.A., **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. UnB, Brasília, DF, 1991.

FARMER, E. E., **Relative detachability of soil particles**. Soil Science Society American Proceedings. v. 37, p. 243-254, 1978.

FARRES, P., **The role of time and aggregate size in the crusting process**. Earth Surface Process, p. 243-254, 1978.

FASSBENDER, H. W., **Química de suelos: com énfasis em suelos de América Latina**. IICA: Costa Rica, 1984.

FONSECA, A. M. C. C. C. & FERREIRA, C. M. S., **Metodologia para determinação de um índice de rodibilidade de solos**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em engenharia. COPPE/UFRJ, CNPq, ABMS., p. 646-667, Rio de Janeiro, 1981.

FONTES, L. E. F., FONTES, M. P. F., **Glossário de Ciência do Solo**. UFV/DS, Viçosa, MG, 1992.

GIDIGASU, M. D., **Laterite soil engineering**. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1976.

GOVERS, G. & RAUWS, G., **Transporting capacity overland flow on plane and on irregular beds**. Earth Surface Processes and Landforms, v.11, p.515-524, 1986.

GRAY, D. H. & LEISER, A. T., **Soil Erosion and Mass-Movement**. In: **Biotechnical Slope Protection and Erosion Control**. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1989.

GREELAND, D. J. RIMMER, D. e PAYNE, D., **Determination of the structural stability class of English and Welsh soils using a water coherence test**. Journal of Soil Science, 26, 294-303, 1975.

GRIM, R. E., **Applied Clay Minerology**. McGraw Hill Book Company, New York, 1962.

GUERRA, A. J. T., **Avaliação da influência das propriedades do solo na erosão, com base em experimentos utilizando um Simulador de Chuvas**. Anais do IV Simpósio de Geografia Física Aplicada. Porto Alegre, RS, 1991.

GUERRA, A. J. T., **Processos Erosivos nas Encostas**. In: Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 3 ed., Ed. Bertrand, Rio de Janeiro, 1998.

GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S. & BOTELHO, R. G. M (orgs) **Erosão e conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. Ed. Bertrand, Rio de Janeiro, 1999.

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C. M., **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. Ed. Edgar Blücher, São Paulo, 1984.

HEAD, R. H., **Direct Shear Test**. Manual of soil laboratory testing. Permeability, shear strength and compressibility tests. Vol 2. Pentech Press, London, 1988, pp. 509-580.

HODGES, W. K. & BRYAN, R. B., **The influence of material behavior on runoff initiation in the Dinosaur Badlands, Canada**. In: BRYAN, R. B., YAIR, A. Eds.) *Badlands Geomorphology and piping*. Geo Books, p.13-46, Canadá, 1982.

HORTON, R. E., **Erosion development of streams and their drainage basins: Hidrological approach to quantitative geomorphology**. Geological Society of American Bulletin, n. 56, 275-376, 1945.

HUDSON, N. W., **An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of sub-tropical rainfall**. Proc. Trans. Rhod. Sci. Ass., v. 49, p. 15-25, 1961.

HUDSON, N. W., **Soil conservation**. 2 ed. Ithaca: Cornell University Press, 1973.

IMESON, A. C., KWAAD, F. J. P. M. **The response of tilled soils to wetting by rainfall and the dynamic character of soil erodibility**, 1990.

INDERBITZEN, A. L., **An Erosion test for soils**. Materials Research and Standards. 1(7): 553-554, 1961.

JACKSON, S. J., **Soil erosion survey and erosion risk in mid – Bedfordshire**. Sci. Soil, v. 3, p. 95-105, 1986.

KIEHL, E. J., **Manual de Edafologia**. Ed. CERES, São Paulo, 1979.

KIRKBY, M. J., **The problem**. In: KIRKBY, M. J. MORGAN, R. P. C. Soil Erosion, 1980.

KIRKBY, M. J. MORGAN, R. P. C., **Soil Erosion and construction**. Ed. John Wiley & Sons Ltd., 1980.

KIRKBY, M. J. & MORGAN, R. P. C. (eds.) **Erosión de Suelos**. Limusa, México, 1984.

