

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA ERODIBILIDADE E PARÂMETROS  
GEOTÉCNICOS DE UM SOLO EM PROCESSO EROSIVO

Recife, dezembro de 2001

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE E PARÂMETROS  
GEOTÉCNICOS DE UM SOLO EM PROCESSO EROSIVO**

**FABÍOLA DE SOUZA GOMES**

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO  
DO MESTRADO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE  
DOS REQUISISTOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL

APROVADA POR:

---

Roberto Quental Coutinho, D.Sc.

---

Jaime Azevedo Gusmão Filho, Prof. Titular

---

Mario F. de Lima Filho, D.Sc.

---

Willy Alvarega Lacerda, D. Sc.

RECIFE, PE - BRASIL  
DEZEMBRO, 2001

G633e **Gomes, Fabíola de Souza.**  
Estudo da erodibilidade e parâmetros geotécnicos de um solo em processo erosivo / Fabíola de Souza Gomes. - Recife : O Autor, 2001.  
xxi, 207 folhas : il.

Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Mestrado em Engenharia Civil, 2001

Inclui bibliografia , figuras , tabelas e fotografias.

1. Mecânica de solos (Engenharia civil) – Teses. – 2. Erosão (Engenharia civil) – Teses. – I. Título.

624 CDD (21.ed.) UFPE/CTG 2002

À Deus;  
meus pais, Amaro e Cecy;  
meu irmão, José Alexandre;  
e minha tia, Ir. Rosalie.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Roberto Quental Coutinho, pela orientação, sugestões, dedicação, amizade, conselhos e respeito demonstrado ao longo do curso.

Ao professor Mario F. de Lima Filho, pela orientação, sugestões, amizade, dedicação e respeito demonstrado ao longo do trabalho.

Ao professor Admilson P. Pacheco do Laboratório de Sensoriamento Remoto da UFPE, pela ajuda, ensinamentos e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio e incentivo recebidos no desenvolvimento deste trabalho.

A FIDEM, SUAPE e Prefeitura do Cabo de Santo Agostinho pela permissão ao estudo no local.

Aos colegas de mestrado da área de geotecnia, pela constante amizade, contribuições e incentivos, em especial aos amigos Ana Tereza, Leonardo, Joaquim, João Barbosa, Sarita, Rogéria e Kalinny.

Aos bolsistas do Laboratório de Solos e Instrumentação, pela amizade e apoio, em especial André, Rafael, Izabela e Kalline.

Aos funcionários do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, pela convivência e dedicação na execução dos trabalhos.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq), pelo superte financeiro recebido durante o período de vigência da bolsa, imprescindível durante a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo das propriedades geotécnicas dos solos envolvidos no processo erosivo na região costeira Cabo de Santo Agostinho / PE, a cerca de 41km de Recife. A região está submetida a um clima tropical chuvoso com verão seco (As'- Köppen). Pedologicamente, a área é de domínio de Latossolos. O perfil geológico é composto por sedimentos da Formação Barreiras, com espessura da ordem de 5m, sobrejacente a um solo residual de granito. A formação superior possui dois horizontes distintos: uma camada superficial, da ordem de 1m de espessura, constituída de uma argila arenosa de cor amarelada; seguida por uma camada constituída de uma areia siltosa de cor rosada. O solo da formação sobrejacente consiste de uma areia siltosa vareagada. Para avaliar o potencial de erodibilidade dos solos foi realizada uma campanha de ensaios de laboratório, consistindo de: ensaios de caracterização, ensaios para avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos (edométricos, cisalhamento direto e permeabilidade) e ensaios para avaliar a erodibilidade do solo (dispersão rápida, furo de agulha, desagregação, inderbtzen, MCT e infiltração). Os ensaios de erodibilidade, em si, não foram suficientes para avaliar o grau de erodibilidade dos solos, necessitando de uma análise conjunta com as propriedades mecânicas e hidráulicas. O Inderbtzen, embora se apresente compatível com o fenômeno de erosão hídrica superficial, os parâmetros obtidos não são suficientes para avaliar o grau de erodibilidade de um solo, ou seja, falta um critério de classificação.

**ABSTRACT**

This work has as objective main the study of the geotechnical properties of involved ground in the erosive process in the coastal region Cabo de Santo Agostinho/PE, about 41km of Recife. The region is submitted to a rainy tropical climate with dry summer (- the Köppen). Pedological, the area is of domain of Latosol. The geologic profile is composed for sediments of the Formation Barriers, with thickness of the order of 5m, superjacent to one granite ground residual. The superior formation possess two distinct horizons: a superficial layer, of the order of 1m of thickness, consisting of an arenaceous clay of yellowish color; followed for a consisting layer of a silty sand of pink color. The ground of the superjacent formation consists of a silty sand. To evaluate the potential of erodibility of ground a campaign of laboratory assays was carried through, consisting of: assays of characterization, assays to evaluate the mechanical and hydraulically properties of ground (oedometricity, direct shear and permeability) and assays to evaluate the erodibility of the ground (fast dispersion, puncture of needle, desegregation, inderbtzen, MCT and infiltration). The erodibility assays, in itself, had not been enough to evaluate the degree of erodibility of ground, needing a joint analysis with the mechanical and hydraulically properties. The Inderbtzen, even so if presents compatible with the phenomenon of superficial hydric erosion, the gotten parameters are not enough to evaluate the degree of erodibility of one ground, or either, it lacks a classification criterion.

INDÍCECAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

<b>I.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES</b>	<b>22</b>
<b>I.2. OCORRÊNCIA DO RENÔMENO EROSIVO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE</b>	<b>28</b>
<b>I.3. OBJETIVOS</b>	<b>33</b>
<b>I.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b>	<b>34</b>

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<b>II.1. INTRODUÇÃO</b>	<b>34</b>
<b>II.2. TIPOS DE EROSÃO</b>	<b>37</b>
II.2.1. EROSÃO HIDRÍCA	38
<b>II.2.1.1. Erosão Superficial</b>	<b>39</b>
II.2.1.1.1. Erosão Pluvial	39
II.2.1.1.2. Erosão Laminar	40
II.2.1.1.3. Erosão por Escoamento Difuso	42
<b>II.2.1.2. Erosão Interna</b>	<b>42</b>
II.2.1.2.1. Erosão por Escoamento Difuso Interno	42
II.2.1.2.2. Erosão por Escoamento Concentrado	43
<b>II.3. AGENTES EROSIVOS</b>	
II.3.1. AGENTES ATIVOS	46
II.3.1.1. Água	46
II.3.1.2. Temperatura	47
II.3.1.3. Vento	47
II.3.1.4. Ação de Microorganismos	47
II.3.1.5. Ações Antrópicas	47
II.3.2. AGENTES PASSIVOS	48
II.3.2.1. Topografia	49
II.3.2.2. Gravidade	50
II.3.2.3. Tipo De Solo	50
II.3.2.4. Cobertura Vegetal	51
II.3.2.5. Formações Superficiais	52
<b>II.4. FATORES EROSIVOS</b>	<b>53</b>
II.4.1. EROSIVIDADE	53
II.4.2. ERODIBILIDADE	54
<b>II.5. IMPACTO AMBIENTAL DEVIDO A EROSÃO</b>	<b>58</b>



<b>II.6. CONTROLE DA EROSÃO</b>	<b>59</b>
<b>II.7. TÉCNICAS E OBRAS DE CONTROLE DA EROSÃO</b>	<b>61</b>

### CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DO LOCAL

<b>III.1. INTRODUÇÃO</b>	<b>66</b>
<b>III.2. HISTÓRIA</b>	<b>67</b>
<b>III.3. PARQUE METROPOLITANO ARMANDO DE HOLANDA CAVALCANTI</b>	<b>70</b>
<b>III.4. CLIMA</b>	<b>73</b>
<b>III.4.1. Estimativa da Erosividade</b>	<b>74</b>
III.4.1.1. PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DA EROSIVIDADE	75
III.4.1.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
<b>III.5. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA</b>	<b>78</b>
<b>III.5.1. Formação Barreiras</b>	<b>78</b>
III.5.1.1. SOLOS LATERÍTICOS	82
<b>III.5.2. Suíte Ipojuca</b>	<b>84</b>
III.5.1.1. GRANITO DE SANTO AGOSTINHO	85
III.5.1.2. SOLO RESIDUAL	85
<b>III.6. DESCRIÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO</b>	<b>88</b>
<b>III.7. DESCRIÇÃO DA ENCOSTA ESTUDADA</b>	<b>90</b>
III.7.1. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA	92
<b>III.8. INVESTIGAÇÃO DE CAMPO</b>	<b>93</b>
<b>III.8.1. Procedimentos dos Ensaio</b>	<b>93</b>
III.8.1.1. PERFIL DE SONDAGEM	95
III.8.1.2. COLETA DE AMOSTRAS DEFORMADAS E INDEFORMADAS	98
<b>III.9. RESUMO - COMENTÁRIOS</b>	<b>101</b>

### CAPÍTULO IV - PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

<b>IV.1. INTRODUÇÃO</b>	<b>103</b>
<b>IV.2. CARACTERIZAÇÃO, IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS</b>	<b>103</b>
<b>IV.2.1. Procedimentos dos Ensaio</b>	<b>104</b>
IV.2.1.1. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO	104
IV.2.1.2. ENSAIO DE CLASSIFICAÇÃO MCT	106

IV.2.1.3. IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	112
<b>IV.2.2. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>114</b>
IV.2.2.1. ENSAIO DE GRANULOMETRIA	114
IV.2.2.2. DENSIDADE REAL DOS GRAOS ( $G_s$ )	118
IV.2.2.3. LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE	119
IV.2.2.4. COMPACTAÇÃO	120
IV.2.2.5. ENSAIO DE CLASSIFICAÇÃO MCT	120
IV.2.2.5.1. Ensaio de Compactação Mini-MCT	122
IV.2.2.5.2. Ensaio de Perda por Imersão	126
IV.2.2.6. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	127
IV.2.2.6.1. Classificação Unificada (USCS)	127
IV.2.2.6.2. Proposta de VARGAS (1988 e 1992)	129
IV.2.2.6.3. Classificação MCT	129
<b>IV.3. COMPRESSIBILIDADE</b>	<b>130</b>
<b>IV.3.1. Procedimentos dos Ensaios</b>	<b>130</b>
IV.3.1.1. ESTIMATIVA DA COLAPSIBILIDADE	131
<b>IV.3.2. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>135</b>
IV.3.1.1. ESTIMATIVA DA COLAPSIBILIDADE	138
<b>IV.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO</b>	<b>140</b>
<b>IV.4.1. Procedimentos dos Ensaios</b>	<b>144</b>
<b>IV.4.2. Apresentação e Análise dos                 Resultados</b>	<b>145</b>
<b>IV.5. PERMEABILIDADE</b>	<b>151</b>
<b>IV.5.1. Procedimentos dos Ensaios</b>	<b>151</b>
<b>IV.5.2. Apresentação e Análise dos                 Resultados</b>	<b>153</b>
<b>IV.6. RESUMO - COMENTÁRIOS</b>	<b>154</b>
 <u>CAPÍTULO V - ERODIBILIDADE</u>	
<b>V.1. INTRODUÇÃO</b>	<b>159</b>
<b>V.2. ENSAIOS DE ERODIBILIDADE</b>	<b>160</b>
V.2.1. ENSAIOS DE DISPERSÃO RÁPIDA	161

<b>V.2.1.1. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>162</b>
V.2.2. ENSAIOS FURO DE AGULHA	163
<b>V.2.2.1. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>163</b>
V.2.3. ENSAIOS DE DESAGREGAÇÃO	165
<b>V.2.3.1. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>166</b>
V.2.4. ENSAIOS DE INDERBTZEN	167
<b>V.2.4.1. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>171</b>
V.2.5. ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO	178
<b>V.2.5.1. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>180</b>
V.2.6. METODOLOGIA MCT	184
<b>V.2.6.1. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>184</b>
V.2.7. CORRELAÇÃO PARA OBTENÇÃO DA ERODIBILIDADE	185
<b>V.2.7.1. Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>186</b>
<b>V.3. RESUMO - COMENTÁRIOS</b>	<b>186</b>
<u>CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</u>	 <b>190</b>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	 <b>195</b>

**LISTA DE FIGURAS**

- Figura I.1 Ocupação antrópica das áreas de morros que deflagra os processos erosivos (MELO, 1990)
- Figura I.2 Trecho do Mapeamento das Encostas Habitadas de Jabotão dos Guararapes por Grau de Risco (GUSMÃO FILHO, 1992)
- Figura II.1 Processo esquematizado do processo de erosão hídrica (LLOPIS TRILLO, 1999).
- Figura II.2 Esquema do processo de erosão pluvial (DAEE, 1990).
- Figura II.3 Esquema do processo de erosão laminar (DAEE, 1990)
- Figura II.4 Esquema de erosão em boçorocas por desmorronamento ou escorregamento de solos (LLOPIS TRILLO, 1999).
- Figura II.5 Esquema de processo de erosão por piping devido às águas servidas em zona urbana (DAEE, 1990)
- Figura II.6 Tipos básicos de vertentes que caracterizam processos erosivos (MOREIRA E PIRES NERO, 1998).
- Figura II.7 Ciclo das águas vs. vegetação (INFANTI JR. & FORNASARI FILHO, 1998).
- Figura II.8 Obras de controle da erosão hídrica (LLOPIS TRILLO, 1998).

- Figura III.1 Localização do município do Cabo de Santo Agostinho, e área de estudo demarcada
- Figura III.2 As três hipóteses sobre o local onde Pinzón, após deixar Cabo Verde, tocou o litoral brasileiro
- Figura III-3 Gráfico das precipitação máxima em 24 horas
- Figura III.4 Gráfico das precipitações máximas em 24 horas, no período de 1930 a 2000
- Figura III.5 Gráfico Erosividade vs. Tempo (ano)
- Figura III.6 Gráfico Erosividade vs. Tempo (mês) no período 1930 a 2000
- Figura III.7 Mapa de ocorrências geológicas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti
- Figura III.8 Perfis típicos de solos residuais brasileiros (VARGAS, 1981)
- Figura III.9 Mapa de ocorrência de processos erosivos no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti
- Figura III.10 Composição de imagem Satélite (Spot e Landsat)
- Figura III.11 Mapa de localização das atividades de campo
- Figura III.12 Perfil geológico-geotécnico do furo SM1
- Figura III.13 Perfil geológico-geotécnico do furo SM3

- Figura III.14 Perfil geológico do furo SP2
- Figura IV.1 Esquema comparativo dos aparelhos de compactação relacionados à metodologia MCT (SOUZA NETO, 1998).
- Figura IV.2 Esquema do Ensaio de Perda por Imersão (SOUZA NETO, 1998).
- Figura IV.3 Gráfico da Classificação MCT e dados diversos dos grupos de solos integrantes da mesma (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).
- Figura IV.4 Classificação modificada do MCT-M (VERTAMATTI et. al., 1990).
- Figura IV.5 Curvas Granulométricas
- Figura IV.6 Curvas de compactação Mini-compactação e Proctor Normal
- Figura IV.7 Resultados de ensaios da Classificação MCT:  
a) Curvas de deformação; b)  $P_i$  vs. Mini-MCV e  $w(\%)$  vs. Mini-MCV; e c) Curvas de compactação
- Figura IV.8 Resultados de ensaios da Classificação MCT:  
a) Curvas de deformabilidade; b)  $P_i$  vs. Mini-MCV e  $w(\%)$  vs. Mini-MCV; e c) Curvas de compactação

- Figura IV.9 Resultados de ensaios da Classificação MCT:  
a) Curvas de deformabilidade; b)  $P_i$  vs. Mini-MCV e  $w(\%)$  vs. Mini-MCV; e c) Curvas de compactação
- Figura IV.10 Localização das amostras na Carta de Atividade (a) e na Carta de Plasticidade (b) - Modificação de VARGAS, 1988 e 1992
- Figura IV.11 Curvas índice de vazios ( $e$ ) vs. Tensão vertical ( $\sigma_v$ )
- Figura IV.12 Curvas Deformações Volumétricas Específicas vs. Tensões Verticais
- Figura IV.13 Resultado comparativos de ensaios inundados e na umidade natural - Camada Formação Barreiras
- Figura IV.14 Resultado comparativos de ensaios inundados e na umidade natural - Camada Solo Residual
- Figura IV.1 Envoltórias de Mohr-Coulomb
- Figura V.15 Esquema do ensaio de dispersão rápida
- Figura V.2 Esquema do ensaio Furo de Agulha (CESP / MSL - 12)
- Figura V.3 Gráfico Carga Hidráulica vs. Vazão, obtido no ensaio de Furo de Agulha

- Figura V.4 Esquema do equipamento de inderbtzen: 1 - amostra de solo, 2 - entrada d'água, 3 - medidor de vazão, 4 - rampa e 5 - peneiras (BASTOS et. al., 1999).
- Figura V.5 Gráfico Perda de Solo vs. Vazão em ensaio não padronizado e padronizado
- Figura V.6 Gráfico Perda de Solo vs. Tempo em ensaio padronizado
- Figura V.7 Gráfico Perda de Solo vs. Tensão Cisalhante Hidráulica
- Figura V.8 Gráfico Altura (mm) vs. Tempo (minuto)
- Figura V.9 Volume de água infiltrada vs. raiz de tempo
- Figura V.10 Aplicação do critério de erodibilidade da metodologia MCT (BASTOS et. al., 1999)
- Figura V.11 Aplicação do critério de erodibilidade da metodologia MCT aos solos estudados



**LISTA DE TABELAS**

- Tabela I.1 Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento (BASTOS, 1999)
- Tabela II.1 Processos geológicos
- Tabela II.2 Tipos e subtipos de processo erosivo
- Tabela II.3 Tipos de Agentes Erosivos
- Tabela II.4 Suscetibilidade de diferentes tipos de solo à erosão (LLOPIS TRILLO, 1999)
- Tabela II.5 Velocidade de infiltração dos diferentes tipos de solos
- Tabela III.1 Cálculo da erosividade por ano de ocorrência
- Tabela III.2 Cálculo da erosividade por média de meses no período de 1930 a 2000
- Tabela III.3 Resumo dos valores de RQD
- Tabela IV.1 Valores numéricos das propriedades dos grupos que complementam a Figura IV.3
- Tabela IV.2 Classificação dos solos por proposta VARGAS (1988 e 1992).
- Tabela IV.3 Resumo comparativo dos ensaios de granulometria com defloculante, sem defloculante com dispersor e sem defloculante e sem dispersor

Tabela IV.4	Valores do potencial de dispersão
Tabela IV.5	Valores de $G_s$ com a profundidade
Tabela IV.6	Resultado do Limites de Atteberg
Tabela IV.7	Resumo dos resultados dos ensaios para Classificação MCT
Tabela IV.8	Resumo dos parâmetros básicos para classificação dos solos
Tabela IV.9	Identificação de colapso (SILVA FILHO, 1998)
Tabela IV.10	Resumo das tensões de cedência
Tabela IV.11	Parâmetros utilizados para estimativa de colapso
Tabela IV.12	Utilizando critérios resumidos em FUTAI (1998)
Tabela IV.13	Velocidade de cisalhamento aplicada
Tabela IV.14	Valores da redução de coesão
Tabela IV.15	Valores obtidos da Condutividade Hidráulica
Tabela IV.16	Resumo dos parâmetros geotécnicos
Tabela V.1	Classificação proposta para o ensaio de Dispersão Rápida (modificado de SILVEIRA et. al., 1974)

Tabela V.2	Valores obtidos no Ensaio de Dispersão Rápida
Tabela V.3	Determinação da erodibilidade por ensaio de desagregação
Tabela V.4	Resultado do ensaio Inderbtzen quanto à taxa de erodibilidade
Tabela V.5	Determinação do coeficiente de sorção e da velocidade de frente de saturação
Tabela V.6	Determinação do índice de petrificação
Tabela V.7	Valores obtidos para metodologia MCT
Tabela V.8	Valores obtidos da relação de erosão
Tabela V.9	Resumo dos resultados obtidos de potencial de erodibilidade

**LISTA DE FOTOS**

- Foto I.1 Encosta Erodida no Horto de Dois Irmãos  
(COUTINHO et. al., 1999)
- Foto I.2 Encosta erodida no Horto de Dois Irmãos  
(SANTOS, 2001)
- Foto III.1 Vicente Yáñez Pinzón
- Foto III. 2 Réplicas de Caravelas usadas nas grandes  
navegações, atacadas no Porto de Palos
- Foto III.3 Forte Castelo do Mar
- Foto III.4 Ruínas da Base da Marinha
- Foto III.5 Ruínas do Convento Carmelita, atualmente  
Igreja de Nazaré
- Foto III.6 Casa do Faroleiro
- Foto III.7 Vista Geral da Boçoroca em estudo
- Foto III.8 Moldagem do bloco (Formação Barreiras a  
0,30m de profundidade)
- Foto III.9 Preparação do bloco para parafinagem  
(Formação Barreiras a 0,30m de  
profundidade)
- Foto III.10 Parafinagem do bloco (Formação Barreiras a  
0,30m de profundidade)
- Foto III.11 Acondicionamento do bloco (Formação a 0,30m  
de profundidade)

- Foto V.1            Ensaio de Dispersão Rápida
- Foto V.2            Esquema do Ensaio de Desagregação
- Foto V.3            Vista Frontal do equipamento confeccionado  
na UFPE
- Foto V.4            Vista Lateral do equipamento confeccionado  
na UFPE
- Foto V.5            Acondicionamento da amostra
- Foto V.6            Embebecimento por 15 minutos da amostra  
para chegar ao estágio de saturação
- Foto V.7            Esquema do Ensaio de Infiltração

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### **I.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

Segundo BASTOS o tema erosão dos solos é tratado por quatro grandes áreas do conhecimento: Agronomia, Hidráulica, Geologia e Engenharia. Na Tabela I.1 é apresentado de forma sumária o principal enfoque de cada área sobre o tema, baseado na revisão de trabalhos de pesquisa publicados em periódicos e anais de eventos de cada uma das áreas.

Os primeiros trabalhos de repercussão mundial a tratar a questão da erodibilidade vieram de agrônomos norte-americanos, que procuravam determiná-la através de ensaios laboratoriais básicos (MIDDLETON, 1930; BOYOUCOS, 1935).

Para MIDDLETON (1930), a erodibilidade poderia ser estimada através de dois índices: a relação de dispersão e a capacidade de infiltração do solo. Por esta concepção, a erodibilidade seria controlada pela capacidade de destacamento ou desprendimento das partículas, dependente do volume de escoamento superficial avaliado, indiretamente, pela recíproca da capacidade de armazenamento de água pelos solos. A relação de dispersão (RD) mede a relação de silte e argila dispersos em água pela quantidade total dos mesmos no solo. Esta relação parte do pressuposto de que há relação entre a dispersibilidade do silte e da argila e a erosão. A erodibilidade seria então proporcional à relação de erosão (RE):

$$RE = RD / (CC/EU)$$

$$\text{Equação (I.1)}$$

Tabela I.1 - Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento (BASTOS, 1999).

ÁREA DO CONHECIMENTO		ENFOQUE
AGRONOMIA	Física dos Solos	Estudo de características físicas, químicas e mineralógicas que influenciam a erodibilidade dos solos dos horizontes superficiais e estudo de modelos de previsão da perda de solo.
	Manejo e Conservação dos Solos	Estudo do impacto de técnicas de cultivo e manejo no processo erosivo.
HIDRÁULICA	Hidráulica de Canais	Estudo da erosão localizada dos solos pelo fluxo d'água em estruturas hidráulicas (p. ex. canais em terra).
GEOLOGIA	Geologia de Engenharia	Estudos concentrados no diagnóstico ambiental da erosão, nas condicionantes geológicas e geomorfológicas à erosão regional e no relato de obras para controle da erosão.
ENGENHARIA	Engenharia Geotécnica	Ainda limitada abordagem ao problema da erosão. Poucos trabalhos na modelagem dos mecanismos de erosão e em critérios de avaliação da erodibilidade de solos.

Numa reavaliação sobre o assunto, BRYAN (1976) criticou a relação de erosão, mencionando estudos empíricos que indicavam que não é o silte e a argila que seriam as partículas mais erodíveis, mas sim a areia fina e o silte.

Outro índice muito conhecido, de mais fácil determinação, é a relação de argila (RA), apresentado por BOYUCOS (1935):

$$RA = (\%Silte + \%Areia) / \%Argila \quad \text{Equação (I.2)}$$

A relação de Boyucos está mais de acordo com os estudos de Hjulstrom, já que parte do pressuposto de que a argila agiria como ligante, dificultando o destacamento das

partículas do solo, e que as partículas mais grossas que a areia não seriam destacáveis - ao menos sob condições de fluxo com baixa energia.

Tanto a relação de erosão e de argila têm sido utilizadas com relativo sucesso como índice de erodibilidade no Brasil (BERTONI & LOMBARDI NETTO, 1985; SANTOS & NAKASAWA, 1992; VILAR & PRANDI, 1993) e no exterior (LAL, 1990).

Segundo BASTOS (1999), um dos grandes problemas na determinação da erodibilidade a partir de análises granulométricas é a aglomeração das partículas do solo em agregados. O método de dispersão utilizado para a caracterização textural é muito importante, pois a distribuição granulométrica varia conforme o tipo de dispersante e o tempo de dispersão. Existem vários dispersantes recomendados, e alguns, como o hexametáfosfato de sódio, nem sempre são eficientes para dispersar solos lateríticos (HEAD, 1992). Na verdade, solos lateríticos e saprolitos normalmente não apresentam fração argila quando submetidos à análise granulométrica sem defloculante (ALCÂNTARA, 1997; SANTOS, 1997; MORAES SILVA, 2000).

BASTOS (1999) acredita que além da questão da agregação, estes índices também desconsideram outros fatores que influenciam a erodibilidade, como o salpicamento de gotas de chuva e mineralógica do solo, especialmente nos saprolitos derivados de rochas graníticas e gnáissicas.

A busca de relações entre a erodibilidade dos solos e outras propriedades geotécnicas e o desenvolvimento de técnicas de ensaios e de critérios de avaliação da erodibilidade constituem os principais objetivos dos trabalhos de pesquisa presentes na literatura técnica. A maioria destes estudos está voltada para solução de problemas



de engenharia geotécnica relacionados à erosão hídrica de solos tropicais e subtropicais.

Dentre os trabalhos sobre erodibilidade em engenharia, vale destacar o pioneirismo dos estudos iniciados na década de 60, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e pelo Laboratório de Engenharia de Angola, com o objetivo de encontrar soluções do fenômeno erosivo associado a cortes de estradas. Várias propriedades físicas, químicas e mineralógicas, que potencialmente influenciam a resistência do solo à erosão, foram investigadas e correlacionadas aos resultados de perda de solo em ensaios de canal hidráulico e observações de campo.

As primeiras propriedades relacionadas com a erodibilidade foram a expansibilidade, a distribuição granulométrica e a plasticidade dos solos. Posteriormente, os pesquisadores do LNEC modelaram o solo de encosta frente à erosão como um talude infinito sujeito a uma tensão tangencial que corresponde à tensão cisalhante hidráulica. A resistência à erosão é identificada como sendo a resistência ao cisalhamento dada pela lei de Coulomb generalizada para escoamento superficial em taludes. Esta abordagem foi implementada em 1981, com a proposta de um novo mecanismo para a erosão de solos não coesivos, onde as forças hidráulicas atuantes apresentam flutuações inerentes a condição do fluxo junto à superfície do solo. As variações nas tensões normais também determinam flutuações nos valores de resistência friccional. Logo, a ação erosiva do fluxo superficial passa a ser modelada segundo uma função probabilística.

Outras contribuições discutidas pelos pesquisadores portugueses são relacionadas à coesão na resistência à erosão. NASCIMENTO & CASTRO (1974) tentaram solucionar a

questão da erosão com um modelo conceitual. As forças coesivas foram divididas em duas componentes, uma (coesão pétrea ou verdadeira) resultante de processos geológicos (diagênese e litificação), e que permaneceria mesmo com a saturação em água (ex.: cimentação, deposição de matriz entre partículas e travamento dos grãos). A outra (coesão não pétrea ou aparente) desapareceria com a saturação em água e se originaria pelas seguintes causas: sucção em solos não saturados; e forças de Van der Waals (importante em solos de textura fina).

Para solos não coesivos, NASCIMENTO & CASTRO (1974) utilizaram-se de relações empíricas sobre erosão em canais, tomadas da engenharia hidráulica, para estipular que solos pouco erodíveis mostrariam diâmetro médio (D50) em torno de 1,0 cm, ou seja, solos dos tipos A, B e C (da especificação M 147-65, da AASHTO). Segundo estes autores, solos consistentes mas muito expansíveis ( $E > 10\%$ ) se comportariam na prática como solos não coesivos, devido sua dispersibilidade. A título preliminar, os autores sugeriram a inclusão nestas classes (A, B e C) como um dos requisitos básicos para solos não erodíveis, tanto os não coesivos como os coesivos expansíveis.

Quanto aos solos finos (silte e argilas), saturados e sem coesão verdadeira (torrões se desfazem completamente na água), a coesão seria fornecida unicamente pelas forças de Van der Waals. Nestes solos, a erodibilidade depende da quantidade e qualidade da fração fina e da expansibilidade. A resistência à erosão seria expressa pela relação:

$$40\% \leq \% \text{ passada na peneira n}^\circ 40 \leq 90\%;$$

$$\text{Expansibilidade} \leq 10\% \text{ e } IP \leq 4\%.$$

Quando o torrão de solo não se desfaz completamente em água, o solo apresenta coesão verdadeira (NASCIMENTO & CASTRO, 1976). Neste caso, determina-se a absorção ( $W'a$ ) em amostras indeformadas e  $W'o$ , que é o teor em água para saturar uma amostra seca ao ar sem variação de volume. Se  $W'a \leq A W'o + B$ , com A e B determinados experimentalmente, a coesão é suficiente para limitar a expansão do solo, e resistir à erosão.

As tendências no estudo da erodibilidade em geotecnia indicam uma aproximação na relação erodibilidade e coesão. Naturalmente os estudos geotécnicos desenvolvem-se para uma modelagem matemática e numérica do fenômeno da erosão por fluxo superficial. Como elementos principais do modelo, ter-se-iam, segundo BASTOS et. al. (2000):

- A estimativa das tensões hidráulicas atuantes pelo fluxo superficial a partir de condicionantes hidrológicos e da infiltrabilidade do solo;
- A resistência à erosão prevista pela coesão dos solos superficiais e sua variação com a saturação do terreno;
- A estimativa da perda de solo com base nos dados de taxa de erodibilidade, obtidos em ensaios de erosão como o ensaio de Inderbtzen.

Outro avanço relativo ao estudo do processo erosivo se faz mediante ao estudo da suscetibilidade à erosão. Isto é possível através de confecções de mapas de suscetibilidade ou de risco ao fenômeno. Para a confecção destes mapas são necessárias metodologias de mapeamento. Dentre os vários modelos utilizados encontra-se a Equação Universal de Perdas de Solos (USLE) que é um modelo empírico de perda potencial

de solos por erosão laminar elaborado por WISCHMEIER & SMITH (1962).

$$E = R.K.L.S.C.P$$

Equação (I.3)

Onde:

E = perda de solo calculada por unidade de área (t/há);

R = fator erosividade (MJ/ha.mm/h);

K = fator erodibilidade do solo

L = fator comprimento do declive;

S = fator grau de declive;

C = fator de uso e manejo do solo;

P = fator prática conservacionista (cultivo).

O fator erosividade, refere-se à perda de solo por unidade de área que pode ser esperada de uma chuva ocorrendo sobre área completamente desprovida de cobertura e resíduos vegetais, mas sofrendo os mesmos tipos de operações culturais do solo cultivado. Por essa definição, o potencial de erosão de uma chuva é função do solo, do relevo e das características da chuva. Estudos relativos a este fator devem-se a dados de observações de precipitações de chuvas superiores a 20 anos.

## **I.2. OCORRÊNCIA DO FENÔMENO EROSIVO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

A Região Metropolitana do Recife (RMR) encontra-se formada pelas cidades de maior densidade populacional do estado de Pernambuco. Dentre as cidades que compõem a RMR destacam-se: Recife, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe e São Lourenço da Mata. O

processo erosivo nesta região está correlacionado às áreas de encostas com predominância de solos arenosos.



Figura I.1 - Ocupação antrópica das áreas de morros que deflagra os processo erosivos (MELO,1990)

Segundo MELO (1990), a cidade do Recife cresceu em torno do porto a partir do sec. XVI, sendo que o primeiro planejamento urbano que previu o disciplinamento da rede de drenagem ocorreu em meados do sec. XVII com o domínio holandeses. No sec. XVIII, com a expulsão dos holandeses a população continuou a crescer, expandindo-se em direção às colinas e relegando a segundo plano o planejamento iniciado pelos holandeses. A ocupação das colinas foi marcada pela retirada da cobertura vegetal e pelo assentamento desordenado da população nos topos planos e elevados, o que deflagrou os processos erosivos devido à presença de solos extremamente friáveis naquelas áreas. A partir da segunda metade do Sec. XX, as adversidades climáticas observadas no interior do

estado (secas) promoveram um ritmo mais acelerado ao crescimento populacional da cidade, intensificando a ocupação das áreas de morros e de mangues (áreas menos valorizadas sob o ponto de vista imobiliário). A ação antrópica, decorrente da ocupação indiscriminada dos morros, agravou consideravelmente o problema das erosões (ver Figura I.1).

Um caso de ocorrência de processo erosivo no município de Recife pode ser exemplificado pelo projeto de recuperação de uma encosta no Horto de Dois Irmãos.



Foto I.1 - Encosta Erodida no Horto de Dois Irmãos  
(COUTINHO et. al.,1999).

Segundo COUTINHO et. al. (1999a), nos últimos 5 anos, a encosta objeto de estudo (Foto I.1) vem sofrendo um processo erosivo de grande intensidade, cujo principal agente deflagrador é a ação antrópica, através de uma intervenção realizada de forma inadequada. A origem do problema remonta à implantação de uma área de lazer, no Horto Dois Irmãos, denominada Cidade da Criança, para cuja construção foi

necessário alterar a geometria da encosta natural, construindo-se um talude em patamares. Nesta intervenção, a ausência da especificação de material de proteção para o talude e a falta de manutenção do sistema de drenagem, associadas às características erodíveis do material presente, contribuíram para que as águas pluviais, através do regime de chuvas intensas da região, dessem início ao processo erosivo ( ver Fotos I.1 e I.2).



Foto I.2 - Encosta erodida no Horto de Dois Irmãos  
(SANTOS, 2001).

No município de Jaboatão dos Guararapes, segundo GUSMÃO FILHO et. al. (1962), a distribuição da população é heterogênea, efetuada em três formas distintas: A ocupação

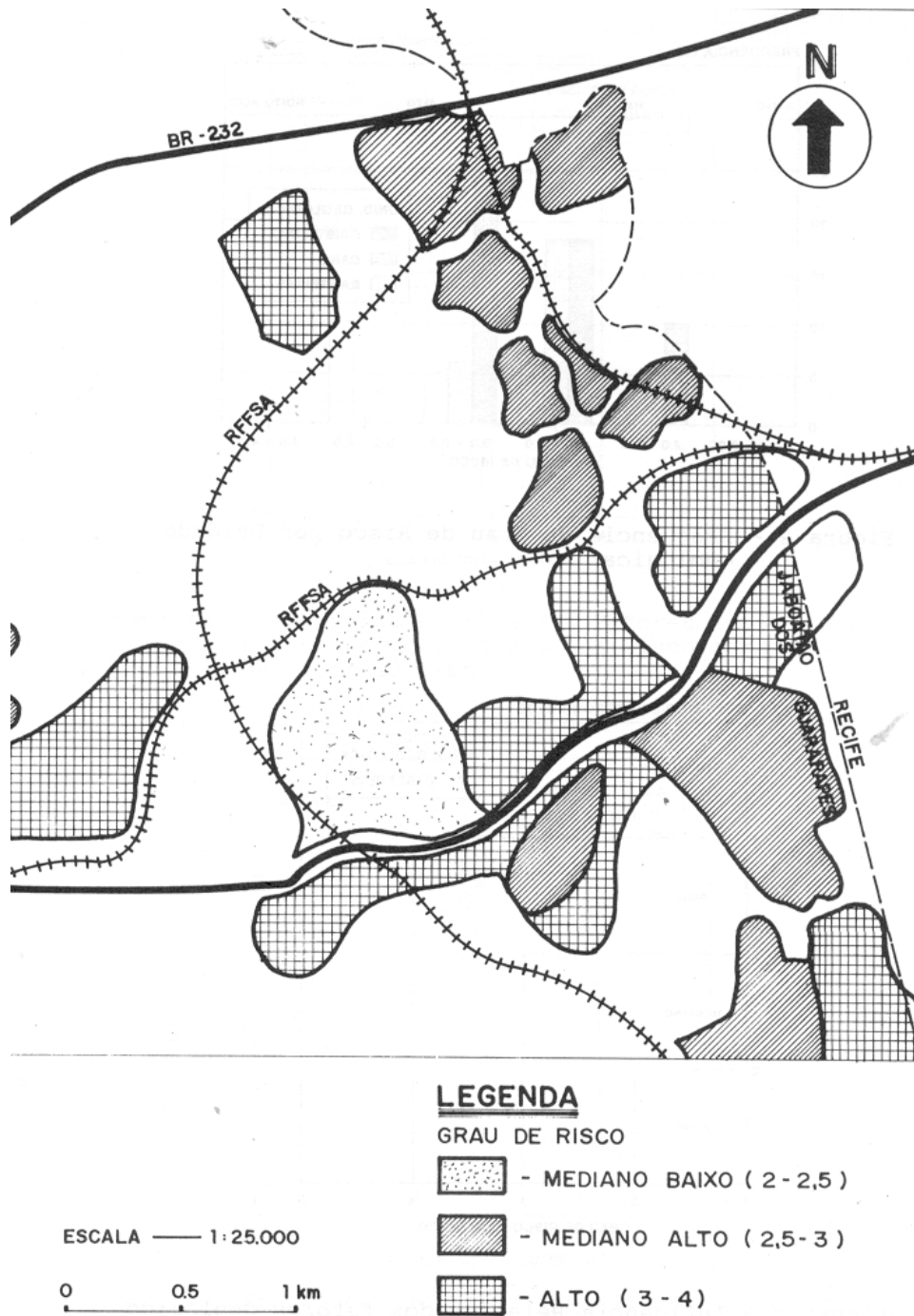


Figura I.2 - Trecho do Mapeamento das Encostas Habitadas de Jabotão dos Guararapes por Grau de Risco (GUSMÃO FILHO, 1962)

*informal e legal, feita pela população sem planejamento urbano adequado entorno do núcleo urbano inicial, deu-se de*



maneira lenta e gradual e sem agravar o meio físico. A *ocupação formal*, feita pelo poder público através de conjuntos habitacionais (COHAB), deu-se de maneira rápida e modificando o meio físico. E por último, a *ocupação por invasões*, feita pela população de forma ilegal envolve dos conjuntos habitacionais, sendo a mais agressiva ambientalmente. Na Figura I.2 observa-se o mapa de risco a movimentos de terra confeccionado na tentativa de identificar áreas de maior risco.

### **I.3. OBJETIVOS**

Nesta dissertação é apresentado o estudo da erosão no Parque Metropolitano Armando Holanda Cavalcanti, situado no Cabo de Santo Agostinho, a 40 km ao sul de Recife. A área em questão apresenta uma série de características peculiares que lhe conferem importância com relação ao turismo quanto para o desenvolvimento de projetos de preservação e educação ambiental. O Parque Metropolitano Armando Holanda Cavalcanti teve o plano diretor elaborado no ano de 1980, porém não foi implantado por falta de recursos.

A FUNCEF, em conjunto com SUAPE, CPRH, FUNDARPE e FADE, convidou o Departamento de Engenharia Civil da UFPE, através da Área de Geotecnia, para elaborar um plano de estudo preliminar de análise e avaliação do problema erosivo em áreas do parque. Deste trabalho resultou um relatório preliminar que apontava as obras de infra-estrutura para o local, com a finalidade de promover o desenvolvimento sustentável, utilizando todo o potencial da área. Entretanto, este mesmo local vem sofrendo a ação de intenso processo erosivo espalhado por várias partes numa extensão de aproximadamente 15% (37ha) de sua área total (250 ha). Este

fato pode vir a comprometer a integridade do Parque diminuindo seu potencial e prejudicando todos os ecossistemas que dele dependem.

Esta Dissertação vem contribuir nesse estudo do processo erosivo, tendo como objetivo geral conhecer o processo erosivo e sua potencialidade na encosta escolhida - encosta central - para futuras intervenções, no intuito de estagnar o processo e recuperar a área degradada. A fim de estruturar o trabalho, foram estabelecidos objetivos específicos a serem alcançados, que são:

- Estudar o potencial erosivo do solo através de ensaios de caracterização;
- Estudar o potencial de colapsibilidade do solo;
- Avalizar a erodibilidade do solo utilizando parâmetros de resistência;
- Estudar o potencial de erodibilidade do solo através de ensaios de erodibilidade;

#### **I.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente estudo está dividido em seis capítulos, a seguir descritos:

O Capítulo II apresenta uma abordagem sobre erosão, descrevendo os tipos de erosão, seus agentes e fatores. É também avaliado o impacto ambiental devido à erosão as técnicas e obras de controle.

No Capítulo III estão apresentadas as características gerais referentes à área em estudo e sua importância histórica e eco-turística descrevendo os acontecimentos ocorridos ao longo do tempo. Nas características relativas a área descreve-se o clima, a geológica, o relevo e a investigação de campo.

O Capítulo IV descreve o trabalho, as metodologias e procedimentos empregados nas atividades de laboratório. Este capítulo divide-se em quatro estudos: granulometria, compressibilidade, cisalhamento direto e permeabilidade. A partir dos parâmetros geotécnicos obtidos tentou-se obter, por correlações, a potencialidade quanto a erodibilidade de cada camada de solo.

O Capítulo V apresenta, analisa e discute os resultados obtidos nos ensaios de laboratório para quantificar o potencial de erodibilidade. Apresentando os estudos do potencial de erodibilidade através de ensaios de erodibilidade, metodologias e correlações.

No capítulo VI são apresentadas as principais conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

## **CAPÍTULO II** **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### II.1. INTRODUÇÃO

De acordo com INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998) e conforme o princípio do *uniformitarismo*, enunciado por HUTTON, em 1976, reexposto por PLAYFAIR, em 1802, e popularizado por LYELL, nas edições de *Principles of Geology*, todos retirados da primeira referência, os mesmos processos físicos atuantes hoje operaram no passado, embora não necessariamente com a mesma intensidade.

Os processo físicos seriam os responsáveis pela moldagem da paisagem, ou seja, está relacionada às forças atuantes na superfície da terra (a gravidade, as marés, a radiação e o calor interno).

A gravidade ou o campo gravitacional terrestre é responsável pela tendência da água e do solo ou rocha se deslocarem dos pontos mais altos para os mais baixos. Os fundos dos mares são os limite para esse movimento nivelador. O efeito gravitacional do Sol e da Lua, sobre os oceanos, provoca as marés que favorecem um ataque de maior amplitude das ondas do mar sobre as costas continentais. Como também a grande quantidade de energia solar recebida pela Terra na forma de radiação solar, convertida em trabalho mecânico pela água, desempenha um papel importante na modelagem da paisagem.

Os processos de dinâmica superficial são resultado da interação de diversos fatores físicos, químicos, biológicos e, recentemente, quando o homem passou a interferir nos processos naturais, também de fatores antrópicos (socioeconômicos, culturais ou tecnológicos).

Partindo do meio físico, com a ótica da Geologia de Engenharia, FORNASARI FILHO et. al. (1992) e INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998), abordam os processos que, com alguma frequência, são afetados por atividades humanas individualizadas e modificadas do meio ambiente, Tabela II.1.

Utilizando esta ótica, observa-se que o fenômeno da erosão está enquadrado nas esferas da hidrosfera (escoamento das águas em superfície) e da litosfera (exógenos: intemperismo e movimentos de massa).

Tabela II.1 - Processos geológicos.

ATMOSFERA	HIDROSFERA	LITOSFERA
Circulação de água no ar	Escoamento das águas em superfície	Endógenos: sismos e vulcanismo
Circulação de partículas e gases na atmosfera	Movimentação das águas de subsuperfície	Exógenos: intemperismo e movimentos de massa.

De acordo com LLOPIS TRILLO (1999), erosão provém do verbo latino *erodere* que significa roer. É um fenômeno geológico natural, gerador de sedimentos, que sempre existiu na superfície terrestre, começando quando as rochas põem-se em contato com a atmosfera. Em última instância se deve a energia solar e a presença de um potencial regulador que é a gravidade e seu poder de influência em toda a superfície do planeta, como também na mesma intensidade no tempo e no espaço.

A intensidade com que se manifesta depende de uma série de fatores que, por sua vez, são dependentes da geologia e do clima da região considerada, e ainda, da ação antrópica..

Conclui-se que a erosão é um fenômeno do desgaste das rochas e solos, com desagregação, deslocamentos ou arrastamento das partículas por ação de agentes erosivos. As

formas de erosão são diferenciadas pela velocidade e pela ação dos agentes que a produz.

## II.2. TIPOS DE EROSÃO

Classifica-se a erosão por dois processos: 1º) Quanto à velocidade e 2º) Quanto ao agente erosivo.

Quanto à velocidade do processo segundo DAEE (1990), o solo é uma camada *viva*, no sentido do processo permanente da sua formação, através da alteração das rochas e de processos pedogenéticos comandados por agentes físicos, químicos e orgânicos. Este processo de erosão, remove seus constituintes, sobretudo pela ação da água de chuvas. Portanto, na superfície da terra há um quadro extremamente dinâmico, no qual diversos processos atuam de forma contraditória, formando e erodindo os solos. Este é um quadro que reflete um certo equilíbrio na natureza e, onde, a erosão é considerada como *erosão normal*. Entretanto, às vezes, esse equilíbrio é rompido com uma intensificação da erosão quando, então, se considera uma *erosão acelerada* que, sendo mais veloz que os processos de formação dos solos, não permite que estes se regenerem. Neste quadro de desequilíbrio observa-se a perda das diversas camadas ou horizontes do solo sucessivamente até que aflorem as rochas subjacentes. A perda total do solo constitui um altíssimo índice de degradação da superfície da terra, impedindo a realização de importantes atividades humanas, como o uso agrícola do solo, embora esta erosão acelerada, quando desencadeada por alterações das condições geológicas ou climáticas, se dê ao longo de milhares de anos. A erosão acelerada, quando provocada pelo homem, pode ocorrer em poucos anos; sendo conhecida por *erosão antrópica*.

Quanto ao agente erosivo, à nível global do conjunto da superfície terrestre, os diferentes tipos de erosão dividem-se: erosão hídrica e erosão eólica. Esta revisão bibliográfica se limitará ao primeiro tipo.

De acordo com LLOPIS TRILLO (1999), a uma escala reduzida de um talude e zonas vizinhas, os únicos agentes que revestem importância são a *erosão eólica* e, sobretudo, a *erosão hídrica* produzida pelas gotas de chuva que no impacto sobre o terreno desprendem partículas que são arrastadas pelas águas de escoamento, e pelas águas de infiltração irão reduzir a resistência e coesão do solo.

### II.2.1. EROSÃO HÍDRICA

LLOPIS TRILLO (1999), define a erosão hídrica como aquela em que os processos de desagregação das rochas ou solos, e de desnudação e transportes, são efetuados pela chuva.

A erosão hídrica é dependente de forças devidas a fatores ou determinadas por fatores que afetam seu processo, será mais bem esquematizado na Figura II.1.

Este tipo de erosão pode se processar em duas formas: erosão interna e externa, devido, respectivamente, a fluxos internos e externos (ver quadro abaixo).

Tabela II.2 - Tipos e subtipos de processo erosivo.

TIPO	SUBTIPO
Erosão Superficial	Este tipo de erosão pode se processar em forma de erosão pluvial, erosão laminar, erosão por escoamento difuso (em sulcos).
Erosão Interna	Erosão interna por escoamento difuso interno ( <i>piping</i> ) e erosão por escoamento concentrado ( <i>voçorocas</i> ).

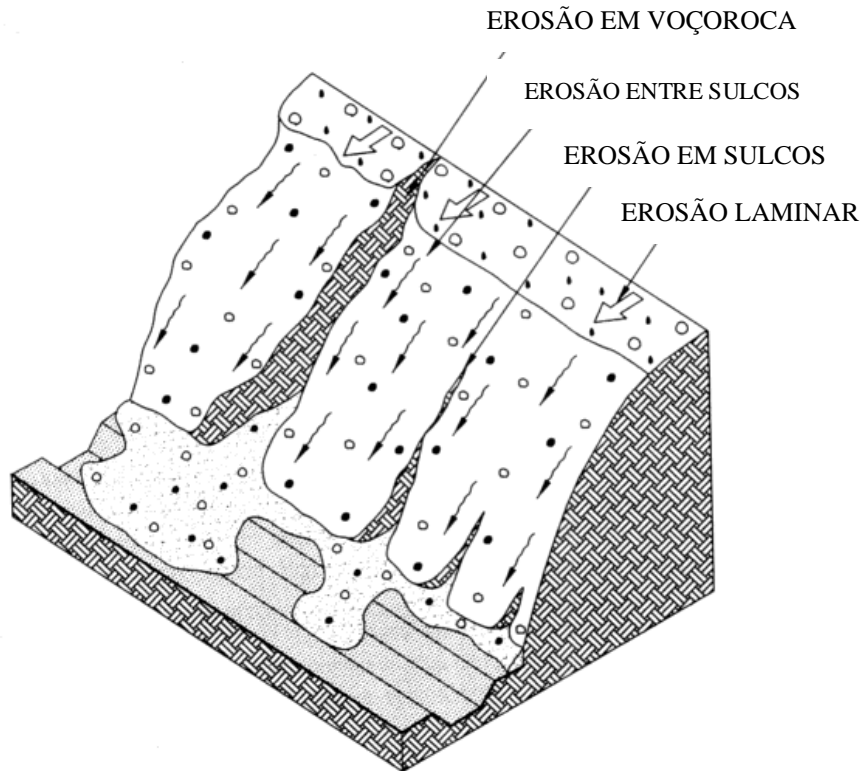


Figura II.1 - Processo esquematizado do processo de erosão hídrica  
(LLOPIS TRILLO, 1999).

### II.2.1.1. Erosão Superficial

#### II.2.1.1.1. Erosão Pluvial

Também denominada de erosão *por embate*, é produzido pelo impacto das gotas de chuva ao caírem sobre superfícies desprovidas.

A desintegração parcial dos agregados naturais no solo, liberta partículas finas, deslocando-as e projetando-as a uma certa distância. O golpe das gotas afeta primeiramente a estrutura da capa superficial, predispondo a um desprendimento das partículas, que em seguida serão mobilizadas pelo escoamento.



Segundo DAEE (1990), inicialmente, o solo desprovido recebe o impacto direto de cada gota de chuva, desagregando suas partículas, em, partículas menores e mais soltas (Figura II.2).

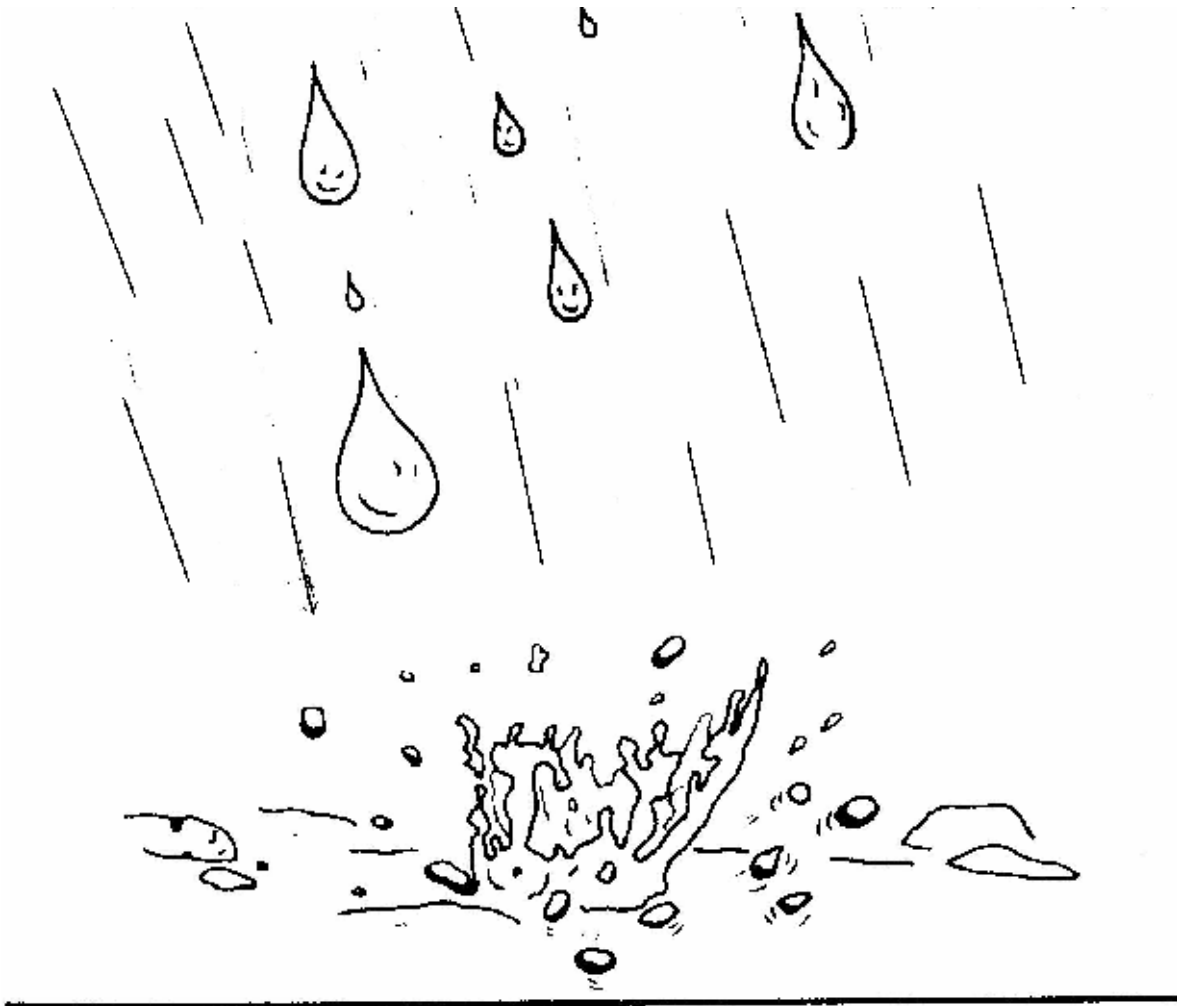


Figura II.2 - Esquema do processo de erosão pluvial (DAEE, 1990).

#### II.2.1.1.2. Erosão Laminar

Também denominada de *erosão em lençol* se processa durante as fortes precipitações, quando o solo superficial já está saturado, sendo produzido por um desgaste suave e uniforme da camada superficial em toda sua extensão. Esse tipo de erosão

se desenvolve quando há pouco obstáculo, permitindo uma lâmina de água se ecoar, sendo um fenômeno muito comum em regiões semi-áridas. É de difícil observação e pode ser percebido pelo aparecimento de raízes ou marcas nas estruturas.

Segundo DAEE (1990), os filetes de água, ao escorrerem encosta abaixo, podem seguir lavando a superfície do terreno como um todo, sem formar canais definidos, ou podem se juntar cada vez mais até formar enxurradas com elevada capacidade de arrancar novas partículas dos solos e de transportar grandes volumes do material solto. No primeiro caso, é como se uma lâmina d'água lavasse por inteiro o terreno, daí por que a erosão dos solos que ela causa ser conhecida como *erosão por escoamento laminar* ou, simplesmente, *erosão laminar* (Figura II.3).

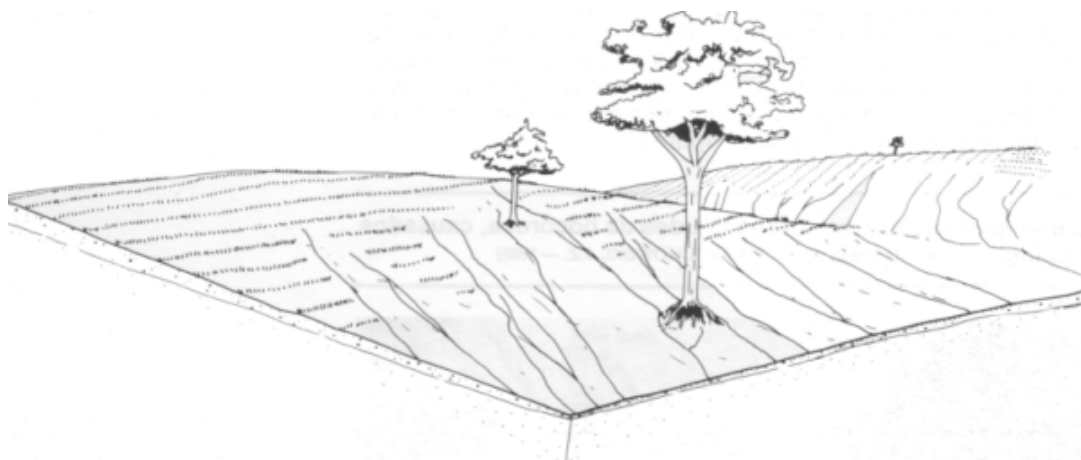


Figura II.3 - Esquema do processo de erosão laminar  
(LLOPIS TRILLO, 1999).

De acordo com LLOPIS TRILLO (1999), a erosão laminar consiste em uma remoção de delgadas capas de solo produzida pela água que escorrem por terrenos uniformes e de pouco

relevo, provocando a perda de uma porção de solo com maior teor de matéria orgânica, que conduz a um empobrecimento em elementos nutrientes e a um decréscimo da capacidade de armazenagem de água.

#### II.2.1.1.3. Erosão Por Escoamento Difuso

Também denominada *erosão em ravinas ou regos*, é uma forma caracterizada por filetes de água que se dividem em braços que se espalham e se juntam constantemente, infiltrando-se depois de pouca distância, depositando o material transportado. A água ao escoar pelo terreno pode formar depressões que aos poucos vão aumentando para sulcos. Esse tipo de erosão é generalizado e existe mesmo sob uma cobertura vegetal, sendo um agente de transporte do material já desagregado pelas chuvas ou outros fatores.

Segundo LLOPIS TRILLO (1999), as linhas de corrente de trajetória variante vão se concentrando a favor das linhas de máxima do relevo do terreno aparecendo concentrações de fluxo e aumentos de velocidade da água como conseqüência aumento do potencial erosivo, levando a ocorrer pequenas incisões longitudinais, de medida aproximada de 30 cm de profundidade, com seções em forma de U ou de V denominadas regos ou sulcos.

#### II.2.1.2. Erosão Interna

##### II.2.1.2.1. Erosão Por Escoamento Difuso Interno

Também denominada por *erosão por piping* - nome em inglês, segundo DAEE (1990), tal processo avança para o interior do solo na forma de tubos (daí o processo ser também conhecido por entubamento). Quando os vazios criados no interior do solo tornam-se significativos, podem dar origem a colapsos do

terreno, com desabamentos que alargam a voçorocas ou criam novos ramos. Associa-se também aos processos de erosão interna os descalçamentos e solapamentos da base de paredes da voçoroca, que provocam desmoronamentos ou escorregamentos de solos (Figura II.4).