KRAMER, L. A., Meyer, L. D., **Small amount of surface mulch reduces soil erosion and runoff velocity**. Trans. Am. Soc. v. 12, p. 638-641, 1969.

KRISHNAYYA, A. V. G., EISENSTEIN, Z., **Brazilian Tensile – test for soils**. Can Geotech., p. 652-641, 1974.

LAL, R., **Soil erosion on Alfisols in western Nigéria, III. Effects on rainfall characteristics**. Geoderma, v.16, p. 389-401, 1976.

LAMBE, T. W. e WITHMAN, R. V., **Soil mechanics**. 51 v., Ed. John Wiley e Sons, New York, 1979.

LAWS, J. O., **Measurements of fall velocity of water drops and rainsdrops**. Trans. A. Geophys. v. 22, p.709-721, 1941.

LEOPOLD, L. B. et al., **Fluvial process in geomorphology**. W. F. Freeman and Co., San Francisco, California, US, 1964.

LEPSCH, E. I., **Solos, formação e conservação**. Ed. Melhoramentos, Campinas, SP, 1982.

MACIEL, I. C. Q., **Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gnaiss facoidal**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1991.

MARINHO, F. A. M., **Medição de Sucção com o método do Papel Filtro**. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.2, Foz do Iguaçu, PR, 1994.

MAZUCHOWSKY, J. Z. DERPSH, R., **Guia de reparo de solos**. Ed. ACARPA, Curitiba, PR, 1984.

MEDINA, H. P., **Constituição Física**. Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ, 1975.

MITCHELL, J. K., **Fundamentals of soil behavior**. 2 ed., Ed. John Wiley e Sons, New York, 1993.

MORGAN, R. P. C., **Soil erosion in the United Kingdom: field studies in the Silsoe area, 1973-1975**. Silsoe Occasional Paper, v.4, 1977.

MORGAN, R. P. C., **Soil erosion and conservation**. Ed. Longman Group, England, 1986.

MORTARI, D., **Caracterização Geotécnica e Análise de Processo Evolutivo das Erosões no Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. UnB, Brasília, DF, 1994.

NEARING, M. A.; FOSTER, G.R.; LANE, L.J. & FINKNER, S.C., **A Process – Based Erosion Model for USDA – Water Erosion Predication Project Technology Transactions of ASAE**, 32 (5): 1587 – 1593, 1989.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F., **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, 1981.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F., **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. Villibor, São Paulo, 1995.

OKA-FIORI, C. & SOARES, P. C., **Aspecto evolutivo das voçorocas**. Notícia Geomorfológica, v.16, n.32, p.114-124, 1976.

OLIVEIRA, J. B., **Classes Gerais de solos do Brasil: guia auxiliary para seu reconhecimento**. 2 ed., FUNEP, Jaboticabal, SP, 1992.

PINTO, C. S., **Curso Básico de Mecânica dos solos**. Oficina de Textos, São Paulo, 2000.

PITTY, A. F., **Geography and soil proprieties**. Methuen, London, 1978.

POESEN, J., **The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow**. v. 7. Geomorph, N. F., 49, 117-131, 1984.

REGO, J. J. V., **Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaissé**. Dissertação de Mestrado. 125p., COPPE / UFRJ. Rio de Janeiro, 1978.

REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E., CLOTHIER, B. E., **The constant head well permeameter: effects of unsaturated flow**. Soils; Science, 139,172–180, 1985.

RESENDE, M. et al., **Pedologia: base para a distinção de ambientes**. Ed. JARD, Viçosa, 1995.

RODRIGUES, J. E., **Estudo de fenômenos erosivos acelerados – Boçorocas. Tese de Doutorado**, EESC, USP. São Carlos, São Paulo, 1981.

SANCHEZ, L. E., **Referências bibliográficas Espeológica Brasileira de Ciência e Cultura (1836-1980)**. São Paulo. 38 (5): 927, 1986.

SANTOS, P. de S., **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras**. v. 1. Ed. da USP, São Paulo, 1975.

SANTOS, M. P., **A new soil Constant and its application**. Proc. 3^d Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. v.1, Zurich, 1953.

SANTOS, M. P., CASTRO, E., **Estudos sobre erosões em taludes de estradas**. 2^a Jorn. Luso-Bras. Eng. Civil. Rio de Janeiro – São Paulo, 1967.

SANTOS, R. M. M., **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia-GO**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB: Brasília, 1997.

SELBY, M. J., **Hill slope sediment transport and deposition**. In: PYE, K. (ed.) Sediment transport and depositional process. Blackwell Scientific Publications, 61-87, 1993 e 1994.

SHERARD, I.L. DUNNIGAN, L.P. e DECKER, R.S., **Identification and nature of dispersive soils**. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(4): 287-301.

STOCKING, M. A., **Rainfall Erosivity in erosion: some problems and applications**. Research Discussion Paper 13. Universidade de Edinburg, 29p., 1977.

STOCKING, M. A., **Examination of the factors controlling gully growth on cohesive fine sands in Rhodesia**. University of East Anglia. Discussion Paper, 39, 6p., 1983.

TAVARES, A. C. VITTE, A. C., **Erosão do solo e assoreamento de represas: o caso de Monte Aprazível – SP**. Geografia, v. 18, n.1, p. 51-95, 1993.

THORNES, J. B., **Erosional processes of running water and their spatial and temporal controls: a theoretical viewpoint**. Soil Erosion: John Wiley, 1980.

TISDALL, J. M. e OADES, J. M., **Organic matter and water stable aggregates in soils**. Journal of Soil Science, 33, 2, 141-163, 1982.

VILAR, O.M. e PRANDI, E. F., **Erosão dos Solos do Interior de São Paulo**. ABMS/USPSC, p. 177-206, 1993.

VITTORINI, S., **The effects of soil erosion in experimental station in the Pliocene clay of the Val d'Era (Tuscany) and its influence of the evolution of the slopes.** Acta Geographica Debrecina, v.10, p. 71-81, 1972.

VOLK, G. M., **Method of determination of the degree of dispersion of the clay fraction of soils.** Proceedings Soil Science Society of America, 1937.

WILSON, J. J. & COOK, R. V., **Erosión Eólica.** In: KIRKBY, M. J. & MORGAN, R. P. C. (eds.) Erosión de Suelos. Ed. Limusa, p.267-305, México, 1984 .

WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D., **Rainfall energy and its relationship to soil loss.** Transactions of American Geophysical Union, p.285-291, 1958.

WISCHMEIER, W. H., **A rainfall energy and its relationship to soil loss.** Transactions of American Geophysical Union, v. 39, p. 285-291, 1959.

WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D., **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains.** Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington: USDA, 1965.

WISCHMEIER, W. H., MEYER, L. D., **Soil Erodibility on Construction Areas.** MRB-SR, 135, 1973.

WUTKE, A. C. P., CAMARGO, O. A., **Adsorção e troca iônica.** Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1975.

ANEXOS

1. PERFIS INDIVIDUAIS DAS SONDAGENS À PERCUSSÃO

Perfil Individual de Sondagem à Percussão - SPT									
Obra:		UHE ITUMBIARA			Data:		13/12/2002		
Local:		Área de Emprestimo			Cota (m):		503,411		
Número do furo:		PZ-44		Profund. Final:		14,45 metros			
Revestimento e		Altura de Queda		Peso Martelo		Coordenadas			
		0,75 m		65 kg		N: 7.966.919,4277			
						E: 702.759,5634			
						Gráfico			
						0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50			
Número da Amostra		Prof. da camada (m)	Teor de Umidade (%)	Número de golpes					
2	1,45	21,10	8/31 12/28						
3	2,45	ND	12 12						
4	3,47	ND	6 8/32						
5	4,48	30,50	6/33 8/31						
6	5,47	ND	2/35 2						
7	6,45	ND	3/35 3						
8	7,45	ND	5/31 7						
9	8,45	20,30	13 22						
10	9,45	ND	27 38						
11	10,45	ND	25 36						
12	11,45	21,60	10 10						
13	12,45	16,40	12 17						
14	13,45	23,00	12 13						
15	14,45	26,30	27 35						
Classificação do material									
0,00 a 7,00m - SOLO COLUVIONAR - Site argiloso marrom avermelhado desestruturado e heterogêneo com compactidade elevada e plasticidade média. Elevada concentração de matéria orgânica. Fragmentos avermelhados (óxidos).									
7,00 a 11,00m - SOLO RESIDUAL MADURO - Site argiloso com fragmentos de quartzo, fofa acinzentado com elevada concentração de micas, compactidade média e plasticidade baixa.									
11,00 a 14,45m - SOLO RESIDUAL JÓVEM - Site argiloso rosa acinzentado com passagens mais esbranquiçadas, compactidade média e plasticidade elevada, concentração de minerais micáceos. Apresenta-se estruturado e homogêneo.									
OBS.:									