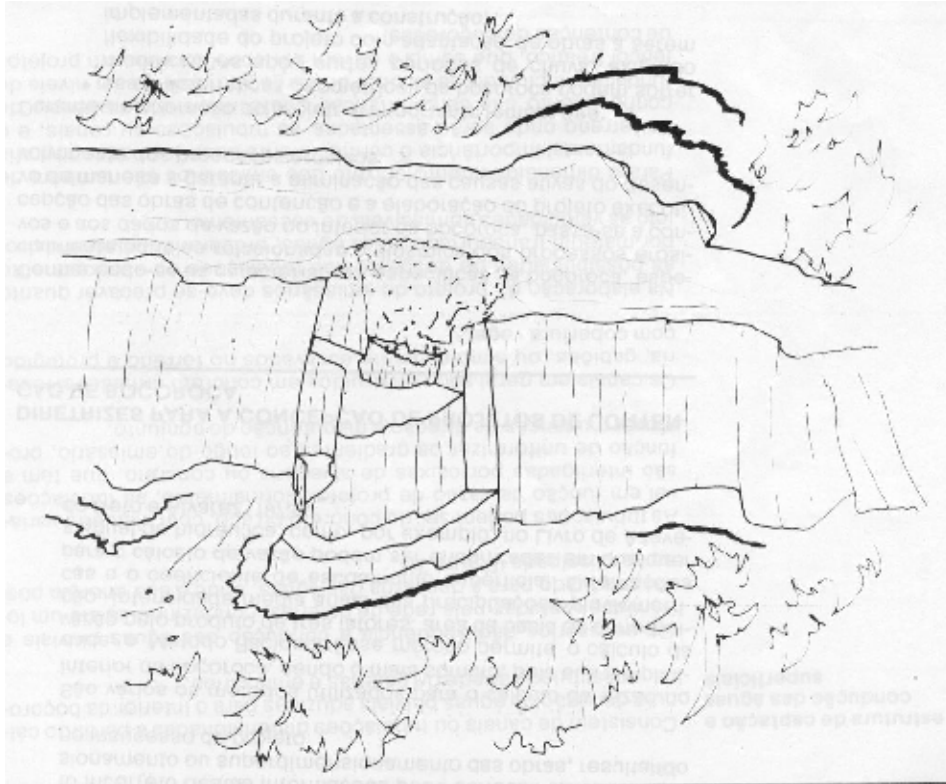


Figura II.4 - Esquema de erosão em voçoroca por desmoronamentos ou escorregamento de solos (DAEE, 1990).

#### II.2.1.2.2. Erosão Por Escoamento Concentrado

Refere-se ao tipo de erosão semelhante ao formador de sulcos ou ravinas, sendo neste caso a formação de crateras com escoamento das águas.

Segundo LLOPIS TRILLO (1999), se as pequenas incisões que circulam água no terreno não se eliminam (por meteorização ou por lavragem - cultivo da terra), estas irão progredindo em

sentido do escoar a água, captando e desprendendo matérias de maior tamanho devido a sua falta de coesão por excesso de umidade, chegando a produzir profundas incisões, mais de 30 cm passando a vários metros de profundidade, com secções em forma de U, de V, ou uma combinação de ambas.

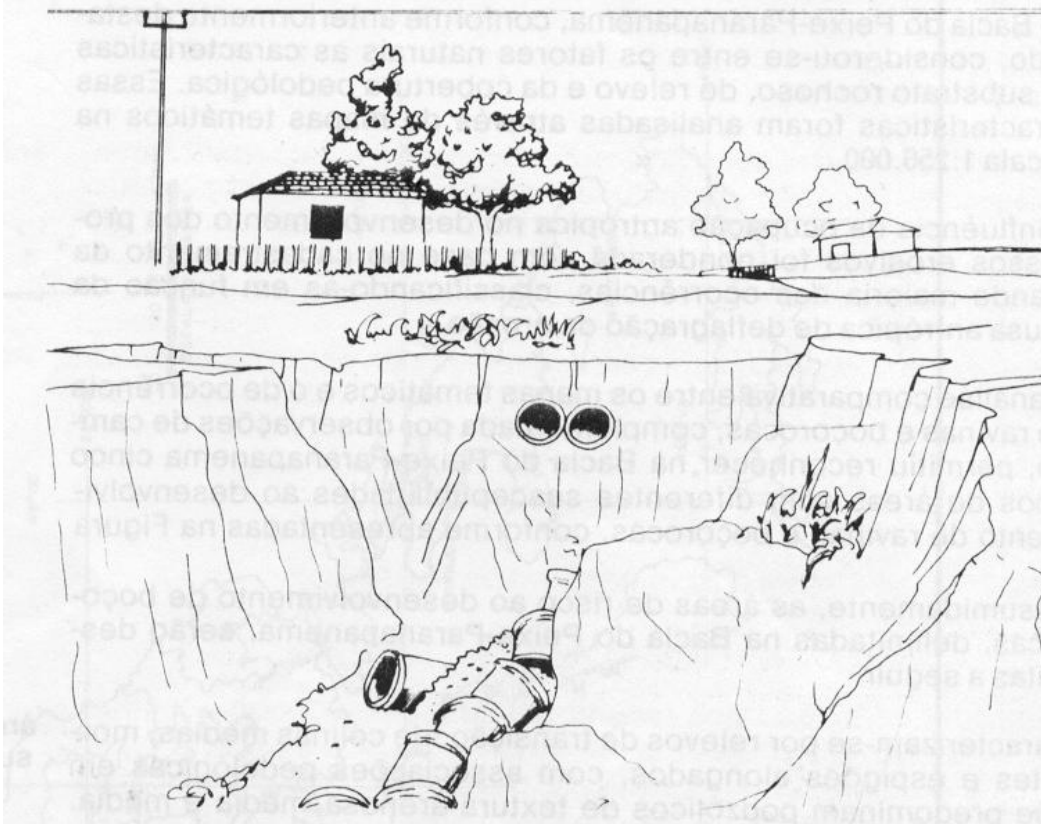


Figura II.5 - Esquema de processo de erosão por piping devido às águas servidas em zona urbana (DAEE, 1990).

Ainda segundo LLOPIS TRILLO (1999), as crateras se produzem em terrenos que previamente tenha sofrido algumas das anteriores modalidades de erosão. Crescem em profundidade e em largura por erosão da corrente d'água - fluxo interno - e dos materiais que são arrastados, pela queda d'água na cabeceira da cratera, o que dá lugar a uma erosão remontante,

e por desmoronamento das paredes devido à instabilidade da encosta em que se encontra.

### II.3. AGENTES EROSIVOS

Os agentes erosivos denominam-se aos elementos que causam, ou afetam, diretamente a erosão, podendo ser *ativos* e *passivos* (Tabela II.2).

Tabela II.3 - Tipos de Agentes Erosivos

<b>Agente Erosivo</b>	<b>Tipo de Agente</b>	<b>Observações</b>
<b>ATIVOS</b>	Água	Devido as águas de infiltração e escoamento, podendo ocorrer erosão quando ocorrer chuvas de grande intensidade e curta duração.
	Temperatura	Influenciada pela insolação provocando dilatações e contrações que enfraquecem o solo.
	Vento	Responsável pelo transporte das partículas em terrenos planos (sem escoamento).
	Ação de Microorganismos	Numa micro-escala agem intemperizando rocha e minerais.
	Ação Antrópica	Correspondem as práticas gerais realizadas pelo homem. Atuação crescente com o aumento da população e a ocupação territorial.
<b>PASSIVOS</b>	Topografia	Aumentando a declividade e o comprimento da rampa condicionada a rugosidade da superfície.
	Gravidade	A declividade do terreno favorece a atuação.
	Tipo de Solo	É dependente da textura e da estrutura do solo que influência na permeabilidade.
	Cobertura Vegetal	Protege o solo do impacto das gotas de chuva, aumentando a evapotranspiração e a infiltração, diminuindo o escoamento.
	Formações Superficiais	São os materiais passíveis de erosão que afloram na superfície.

### **II.3.1. AGENTES ATIVOS**

Compõem os agentes ativos a água, temperatura, insolação, vento, a ação de microorganismos e a ação humana.

#### **II.3.1.1. Água**

A água, como agente ativo, atua no processo de erosão através do efeito de *infiltração* e de *escoamento*. As águas de infiltração dão lugar a movimentos de remoção de materiais quando a umidade excessiva provoca a perda de coesão do solo, ou seja, quando excede os limites de plasticidade ou de liquidez. Também as águas de infiltração originam as alterações de dissolução dos minerais. As águas de escoamento são aquelas que se escoam pela superfície do terreno, em enxurradas de forma difusa, laminar ou concentrada, e cuja força de arraste e de transporte é variável segundo os diferentes fatores físicos.

De acordo com MOTA (1991), chuvas de grande intensidade e curta duração resultam em maior escoamento das águas e, conseqüentemente, em maior possibilidade de ocorrer a erosão. Quanto maior for a freqüência das chuvas, mais encharcado ficará o solo, reduzindo sua capacidade de absorver água e, portanto, mais água escoará arrastando partículas do solo.

#### **II.3.1.2. Temperatura**

A temperatura e a insolação são outros efeitos climáticos de grande importância na erosão. A temperatura é muito influenciada pela insolação e ambas provocam dilatações e contrações sucessivas que enfraquecem o solo, facilitando a remoção de partículas.

### **II.3.1.3. Vento**

O vento é um agente de importância secundária. É responsável por transporte de material já desagregado e tem grande importância nos terrenos planos, onde não se processa escoamento, nas regiões áridas, semi-áridas e nas superfícies desérticas onde a vegetação não protege o solo adequadamente.

### **II.3.1.4. Ação de Microorganismos**

A ação de microorganismos tem um papel muito reduzido em comparação com os outros agentes.

Segundo THORNES (1990), estudos realizados em pequenas plantas e microorganismos no intemperismo de rochas e minerais tem focalizado especialmente resultados em micro-escala. Algumas espécies de líquens, algas, fungos e bactérias têm-se encontrado capazes de intemperizar rochas comuns através de processos químicos e/ou físicos. Microorganismos também podem proteger a superfície de rochas e minerais, entretanto retardando a intemperização. Alternativamente eles também intemperizam diretamente por ataques de ácidos e outros processos. Em alguns casos ocorrem as três situações ao mesmo tempo, devido a complexibilidade do sistema, torna-se difícil avaliar a velocidade biológica de intemperização e compara-la com os processos inorgânicos.

### **II.3.1.5. Ação Antrópica**

As ações antrópicas correspondem às práticas gerais realizadas pelo homem, e têm grande importância no tipo e intensidade dos processos erosivos.



Segundo MOTA (1991), atividades desenvolvidas pelo homem contribuem para a aceleração do processo de erosão do solo, destacando-se:

- Desmatamento de áreas extensas, de terrenos de encostas, da mata ciliar, de locais de solos erodíveis, entre outros.
- Práticas agrícolas: monoculturas; culturas não perenes; plantio em encostas; cultivo intensivo; uso de máquinas e implementos agrícolas.
- Queimadas.
- Agropecuária: criação excessiva de animais em áreas de pastagem (sobre pastoreio).
- Movimentos de terra: escavações e aterros.
- Alterações no escoamento natural das águas: barragens; aterros; alterações nos trajetos de cursos d'água; drenagem artificial.
- Impermeabilização do solo: construções, pavimentações, compactação.
- Atividades de mineração.
- Execução de obras: desmatamentos; movimentos de terra; áreas de empréstimos; impermeabilização; alterações no escoamento das águas.

### **II.3.2. AGENTES PASSIVOS**

Compõem-se os agentes passivos a topografia, a gravidade, o tipo de solo, a cobertura vegetal, as formações superficiais.

### II.3.2.1. Topografia

A topografia, levando em conta o aumento da *declividade* e o *comprimento da rampa*, provoca um aumento de erosão, condicionado também pela rugosidade da superfície.

O relevo refere-se às saliências e reentrâncias da superfície da terra, em escala planetária: representada pelo oceano e pelo continente - este representado pelas cadeias de montanhas e pelas grandes planícies fluviais. Segundo MOREIRA e PIRES NETO (1998) os arranjos espaciais dos perfis transversais e longitudinais das vertentes definiram quatro tipos básicos de vertentes que se caracterizam pela atuação de diferentes processos erosivos, Figura II.9.

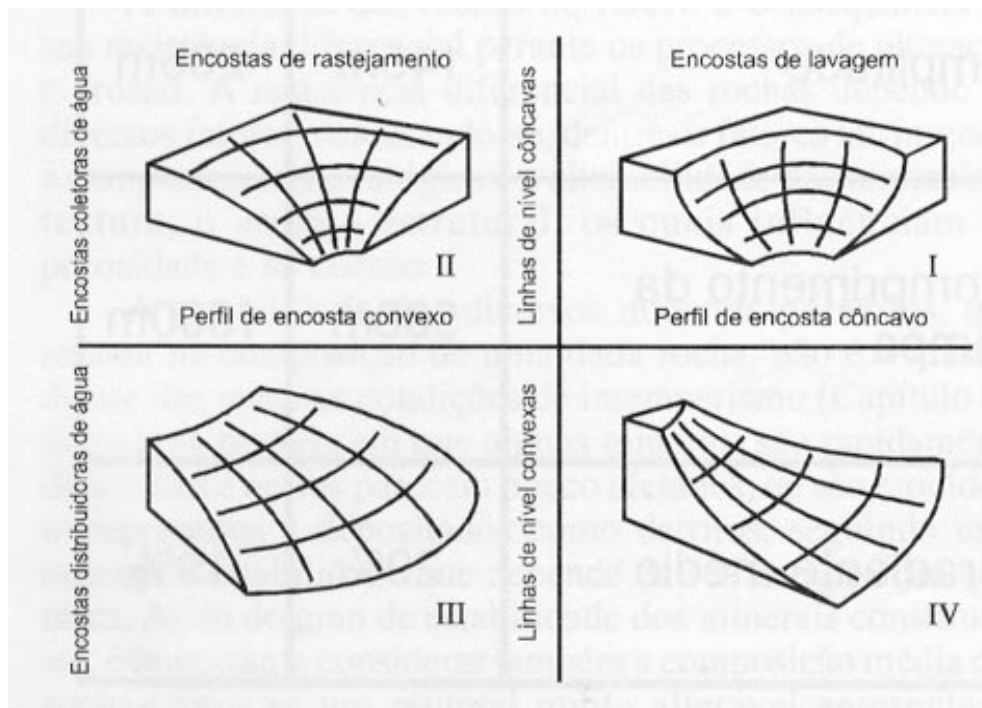


Figura II.6 - Tipos básicos de vertentes que caracterizam processos erosivos (MOREIRA E PIRES NETO, 1998).

MOTA (1991) afirma que a topografia do terreno, representada pela declividade e extensão do declive, também

contribui para a maior ou menor ocorrência da erosão do solo. Terrenos com grandes declividades são mais sujeitos à erosão, pois é maior a velocidade de escoamento da água que se acumulará ao longo do mesmo e mais elevada será a sua velocidade, resultando no incremento da erosão.

As vertentes e as formas de relevo podem ser caracterizadas por índices morfométricos, através de cartas topográficas, sendo estes a altitude, a amplitude, o comprimento de rampa e a declividade. Outros índices podem ser utilizados como a densidade de drenagem, relação de bifurcação de canais, gradiente de canais, etc. Segundo MOREIRA e PIRES NETO (1998), a análise dos atributos morfométricos do relevo permite avaliar o seu grau de energia e a sua suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos e deposicionais. Permite também inferir a intensidade de desnudação e a amplitude de soerguimento, bem como contribuir para a avaliação das possibilidades de urbanização, o tipo e as características do sistema viário, o tipo de manejo agrícola, etc.

#### II.3.2.2. Gravidade

A gravidade é outro agente de grande importância na ação erosiva, sendo que a declividade dos terrenos favorece a sua atuação. Devido ao campo gravitacional terrestre nos terrenos de maior declividade ocorre aumento da velocidade das águas vindas de chuvas, incrementando o processo erosivo.

#### II.3.2.3. Tipo de Solo

O tipo de solo, nas formações superficiais, é muito variável e representa uma grande importância na erosão. As

rochas sofrem erosão muito lenta, mas os solos podem ter uma grande erosão dependendo da sua textura e estrutura. A textura representa o tamanho das partículas, enquanto a estrutura representa o arranjo e o agrupamento dessas mesmas partículas, influenciando esses aspectos na permeabilidade.

De acordo com MOTA (1991), as características do solo têm influência no processo de erosão. Dependendo de sua estrutura e da sua textura, será maior ou menor a quantidade de solo arrastado. A permeabilidade é outro fator importante, pois, quanto maior for a mesma, mais elevada será a infiltração e menor será o escoamento superficial e, por consequência, menor será a erosão. A profundidade do solo também influi, pois quanto maior for a camada de solo, mais água ele acumulará, reduzindo o escoamento superficial. O conteúdo de matéria orgânica é outro aspecto a ser considerado, pois a mesma retém bem a água, diminuindo as perdas por erosão.

#### II.3.2.4. Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal protege o solo contra a erosão pluvial, aumentando a evapotranspiração e a infiltração, diminuindo o escoamento. Parte da água da chuva não chega ao solo, sendo interceptada pela folhagem e evapora diretamente, outra parte se escoia pelos ramos e troncos lentamente, indo ao solo para se infiltrar (Figura II.10).

Segundo BRANCO & ROCHA (1987), a vegetação protege o solo de diferentes maneiras em primeiro lugar, ela reduz ou amortece o impacto das gotas de chuva contra o solo, além disso, constitui barreira física ao transporte de materiais (principalmente as plantas rasteiras), reduzindo a velocidade de escoamento da água, de tal maneira que, quando a velocidade é reduzida à metade, o transporte cai à quarta

parte de seu valor; por outro lado, a presença de um sistema radicular constituído de uma infinidade de filamentos microscópicos aderentes aos grãos de terra dá uma solidez muito maior à sua estrutura, ao mesmo tempo em que aumenta sua porosidade. Pode-se acrescentar a esses efeitos, o da formação de materiais coloidais, pela decomposição de folhas e outros vegetais que caem sobre o chão, matérias essas que exercem ação aglutinante das partículas, originando agregados de maiores dimensões e elevando a porosidade do solo, que se torna, assim, mais capaz de absorver a água.

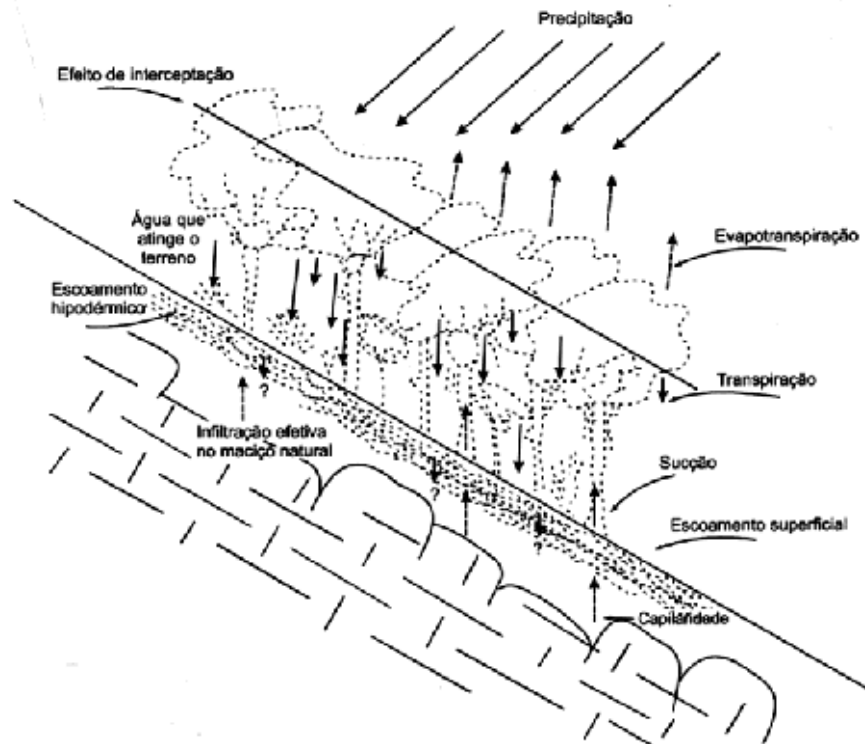


Figura II.7 - Ciclo das águas vs. vegetação  
(INFANTI Jr. & FORNASARI FILHO, 1998).

### II.3.2.5. Formações Superficiais

As formações superficiais são os materiais passíveis de erosão que afloram na superfície, como rochas, rochas

alteradas ou depósitos aluviais, coluviais e glaciais. A erosão dessas formações superficiais é muito variável e depende da consistência dos materiais, do comportamento na infiltração e no escoamento, da espessura da camada, da declividade e das fraturas existentes.

#### **II.4. FATORES EROSIVOS**

Genericamente os fatores que influenciam na determinação da erosão, dentro da superfície terrestre, são os geológicos e os climáticos derivados de outros fatores que podem ser de ordem tectônicos, litológicos, edafológicos (ciência que estuda o solo) e geomorfológicos e inclusive antrópicos. Estes em conjunto tornam complexos, independentes e variáveis com o tempo.

A escala reduzida de um talude, os fatores que controlam a erosão são o *clima* com sua agressividade ou *erosividade*, a *natureza do terreno* com seu maior ou menor *erodibilidade*, o *relevo topográfico* com sua *inclinação*, *longitude* e *forma* da vertente, e a *cobertura vegetal* própria ou implantada em sua superfície.

A erosividade depende exclusivamente das propriedades da chuva ou do vento e é independente da erodibilidade, que é uma medida quantitativa do solo, podendo verificar o quando tente á erosão.

##### **II.4.1. EROSIVIDADE (EROSÃO SUPERFICIAL)**

Segundo LLOPIS TRILLO (1999), a perda de solo está estritamente relacionada com a chuva, em parte pelo poder de desprendimento no impacto das gotas de chuva ao golpear o

solo e, em parte, pela contribuição da chuva ao escoamento da superfície.

O impacto das gotas de chuva dispensa e separa as partículas de solo, como que se inicia a perda do mesmo. A eficiência da chuva nessa desagregação depende diretamente de sua *energia cinética* (LLOPIS TRILLO, 1999).

Uma gota de chuva alcança uma velocidade limite, chamada velocidade terminal. Devido a dificuldade de equacioná-la, se recorre ao registro da *intensidade de chuvas*, que é a quantidade que cai em cada instante. Como existe uma relação entre a intensidade de chuvas e a distribuição das gotas que compõem, portanto assim relacionadas à intensidade de chuvas e a energia cinética (velocidade inicial e terminal da queda da gota de chuva).

Segundo LLOPIS TRILLO (1999), a maior parte da energia cinética da chuva se dissipa no rolamento com a superfície do terreno, de maneira que sobram uns 0,2% de energia das gotas de chuva, e entre uns 3 a 4% de energia do escoamento se consomem na erosão.

A água e o ar têm propriedades diferentes, que refletem nas características de transporte de sedimentos de forma diferente. A força de coesão que mantém as moléculas de água junta frente ao movimento desordenado das moléculas de ar, a menor compressibilidade da água, fazem que uma corrente de água possa arrastar e manter em suspensão partículas de sedimentos muitos mais grandes que uma corrente de ar fluindo na mesma velocidade.

#### **II.4.2. ERODIBILIDADE**

A erodibilidade de um solo é diretamente proporcional a ocorrência de erosão do solo, isto é, quanto maior a

erodibilidade sofrerá mais erosão. Sendo que a erodibilidade relacionada com a chuva e ou o vento é uma medida direta em ambas devido as propriedades físicas do solo ou da rocha, e de difícil quantificação.

Segundo LLOPIS TRILLO (1999), em termos gerais se pode dizer que as rochas que apresentam menor erodibilidade são as rochas ígneas junto com as quartzas e calcitas compactadas (mármore). Em rochas carbonatas (calcárias sedimentares) a erodibilidade será função do teor em cálcio, e em rochas detríticas (plásticas) dependerá da cimentação.

Ainda de acordo com LLOPIS TRILLO (1999), em caso de formações sedimentares, a erodibilidade de um solo depende da textura, da estrutura, da resistência ao esforço cortante, da capacidade de infiltração e dos teores de minerais e orgânicos.

A textura é em função da granulometria, representada pela curva granulométrica, sendo que os solos que contém maior teor em areias finas e grossas são pouco erodíveis, devido a sua alta permeabilidade; porém, os solos que contém mais argilas são mais coesivos, diminuindo a dispersão, assim, o impacto das gotas de chuva. No caso de siltes que contenham elevada porcentagem de areias finas são solos menos resistentes e mais erodíveis (Tabela II.2; retirada em LLOPIS TRILLO, 1999).

A estrutura determina a distribuição dos espaços de matéria sólida e de poros ocupados por água ou ar. Essa distribuição condiciona as propriedades físicas do solo: sucção, permeabilidade, etc.


Na estrutura encontram-se, em geral no solo, formas e tamanhos diferentes chamados de agregados. A estabilidade destes agregados influência diretamente na erodibilidade de um solo e está relacionado com a textura, teor em matéria



orgânica e presença de cátions bivalentes. De acordo com LLOPIS TRILLO (1999), são mais estáveis aqueles agregados que contém uma quantidade importante de argila e de matéria orgânica, e ademais predominem os cátions bivalentes (cálcio e magnésio) sobre os monovalentes (sódio e potássio). Como também depende do tipo de mineral argiloso presente: *ilita* e *montmorilonita* formam agregados mais rapidamente, porém são estruturas cristalinas mais abertas sujeitas a maiores dilatações e contrações que se produzem nas variações de umidade, fazendo com que seus agregados sejam menos estáveis que os formados por *caulinita*.

A resistência ao corte de um solo é medida pela coesão e capacidade de resistir as tensões exercidas pela gravidade,

Tabela II.4 - Suscetibilidade de diferentes tipos de solo à erosão (LLOPIS TRILLO, 1999).

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO DO SOLO	ERODIBILIDADE
GW	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia, bem graduados, com poucos ou sem finos.	
GP	Pedregulhos e mistura de pedregulho e areia, mal graduados, com poucos ou sem finos.	
SW	Areias e areias pedregulhosas, bem graduadas, com poucos ou sem finos.	
GM	Cascalho siltoso, misturas de cascalho, areia e silte.	
CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada, argilas gordas.	
CL	Argilas inorgânicas de plasticidade baixa ou média, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.	
OL	Siltes orgânicos, siltes e argilas orgânicas de plasticidade baixa.	
MH	Siltes inorgânicos, solos arenosos finos ou siltosos micáceos e diatomáceos, solos elásticos.	
SC	Areias argilosas, mistura de areia e argila.	
SM	Areias siltosas, misturas de areia e silte.	
ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, pó-de-pedra, areias finas siltosas ou argilosas, e siltes argilosos pouco plásticos.	

movimentos de fluidos e cargas mecânicas; e está relacionada com a umidade. Quando o solo está saturado é mínima a resistência ao corte, devida a produção de desprendimento das partículas, por mecanismos combinados de compressão e corte, provocados pelo impacto das gotas. Quando o solo não está saturado, a velocidade de infiltração é alta, apesar de possuir alta sucção, isto está relacionada à condutividade hidráulica. A absorção d'água diminui com o aumento da velocidade de infiltração chegando a um valor estável, então o solo apresentará no estado saturado neste estágio. Segundo LLOPIS TRILLO (1999), a velocidade de infiltração estabilizada depende, sobre tudo, da textura do solo. Os solos arenosos têm uma velocidade de infiltração maior que os argilosos, sendo os solos siltosos têm valores intermediários, Tabela II.4.

Tabela II.5 - Velocidade de infiltração dos diferentes tipos de solos.

TEXTURA	VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO <sup>(1)</sup>
<b>Arenosa</b>	Mais de 30
Silto arenosa	20 - 30
Silte	10 - 20
Silto argilosa	5 - 10
Argila	Menos de 5

(1) Unidade: milímetros de altura de água por hora.

A estabilização dos agregados é influenciada pelo teor de componentes minerais e orgânicos. A matéria orgânica formada pela decomposição de restos vegetais e/ou animais constitui o *humus* por processo de *humificação*, os componentes minerais, *argilas* e/ou *óxidos*, se minaralizam de forma mais lenta por

processos *físicos* e *químicos*. Segundo LLOPIS TRILLO (1999), solos com menos de 3,5% de matéria orgânica (equivalente aproximadamente a 2% de carbono orgânico) podem ser considerados erodíveis. A respeito dos componentes minerais, o fator mais importante sobre a erodibilidade é a proporção de argila facilmente dispersiva no solo. Uma alta proporção de sódio pode deteriorar rapidamente a estrutura de um solo ao humedecer, com conseqüente perda de resistência, seguida de formação de uma crosta superficial e diminuição da infiltração.

#### II.5. IMPACTO AMBIENTAL DEVIDO A EROÇÃO

De acordo com MOTA (1991), no Nordeste Brasileiro, onde as condições ambientais são críticas - precipitações baixa e mal distribuídas, solo rasos, temperaturas elevadas, cobertura vegetal rala - e a ação degradadora do homem é intensa, já se constata diversas áreas em processo de desertificação que é o esgotamento total do solo pelas erosão interna.

Ainda segundo MOTA (1991), outra conseqüência da erosão do solo é o assoreamento dos recursos hídricos. A água, arrastando o solo, o conduz para os curso d'água e reservatórios, provocando a redução das calhas de escoamento e dos volumes de armazenamento, resultando em transbordamento da água e inundação, com prejuízos materiais e sociais. São muitos os recursos hídricos que se encontram em processo acelerado de assoreamento, como conseqüência do desmatamento em sua bacia hidrográfica, especialmente com a remoção da mata ciliar.

Outros impactos importantes provocados pelo assoreamento são, segundo MOTA (1991):

- Aterramento gradual dos mananciais, com redução da capacidade de fornecer água para seus diversos usos;
- Soterramento de ovos de peixes e de outros organismos que se reproduzem no fundo dos mananciais;
- Aumento da turbidez da água, ocasionando a diminuição da penetração da luz solar, reduzindo a atividade fotossintética das algas e, em consequência, sua produção de oxigênio.

#### II.6. CONTROLE DA EROSÃO

O princípio básico no controle da erosão é planejar o uso e a ocupação do solo em comum acordo com a preservação das características topográficas, de solo, de drenagem da água e da vegetação natural do local (MOTA, 1981).

Segundo MOTA (1991), o controle da erosão está, portanto, associado ao manejo adequado do solo, da vegetação e da água. A redução da erosão é conseguida através das seguintes medidas de controle:

- Proteção da vegetação;
- Disciplinamento do uso / ocupação do solo;
- Práticas agrícolas adequadas;
- Proteção do escoamento das águas;
- Controle dos movimentos de terra em obras de engenharia;
- Reflorestamento de áreas degradadas.