<p style="text-align: right;">Perfil Individual de Sondagem à Percussão - SPT</p>									
Obra:		UHE ITUMBIARA							
Local:		Área de Empreendimento			Data: 02/12/2002				
Número do furo:	PZ-45	Cota (m):	517,153	Profund. Final:	13,46m	NA (m)	data	Operador:	RESP. TÉCNICO:
Revestimento e	2.1/2"	Coordenadas				seco	13/12/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Altura de Queda	0,75 m	N: 7.966.342,7799				10,56	14/12/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Peso Martelo	65 kg	E: 703.810,7728				12,01	16/12/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Número da Amostra	Prof. da camada (m)	Teor de Umidade (%)	Número de golpes		Gráfico	Classificação do material			
			1o. e 2o.	2o. e 3o.					
2	1,45	20,10	6	8		<p>0,00 a 1,00m - SOLO COLLUVIONAR - Solo marrom avermelhado com presença de fragmentos de quartzo e raízes. Plasticidade e compactidade médias.</p> <p>1,00 a 3,00m - SOLO RESIDUAL MADURO - Areia silteosa rosa acinzentada com presença abundante de micas. Solo estruturado, diminuição gradativa da quantidade de raízes de acordo com o aumento da profundidade. Presença de fragmento de rocha e de quartzo puro.</p> <p>3,00 a 13,45m - SOLO RESIDUAL JOVEM - Solo argiloso rosa acinzentado com passagens avermelhadas e esbranquiçadas, bastante estruturado. Elevada concentração de minerais micáceos. De acordo com o aumento da profundidade há um aumento no grau de plasticidade e compactidade do solo que nos primeiros metros são médias, da mesma forma ocorre com o teor de umidade das amostras e com a preservação das características da rocha (xistocidade, textura, estruturação e constituição mineral). De 3,00 a 3,45m presença de fragmentos de quartzo.</p>			
3	2,45	ND	6	7					
4	3,45	19,40	4/32	6					
5	4,45	ND	5	8/28					
6	5,45	14,40	9	13					
7	6,45	ND	11	15					
8	7,45	13,30	16	26					
9	8,45	ND	14	25					
10	9,45	18,90	13	20					
11	10,45	16,70	16	23					
12	11,45	ND	15	24					
13	12,45	ND	17	27					
14	13,45	19,10	20	31					
OBS.:									

Perfil Individual de Sondagem à Percussão - SPT									
Obra:		UHE ITUMBIARA							
Local:		Área de Emprestimo							
		Data: 11/12/2002							
Número do furo:	PZ-47	Cota (m):	509,389	Profund. Final:	11,73 metros	NA (m)	data	Operador:	RESP. TÉCNICO:
Revestimento e		Coordenadas				seco	06/12/2002	José Cardoso	Geol. Pedro Macêdo
Altura de Queda		0,75 m		N: 7.966.474,2279		seco	12/12/2002	José Cardoso	Geol. Pedro Macêdo
Peso Martelo		65 kg		E: 703.069,1874		11	13/12/2002	José Cardoso	Geol. Pedro Macêdo
Número da Amostra	Prof. da camada (m)	Teor de Umidade (%)	Número de golpes		Gráfico	Classificação do material			
			1o. e 2o.	2o. e 3o.					
2	1,45	18,00	5/33	6		<p>0,00 a 2,00m - SOLO COLUVIONAR - Site argiloso marrom avermelhado, heterogêneo desestruturado. Plasticidade e compactação elevadas.</p> <p>2,00 a 8,00m - SOLO RESIDUAL MADURO - Site argiloso rosa acinzentado estruturado com elevada concentração de minerais micáceos.</p> <p>8,00 a 9,00m - PASSAGEM DE ARGILA - Argila silteosa cinza de elevada plasticidade e compactação, homogênea.</p> <p>9,00 a 11,73m - SOLO RESIDUAL JOVEM - Site arenoso cinza rosado com elevada concentração de micas, homogêneo e estruturado.</p>			
3	2,45	17,10	6/32	6/29					
4	3,45	ND	7	9					
5	4,45	24,90	15	23					
6	5,45	ND	18	25					
7	6,45	ND	14	22					
8	7,45	22,40	5	8					
9	8,45	20,60	8	15/27					
10	9,45	ND	13	21					
11	10,45	13,90	19	28					
12	11,33	ND	43	40/18					
OBS.:									