O controle do uso / ocupação visando à proteção do solo deve ser feito através de várias medidas, MOTA (1991):

- Definição de usos em função das características ambientais, estabelecendo-as atividades que resultem em menor remoção da

cobertura vegetal e em menos alterações nas características topográficas e do solo, para os locais mais sujeitos à erosão;

- Adoção de taxas de ocupação baixas para áreas como as encostas, margens de recursos hídricos, dunas, e locais de solos mais erodíveis, de forma a garantir maior percentual de áreas livres, permeáveis, e com vegetação;
- Proteção dos caminhos naturais de escoamento das águas.

De acordo com MOTA (1991), a atividade agrícola deve ser desenvolvida adotando-se várias medidas visando a diminuir, ao máximo, a erosão do solo:

- Nos terrenos em encostas: plantio em curva de nível (plantio em contorno); utilização de terraços (escavações rasas que seguem as curvas de nível, ladeadas por pequenos diques de terra); em terras cultivadas, o terraceamento combina-se com o plantio em contorno; manutenção da vegetação natural nas partes mais altas.
- Cordões de vegetação permanente: barreiras vivas de vegetação, intercaladas entre áreas cultivadas, com o objetivo de reter o escoamento, provocar a deposição de sedimentos e facilitar a infiltração da água.
- Controle das queimadas.
- Alternância de roçados. Rotação de culturas.
- Associação de culturas (ex.: milho + feijão).
- Cobertura morta do solo, com palhas (de carnaúba, de cana, de arroz, etc), capim seco, folhas, etc. A cobertura morta, além de proteger o solo contra efeitos da incidência dos raios solares e do impacto das chuvas, que provoca compactação e erosão, também melhora a bio-estrutura do terreno e protege a microfauna e microflora do solo,

aumentando as condições de aeração e de absorção hídrica (CAMPOS, 1994; retirado em MOTA - 1991).

- Adubação orgânica: torna o solo mais resistente à erosão, pois melhora a sua cobertura porosa, aumentando a absorção da água.
- Cobertura verde: em rotação, sucessão ou consorciação com culturas; são muito usadas as leguminosas herbáceas, arbustivas e arbóreas, que consiste no cultivo de plantas que produzem grande quantidade de massa, em pouco tempo, as quais são cortadas ainda verdes e enterradas.

Ainda segundo MOTA (1991), durante a realização de obras, algumas medidas devem ser tomadas, objetivando minimizar a erosão do solo:

- Cobertura temporária do solo com palhas, capim seco, folhas, madeira, etc.
- Execução de obras para dirigir ou reter o fluxo da água, tais como, valas, canais, drenos, diques interceptadores e barragens de acumulação, de forma a evitar escoamento a grandes velocidades e volumes.
- Nas áreas de empréstimos, observar: acumular os restos vegetais e a primeira camada do solo, mais fértil, para depois espalhar sobre o terreno escavado, após a extração do material; realizar o acerto topográfico do terreno, de forma a facilitar o escoamento da água superficial.
- Nos taludes de estradas e de outras obras de engenharia, devem ser plantadas gramíneas e implantados adequados sistemas de drenagem das águas.

## II.7. TÉCNICAS E OBRAS DE CONTROLE DA EROSÃO

Para controlar a erosão hídrica e a erosão eólica (tipos de erosão encontrados no país) podem utilizar-se de diferentes técnicas, a decisão de adotar uma ou outra dependerá do objetivo que se persegue: interceptar o escoamento superficial, reter e disciplinar as águas de escoamento com velocidade não erosiva, reter as partículas de solo transportadas pelas águas pluviais antes que se incorporem aos leitos fluviais, ou reduzir a velocidade do vento. Sendo a maior parte destas técnicas e algumas obras ou estruturas mais significativas estão esquematizadas na Figura II.11.

LLOPIS TRILLO (1999) recorda de alguns princípios gerais que devem ser observados na fase de realização dos projetos de controle da erosão:

- Adaptar o projeto à área evitando grandes terraplenagens em solos propensos a erosão.
- Instalar equipamentos de condutividade hidráulica (canaletas, a exemplo) para controlar os incrementos de escoamento superficial.
- Manter velocidades de escoamento baixas.
- Desviar a força de escoamento de taludes escarpados e áreas desnudadas construindo diques de interceptação e bermas.
- Proteger a vegetação própria da área sempre que seja possível.
- Se ocorrer de retirar a vegetação, proteger a área afetada - área desagregada - em módulos de trabalho seccionados, limitando o tempo de exposição do solo desnudo.

- Proteger com vegetação morta as áreas desagregadas e, de forma temporal, com coberturas herbáceas de crescimento rápido.
- Construir bacias de decantação ou barreiras de sedimentos para evitar que o solo erodido ou os sedimentos abandonem a áreas de projeto.
- Inspecionar e manter as medidas de controle.

A forma de corte da encosta e o material que compõem a mesma devem ser observados. Existem técnicas para tentar estabilizar o talude, conhecidas como técnicas de bioengenharia. Sendo tratamentos denominada bioengenharia do solo ou estabilização biotécnica em que se utilizam as vegetações como elemento principal de estabilização e controle da erosão.

Cada uma destas técnicas compreende as seguintes atuações:

*Estabilização biotécnica.* Este termo tem referência ao uso combinado de elementos vegetais vivos e componentes mecânicos ou estruturais inertes. Os componentes inertes incluem uma variada gama de materiais: concreto, madeira, pedra, geotexteis, geomalhas, etc.

*Bioengenharia do solo.* É um termo mais específico que se refere principalmente à utilização de plantas completas ou estaqueadas - fragmentos de talos, raízes ou ramos com capacidade de enraizar e desenvolver uma planta adulta completa - como elementos principais e únicos na estabilização do talude. A ação da vegetação perde potência





mediante a instalação de geotexteis ou geomalhas de proteção superficial. Técnicas como o estaqueamento ou os feixes de ramos, desenvolvidas e utilizadas habitualmente para proteger as beira dos cursos d'água, estão englobadas dentro desta categoria.

Com relação ao dimensionamento das obras de redistribuição das águas superficiais e subsuperficiais, ao realizar o projeto de canaletas, canais, bajantes e outras obras que permitam controlar a erosão é necessário dispor de informações acerca da quantidade de água de escoamento esperada. Em geral, a geração de escorregamento intervém numerosos fatores como quantidade, intensidade e duração de chuva; condições superficiais do terreno (geologia, tipo do solo, permeabilidade, condições precedentes de umidade, etc); interceptação causada por cobertura vegetal, variação segunda a espécie e densidade da vegetação, época do ano, etc; valor de evapotranspiração, que é função da temperatura, pressão e umidade atmosférica; radiação solar; densidade da rede de drenagem e capacidade de evacuação, etc.

A rede de drenagem superficial deve estar calculado de forma que, para a lamina de deságüe, a velocidade da água não cause danos por erosão ou aterramento. Para o cálculo da capacidade de desague tem-se que diferenciar os elementos lineares ou canais propriamente ditos (canais de guarda, canais pé de talude, canais do terraço de deságüe) dos elementos pontuais ou semidouros.

As partículas de solo que desprendem na erosão hídrica, podem prejudicar de várias formas o sistema de drenagem obstruído ou produzindo aterramentos. Como também poderá provocar o escurecimento das águas pluviais, desfavorecendo a vida da fauna e flora dos canais naturais próximos.

O primeiro se evita dispondo de barreiras de sedimentos que clarificam as águas de escoamento antes de sua entrada aos diferentes elementos que drenam um talude, e protegendo com filtros ou pequenas áreas de estagnação as águas antes de sua entrada aos canais. O segundo se consegue construindo pequenas balsas de decantação que retenha parte dos sólidos transportados em suspensão antes que as águas se incorporem aos seus canais naturais.

### CAPÍTULO III DESCRIÇÃO DO LOCAL

#### III.1. INTRODUÇÃO

A região em estudo está localizada no município do Cabo de Santo Agostinho, dentro do Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti. O município está localizado dentro da Messorregião Metropolitana do Recife, possui como coordenadas geográficas latitude (S) 8° 17' 15" e longitude (W Gr) 35° 02' 00", sua área é de 445 Km<sup>2</sup> com distância à Recife de 41Km utilizando como vias de acesso a BR-101 e



Figura III.1 - Localização do município do Cabo de Santo Agostinho, e área de estudo demarcada.

PE-7. Possui também o Cabo de Santo Agostinho uma extensão de orla marítima de 24,1 Km, um clima tropical quente úmido AS' e temperatura média anual de 28°C (Figura III.1).

### III.2. HISTÓRIA DO MUNICÍPIO

As raízes históricas da cidade do Cabo de Santo Agostinho têm seu fundamento na época do descobrimento do Brasil e, até mesmo antes da chegada dos portugueses em nossas terras.

Segundo Informe Especial do JORNAL DO COMMERCIO (19/01/2001), em 19 de novembro de 1499, uma frota de quatro caravelas, com 150 marinheiros comandados por Vicente Yáñez Pinzón, zarparam do porto de Palos, no sul da Espanha, em direção às ilhas Canárias, na costa ocidental da África (Fotos III.1 e III.2). O porto de Palos fica na cidade de Palos de la Frontera - Espanha, um povoado localizado na província de Huelva, na Andaluzia. A expedição aportou antes do Natal daquele ano na ilha de Santiago, no arquipélago de Cabo Verde, de onde partiu em 13 de janeiro de 1500 em direção às novas terras que Colombo havia descoberto, nas suas três expedições. O objetivo de Pinzón era chegar à Ásia continental por esta rota.

Após enfrentar uma semana de tempestade, que quase provocou o naufrágio das caravelas, a esquadra chegou à América do Sul em tempo recorde - 13 dias entre Cabo Verde e o continente americano. E em 26 de janeiro de 1500, Pinzón e seus marinheiros desembarcaram em um Cabo que denominaram *Santa Maria de la Consolación*. Na sua chegada ao desembarcar tomou-o em nome do soberano espanhol a terra descoberta, esculpiu o seu nome em vários troncos de árvores como registro de sua presença no local e lavrou uma Ata de Posse da Terra.

A terra foi batizada com o nome de *Cabo de Santa Maria de La Consolación*. Registra a história oficial, que os portugueses desembarcaram no Cabo de Santo Agostinho em 1501, quando o rei de Portugal enviou uma esquadra de reconhecimento, tendo o navegador Américo Vespúcio, às terras brasileiras. Nessa ocasião, o Cabo de Santo Maria de La Consolación foi rebatizado com o nome de *Cabo de Santo Agostinho*.



Foto III.1 - Vicente Yáñez Pinzón

Segundo alguns historiadores, Pinzón, partiu desse ponto - Cabo de Santo Agostinho - e seguiu na direção Noroeste, cem quilômetros depois, parou na foz de um rio, onde se travou uma luta entre nativos e a tripulação. Dezenas de índios, além de oito tripulantes, morreram no confronto. Dali, a expedição encontrou a foz do Amazonas, chegando a navegar 300 quilômetros rio acima.

Apesar do depoimento de Pinzón num processo judicial movido anos depois por Diego Colombo (filho de Cristóvão) contra a Coroa de Castela, os historiadores divergem a respeito do local onde o navegador desembarcou existindo três hipóteses. A primeira - para os portugueses - o cabo onde se deu o desembarque foi o Cabo Orange, no Norte, divisa entre o Brasil e a Guiana Francesa. A segunda - para



Foto III.2 - Réplicas de caravelas usadas nas grandes navegações,  
atracadas no Porto de Palos.

os castelhanos - o depoimento reforça a hipótese de ter sido no Cabo de Santo Agostinho o local. E a terceira hipótese, levantada em 1975 pelo capitão-de-mar-e-guerra Max Justo Guedes, através de pesquisa por mapas da época (como o de Juán de la Costa, de 1501) e também os depoimentos do processo. Max Justo Guedes (o capital-de-mar-e-guerra) acredita que a esquadra teria tocado a ponta de Mucuripe, a 10 quilômetros da capital do Ceará, Fortaleza. Em seguida, teria chegado à foz do Rio Curu, onde lutou contra uma tribo Potiguar. Depois, partiu para o Amazonas (Figura III.2).



Figura III.2 - As três hipóteses sobre o local onde Pinzón, após deixar Cabo Verde, tocou o litoral brasileiro.

Nos comemorativos dos 500 anos de descobrimento do Brasil ocorreu a criação de eventos no Cabo de Santo Agostinho com a finalidade de divulgar sua história. E entre esses eventos surge a idéia de revitalização do Parque de Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti, este foi palco dos acontecimentos históricos relatados.

### **III.3. PARQUE METROPOLITANO ARMANDO DE HOLANDA CAVALCANTI**

A região do Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti foi palco de vários acontecimentos históricos. Iniciando-se no ano de 1500, onde aportou o primeiro navio ocidental em terras até então desconhecidas. Tratava-se da vinda da embarcação do Espanhol Vicente Yáñez Pinzón - segundo alguns historiadores.

A área do Parque possuiu também algumas edificações históricas que o torna mais atrativo, todos datam séc. XVII.

A Vila de Nazaré, localizada na parte mais elevada do promontório e às margens da praia do Paraíso, é um dos principais destaques do sítio histórico do Cabo de Santo Agostinho. Uma das mais belas atrações do lugar é o forte do Castelo do Mar (Foto III.3). Ainda encontra-se também ruína do primeiro farol, este construído como base da marinha (Foto III.4). A construção, hoje em ruínas, herança do tempo dos holandeses entre nós, servia de proteção nos embates contra os índios caetés, que acabaram por expulsar os europeus. Na mesma Vila de Nazaré, a igreja de mesmo nome, e as ruínas do antigo convento Carmelita (Foto III.5), uma importante lembrança do tempo da dominação portuguesa, é um conhecido ponto de visitaçao. A edificação, em pedra sabão, foi erguida pelos holandeses, com objetivos militares, sendo depois concluída pelos portugueses. A Igreja de Nazaré e as ruínas



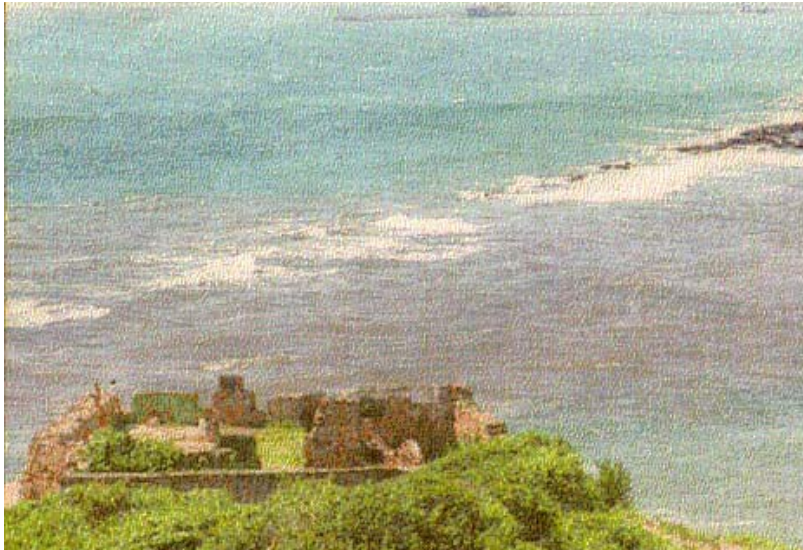


Foto III.3 - Forte Castelo do Mar.

do Convento Carmelita, construções datadas do século XVII chamam a atenção dos visitantes por retratarem a estratificação social daquele tempo. A Casa do Faroleiro (Foto III.6) é uma das atrações turísticas da Vila de Nazaré, nas proximidades do lugar onde se acredita que Vicente Pinzón desembarcou. A sua localização, estratégica por conta das formações rochosas elevadas, servindo de sinalização para os viajantes, abrigou um antigo farol. A Marinha reconstruiu um outro farol em local mais seguro- neste século, há, aproximadamente, 20 anos atrás.



Foto III.4 - Ruínas da Base da Marinha.

A região atualmente é de proteção ambiental, que compreende 250 hectares de fauna, flora, e população nativa. Ela também está inserida numa rota turística praieira criada desde a década de 90, a partir da qual foram introduzidas novas vias de acessos e hotéis. A região possui um dos maiores portos marítimos do nordeste brasileiro (o porto de Suape), responsável pela exportação e importação de produtos manufaturados e agrícolas.

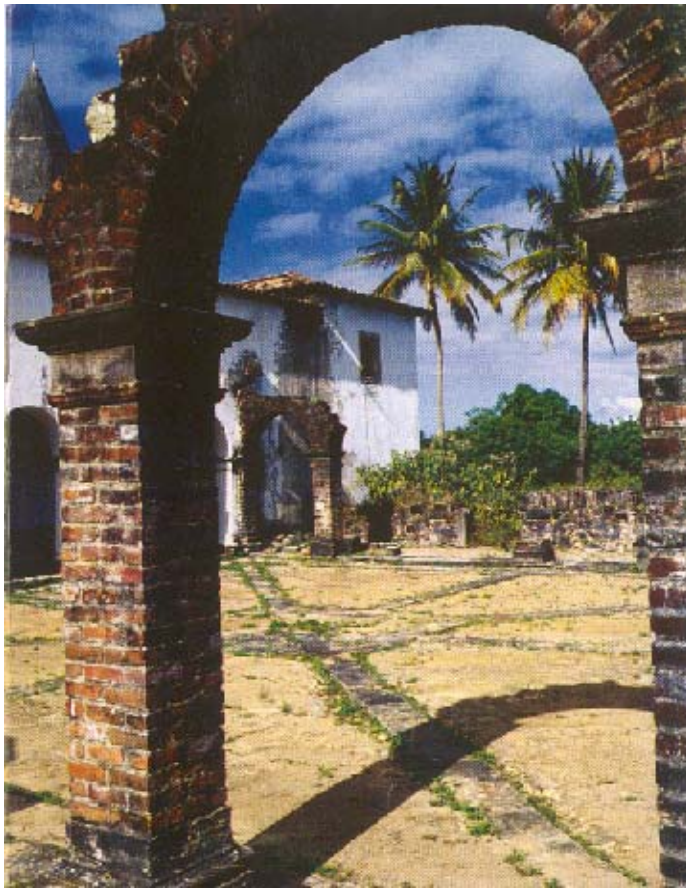


Foto III.5 - Ruínas do Convento Carmelita,  
atualmente Igreja de Nazaré

A constante aparição do homem ao decorrer dos tempos na área do Parque, ocasionou modificações ao meio físico fazendo

surgir, em meados deste século, ocorrências de processo erosivo de modo bastante significativo.



Foto III.6 - Casa do Faroleiro.

#### **III.4. CLIMA**

Em virtude do local não possuir no momento da realização deste trabalho um pluviômetro, são apresentados os dados obtidos no INMET (Instituto Meteorológico) referentes a estação Recife, a mais velha da região e seus dados equivalem por um raio de 150km da costa marítima, e estes datam de 1931 à 1990 em médias de 30 anos e a partir de 1995 a 2000 por ano. Ressalta existência da estação em Ipojuca, que se encontrava desativada e portanto inadequado o seu uso.

Na Figura III.3 são observadas as maiores precipitações máximas em 24 horas por mês ocorridas desde de 1930 a 2000. Observa-se que nos meses de maio e junho ocorrem maiores precipitações e em outubro e novembro as menores.

Na Figura III.4 mostram-se as máximas precipitações em 24 horas ocorridas desde de 1930 a 2000. Note-se que nos primeiros pontos é feito uma média de 30 anos, ou seja, média de 1930 a 1960 e a média de 1961 a 1990 e estes apresentam a maior precipitação consegüentemente.

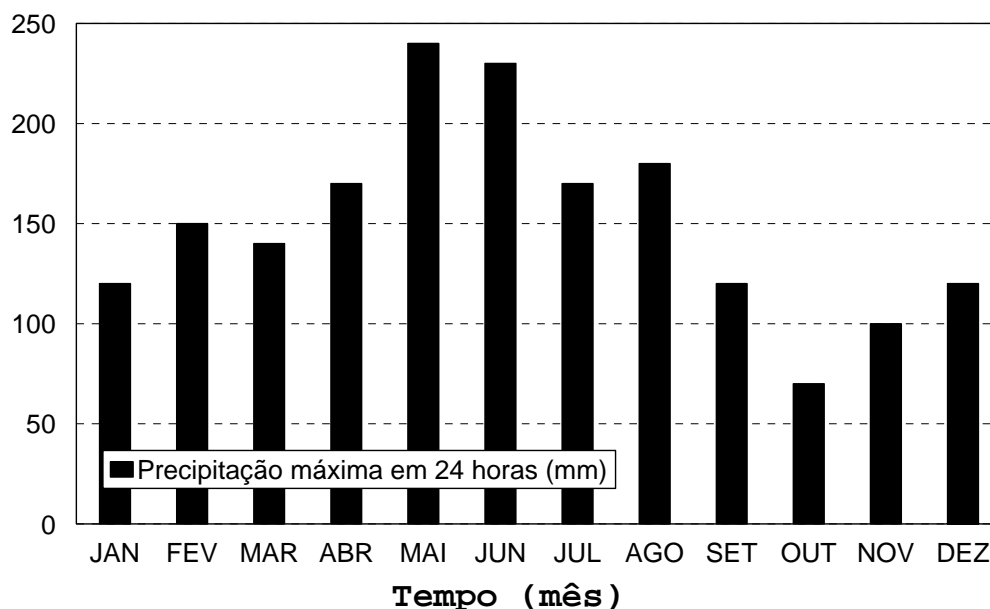


Figura III.3 - Gráfico das precipitações máximas em 24 horas.

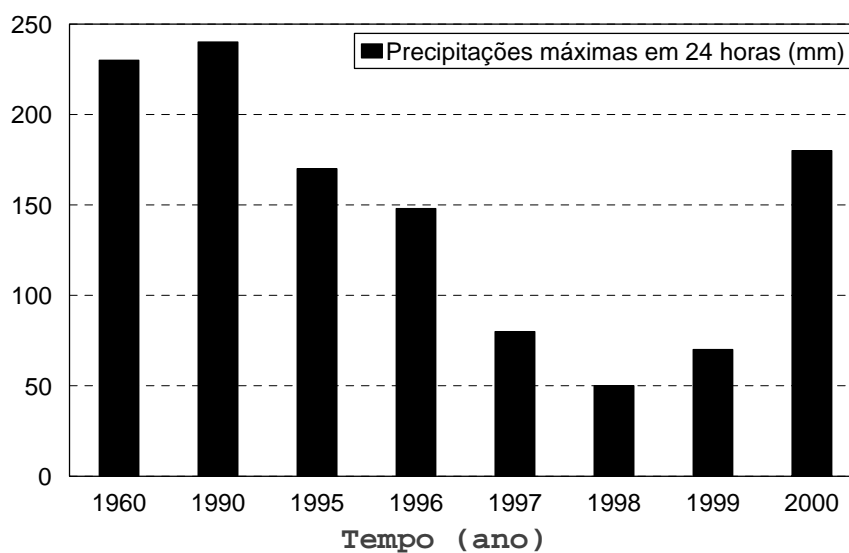


Figura III.4 - Gráfico das precipitações máximas em 24 horas, no período de 1930 a 2000.

### III.4.1. Estimativa da Erosividade

Este estudo vem informar o potencial erosivo da área em estudo, desta forma pode-se entender a intensidade da ocorrência do processo erosivo. Além de visualizar épocas de maior intensidade pluviométrica que reverterão em maior tendência de ocorrer processo erosivo.

#### III.4.1.1. PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DA EROSIVIDADE

Segundo IG-SP (1996), o potencial de erosão de uma chuva refere-se à perda de solo por unidade de área, que pode ser esperada de uma chuva ocorrendo sobre área completamente desprovida de cobertura e resíduos vegetais. Por essa definição, o potencial de erosão de uma chuva é função do solo, do relevo e das características da chuva. WISCHMEIER & SMITH (1958) (retirados IG-SP (1996)), verificaram que quando todos os outros fatores, com exceção da chuva são mantidos constantes, a perda do solo por unidade de área em um terreno desprotegido de vegetação é diretamente proporcional ao produto de duas características da chuva: energia cinética multiplicada por sua intensidade máxima em 30 minutos.

A erosividade da chuva é obtida a partir de chuvas individuais por um período de 20 a 25 anos podendo ser calculadas médias mensais e anuais. A energia cinética da chuva é computada pela análise de gráficos de pluviosidade obtidos por pluviógrafos, e é calculada segundo a equação (WISCHMEIER & SMITH - 1958, retirado em IG-SP - 1996):

$$KE = 11,87 + 8,73 \log_{10} I \quad \text{Equação (IV.10)}$$

Onde:

KE = energia cinética ( $J.m^{-2}.mm^{-1}$ )

I = intensidade da chuva ( $mm.h^{-1}$ )

O método para o cálculo da erosividade necessita da precipitação máxima em 30 minutos e a intensidade máxima em 30 minutos, com obtenção destes através de pluviógrafo na região estudada. E estes dados são transformados para hora de ocorrência.

#### III.4.1.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para o cálculo da erosividade é necessário obter-se a intensidade de chuva por hora, a partir de dados da precipitação máxima em 24 horas em estação do Recife.

Utilizando a equação de Wischmeier & Smith (1958) retirada em IG-SP - 1996, obtém-se a Tabelas III.1 e III.2.

Tabela III.1 - Cálculo da erosividade por ano de ocorrência.

Ano	Chuva (mm)	Intensidade Total (mm h <sup>-1</sup> )	Energia Cinética (J.m <sup>-2</sup> .mm)	Energia Cinética Total (J.m <sup>-2</sup> )	Erosividade (J.m <sup>-2</sup> .mm.h <sup>-1</sup> )
1931 à 1960	14100	235	206,135	0,0146	3,436
1961 à 1990	14400	240	218,651	0,0152	3,644
1995	10200	170	143,226	0,0140	2,387
1996	9000	150	163,224	0,0181	2,720
1997	4800	80	147,482	0,0307	2,458
1998	3000	50	126,773	0,0423	2,113
1999	4200	70	147,282	0,0351	2,455
2000	10500	175	178,704	0,0170	2,978

Observa-se no período de 1961 à 1990 ocorrerem maior intensidade de chuva, e, portanto correlacionando uma erosividade maior. Nos anos analisados (1995 a 2000) estes apresentaram menor erosividade, porém observa-se que no ano de 2000 apresentou uma intensidade maior de chuva e, portanto, uma maior erosividade. Pode-se observa no gráfico que relaciona erosividade e tempo (ano), ver Figura III.5.

Na tabela III.2 observa-se que a erosividade está mais alta nos meses de maior intensidade de chuvas ocorrendo em maio e junho, e conseqüentemente nos meses de menor

Tabela III.2 - Cálculo da erosividade por média de meses no período de 1930 a 2000.

Mês	Chuva (mm)	Intensidade Total ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	Energia Cinética ( $\text{J.m}^{-2}.\text{mm}$ )	Energia Cinética Total ( $\text{J.m}^{-2}$ )	Erosividade ( $\text{J.m}^{-2}.\text{mm.h}^{-1}$ )
Jan	450,0	150,0	30,9	0,069	10,290
Fev	562,5	187,5	31,7	0,056	10,570
Mar	524,7	174,9	31,5	0,060	10,483
Abr	637,2	212,4	32,2	0,051	10,730
Mai	900,0	300,0	33,5	0,037	11,167
Jun	862,2	287,4	33,3	0,039	11,110
Jul	637,2	212,4	32,2	0,051	10,730
Ago	675,0	225,0	32,4	0,048	10,800
Set	450,0	150,0	30,9	0,069	10,290
Out	262,8	87,6	28,8	0,110	9,610
Nov	375,3	125,1	30,2	0,080	10,060
Dez	450,0	150,0	30,9	0,069	10,290

intensidade de chuva também menor é a erosividade ocorrendo nos meses outubro e novembro. Na Figura III.6 observa-se o gráfico que melhor relaciona erosividade e tempo em relação ao meses analisados de 1930 a 2000.

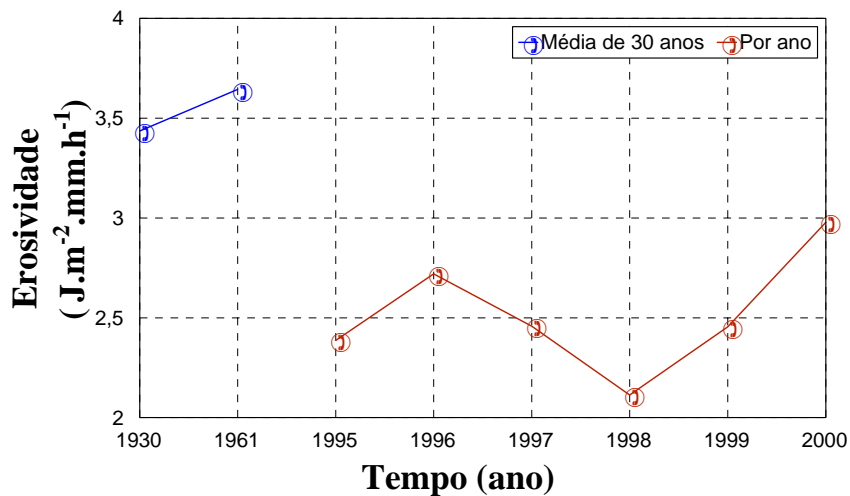


Figura III.5 - Gráfico Erosividade vs. Tempo (ano).

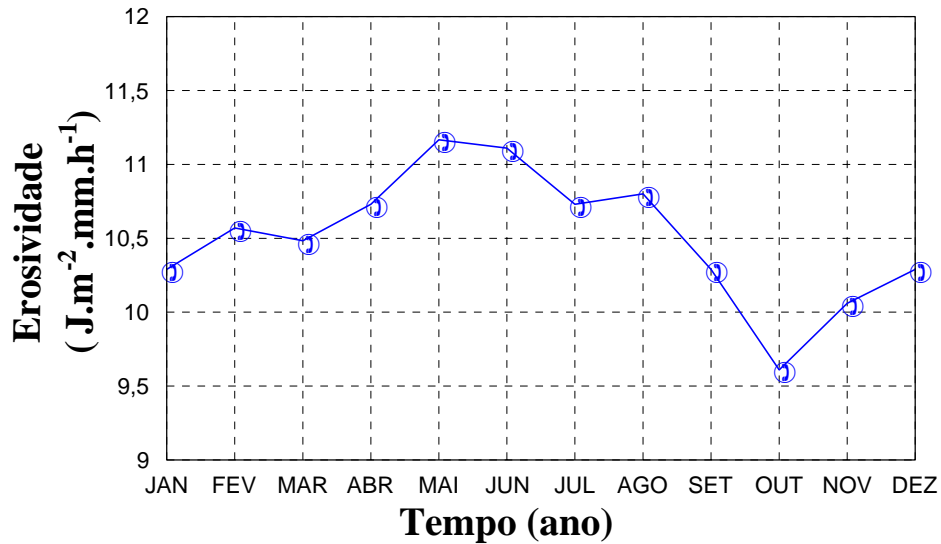


Figura III.6 - Gráfico Erosividade vs. Tempo (mês)  
no período 1930 a 2000.

### III.5. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Segundo COUTINHO et. al. (1999), na área do Parque foram identificadas rochas pertencentes às unidades da Bacia Pernambuco, que são: Suíte Ipojuca, depósitos sedimentares da Formação Barreiras e de sedimentos do Quaternário (Figura III.7).

A maior feição geomórfica sem dúvida é o Granito de Santo Agostinho, conhecido como Granito do Cabo. Esse granito tem idade de aproximadamente 100 milhões de anos, ou seja no Cretáceo inferior, quando a região foi palco de intenso magmatismo decorrente da separação da Placa Sul-Americana da África.

#### III.5.1. Formação Barreiras

BRANNER (1920) utilizou pela primeira vez o termo "Barreiras" aos sedimentos cenozóicos que afloram ao longo da



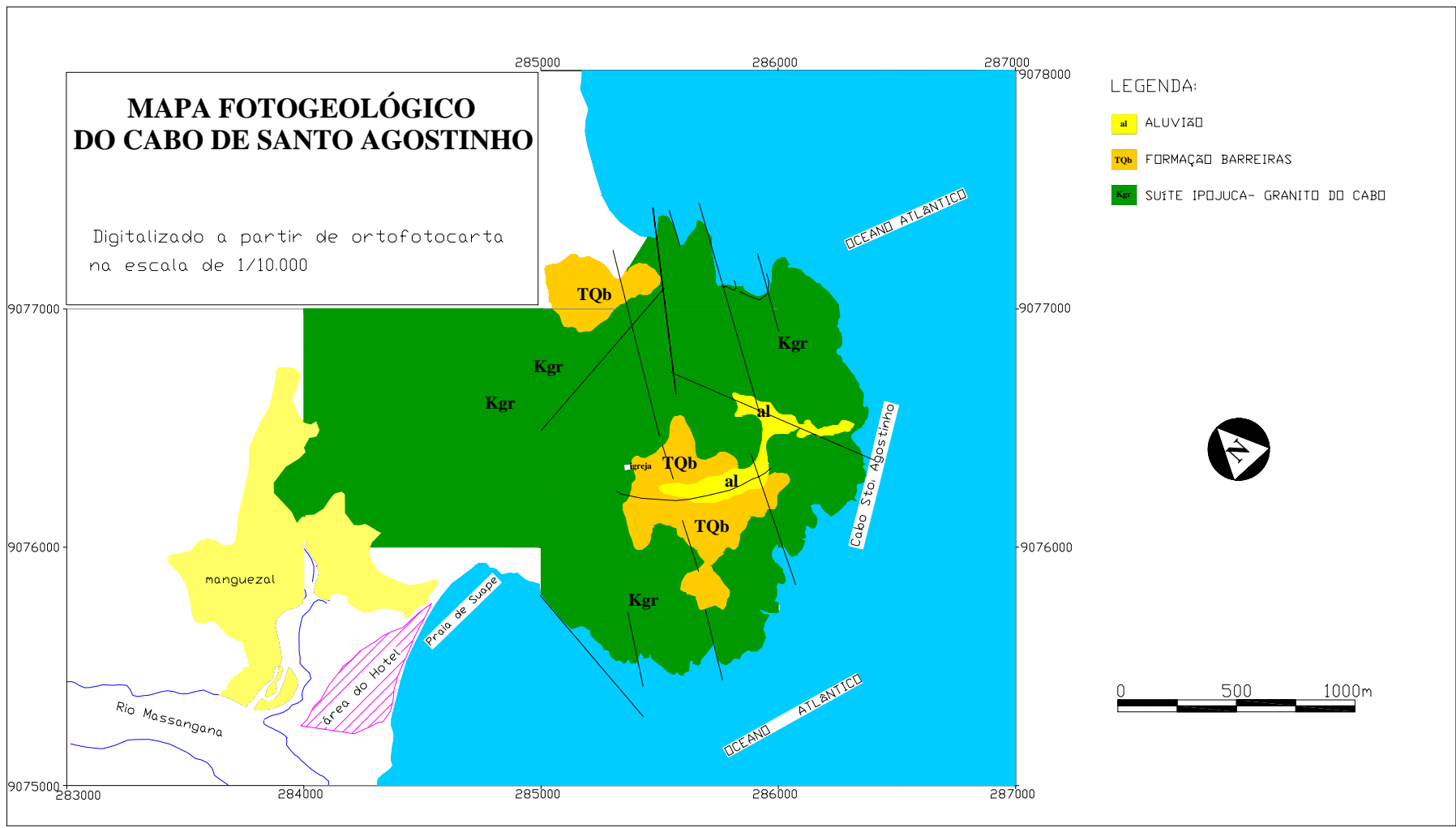


figura III.7 - Mapa Fotogeológico do Cabo de Santo Agostinho.

costa. KEGEL (1957) designou como sedimentos da Formação Barreiras impropriamente às camadas variegadas denominadas de Terciário Superior Indiviso e Formações Cenozóicas Indiferenciadas mostradas por ANDRADE (1955) e MATTOSO & ROBERTSON (1959).

BIGARELLA & ANDRADE (1964) elevaram a Formação Barreiras a Grupo, distinguindo e subdividindo dentro de duas formações distintas, separadas por uma desconformidade, que denominam de Formação Guararapes (inferior) e Formação Riacho Morno (superior).

MABESOONE (1966 e 1967) identificam evidências que colocam em dúvida essa subdivisão. Primeiro, a sedimentologia das formações não pode ser distinguida, indicando assim um mesmo ambiente de deposição. Segundo, o afloramento na Formação Guararapes é caracterizado por estratificação horizontal ou lenticular, e a Formação Riacho Morno não coincide com tal estratificação.

BUERLEN (1970), confirmam que a Formação Riacho Morno é realmente uma fase de intemperismo da Formação Guararapes, e que a Formação Barreiras não pode ser subdividida.

MABESOONE et. al. (1987), retornam a denominação original de Formação Barreiras para os sedimentos Terciários ou Quaternários, que ocorrem nos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, devido às características litológicas e desenvolvimento sedimentológico associados a processo fluviais.

Quanto a sua composição e textura, a Formação Barreiras possui tonalidades com coloração viva e que variam desde vermelhas, amarelas até brancas, aflorando nas falésias erodidas ao longo das praias e nas vertentes íngremes dos vales. ALHEIROS & FERREIRA (1991) descrevem litologicamente os sedimentos da Formação Barreiras como:

- Areias quartzosas a subarcosianas de coloração creme, com aspecto maciço, onde às vezes, desenvolvem-se solos do tipo "podzol" com até 2,0 m de espessura, referidos como "coberturas de areia brancas". Na base dessas areias, desenvolvem níveis endurecidos de ferro, impermeabilizando as areais cremes. Essa litologia é dominante entre João Pessoa - PB e Parnamirim - RN, representando a maior extensão mapeada;
- Areias quartzosas a subarcosianas, com cores vivas, alaranjado, vermelho e roxo, em função dos diferentes estágios de oxidação do ferro que as colore. Apresentam grande porcentagem de pseudo matriz argilosa, decorrente da argilização dos grãos de feldspato e estão geralmente associadas a litologia pélticas como as seguintes;
- Argilas maciças e siltes, de cores variadas, sob forma de camadas com espessura decimétrica, tendo a caulinita como argilomineral preponderante;
- Diamictitos, com baixa densidade de cascalhos ou seixos, constituída por material argilo arenoso avermelhado, suporta fragmentos subangulosos de quartzo na dimensão cascalho e mais raramente seixos.

Segundo estudos COUTINHO et. al. (1999) identificaram a Formação na área do Parque, como constituída por arenito conglomerático com seixos de quartzo, intercalações de blocos de argila e estratificação cruzada tabular (Sistema Fluvial Anastomosado), e em direção ao topo, separados por uma camada de argila, tem-se uma seqüência arenítica média a grossa, creme, com estratificação plano-paralela e

pequenas intercalações de argila e silte (fluvial meandrante).

No Morro da Serra Redonda temos a Formação Barreiras sotoposta ao Granito do Cabo com uma seqüência espessa de arenito conglomerático laterítico de cor vermelha gradando para uma seqüência arenosa com seixos de quartzo no topo.

#### **III.5.1.1. SOLOS LATERÍTICOS**

Os solos lateríticos (ou latossolo), como foram identificados pedologicamente estes sedimentos da Formação Barreiras, são por definição, solos muito profundos (>2m de profundidade), com horizontes pouco diferenciados. Como o processo de latolização se caracteriza por remoção de Si e bases, há o conseqüente aumento relativo dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al.

Assim, esses solos intensamente intemperizados têm a fração argila composta por argilo-minerais do tipo 1:1, minerais de baixa atividade (baixa capacidade de troca de cátions  $-T < 13 \text{ meq}/100 \text{ gr}$ ) além dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al.

Por isso, são solos de baixa fertilidade natural e de alto grau de flocculação, próximo a 100% (grau de flocculação = 100) (argila total - argila dispersa em água) / (argila total), utilizando o ensaio de sedimentação (classificação dos solos).

Este alto grau de flocculação confere ao mesmo uma boa permeabilidade, conseqüentemente, resistência à erosão. Dada a uniformidade relativa do perfil os barrancos cortados nos latossolos podem se manter verticais com uma parte mais saliente formada pelo horizonte **A**, onde as raízes aumentam a resistência.

Esta realidade pode, no entanto, se modificar com a intensificação do intemperismo em materiais mais argilosos; os teores de óxido e hidróxido de Fe e Al aumentam e,

juntos com a matéria orgânica, favorecem a formação de estrutura granular. Se os grânulos forem pequenos, serão erodidos com facilidade.

Aliás, essa variação nos percentuais de materiais corantes, como por exemplo óxidos e hidróxidos de Fe (nuances de vermelho e amarelo), pode ser observada em qualquer solo comparando-se as suas cores pela carta de cores de Munsell. Os latossolos acima mencionados são bem mais pálidos, por serem mais arenosos que os de N e NW da cidade.

É conveniente que se frise que algumas características dos latossolos são extensivas aos sedimentos sotopostos, até porque podem ter sido deles herdada, lembrando ainda a dificuldade no estabelecimento pela observação de campo desses limites.

Em vista do exposto, serão ressaltados os seguintes pontos de interesse geotécnico que não se restringem ao solo:

- a baixa fertilidade natural deste material torna moroso revegetar esses cortes;
- o excelente grau de flocação é responsável pelo tingimento dos perfis por material carreado das maiores cotas e que depois de seco dá uma certa proteção ao que foi por ele revestido, se estabelecendo logo uma vegetação pioneira (líquens, algas, briófitas etc);
- o intenso intemperismo enriquece o material de óxido e hidróxido de Fe os quais podem ser modilizados formando o mosqueado, posteriormente a plintita e finalmente, e irreversivelmente, depois de diversos ciclos de umedecimento e secagem, a petroplintita. Na cidade do Recife merece menção a petrografia que é característica, mais ao porte dos blocos formados.

O que foi exposto acima também é conhecido na literatura como laterita; nesse caso um termo genérico engloba tanto o estágio plíntico quanto o petroplíntico.

São compostos normalmente por quartzo e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio e argilominerais, normalmente a caulinita. Apresentam normalmente textura argilo-arenosa, são maciços, porosos e, ocasionalmente, colapsíveis (VARGAS, 1973). Mostram certa coesão, conferida pela cimentação por oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, e exibem razoável permeabilidade - quando se leva em conta sua granulometria argilosa - devido à formação de agregados estáveis de maiores dimensões, numa estrutura denominada granular porosa na pedologia (REZENDE & RESENDE, 1996).

A resistência ao cisalhamento normalmente é parecida com a dos saprolitos de rochas do embasamento (CAMPOS et. al., 1998). Com efeito, nos solos lateríticos o ângulo de atrito interno em termos de pressão efetiva varia entre 28 e 35° e a coesão é quase nula quando saturado, mas pode ser elevada quando parcialmente saturado (BASTOS et. al., 1997; WOLLE, 1998; CAMPOS et. al., 1998).

### **III.5.2. Suíte Ipojuca**

Esta suíte é representada por riolitos, traquitos, basaltos e o Granito de Santo Agostinho. Também foram incluídos, os depósitos piroclásticos de primeira, os ignimbritos e os fluxos piroclásticos que ocorrem na região.

Há muitas controvérsias sobre a idade da Suíte Ipojuca. Em princípio, a bibliografia nos dá duas distintas amplitudes:  $135 \pm 0,7$  Ma e  $89,4 \pm 11,8$  Ma (LIMA FILHO, 1998).

### III.5.2.1. GRANITO DE SANTO AGOSTINHO

Segundo LIMA FILHO, 1998, o granito possui tendência alcalina e apresenta-se, em geral, como um stock isotrópico, limitado por falhas. Está bastante intemperizado, mostrando feições de esfoliação esferoidal. É cortado por falhas e fraturas na direção NE-SW, com direções variadas. Localmente, na praia de Suape, esse stock mostra deformação dúctil, representada por milonitização, com foliação tectônica na direção 165<sup>0</sup> Az.

O granito do Cabo é uma rocha de cor mesocrática, constituída por quartzo, K-feldspato e anfibólio, de granulação grossa e com cristais anedrais. Microscopicamente, é composta por plagioclásio e K-feldspato, biotita, e tem como acessórios: zircão, fluorita e riebequita. A matriz mostra textura granular composta por biotita e riebequita. Sua Idade é de aproximadamente 100 milhões de anos.

### III.5.2.2. SOLO RESIDUAL

A formação de solos residuais deve-se a alterações "in-situ" de uma "rocha matriz", e envolve processos de intemperismo mecânico (trituração, abrasão, etc); de intemperismo químico e de processo pedogenéticos. TOWNSEND (1985), afirma que o intemperismo químico é o real responsável pela formação dos solos residuais, uma vez que o mecânico está associado a agentes transportadores. Desta forma os fatores relacionados ao clima (temperatura e chuva), rocha matriz, movimento d'água (drenagem e topografia), vegetação e tempo transcorrido sob a ação destes fatores são os principais responsáveis pelo resultado do perfil de intemperismo. Este é caracterizado por conter materiais variando desde rocha sã a materiais

completamente intemperizados, este último descrito pelos engenheiros como solo.

Os fatores acima mencionados variam horizontalmente e o perfil pode variar com distâncias horizontais relativamente curtas (LAMBE, 1996). Estes fatores são acentuados nas regiões de clima tropical onde prevalecem períodos chuvosos com temperaturas elevadas, conduzindo ao intemperismo químico e desenvolvimento de perfis profundos.

SOUZA NETO (1998), a descrição do perfil no campo requer um enfoque mais geológico do que mesmo geotécnico. Nestes termos, vários autores apresentam sistemas de classificação dividindo o perfil em zonas de intemperismo. Entretanto, as várias simbologias adotadas para identificar o mesmo horizonte, ou o oposto, têm gerado alguns inconvenientes ao se tratar com o assunto.

Dentre as classificações encontradas a de DEERE & PATTON (1971) é uma das mais bem aceitas internacionalmente. Outra de destaque é a proposta apresentada por VARGAS (1971), a qual, entender de SOUZA NETO (1998), é bem condizente com a realidade brasileira. Nesta classificação o perfil (Figura III.5) é dividido em cinco zonas de intemperismo:

1. Zona I: corresponde a camada superior. Em geral, constituída por solos argilosos, com coloração variando de vermelha, marrom a amarela e apresentando estrutura porosa. Esta zona pode ser um solo residual ou coluvionar, muitas vezes difícil de se distinguir. Esta zona pode estar ausente, especialmente no litoral.

2. Zona II: zona intermediária. Geralmente constituída por uma argila vermelha, marrom ou amarela, com consistência variando de rígida a dura; ou areia argilosa variando de média a compacta. Eventualmente com concreções de limonita



ou camadas duras, sugerindo precipitação de material coloidal da camada superior.

3. Zona III: zona de decomposição parcial de rocha, também conhecida como saprolito pelos geólogos. Predominam solos argilosos ou arenosos com estrutura reliquiar da rocha matriz. Eventualmente com presença de matações de rocha alterada.

4. Zona IV: referida como zona de intemperismo fresco. É composta por blocos de rocha alterada ou camadas de rocha quase intactas interligadas com solos argilosos ou arenosos.

5. Zona V: substrato de rocha sã, eventualmente fissurada até uma certa profundidade.

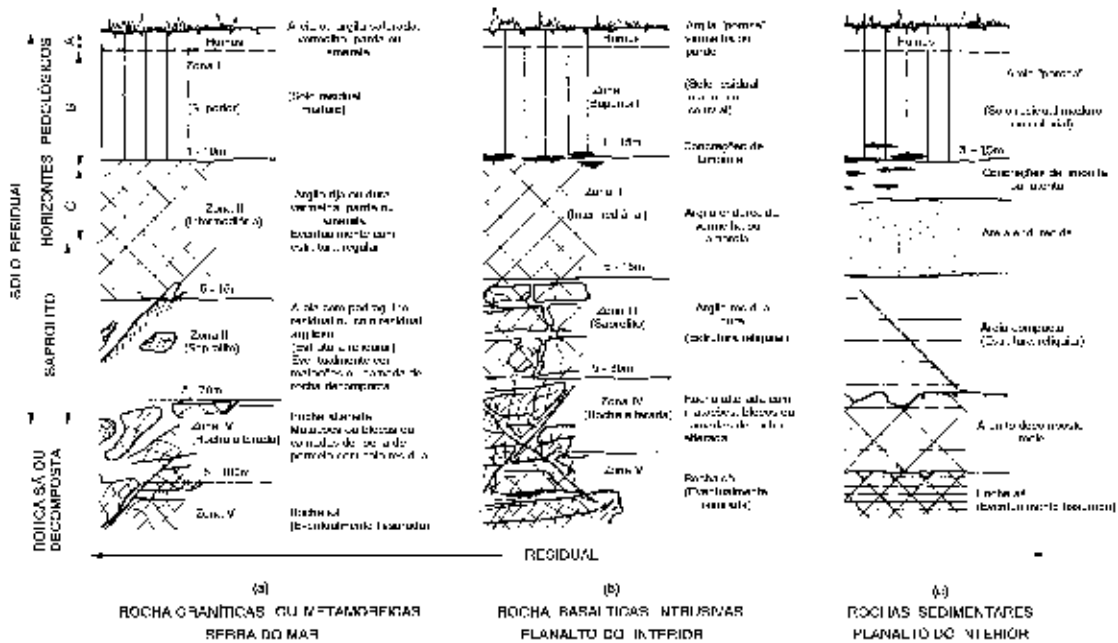


Figura III.8 - Perfis típicos de solos residuais brasileiros (VARGAS, 1981).

A ocorrência de solo residual na área do Parque está devida ao processo intemperismo na rocha matriz, que no caso refere-se ao Granito do Cabo. Assim compõem-se por uma camada correspondente a zona III de perfil de intemperismo, e apresentando assim um solo pouco intemperizado devido ao fato da rocha matriz ser recente (aproximadamente 100 milhões de anos).

As propriedades geotécnicas dos saprolitos são dependentes da composição e estrutura da rocha original. Os saprolitos derivados de rochas ígneas e metamórficas de composição ácida tenderão a ser mais desenvolvidos nos tipos com textura mais fina, empobrecidos em quartzo, enriquecidos em feldspato e muito fraturados (BIGARELLA et. al., 1994). Quando gnaisses e granitos apresentam composição mineralógica semelhante e estão sob mesmas condições ambientais, o saprolito tende a se desenvolver mais nos primeiros, em função do maior intemperismo facilitado pelo bandamento composicional (BIGARELLA et. al., 1994).

### **III.6. DESCRIÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO**

Na Figura III.9 mostra uma composição georeferenciada de imagens de satélite da área do parque, onde se encontram as três principais voçorocas. A voçoroca em estudo encontra-se na área central a baixo, demarcada na imagem. A imagem junção resultante foi obtida através de uma combinação de imagens Landsat/TM5 (bandas 5, 4, 3) e de uma imagem spot/HRV (banda pancromático). A utilização deste processo objetiva a geração de uma imagem em escala maior, isto é justificado devido a resolução espacial que na Landsat é de 30 metros e na Spot é de 10 metros. As imagens foram georeferenciadas no sistema de projeção cartográfica UTM (Universal Transversal of Mercator) para o Datum de referência SAD69. Este processo de junção de imagens foi realizado com imagens obtidas na mesma data (25 de outubro de 1996).

No processo de georeferenciamento das imagens (Landsat e Spot) utilizou-se 30 pontos de controle adquiridos em campo pelo sistema de posicionamento global (GPS) Garmim. Estas coordenadas geodésicas (UTM/SAD69) foram obtidas com

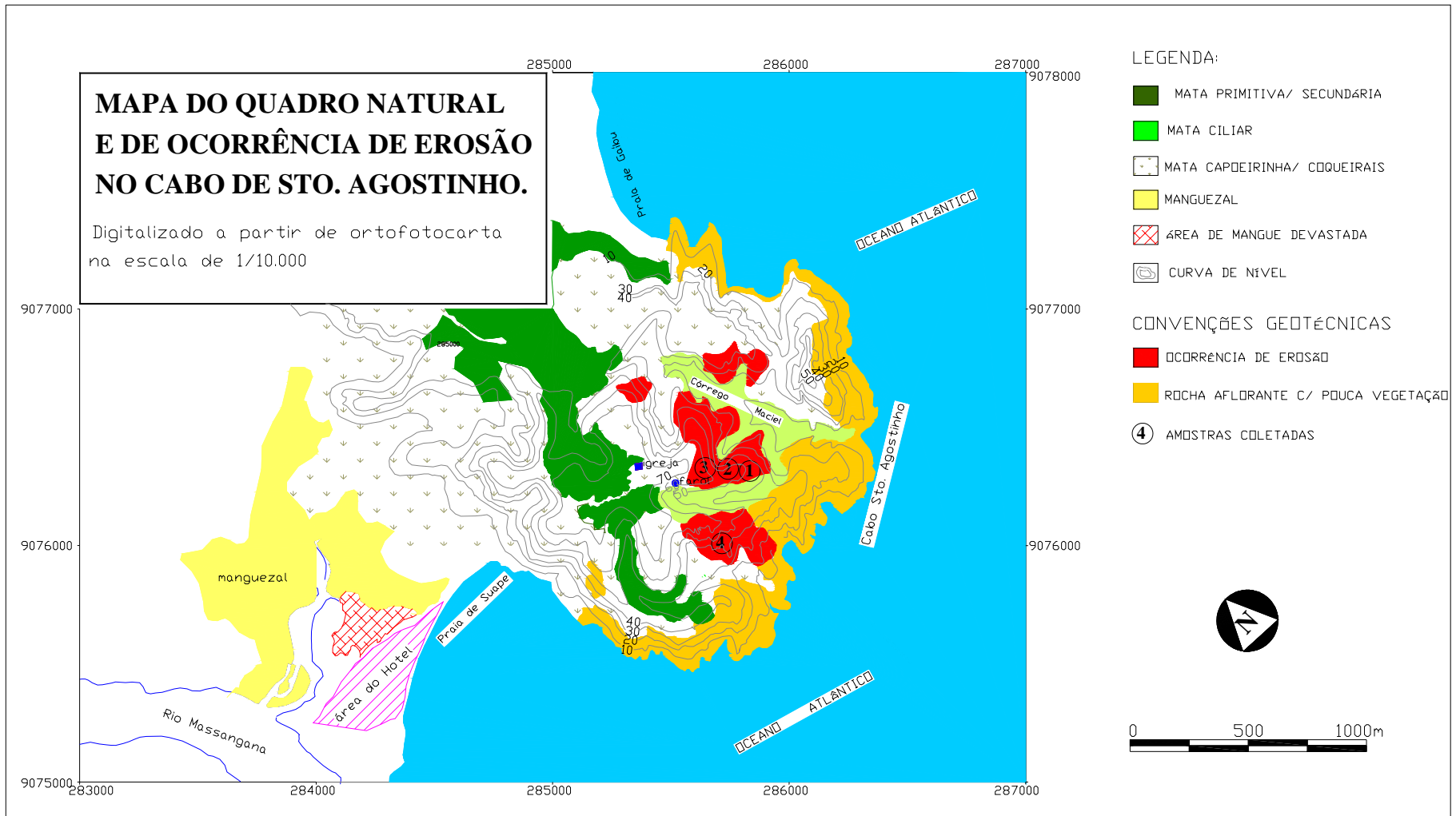


Figura III.9 - Mapa do Quadro Natural e de Ocorrência de Erosão do Cabo de Santo Agostinho.

precisão geodésica de aproximadamente 8 metros. Neste processo de retificação das imagens utilizou-se modelo polinomial e o erro quadrático médio obtido foi de aproximadamente 1 (um) pixel para ambas imagens.

Todos os procedimentos de processamento digital de imagens foram realizados no software ERDAS/IMAGINE 8.4 do Laboratório de Sensoriamento Remoto da UFPE, apresentando como resultado uma composição de imagens georeferenciadas em coordenadas geográficas e escala 1:2000.

### **III.7. DESCRIÇÃO DA ENCOSTA ESTUDADA**

A encosta em estudo apresenta características de ocorrência de erosão hídrica superficial, com formação de voçorocas, isto devido tanto a fatores antrópicos como também a fatores naturais. Esta erosão hídrica superficial é relacionada ao processo de erosão por ravinas formando dígito. Este processo deve ter surgido a partir da remoção da cobertura vegetal expondo o solo às intempéries. Este solo apresenta características suscetíveis à erosão e o fenômeno foi intensificado pela ocorrência de chuvas de grande intensidade resultando em maior desagregação e remoção das partículas do solo. Ocorrendo a remoção do solo através do escoamento das águas, surgindo primeiramente sulcos erosivos que vão crescendo e formando ravinas e posteriormente crateras, denominadas voçorocas. O processo fica estagnado quando se encontra um nível de base, ou seja, solo que apresente resistência à erosão.

Na Figura III.10 encontra-se as encostas sobre processo erosivo em vermelho. Dentre as três principais encostas degradadas foi escolhida a voçoroca central para o estudo. Ressalta-se que as formações e sedimentos assemelham-se na

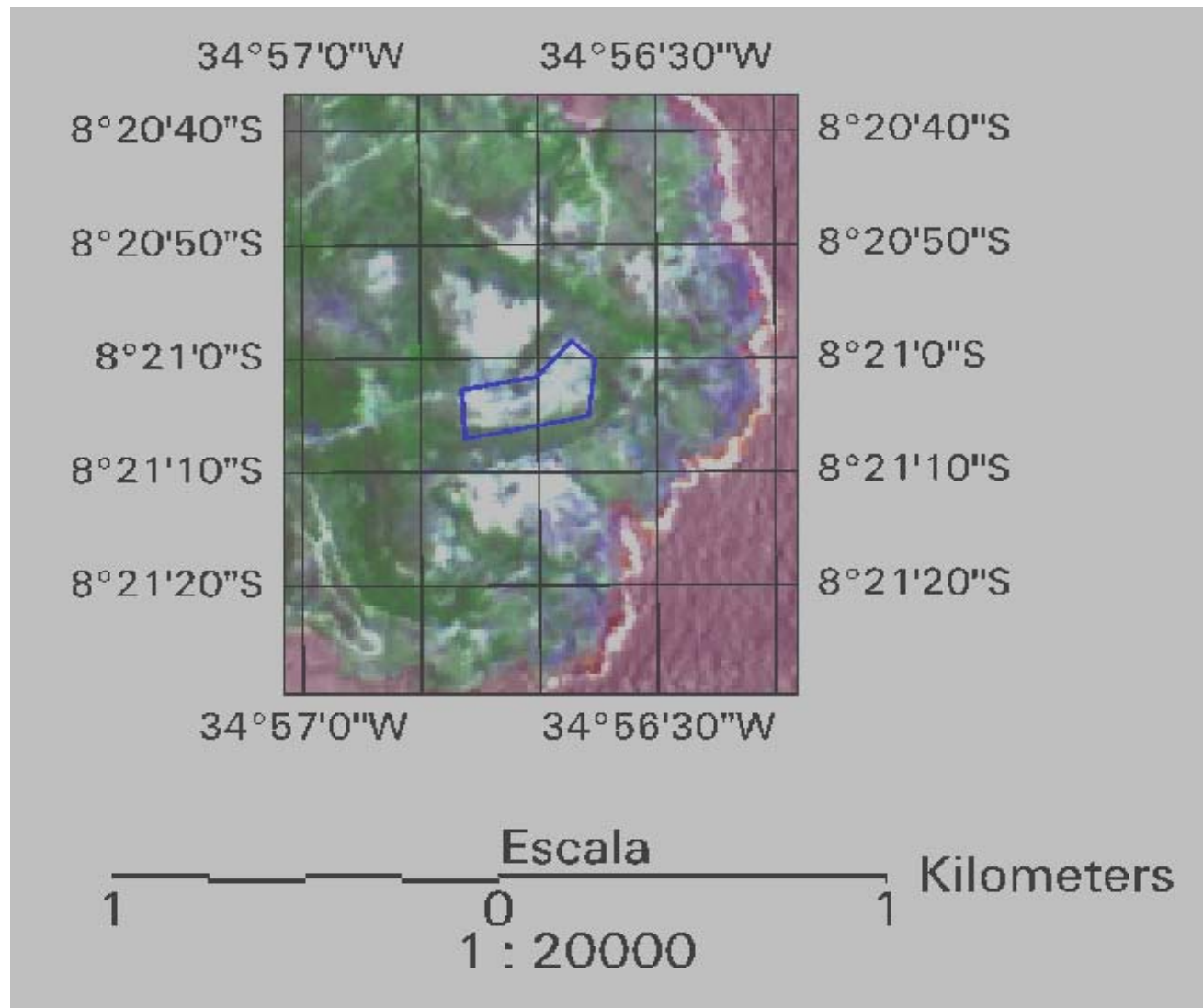


Figura III.10 - Composição de imagem satélite (Landsat e Spot) georeferenciada.

região, e a escolha da encosta deve-se a facilidade de acesso.

crateras, denominadas voçorocas. O processo fica estagnado quando se encontra um nível de base, ou seja, solo que apresente resistência à erosão.