Perfil Individual de Sondagem à Percussão - SPT									
Obra:		UHE ITUMBIARA							
Local:		Área de Empreendimento							
		Data: 28/11/2002							
Número do furo:	PZ-49	Cota (m):	512,748	Profund. Final:	14,46m	NA (m)	data	Operador:	RESP. TÉCNICO:
Revestimento e	2.1/2"	Coordenadas				seco	28/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Altura de Queda	0,75 m	N: 7.965.920,0089				6,72	28/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Peso Martelo	65 kg	E: 703.265,4850				6,72	30/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Número da Amostra	Prof. da camada (m)	Teor de Umidade (%)	Número de golpes		Gráfico	Classificação do material			
			1o. e 2o.	2o. e 3o.					
2	1,46	22,00	5/37	5/31		<p>0,00 a 5,00m - SOLO COLUVIONAR - Solo argiloso marrom avermelhado com passagens areniladas, homogêneo, com presença de fragmentos de quartzo (poucos), matéria orgânica e raízes. Plasticidade e compactidade médias. Presença de fragmentos subarredondados de óxido de ferro (hematita). De acordo com o aumento da profundidade há uma diminuição na plasticidade e a granulometria torna-se mais silteosa, perdendo assim o percentual de argila. De 4,00 a 5,00 ocorre um aumento significativo na granulometria (areia), porém o mesmo não ocorre com o teor de argila.</p> <p>5,00 a 5,45m - CASCALHO - Fragmentos de quartzo de tamanhos variados marcando o limite entre o solo coluvionar e o solo residual.</p> <p>5,45 a 11,45m - SOLO RESIDUAL MADURO - Solo argiloso de coloração avermelhada com algumas passagens esbranquiçadas, estruturação não muito proeminente. Compactidade e plasticidade elevadas. Fragmentos de quartzo na profundidade de 9,00 metros (provável arranhão de quartzo).</p> <p>11,45 a 14,45m - SOLO RESIDUAL JOVEM - Solo argiloso de coloração avermelhada com algumas passagens esbranquiçadas, estruturação bastante evidente. Aumento significativo na concentração de minerais micáceos. Compactidade e plasticidade baixas. Apresenta-se mais argiloso que o solo residual maduro.</p>			
3	2,47	ND	4	4/32					
4	3,45	23,10	6	7					
5	4,45	22,00	17	21					
6	5,45	ND	16	12					
7	6,45	ND	4/31	7/27					
8	7,45	41,70	5/33	7/27					
9	8,45	42,40	8	14/27					
10	9,45	ND	5/31	8/27					
11	10,45	34,40	16	26					
12	11,45	ND	13	21					
13	12,45	ND	12	18					
14	13,45	38,20	26	29					
15	14,45	15,40	15	25					
OBS.:									