Na Figura III.10 encontra-se as encostas sobre processo erosivo em vermelho. Dentre as três principais encostas degradadas foi escolhida a voçoroca central para o estudo. Ressalta-se que as formações e sedimentos assemelham-se na região, e a escolha da encosta deve-se a facilidade de acesso.

### **III.7.1. Descrição Geológica**

Na encosta em estudo apresenta-se três níveis de feições. Na camada superficial, com variação de cota superior a 2,0 metros, encontra-se a Formação Barreiras, mencionado anteriormente. Abaixo se encontra uma camada intemperizada do cristalino denominada de solo residual, também já descrito. Na camada mais profunda encontra-se o embasamento composto pelo Granito do Cabo. Deve ressaltar a ocorrência de óxido de ferro em abundância e até formando camadas impermeáveis.



Foto III.7 - Vista Geral da Boçoroca em estudo.

Na Foto III.7 encontra-se a encosta em estudo ao centro, pode-se observar as feições sendo: na camada superior de cor escura, denominada Formação Barreiras; e a camada intermediária na cor mais clara, denominada de solo residual. Quanto à rocha Granito do Cabo, não é possível visualizar nesta foto.

### **III.8. INVESTIGAÇÃO DE CAMPO**

Partindo da descrição do local estudado foram discriminadas camadas para o estudo dos problemas encontrados. As camadas foram definidas através de perfis de sondagem que identificaram pela classificação geológica camadas como: camada Formação Barreiras subdivida em camadas superficial (0,30m de profundidade) e intermediária (1,30m de profundidade); e camada de solo residual proveniente de rocha matriz - Granito do Cabo (7,80m de profundidade).

Para determinação das camadas foram realizadas investigações de campo. E como diretrizes deste trabalho, temos: conhecimento das características físicas do solo e o conhecimento das características físicas da rocha. Os trabalhos de campo podem ser observados na Figura III.11.

#### **III.8.1. Procedimentos dos Ensaios**

Como primeira etapa dos trabalhos realizaram-se sondagens SPT (Standard Penetration Test), utilizando a Norma da ABNT n.º 6484/80. Sendo realizados à seco (trado) até a profundidade aproximada de 3,0 metros, quando tornava-se impossível a penetração à trado, sendo continuadas utilizando a penetração com lavagem ao furo a medida que se penetrava a ferramenta.

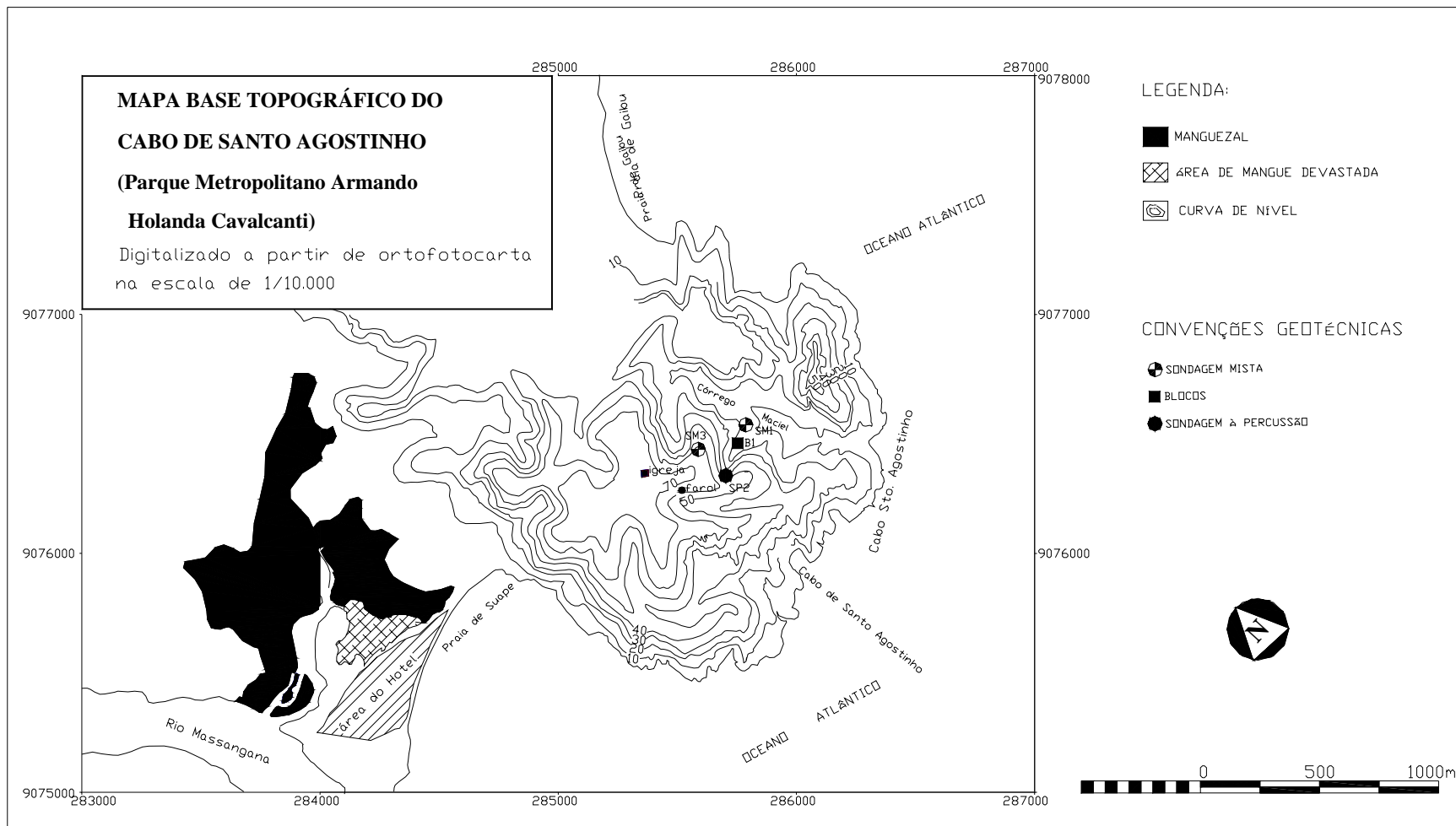


Figura III.11 - Localização das atividades de campo na área em estudo.



Ao chegar na rocha eram realizadas sondagens rotativas em obtenção de amostras. Eram também realizados ensaios de perda d'água baseados nas recomendações da ABGE, a cada metro penetrado na rocha.

Na amostragem indeformada e deformada foram utilizados a Norma da ABNT nº 9604/86. A obtenção de amostras de solo tem a finalidade de poder continuar as investigações em laboratório.

#### III.8.1.1. PERFIL DE SONDAGEM

As realizações das operações de sondagens ocorreram em duas fases, na primeira fase em março de 2000 foram realizadas duas sondagens mistas e na segunda fase em fevereiro de 2001 foram realizada uma sondagem SPT (Figura III.11).

Durante a abertura dos furos, eram coletadas amostras da ponta do trado e do amostrador padrão para determinação da umidade.

E a partir dos resultados das sondagens em conjunto ao trabalho de mapeamento geológico, foram obtidos perfil geológico-geotécnico apenas nos furos SM1 e SM3 (Figuras III.12 e III.13). Também é apresentando o perfil geotécnico do furo SP2 (Figura IV.14).

Nas sondagens rotativas utilizou-se barrilete do tipo duplo giratório com diâmetro HX (100 mm), obtendo testemunhos com diâmetro de 76,2mm. Uma vez atingido o limite estabelecido da rotativa, eram realizados ensaios de perda d'água em 03 (três) profundidades.

Os resultados das sondagens rotativas indicam uma rocha pouca a muito alterada, com valores de RQD igual a zero em um trecho (Tabela III.3). No furo SM1 (Anexo) a recuperação

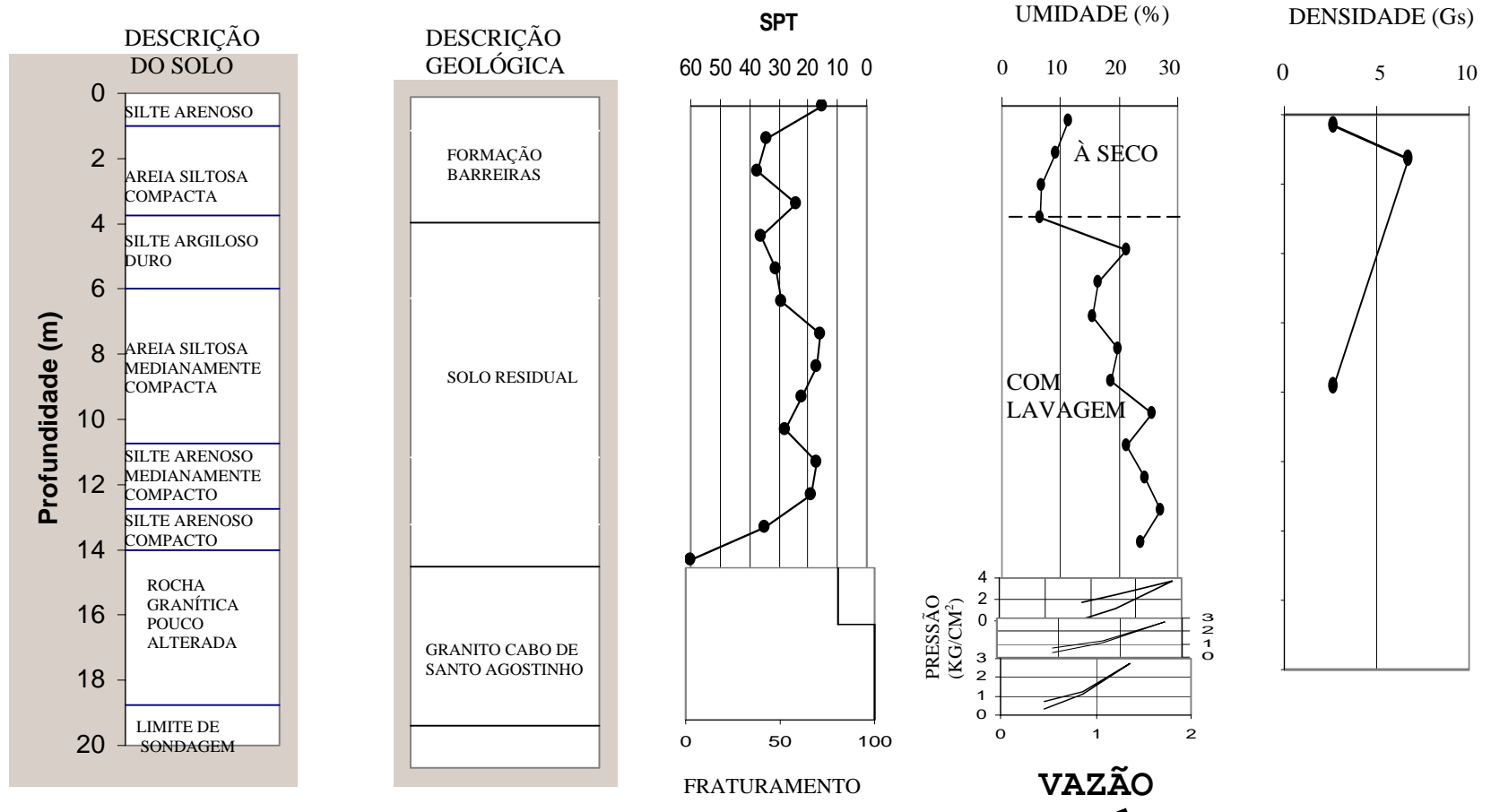


Figura III.12 - Perfil geológico-geotécnico do furo SM1.

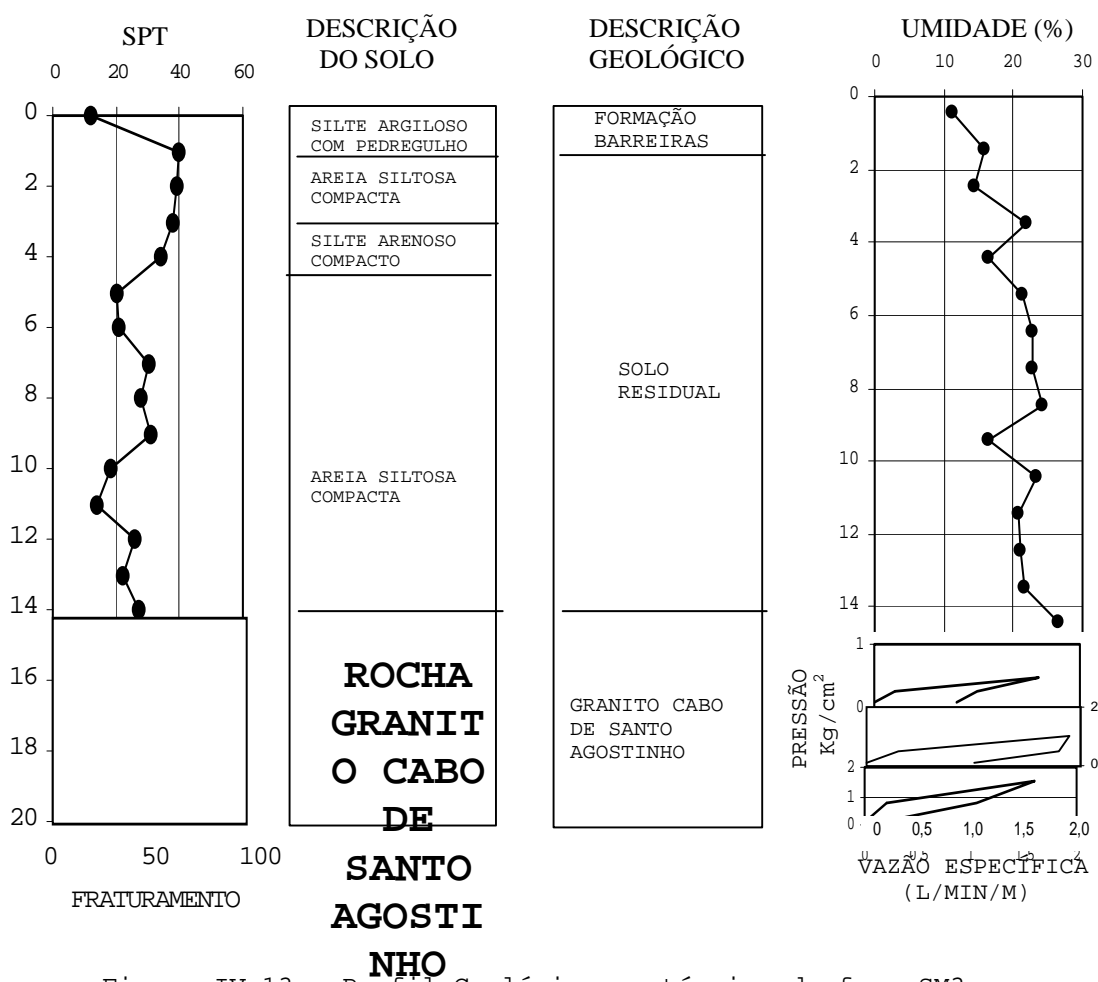


Figura IV.13 - Perfil Geológico-geotécnica do furo SM3.

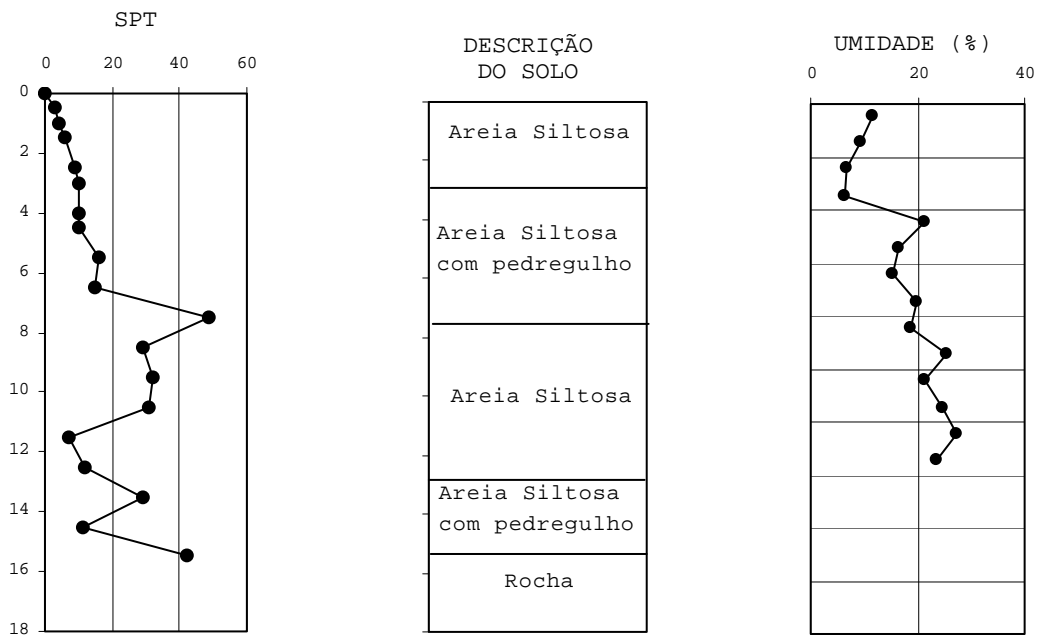


Figura IV.14 - Perfil Geotécnico do furo SP2.

iniciou-se a partir de 14,00 m de profundidade, enquanto no SM3 (Anexo) a recuperação só foi possível a partir de 14,75m.

Tabela III.3 - Resumo dos valores de RQD

Furo	Profundidade	Nº de frag. 10cm	Nº de frag.	RQD	Qualidade da Rocha
SM1	14,50 a 15,50	5	15	33,33	pobre
	15,50 a 17,00	5	12	41,67	pobre
	17,00 a 18,00	0	16	0	muito pobre
SM3	14,60 a 15,40	2	8	25	muito pobre
	15,40 a 16,04	3	4	75	boa
	16,04 a 16,84	3	3	100	excelente
	16,84 a 18,24	5	9	55,56	regular
	18,24 a 18,64	1	3	33,33	pobre

Os resultados dos ensaios de perda d'água indicam valores de até 1,143 l/min/m/atm (referente a pressões 0,10 a 0,50 kg/cm<sup>2</sup> no trecho 14,75m) no furo SM3 e até 4,93 l/min/m/atm no furo SM1 (referente a pressões 0,10 a 0,50 kg/cm<sup>2</sup> no trecho 14,00m). Nos trechos de rocha alterada chegando a 0,00 l/min/m/atm (referente a pressões 3,00 a 18,00 kg/cm<sup>2</sup> no trecho 17,00m - SM1).

#### III.8.1.2. COLETA DE AMOSTRAS DEFORMADAS E INDEFORMADAS

As campanhas de amostragem realizadas foram conduzidas após a sondagem, pois através dos perfis de sondagens é que foram definidas as camadas onde seriam retirados os blocos - amostras indeformadas.

A amostras indeformadas eram obtidas para a realização de ensaios laboratoriais com intuito de estudar as propriedades mecânicas dos solos e as amostras deformadas seriam para os ensaios de caracterização e classificação. As camadas foram definidas através de perfis de sondagem que identificaram pela classificação geológica camada como:

camada Formação Barreiras subdivida em camadas superficial (0,30m de profundidade) e intermediária (1,30m de profundidade); e camada de solo residual proveniente de rocha matriz - Granito do Cabo (7,80m de profundidade). Nestas camadas foram retirados dois blocos - amostras indeformadas -, mais aproximadamente 3 kg de amostra deformada de solo.



Foto III.8 - Moldagem do bloco  
(Formação Barreiras a 0,30m de profundidade)



Foto III.9 - Preparação do bloco para parafinação  
(Formação Barreiras a 0,30m de profundidade).



Foto III.10 - Parafinação do bloco  
(Formação Barreiras a 0,30m de profundidade).



Foto III.11 - Acondicionamento do bloco  
(Formação Barreiras a 0,30m de profundidade).

Os detalhes adotados nos procedimentos de amostragem podem ser observados nas Fotos III.8, III.9 , III.10 e III.11. Em resumo, eram blocos com dimensões entre 28 a 30 cm de arestas, obtidos por minuciosa escavação e, utilizando-se de uma faca afiada, era dado o acabamento final. Em seguida o bloco era envolvido com um papel laminado e um tecido de algodão poroso, onde eram aplicadas várias camadas de parafina até formar uma capa suficientemente rígida. Posteriormente, o bloco era cuidadosamente seccionado do maciço e acondicionado em uma caixa de madeira. Como pode ser observado na Foto III.11, o acondicionamento do bloco na caixa se faz com encaixe perfeito, sem espaços vazios. Portanto, não se utiliza da metodologia tradicional que preenchia os vazios entre a caixa e bloco com serra de madeira, foi observado que este artifício no transporte pode amalgar a amostra.

### III.9. RESUMO - COMENTÁRIOS

A região está submetida a um clima tropical chuvoso com verão seco (As'- Köppen). Pedologicamente, a área é de domínio de Latossolos. O perfil geológico é composto por sedimentos da Formação Barreiras, com espessura da ordem de 5m, sobrejacente a um solo residual de granito. A formação superior possui dois horizontes distintos: uma camada superficial, da ordem de 1m de espessura, constituída de uma argila arenosa de cor amarelada; seguida por uma camada constituída de uma areia siltosa de cor rosada. O solo da formação sobrejacente consiste de uma areia siltosa vareagada.

A estimativa da erosividade realizados por dados pluviométricos obtidos na estação do Recife (aproximadamente 41km de distância do local em estudo) pelo Instituto de Meteorologia. Observou-se elevados índices de erosividade nos períodos formados por 30 anos, enquanto aos períodos formados em ano essa taxa diminui. Ainda foi observado que nos períodos compostos de meses de leituras no período de 1930 a 2000 apresentou uma elevada erosividade os meses de maio e junho por apresentar também maiores índices de pluviometria, e conseqüentemente os meses de outubro e novembro as menores taxas de erosividade, também por apresentar menores índices de pluviometria.



## CAPÍTULO IV PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

### **IV.1. INTRODUÇÃO**

Nesta segunda etapa dos trabalhos fez-se a caracterização, identificação e classificação dos solos, através dos ensaios convencionais da geotecnia realizando-se estudos da compressibilidade, da resistência ao cisalhamento e da permeabilidade. Também foi realizada a classificação MCT para solos tropicais.

Nessa etapa dos trabalhos teve como objetivo principal conhecer os parâmetros geotécnicos das camadas de solos, e partindo destes parâmetros fazer correlações a fim de obter o potencial de erodibilidade destas camadas.

### **IV.2. CARACTERIZAÇÃO, IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS**

Inicia-se a caracterização do solo das camadas escolhidas para definição de forma quantitativa a granulometria e os limites de Atterberg, desta forma serão identificadas as estruturas dos solos.

A estrutura é definidor de ocorrência de potencial de erodibilidade, devido à formação de grumos na parte fina do solo. Este tipo de estrutura com grumos, influenciam nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos, onde materiais argilosos podem apresentar comportamento típico de solo arenoso ou friável (granular) - e são estes que possuem potencial de erodibilidade, por possuírem uma estrutura mais fraca e de fácil remoção das partículas.

Já a caracterização MCT, utilizada em solos tropicais, informa o comportamento laterítico do solo quando compactado. Este comportamento, quando identificado, é sinal de potencial de erodibilidade, pois nestes solos

caracterizam-se por apresentarem camadas superficiais não permeáveis provocando no surgimento de lâminas d'água na superfície, quando ocorrem chuvas, a remoção de partículas de solo - processo erosivo.

#### **IV.2.1. Procedimento dos Ensaios**

Foram realizados ensaios convencionais e não convencionais para definição das características físicas.

##### **IV. 2.1.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

Consistem nos ensaios:

- NBR 6467/86 - Preparação de amostras;
- NBR 7181 - Análise granulométrica;
- NBR 6508 - Massa específica dos grãos dos solos;
- NBR 6459 - Limite de liquidez;
- NBR 7180 - Limite de plasticidade;
- NBR 7182/86 e DNER - ME 228/94 - Compactação;

Na análise granulométrica foram realizados para os ensaios de sedimentação três procedimentos: ensaios com defloculante e com dispersor, sem defloculante e com dispersor, e, sem defloculante e sem dispersor.

O ensaio de dispersão SCS (ou ensaio sedimentométrico comparativo ou ainda ensaio duplo hidrométrico) tem por objetivo a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pela comparação entre as porcentagens (em massa) de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, determinadas de

acordo com o ensaio de sedimentação proposto para a análise granulométrica (NBR 7181/84) e de acordo com o ensaio de sedimentação realizado sem agitação mecânica e agente defloculante.

O ensaio foi desenvolvido pelo SCS/USDA (Soil Conservation Service / United States Department Agriculture) e recentemente normatizado no Brasil pela norma ABNT NBR 13602/96 (Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo). Especificações para este ensaio são também encontradas na especificação de método de ensaio MSL-12 (Ensaio de erodibilidade de solos) do Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP (Companhia Energética de São Paulo) (CESP, 1979).

O parâmetro obtido do ensaio é a chamada porcentagem de dispersão:

$$\% \text{dispersão} = (A/B)100\% \qquad \text{Equação (IV.1)}$$

onde: A é a porcentagem, em massa, de partículas < 0,005 mm sem defloculante e agitação mecânica e B é a porcentagem, em massa, de partículas < 0,005 mm com defloculante e agitação mecânica.

Convém destacar que a norma ABNT só considera válida para os resultados obtidos de solos com teor de argila (<0,005 mm) > 12% (em ensaios com defloculante).

E no terceiro procedimento do ensaio de sedimentação (sem defloculante e sem dispersor) terá o objetivo de identificar a formação de grumos e auxiliar na classificação da atividade do solo.

Finalizando esta etapa com o ensaio de classificação MCT com o objetivo de classificar os solos estudados em três metodologias diferentes: classificação MCT,

classificação Unificada e classificação proposta por Vargas.

#### IV.2.1.2. ENSAIO DE CLASSIFICAÇÃO MCT

Segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995), essa metodologia foi iniciada com a introdução do ensaio Mini-CBR (1970), para solos tropicais, com base no procedimento desenvolvido pela Iowa State University (1960) e posteriormente ampliado, sobretudo para possibilitar aproveitamento em solos arenosos finos lateríticos.

De acordo com NOGAMI e VILLIBOR (1995), os corpos de prova utilizados para os ensaios são moldados em cilindros de 50 mm de diâmetro, num compactador de secção plena. A adaptação do cilindro e compactador para execução do ensaio para determinação do MCV (Moisture Condition Value), que foi proposto por Parsons (1976), e a introdução do ensaio de "Perda de Massa por Imersão" possibilitaram a determinação de coeficientes e índices, que permitem classificar os solos tropicais.

O ensaio Mini-CBR, consistem em preparar amostras secas ao ar em cinco faixas de umidade e sendo três abaixo da ótima, uma acima da ótima e outra na ótima, poderá ser baseado num ensaio de compactação Proctor. Após tomá-se a cada porção de amostra da faixa de umidade pesando 200g introduz no molde compactação (Figura IV.1). Adaptando o soquete na amostra inicia-se a operação de golpeá-la sucessivamente (2,3,4,6,8,12,16,...n,...4n). Pára-se de dar golpes quando:

1. As medidas sucessivas derem diferenças menores que 0,1 mm;
2. 4n atingir 256 (96 no S-MCV);
3. Houver nítida expulsão de água.

Partindo das respostas obtidas confecciona-se a curva de compactação.

Para o ensaio de perda de massa por imersão em água, o corpo de prova compactado é parcialmente extraído de seu molde, de maneira que fiquem salientes 10 mm (5 mm para  $\phi$  26 mm) e, em seguida submerso em água, em posição horizontal. Recolhe-se a parte eventualmente despreendida e determina-se a sua massa seca. A perda de massa por imersão  $P_i$  é expressa em porcentagem relativamente à massa seca da parte primitiva saliente do corpo de prova (Figura IV.2).

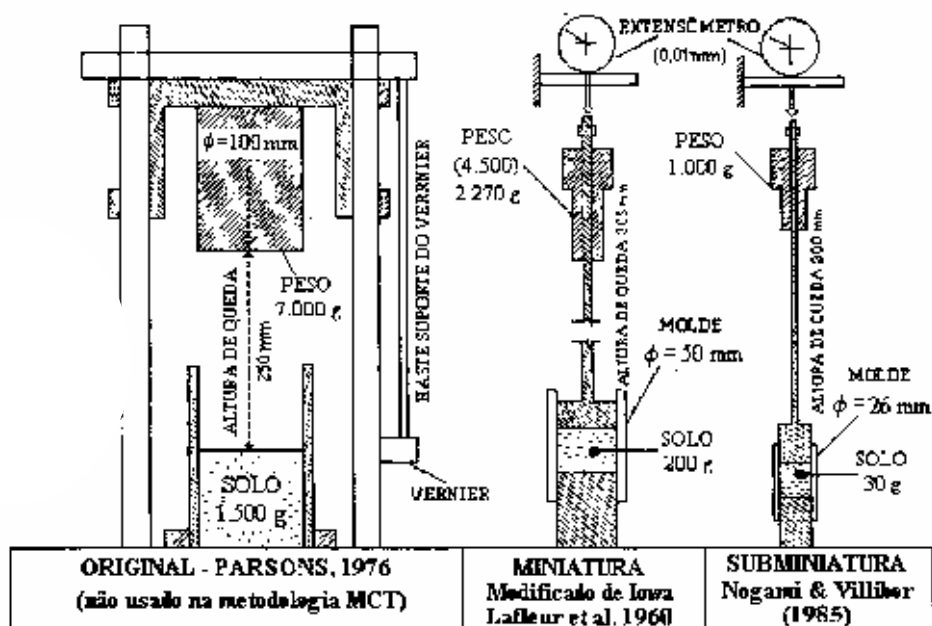


Figura IV.1 - Esquema comparativo dos aparelhos de compactação relacionados à metodologia MCT (SOUZA NETO, 1998).

A classificação geotécnica MCT foi desenvolvida para solos tropicais lateríticos e saprolíticos. Os dados a serem obtidos no ensaio de Compactação são:

1. Coeficiente  $c'$ ;
2. Curva Mini-MCV = f (teor de umidade de compactação);
3. Coeficiente  $d'$ .

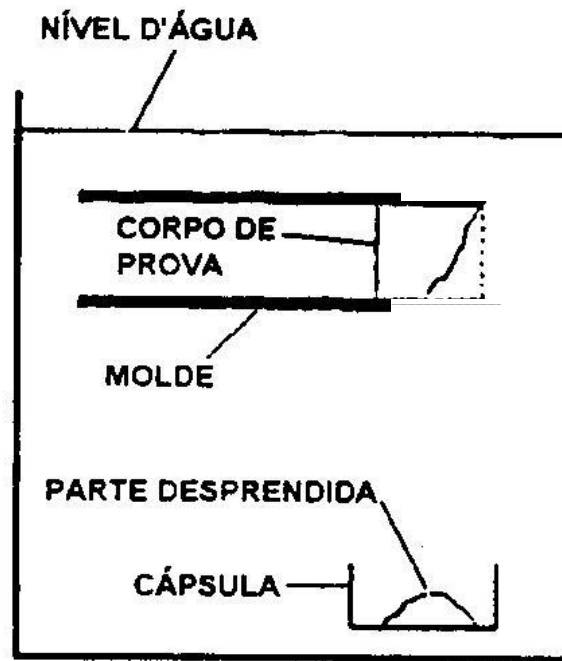


Figura IV.2 - Esquema do Ensaio de Perda por Imersão  
(SOUZA NETO, 1998)

Os dados a serem obtidos no ensaio de perda de massa por imersão são:

1. Perda de Massa  $P_i$ , correspondente ao Mini-MCV
2. Curva de Perda de Massa  $P_i$ , em função do Mini-MCV.

A obtenção do coeficiente  $c'$  é obtida através da confecção das curvas de deformabilidade, Número de golpes vs. Diferença de altura ( $a_n = A_n - A_{4n}$ , [mm]). Partindo da umidade de compactação definida na curva de compactação procura-se a interseção com  $a = 2$  mm. Na obtenção do coeficiente  $d'$  é a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV, medida nas adjacências da massa específica aparente seca máxima, devendo ser expressa em  $\text{Kg/m}^3$  e, o teor de umidade de compactação, em %. E a obtenção do  $e'$  se faz pelo uso da equação:

$$e' = \sqrt{\frac{P_i}{100} + \frac{d'}{20}}$$

Equação

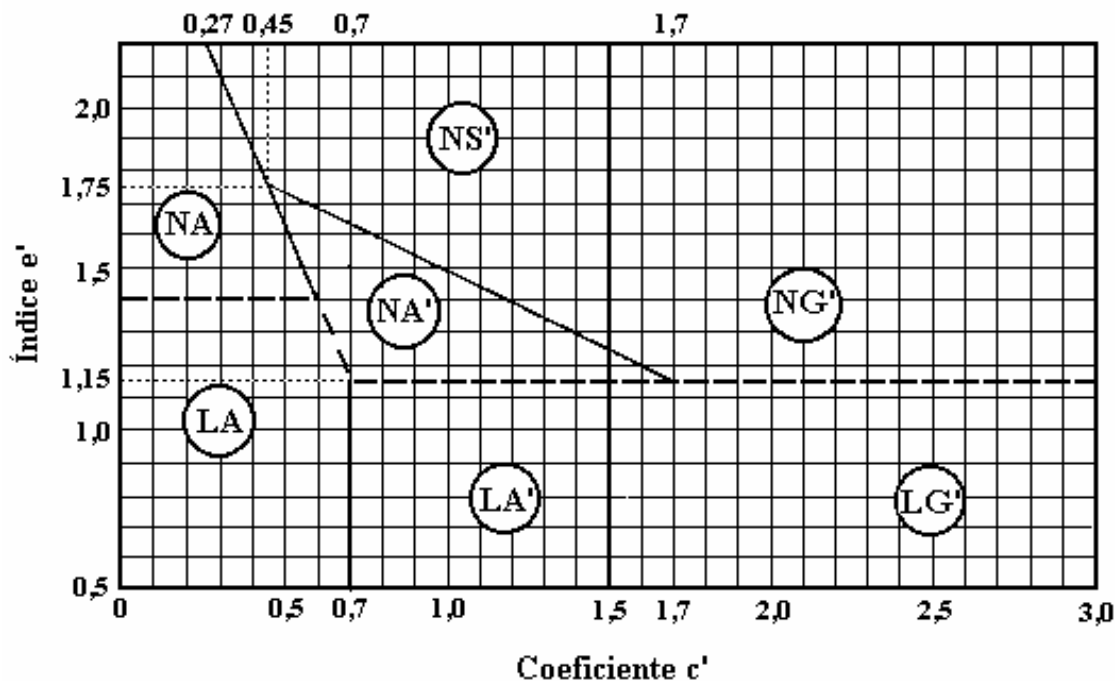
(IV.2)

Utilizar-se o gráfico classificatório da Figura IV.3 para determinação do Grupo MCT.

VILLIBOR et. al.(1986) reconhecem como solos erodíveis aqueles classificados como NS', como potencialmente erodíveis os solos LA e LA' e como resistentes à erosão os solos LG'. As demais classes têm a erodibilidade condicionada a outras propriedades, o que dificulta a previsão do comportamento frente à erosão pela classificação MCT.

Tabela IV.1 - Valores numéricos das propriedades dos grupos que complementam a Figura IV.3.

<b>SUPORTE Mini-CBR (%) (C/ SOBRECARGA PADRÃO)</b>	Muito Elevado Elevado Médio Baixo	> 30 12 a 30 4 a 12 <4	<b>PERDA DE SUPORTE Mini-CBR POR IMERSÃO (%)</b>	Elevada Média Baixa	>70 40 a 70 <40
<b>EXPANSÃO (%)</b>	Elevada Média Baixa	>3 0,5 a 3 <0,5	<b>CONTRAÇÃO(%)</b>	Elevada Média Baixa	>3 0,5 a 3 <0,5
<b>COEFICIENTE DE SORÇÃO - S log (cm / raiz (min))</b>	Elevada Média Baixa	>(-1) (-1) a (-2) <(-2)	<b>COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE - K log (cm / s)</b>	Elevada Média Baixa	> (-3) (-3) a (-6) <(-6)



GRANULOMETRIAS TÍPICAS																
Designações do T1 - 71 do DER - SP (equivalentes da Mississipi River Commission, USA)			argilas siltes (q,s)		areias silteosas		siltes (k,m) siltes arenosos		argilas argilas arenosas argilas silteosas siltes argilosos		areias silteosas		areias argilosas		argilas argilas arenosas argilas silteosas siltes argilosos	
k = caolínico      m = micáceo s = sericítico      q = quartzoso																
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico						L = Laterítico							
GRUPO MCT			NA		NA'		NS'		NG'		LA		LA'		LG'	
PROPRIEDADES	MINI-CBR (%)	sem imersão	M, E		E		M, E		E		E		E, EE		E	
		perda por imersão	B, M		B		E		E		B		B		B	
	EXPANSÃO		B		B		E		M, E		B		B		B	
	CONTRAÇÃO		B		B, M		M		M, E		B		B, M		M, E	
	COEF. DE PERMEABILIDADE (K)		M, E		B		B, M		B, M		B, M		B		B	
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (S)		E		B, M		E		M, E		B		B		B	
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima de energia normal		EE = Muito Elevado (a) E = Elevado (a)				M = Médio (a) B = Baixo (a)				Vide Tabela 1 para equivalente numérico					
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas		USCS	SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH							
		AASHO	A - 2	A - 2 A - 4 A - 7	A - 4 A - 5 A - 7 - 5	A - 6 A - 7 - 5 A - 7 - 5	A - 2	A - 2 A - 4	A - 6 A - 7 - 5							

Figura IV.3 - Gráfico da Classificação MCT e dados diversos dos grupos de solos integrantes da mesma (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

O emprego da classificação MCT modificada (MCT-M) na caracterização da erodibilidade foi apresentado em



VERTAMATTI & ARAÚJO (1990) e VERTAMATTI et. al. (1990). Com base no comportamento frente à erosão de taludes rodoviários do interior de São Paulo e em aeroportos de Santarém / PA e Manaus / AM, foram definidos graus de erosão (Grau de Erosão Associado - GEA, segundo VERTAMATTI & ARAÚJO, 1998):

- Erosão grau zero: talude intacto;
  
- Erosão grau um: talude pouco erodido com sulcos esparsos;
  
- Erosão grau dois: talude medianamente erodido com sulcos freqüentes;
  
- Erosão grau três: talude muito erodido, com desconfiguração total da face do talude e sulcos muito freqüentes e interligados.

Os autores propõem a distinção de três faixas de erodibilidade no gráfico classificatório MCT-M (VERTAMATTI, 1998 apud VERTAMATTI et. al., 1990) Figura IV.4. Mesmo havendo a superposição de faixas com as classes de solos, de uma maneira geral, os solos lateríticos correspondem ao grau zero, os transicionais aos graus 1 e 2 e os solos saprolíticos ao grau 3 de erosão.

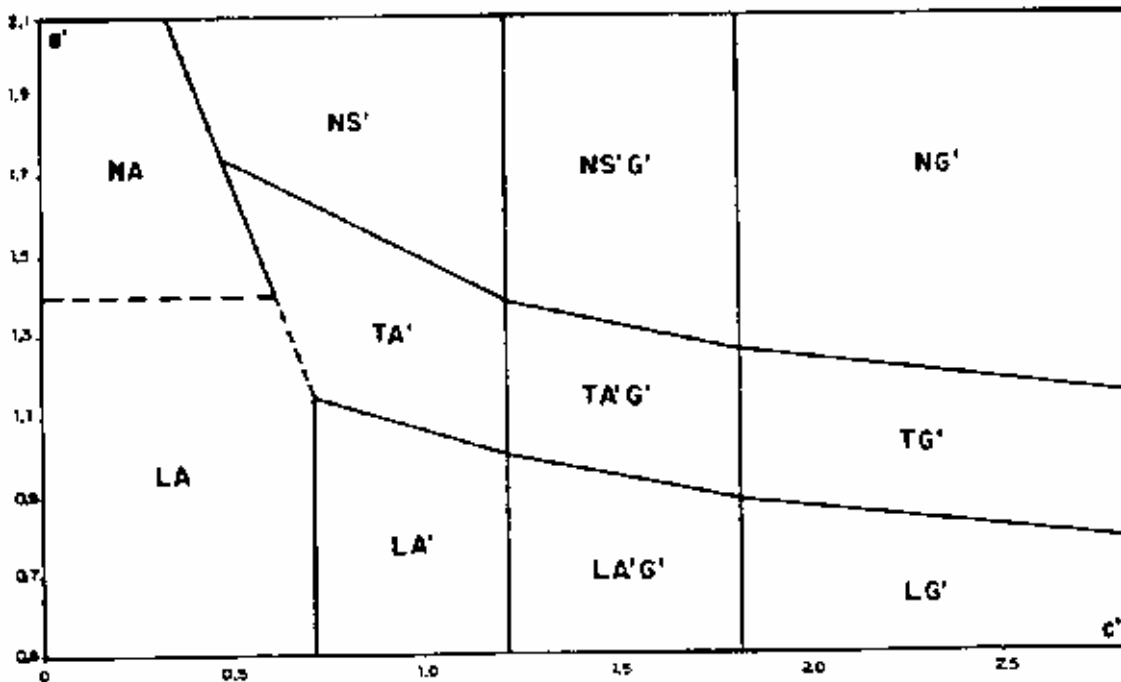


Figura IV.4 - Classificação modificada do MCT  
(VERTAMATTI et. al., 1990)

#### IV. 2.1.3. IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Os ensaios de caracterização (granulometria e limites de Atterberg) são os principais critérios de identificação considerados nas classificações (AASHO, HRB e USCS) comumente utilizadas em mecânica dos solos. Estas classificações foram desenvolvidas em países de clima temperado, destinadas, basicamente, a classificar solos transportados, cujas propriedades de engenharia se correlacionam bem com os critérios de identificação.

A segunda proposta, apresentada por VARGAS (1988 e 1992), busca adaptar a USCS peculiaridades mineralógicas dos solos residuais na identificação da fração fina destes solos. A principal adaptação foi à introdução do conceito de Atividade (Skempton, 1953) na identificação da natureza mineralógica, não apenas da fração argila, mas também da natureza micácea e/ou caulinítica da fração silte de alguns

solos residuais. Os critérios relativos à fração grossa permanecem inalterados (ver Tabela IV.2).

A metodologia MCT (utiliza corpos de prova miniatura, compactados, mediante procedimentos especial, e destinados especialmente para solos tropicias) surgiu como uma necessidade diante das limitações dos procedimentos tradicionais de caracterização e classificação de solos com base nas propriedades índices.

A adaptação dos procedimentos de compactação em miniatura e a introdução do ensaio de perda por imersão em água permitiram o desenvolvimento de uma classificação geotécnica mais tarde denominada classificação MCT.

TABELA IV.2 - Classificação dos solos por proposta de VARGAS (1988 e 1992).

Solos de granulação fina, contendo pouco ou nenhum material de granulação grossa	MAIOR DIVISÃO	GRUPO DO SOLO	SUB-GRUPOS PROPOSTOS	SÍMBOLOS GRUPOS
	Baixa Compressibilidade  LL < 50	Silte e areias muito finas. Areias finas argilosas. Argilas siltosas	Inorgânico. Fluxo de Rochas	
Solos Micáceos			MLm	
Argilas de baixa plasticidade. Argilas arenosas. Argilas siltosas		Solos Não Cauliníticos		CL
		Tipo Caulinítico		KL
Solos siltosos ferrosos			KLf	
Solos siltosos orgânicos			OL	
Alta Compressibilidade  LL > 50	Areia fina ou solos siltosos	Diatomáceas. Solos elásticos		MH
		Solos Micáceos		MHm
	Argilas de alta plasticidade, argilas arenosas ou siltosas	Tipo Não-Caulinítico		CH
		Tipo Caulinítico		KH
	Solos argilosos ferrosos			KHf
	Solos argilosos orgânicos			OH

#### IV.2.2. Apresentação e Análise dos Resultados

Nesta fase serão apresentados os ensaios de laboratório que definem as propriedades do solo com finalidade de realizar uma classificação geotécnica.

#### IV.2.2.1. ENSAIO DE GRANULOMETRIA

Na Figura IV.5 está apresentada as curvas granulométricas segundo os dois procedimentos adotados na presente dissertação (ABNT e Sistema Internacional) para os solos estudados em profundidades diferentes. Nestas figuras, as frações dos solos foram enquadradas segundo as Normas Brasileiras (ABNT), como informação adicional. Paralelamente, o qual será considerado neste trabalho para efeito de análise e classificação dos solos, nas referidas figuras foi inserida a escala granulométrica correspondente ao Sistema Internacional. Um resumo dos correspondentes percentuais está apresentado na Tabela IV.3.

As curvas granulométricas (Figura IV.5) mostram, na amostra superficial a 0,30m de profundidade (solo da Formação Barreiras) observa-se uma variação entre as três metodologias adotadas e isto é devido ao solo possuir comportamento dispersivo e formação de grumos na sua estrutura. Enquanto nas outras amostras com profundidades 1,30 - Formação Barreiras - estas apresentam uma pequena variação entre as três metodologias, portanto não possuem comportamento dispersivo e nem formação de grumos na sua estrutura; na amostra a 5,50m de profundidade (Solo Residual) apresenta uma variação acentuada em duas metodologias, as que definem o comportamento dispersivo, enquanto isto não apresentam variação nas curvas que definem formação de grumos na estrutura, e como consequência são dispersivos e não apresentam grumos em sua estrutura. E os solos da camada na profundidade 7,80m - Solo Residual - não apresentam variação entres as metodologias, indicando solos não dispersíveis e não formam grumos em sua estrutura.

Tabela IV.3 - Resumo comparativo dos ensaios com defloculante, e sem defloculante com e sem dispersor.

Prof: (m)	Composição Granulométrica (%) - ABNT											
	<b>Com defloculante</b>				Sem defloculante e com dispersor				Sem defloculante e sem dispersor			
	Arg	Silt	Areia	Pedr	Arg	Silt	Areia	Pedr	Arg	Silt	Areia	Pedr
0,3(FB)	42	8	49	1	12	13	74	1	5	10	84	1
1,3(FB)	24	2	74	0	5	8	86	0	5	10	85	0
5,5(SR)	70	8	21	0	10	27	63	0	0	14	86	0
7,8(SR)	23	4	64	9	2	22	67	9	2	22	67	9

Prof (m)	Composição Granulométrica (%) - SI																	
	Com defloculante						Sem defloculante e com dispersor						Sem defloculante e sem dispersor					
	Arg	Silt	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedr	Arg	Silt	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedr	Arg	Silt	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedr
0,3 (FB)	37	20	28	19	2	1	16	13	53	19	2	1	2	6	28	19	2	1
1,3 (FB)	20	3	57	15	2	0	2	17	69	15	2	0	2	7	57	15	2	0
5,5 (SR)	75	4	14	7	0	0	14	23	14	7	0	0	0	14	79	7	0	0
7,8 (SR)	10	17	40	20	4	9	2	22	43	20	4	9	2	18	40	20	4	9

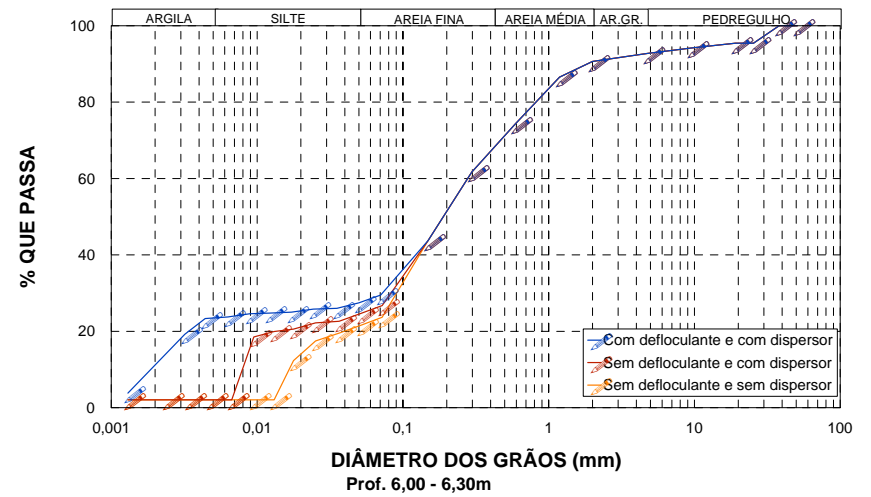
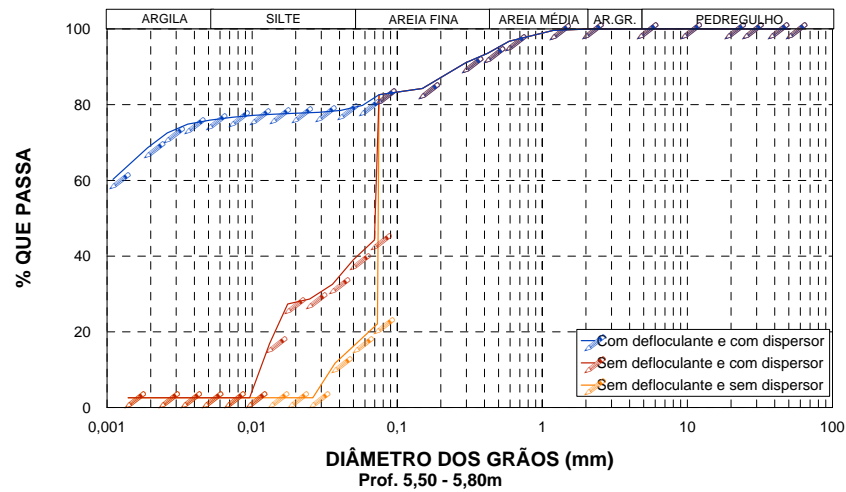
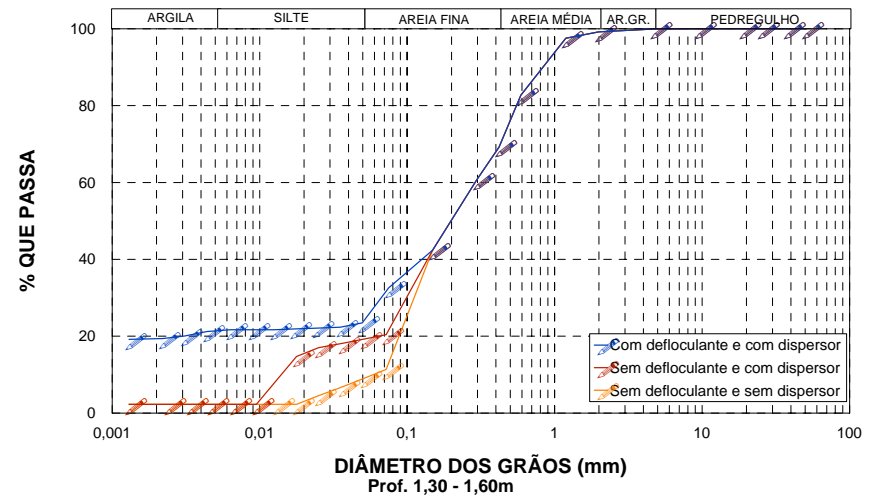
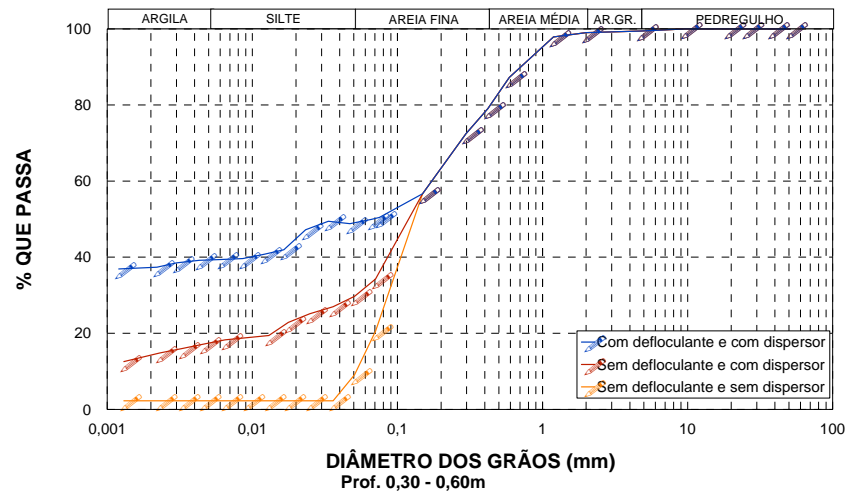


Figura IV.5 – Curvas granulométricas.

Os diâmetros efetivos ( $D_{10}$ ) para as amostras de solo apresentam: na amostra superficial (0,30m de profundidade - formação Barreiras) com diâmetro efetivo de 0,0012mm, na amostra a 1,30m de profundidade (Formação Barreiras) com 0,0013mm, na amostra a 5,50m de profundidade (Solo Residual) foi de 0,01mm na amostra a 7,80m de profundidade (Solo Residual) com 0,0023mm. O coeficiente de uniformidade  $C_u$  ( $D_{60}/D_{10}$ ) foi: na amostra superficial (Formação Barreiras) 222,08; na amostra intermediária (Formação Barreiras) 138,46, na amostra a 5,50m de profundidade (Solo Residual) foi de 0,11 e na amostra mais profunda (7,80m de profundidade - Solo Residual) 155,56. Apresentando nos solos desuniformes e mal graduados, segundo critério de classificação unificada, ressalta a amostra a 5,50m de profundidade apresentou solo uniforme.

Nas curvas granulométricas apresentadas nos ensaios realizados sem o uso do defloculante e com dispersor em comparação com os resultados de ensaios com defloculante observa-se nas amostras a profundidade 0,30m (Formação Barreiras) e a profundidade 5,50m (Solo Residual) variação elevada entre os métodos de realização do ensaio, o que não se encontra nas outras amostras (Tanto na amostra a 1,30m de profundidade - Formação Barreiras - e na amostra a 7,80m de profundidade - Solo Residual). Observando um elevado aumento no percentual de argila ( $\phi = 5\mu$ ) e diminuição na fração silte.

Tabela IV.4 - Valores do potencial de dispersão

Prof. (m)	% < 0,005mm (com defloculante) B	% < 0,005mm (sem defloculante) A	A/B	PD <sup>1</sup> (%)
0,30 (FB)	39,07	16,744	0,429	42,9
1,30 (FB)	21,395	2,791	0,131	13,1
5,50 (SR)	75,89	2,6	0,034	3,4
7,80 (SR)	19,535	2,791	0,143	14,3

1 - PD = Potencial de dispersão.

Essa alteração na granulometria indica que a ausência de defloculante manteve a estrutura porosa (grumos - grãos de argila agregados), encontrado no solo em estado natural. Este tipo de estrutura pode influenciar nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos, onde materiais argilosos podem apresentar comportamento típico de solos arenosos (elevada permeabilidade, recalques imediatos e, em alguns casos, comportamento colapsível).

Os valores obtidos do potencial de dispersão (PD) que encontrarem-se superiores a 10 indica que os solos estudados apresentam elevado teor de dispersão, podendo corresponder a um potencial elevado de erodibilidade dos solos. Ressalta a amostra a 5,50m de profundidade - Solo Residual - apresentou um potencial de dispersão baixo.

#### IV.2.2.2. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS ( $G_s$ )

Os valores obtidos de  $G_s$ , em geral, apresentam coerentes com os encontrados na literatura (ver Tabela IV.5). E esses elevados valores podem estar relacionados com a grande quantidade de mica, cuja densidade pode variar de 2,70 a 3,20; principalmente porque o solo mais profundo é residual e provém de uma rocha granítica, e os demais solos compõem-se de sedimentos formadores da Formação Barreiras. Vale ressaltar, os solos apresentam quantidades expressivas de óxido de ferro, que também contribui para valores elevados na densidade real dos grãos.

Tabela IV.5 - Valores de  $G_s$  com a profundidade.

Prof. (m)	$G_s^1$
0,30 (FB)	2,633
1,30 (FB)	2,664
5,50 (SR)	2,63
7,80 (SR)	2,675

1 -  $G_s$  = Densidade Real dos Grãos.



Portanto seu valor depende da quantidade relativa dos minerais em cada fração do solo, e a sua avaliação influência na determinação da fração argila e no índice de vazios.

#### IV.2.2.3. LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

Os limites LL e LP referentes às amostras nas profundidades 0,30; 1,30 (Formação Barreiras) e 7,80m (Solo Residual) foram realizados segundo a norma convencional (ABNT), como pode ser observado na Tabela IV.6.

Ressaltando as limitações do ensaio de limites de Atterberg, que são fortemente influenciados pelo julgamento do operador e os resultados dos ensaios de caracterização realizados tendem a não indicar clareza em comportamento atribuída ao efeito de secagem das amostras, neste trabalho somente será utilizada metodologia adotada pela ABNT.

Tabela IV.6 - Resultado dos Limites de Atteberg.

Prof. (m)	LL <sup>1</sup>	LP <sup>2</sup>	IP <sup>3</sup>
0,30 (FB)	32,80	19,04	13,76
1,30 (FB)	23,52	19,16	4,35
5,50 (SR)	58,50	30,37	28,13
7,80 (SR)	53,19	29,38	23,80

1 - LL = Limite de liquidez; 2 - LP = Limite de plasticidade e 3 - IP = Índice de plasticidade.

#### IV.2.2.4. COMPACTAÇÃO

Na realização deste ensaio foram utilizadas duas metodologias: Ensaio Mini-compactação (DNER - ME 228/94) e Compactação Proctor normal (ABNT - 7182/86). O objetivo é encontrar uma boa correlação entre as metodologias aplicadas, observou-se diferenciação entre os mesmos devido à energia de compactação utilizada e também outras

dificuldades contidas nos ensaios (Figura IV.6). Ressalta-se que o ensaio Mini-compactação apresentava um vácuo dentro do molde de acondicionamento da amostra e a calibração no extensômetro de leitura perdem sua credibilidade pelos impactos sofridos na realização do ensaio. Mas ao todo apresentaram uma correlação boa, deve-se destacar quanto ao uso do ensaio Mini-compactação quanto houver necessidade de parâmetros mais criteriosos.

#### IV.2.2.5. ENSAIO DE CLASSIFICAÇÃO MCT

Nas Figuras IV.7, IV.8 e IV.9 estão apresentados os resultados de uma série de ensaios da classificação MCT realizados nas amostras indeformadas retiradas nas profundidades 0,30m (Formação Barreiras); 1,30m (Formação Barreiras) e 7,80m (Solo Residual).

##### IV.2.2.5.1. Ensaio de Compactação MINI-MCV

Os resultados dos ensaios de compactação Mini-MCV indicam matérias de comportamento distintos, quanto à forma das curvas de deformabilidade (Figuras IV.7a, IV.8a e IV.9a) ou curvas Mini-MCV.

Os solos apresentaram alta massa específica, com alturas finais dos CP's correspondentes ao Mini-MCV = 10 inferiores a 48mm. As mesmas foram determinadas através de interpolação gráfica em uma curva  $An$  vs *Mini-MCV*.