Perfil Individual de Sondagem à Percussão - SPT												
Obra:		Itumbiara										
Local:		Área de Empreendimento Logoa do brejo				Data: 25/11/2002						
Número do furo:	PZ-50	Cota (m):	495,710	Profund. Final:	10,46	NA (m)	data	Operador:	RESP. TÉCNICO:			
Revestimento e	2.1/2"	Coordenadas				seco	25/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo			
Altura de Queda	0,75 m					N:	7.966.249,3136		7,34	26/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Peso Martelo	65 kg					E:	702.766,2346		7,34	27/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo
Número da Amostra	Prof. da camada (m)	Teor de Umidade (%)	Número de golpes		Gráfico	Classificação do material						
			1o. e 2o.	2o. e 3o.								
2	1,45	13,50	11	13		<p>0,00 a 4,45m - SOLO COLUMNAR – Solo arenoso marrom avermelhado, heterogêneo, sem estruturação, com presença de fragmentos de óxidos de ferro (hematita) e quartzo, matéria orgânica e reses. Plasticidade e compactidade baixas. Com o aumento da profundidade há um aumento na homogeneidade, umidade, e uma diminuição no percentual de matéria orgânica e reses.</p> <p>4,45 a 5,00m - CASCALHO – Fragmentos de quartzo de tamanhos variados marcando o limite entre o solo columnar e o solo residual.</p> <p>5,00 a 6,45m - SOLO RESIDUAL MADURO – Solo vermelho acinzentado com elevada concentração de micas, estruturação. Diferenças composicionais marcam porções mais avermelhadas e outras mais acinzentadas.</p> <p>6,45 a 10,45m - SOLO RESIDUAL JOVEM – Solo argiloso com elevada concentração de minerais micáceos, estruturação bastante evidente. Compactidade e plasticidade elevadas, assim como o teor de umidade.</p>						
3	2,45	ND	11	11								
4	3,45	19,80	7	9								
5	4,45	ND	7	11								
6	5,45	12,50	5/33	7								
7	6,45	19,80	6	9								
8	7,45	ND	9	11								
9	8,45	ND	7/32	7								
10	9,45	ND	11	15								
11	10,45	32,60	8	12								
OBS.:												

Perfil Individual de Sondagem à Percussão - SPT										
Obra:		UHE ITUMBIARA								
Local:		Área de Empreitimo				Data: 21/11/2002				
Número do furo:	PZ-82	Cota (m):	515,609	Profund. Final:	20,17m	NA (m)	cota	Operador:	REISP, TÉCNICO:	
Revestimento a	2.1/2'	Coordenadas N: 7.966.345,5670 E: 703.939,6550				seco	21/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo	
Altura de Queda	0,75 m					seco	22/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo	
Peso Martelo	65 kg					13,45	22/11/2002	José Cardoso	Geól. Pedro Macedo	
Número da amostra	Prof. da camada (m)	Teor de Umidade (%)	Número de golpes		Gráfico 		Classificação do material 0,00 a 3,00m - Solo arenoso vermelho, heterogêneo, com presença de fragmentos de quartzo e óxido de ferro. Plasticidade baixa e compactação média alta. 3,00 a 3,48m - TRANSIÇÃO COLÚMBORESIDUAL - Argila silteosa arenosa. Plasticidade e compactação baixas, desestruturada. 3,48 a 10,00m - SOLO RESIDUAL MADURO - Solo argiloso vermelho acromatado, homogêneo e estruturado. 10,00 a 20,17m - SOLO RESIDUAL JOVEM - Solo argiloso de coloração avermelhada estruturado. Aumento significativo na concentração de minerais micáceos e na preservação dos minerais constituintes da rocha original (mica xisto), alguns com estágio de alteração bastante avançado (menos resistentes). Compactação média e plasticidade baixa.			
			1o. e 2o.	2o. e 3o.						
2	1,5	19,50	4	5/35						
3	2,45	ND	5	4/29						
4	3,48	15,90	7/33	6/33						
5	4,45	11,60	15	16/29						
6	5,45	ND	11	13						
7	6,45	7,90	13	17						
8	7,45	ND	19	29						
9	8,45	ND	23	36						
10	9,45	ND	20	31						
11	10,45	ND	25	35						
12	11,45	ND	9	17						
13	12,45	ND	17	31						
14	13,45	24,50	14	26						
15	14,45	ND	24	40						
16	15,45	ND	26	48						
17	16,45	ND	20	42						
18	17,45	ND	30	55/30						
19	18,45	ND	36	64/30						
20	19,45	ND	29	36						
21	20,17	17,90	30/17	10/2						
OBS.:										

2. PERDA DE SOLOS

Tabela 9.1 – Quadro resumo da quantidade de perda de solo laterítico (SL)

PENEIRAS	material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
# 50			
0 min	0	0	0
1 min	0,88	0,88	0,011204508
5 min	0,3	1,18	0,015024227
10 min	0,12	1,3	0,016552114
20 min	0,08	1,38	0,017570706
30 min	0,29	1,67	0,0212631
# 100	material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	1,08	1,08	0,013750987
5 min	0,15	1,23	0,015660846
10 min	0,21	1,44	0,018334649
20 min	0,18	1,62	0,020626481
30 min	0,32	1,94	0,024700847
# 200	material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	0,96	0,96	0,0122231
5 min	0,24	1,2	0,015278875
10 min	0,2	1,4	0,017825354
20 min	0,15	1,55	0,019735213
30 min	0,48	2,03	0,025846763
TEMPO	Total acumulado / Área g/cm²		
0 min	0		
1 min	0,037178595		
5 min	0,045963948		
10 min	0,052712117		
20 min	0,057932399		
30 min	0,07181071		

Tabela 9.2 – Quadro resumo da quantidade de perda de solo (SRJ-B)

PENEIRAS	Material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
# 50			
0 min	0	0	0
1 min	2,43	2,43	0,030939721
5 min	0,76	3,19	0,040616341
10 min	0,08	3,27	0,041634933
20 min	0,06	3,33	0,042398877
30 min	0,53	3,86	0,049147046
# 100	Material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	2,89	2,89	0,036796623
5 min	0,49	3,38	0,043035497
10 min	0,15	3,53	0,044945356
20 min	0,06	3,59	0,0457093
30 min	0,18	3,77	0,048001131
# 200	Material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	3,17	3,17	0,040361694
5 min	0,97	4,14	0,052712117
10 min	0,15	4,29	0,054621976
20 min	0,06	4,35	0,05538592
30 min	0,6	4,95	0,063025357
TEMPO	Total acumulado/ Área g/cm²		
0 min	0		
1 min	0,108098037		
5 min	0,136363955		
10 min	0,141202266		
20 min	0,143494097		
30 min	0,160173535		

Tabela 9.3 – Quadro resumo da quantidade de perda de solo (SRJ-A)

PENEIRAS	material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
# 50			
0 min	0	0	0
1 min	10,44	10,44	0,132926208
5 min	1,32	11,76	0,14973297
10 min	1,33	13,09	0,166667056
20 min	0,46	13,55	0,172523958
30 min	1,78	15,33	0,195187622
# 100	material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	22,1	22,1	0,281385939
5 min	2,56	24,66	0,313980872
10 min	1	25,66	0,326713267
20 min	0,31	25,97	0,33066031
30 min	2,39	28,36	0,361090735
# 200	material erodido (g)	acumulado	acum. / area (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	14,83	14,83	0,188821424
5 min	2,05	16,88	0,214922835
10 min	1,24	18,12	0,230711006
20 min	0,36	18,48	0,235294668
30 min	1,83	20,31	0,258594952
TEMPO	Total acumulado/ Área g/cm²		
0 min	0		
1 min	0,603133572		
5 min	0,678636677		
10 min	0,724091329		
20 min	0,738478936		
30 min	0,814873309		

Tabela 9.4 – Quadro resumo de perda de solo (SRM)

PENEIRAS	material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
# 50			
0 min	0	0	0
1 min	9,4	9,4	0,119684517
5 min	12,97	22,37	0,284823686
10 min	7,85	30,22	0,38477299
20 min	0,28	30,5	0,388338061
30 min	0,06	30,56	0,389102005
# 100	material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	8,15	8,15	0,103769023
5 min	23,12	31,27	0,398142006
10 min	5,98	37,25	0,47428173
20 min	0,27	37,52	0,477719477
30 min	0,34	37,86	0,482048492
# 200	material erodido (g)	acumulado	acum. / área (g/cm²)
0 min	0	0	0
1 min	11,29	11,29	0,143748745
5 min	18,6	29,89	0,3805713
10 min	7,61	37,5	0,477464829
20 min	0,41	37,91	0,482685111
30 min	0,37	38,28	0,487396098
TEMPO	Total acumulado/ Área g/cm²		
0 min	0		
1 min	0,367202285		
5 min	1,063536992		
10 min	1,33651955		
20 min	1,34874265		
30 min	1,358546594		