A determinação dos coeficientes  $c'$  (inclinação da curva de deformabilidade correspondente ao Mini-MCV = 10) só foi possível através de interpolação gráfica, na vez que nenhuma das curvas plotadas corresponderam a tal valor de Mini-MCV.

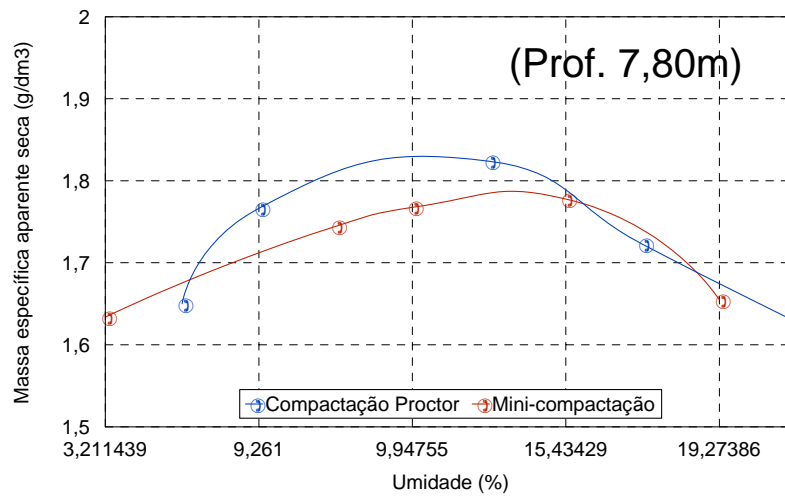
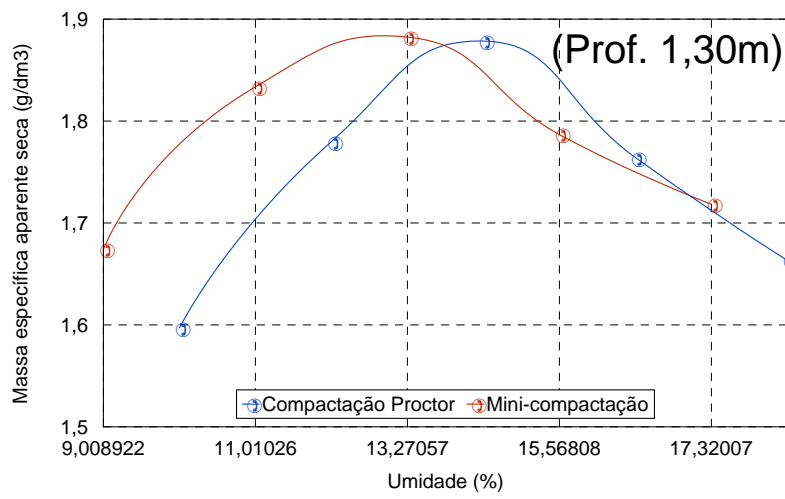
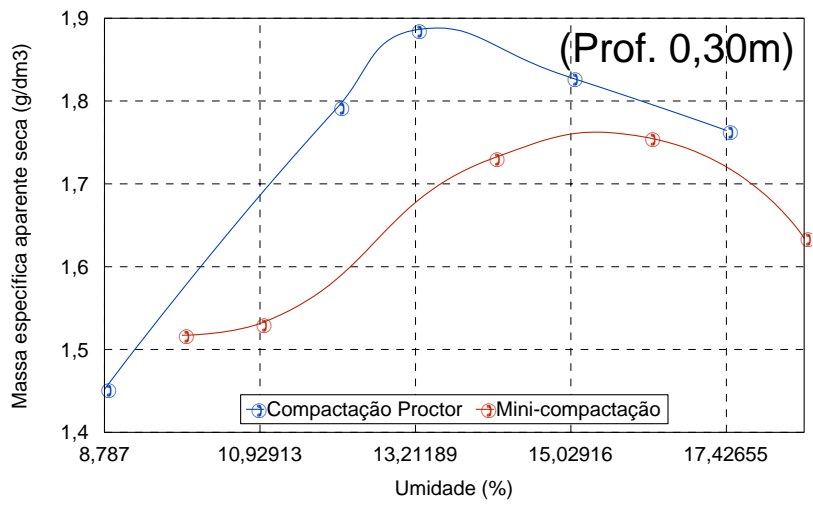


Figura IV.6 - Curvas de compactação Mini-compactação e Proctor normal

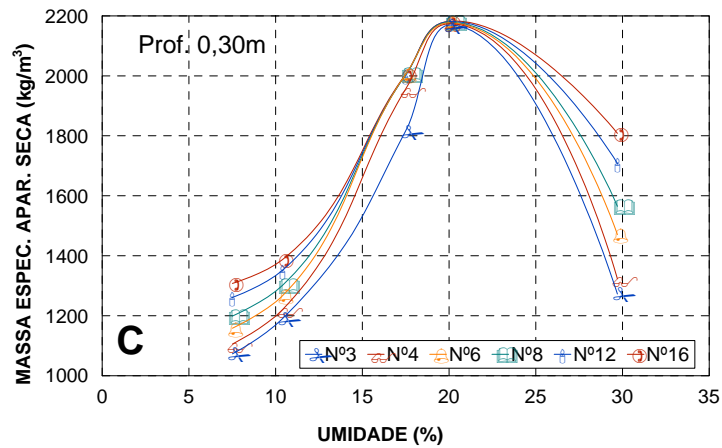
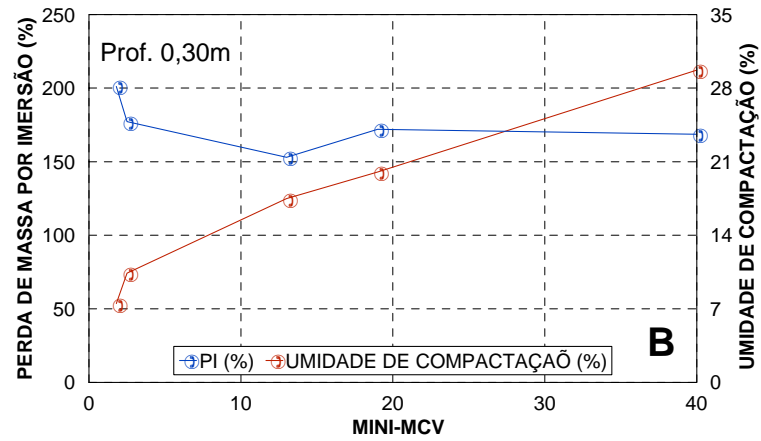
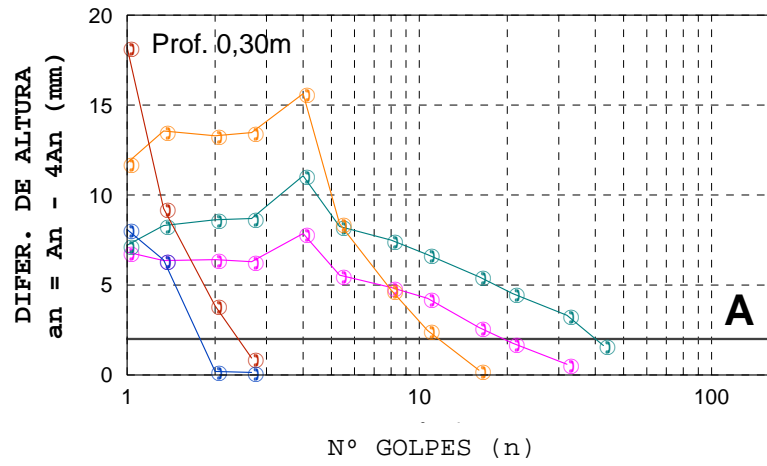


Figura IV.7 - Resultados de ensaios da Classificação MCT:  
 a) Curvas de deformabilidade; b) Pi vs Mini-MCV e W(%) vs Mini-MCV; e c) Curvas de compactação.

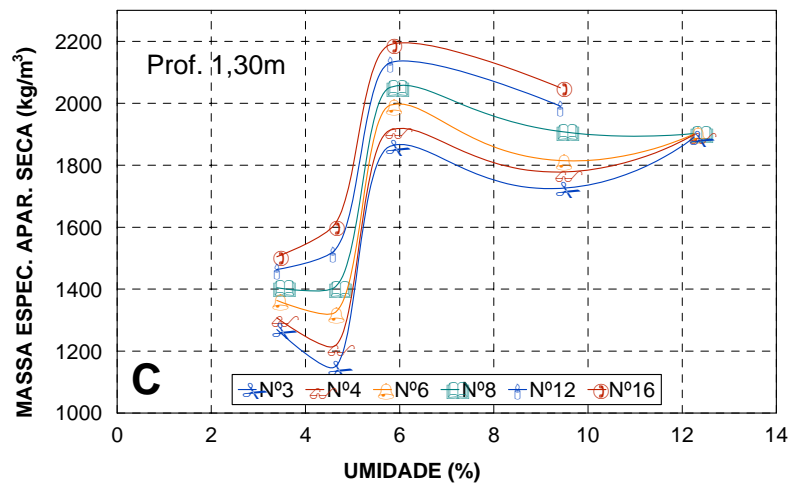
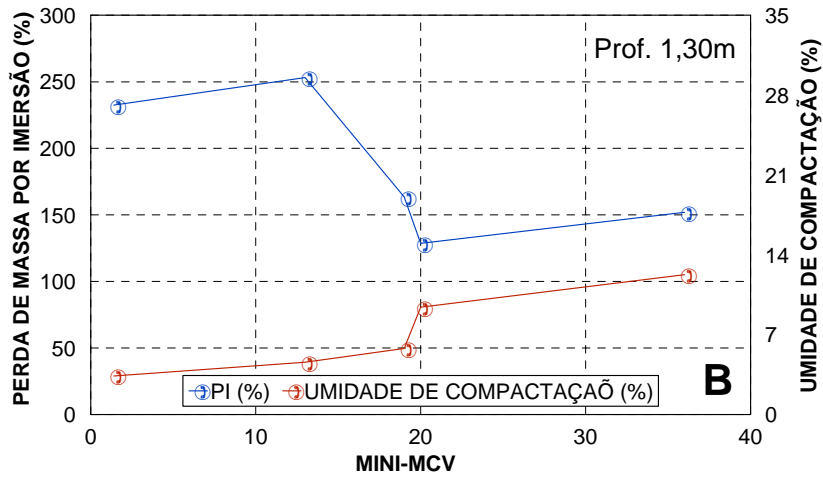
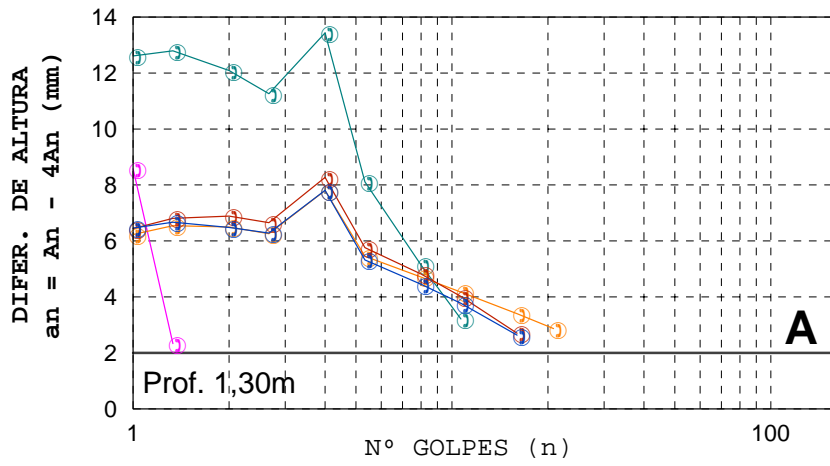


Figura IV.8 - Resultados de ensaios da Classificação MCT:  
a) Curvas de deformabilidade; b) Pi vs Mini-MCV e W(%) vs Mini-MCV; e c) Curvas de compactação.

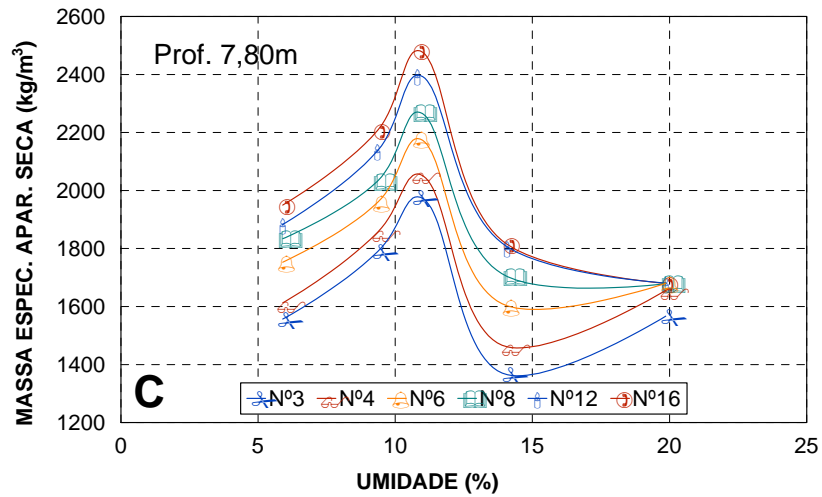
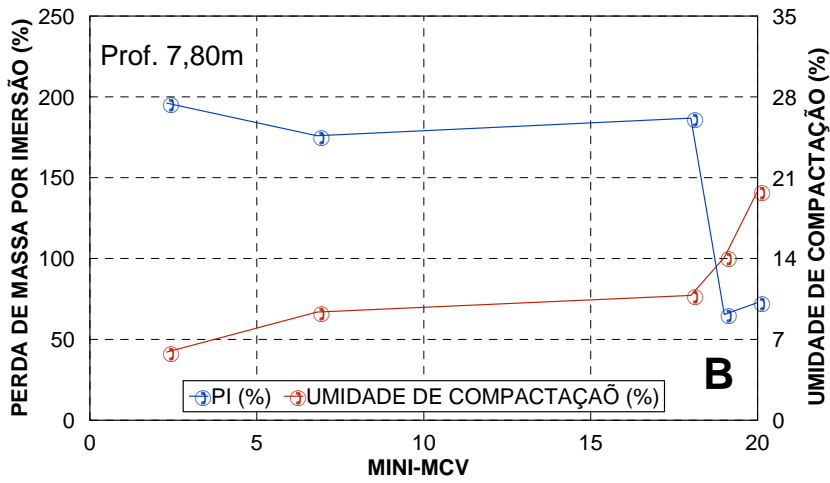
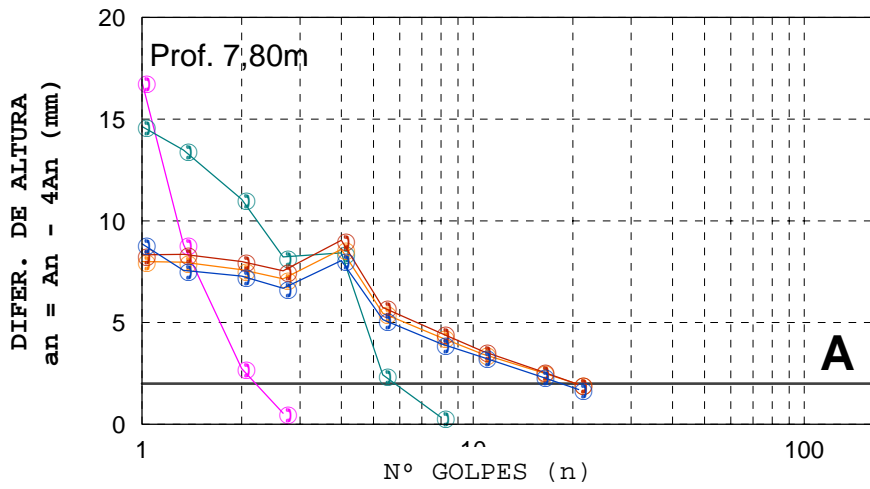


Figura IV.9 - Resultados de ensaios da Classificação MCT:  
a) Curvas de deformabilidade; b) Pi vs Mini-MCV e W(%) vs Mini-MCV; e c) Curvas de compactação.

Os valores de  $c'$  obtidos (Tabela IV.7) estiveram de acordo com a granulometria das amostras analisadas. Todas apresentaram  $c'$  superior a 1,50; isto é indicador de típicos solos argilosos.

As formas das curvas de compactação (Figuras IV.7c, IV.8c e IV.9c) referentes à energia Proctor Normal (aproximadamente 12 golpes do soquete tipo leve) nem sempre apresentaram um trecho retilíneo bem definido no ramo seco, o que tornou difícil à determinação do coeficiente  $d'$  (correspondente à inclinação do trecho retilíneo do ramo seco da curva de compactação). Para todas as amostras analisadas, os valores de  $d'$  foram característicos de solos de comportamento laterítico ( $d' > 20$ ).

Tabela IV.7 - Resumo dos resultados dos ensaios para Classificação MCT.

Prof. (m)	Coeficientes / Índices da MCT				$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Classificação	
	$c'$	Pi (%)	$d'$	$e'$		MCT	MCT-M
0,30 (FB)	1,54	170,79	62	1,266	2180,83	NG'	TG'
1,30 (FB)	1,58	247,19	74	1,399	2131,32	NG'	TG'
7,80 (SR)	1,60	191,01	38	1,346	2398,08	NG'	TG'

#### IV.2.2.5.2. Ensaio de Perda por Imersão

Resultados de ensaios de perda de massa por imersão estão apresentados nas Figuras IV.7b , IV.8b e IV.9b. As curvas apresentaram diferenças entre os solos analisados, mas apresentavam uma tendência a diminuir os valores de Pi com o aumento do Mini-MCV. Os valores de Pi variavam 152,99 a 201,17 para amostras na profundidade 0,30m - Formação

Barreiras; de 128,68 a 253,64 para amostras na profundidade 1,30m - Formação Barreiras; e de 65,38 a 196,91 para amostras na profundidade 7,80m - Solo Residual. Para fins classificatórios (Tabela IV.6), os valores médios obtidos através de interpolação gráfica na curva que relaciona  $P_i$  vs  $Mini-MCV$ .

Os valores dos índices  $e'$  encontra-se na Tabela IV.7. Este parâmetro é determinado por meio da Equação IV.2 (item IV.2.1.1), e não está relacionado com parâmetros geotécnicos, tendo apenas a função de índice classificatório (determina os solos de comportamento laterítico e não laterítico).

#### IV.2.2.6. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Um resumo das informações básico relacionado às classificações dos solos a serem discutidas encontra-se na Tabela IV.5. Na Figura IV.10 estão apresentadas as localizações das frações finas das amostras analisadas nas Cartas de Plasticidade (Figura IV.10a) e atividade (Figura IV.10B).

Na Figura IV.10 observa-se que, na Carta de Plasticidade, as amostras de solo apresentam na totalidade acima da linha A, com  $IP > 7$  e apenas um caso  $4 < IP < 7$ . Na Tabela IV.7 encontra-se em resumo os parâmetros utilizados para classificar os solos.

Tabela IV.8 - Resumo dos parâmetros básicos para classificação dos solos.

Prof. (m)	% passando na peneira (mm)		Limites de Atterberg			$C_u$	$C_{cv}$	Ativ. $I_a$	$e'$	$c'$
	#0,075	#0,42	LL	LP	IP					
0,30 (FB)	50,44	79,02	32,80	19,04	13,76	138,46	0,007	0,372	1,266	1,54
1,30 (FB)	32,60	69,23	23,52	19,16	4,35	222,08	11,21	0,218	1,399	1,58
7,80 (SR)	38,68	67,39	53,19	29,38	23,80	155,56	9,72	2,38	1,346	1,60



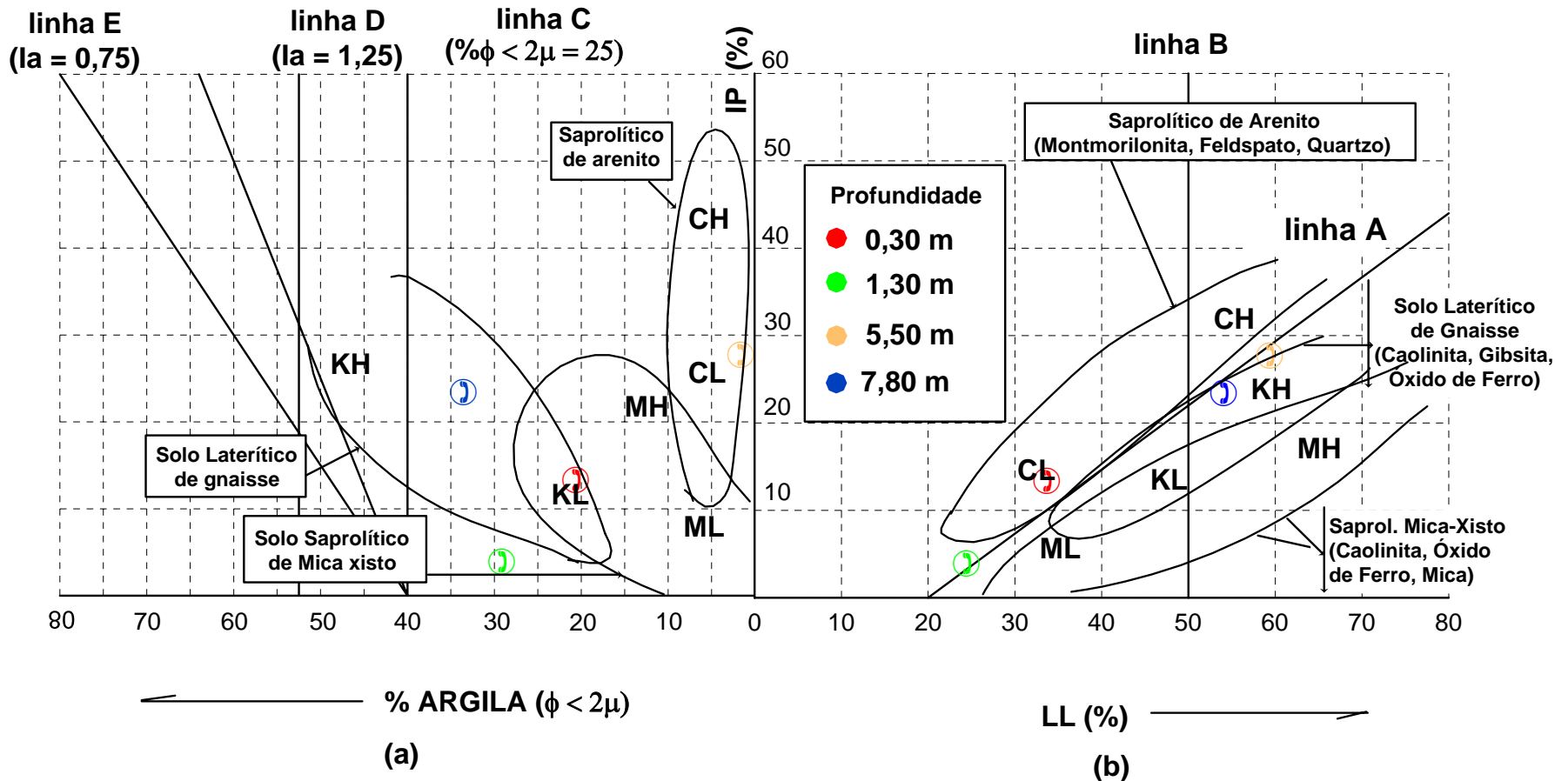


Figura IV.10 - Localização das amostras na Carta de Atividade (a) e na Carta de Plasticidade (b) - Modificação de VARGAS, 1988 E 1992.

#### IV.2.2.6.1. Classificação Unificada (USCS)

Segundo este sistema, os solos foram classificados como solos de granulometria fina (percentual passando na peneira 0,075mm inferior a 50%) e grossa. Os solos analisados na camada da Formação Barreiras à profundidade 0,30m foram classificados como CL (argila de baixa plasticidade); na camada da Formação Barreiras à profundidade 1,30m foram classificados como SM (areia siltosa); e por fim na camada de Solo Residual na profundidade 5,50m foi classificado como CH (argila de alta plasticidade) e na profundidade 7,80m foiclassificado como SC (areia argilosa). Este resultado vem a ressaltar as críticas relativas à discrepância entre a identificação de laboratório e a expedita de campo.

#### IV.2.2.6.2. Proposta de VARGAS (1988 e 1992)

Pela proposta de VARGAS (1988 e 1992), as amostras analisadas apresentaram como classaficação dos solos na profundidade 0,30m como CL (Areia argilosa); na profundidade 1,30m como KL (Argila siltosa caulínítica); na profundidade 5,50m como CH (Argila de alta plasticidade); e na profundidade de 7,80m como MHm (Areia siltosa micácea).

#### IV.2.2.6.3. Classificação MCT

Na Tabela IV.4 está apresentado os resultados das amostras analisadas no gráfico da classificação MCT. Segundo este sistema de classificação, todas as amostras foram classificadas no grupo NG`. Isto significa que os solos estudados não apresentam comportamento laterítico quando compactado. Não significa que o solo não possuir

propriedades índices de laterização, o qual pode ser observando em campo.

Utilizando a modificação da classificação MCT-M proposta por VERTAMATTI & ARAÚJO (1990) e VERTAMATTI et. al. (1990), observou-se que as amostra apresentaram todas como TG`, isto significa que são denominados solos transicionais entre lateríticos e não lateríticos, e também apresentaram grau dois de erosão, ou seja, talude medianamente erodido com sulcos freqüentes.

#### **IV.3. COMPRESSIBILIDADE**

Foram apenas realizados ensaios edométricos duplos utilizados, principalmente, para identificar nas camadas escolhidas potencial de colapsibilidade.

Pois o colapso é um fenômeno de diminuição de volume (deformação elastoplástica) que ocorre em solos não saturados quando submetidos à diminuição de sucção. O arranjo estrutural é um dos aspectos mais importantes dos solos, ocorrendo colapso nos casos de estruturas formadas por partículas elementares de argila organizadas em pacotes (solo granular). E a ocorrência de colapso no solo facilita a este apresentar processo erosivo, isto é devido ao solo torna-se mais frágil e permitindo a sua desagregação e remoção das partículas.

##### **IV.3.1. Procedimentos Dos Ensaios**

Na realização deste ensaio foram utilizadas prensas de adensamento fabricadas pela Ronald Top S.A., do tipo convencional com sistema de cargas através de pesos em pendural, com relação de braço 1:10 e células edométricas do tipo anel fixo. As leituras das deformações foram

realizadas através de extensômetros fabricados pela Mitutoyo e com sensibilidade de 0,01mm.

Sendo moldados dois corpos de prova um na umidade natural e outro inundado. No início do ensaio a pressão é de 0,05 kgf/cm<sup>2</sup>, sendo no ensaio inundado adicionado água na tensão vertical posterior ao peso das terras, e após continuava as leituras e a aplicações de cargas verticais com leituras em intervalos de tempos já convencionados (quando a deformação for inferior a 5% da leitura anterior).

O incremento de carga convencional era: 0,05; 0,10; 0,20; 0,40; 0,80; 1,60; 3,20; 6,40; 12,80 kgf/cm<sup>2</sup> no carregamento e 6,40; 1,60 e 0,40 kgf/cm<sup>2</sup> no descarregamento. E para os intervalos de tempo para cada leitura de deformação são: 6, 15, 30, 60s, 2, 4, 8, 15, 30, 60 min, 2, 4, 8, 24 horas. E o tempo de duração de carga em cada estágio era até ocorrer entre as últimas leituras 5% de deformação.

Os procedimentos dos ensaios seguiram o encontrado no HEAD (Vol.2).

#### IV.3.1.1. ESTIMATIVA DE COLAPSIBILIDADE

SILVA FILHO et. al. (1998), identificam diversas propostas para determinar o colapso através de ensaios de caracterização e índices físicos. Algumas dessas propostas são listadas na Tabela IV.6, onde são apresentados valores dos índices utilizados para a classificação do solo quanto ao colapso. Na última coluna estão indicados os limites, e grifada a avaliação do solo.

Os parâmetros necessários para aplicação e uso da Tabela IV.9 são:

$e_0$ , índice de vazios natural;

$\sigma_{vi}$ , tensão de inundação no ensaio edométrico;  
 $(S-C)$ , diferença entre os teores de areia e argila;  
 $S_r$ , grau de saturação;  
 $\gamma_d$ , peso específico seco;  
 $w, w_0$ , umidade natural;  
 $w_p$ , limite de plasticidade;  
 $w_L$ , limite de liquidez;  
 teor de finos ( $< 0,002\text{mm}$ ).  
 Sendo obtido ou conhecido:  
**K** coeficiente de subsidência;  
**K1** coeficiente de colapsividade;  
**CP** potencial de colapso;  
**cu** coeficiente de uniformidade.

FUTAI (2000), propõe uma metodologia para estudar a colapsibilidade pelo uso do ensaio duplo, que também foi proposto por Jennings e Knight (1957) e Reginatto e Ferrero (1973). A avaliação e previsão da potencialidade da quebra da estabilidade da estrutura do solo são realizadas por dois ensaios edométricos. São tomados dois corpos de prova nas mesmas condições iniciais. Um deles é previamente inundado e realizado estágios de carregamento normalmente. O outro é ensaiado na condição natural, com umidade constante. Neste método a tensão é tomada como referência. O coeficiente de colapsibilidade definido por Reginatto e Ferrero (1973) é:

$$C = \frac{\sigma_{vps} - \sigma_{v0}}{\sigma_{vpn} - \sigma_{v0}} \quad \text{Equação (IV.3)}$$

Onde:

$\sigma_{vpn}$ , é a tensão de pré-adensamento virtual do solo na umidade natural;

$\sigma_{vps}$ , é a tensão de pré-adensamento virtual do solo inundado;

$\sigma_{v0}$ , é a tensão vertical devido ao peso próprio do solo em campo.

O maior valor da tensão de pré-adensamento no corpo de prova em condição natural se deve ao efeito de sucção, promovendo um aumento do enrijecimento do solo. Através do coeficiente de colapsibilidade  $C$ , da tensão de pré-adensamento e estado de tensão de campo, o solo pode ser classificado em:

1. solo verdadeiramente colapsível -  $\sigma_{vps} < \sigma_{v0}$  e  $C < 0$ ,  
o solo sofre colapso sem carregamento externo;

2. solo condicionado ao colapso -  $\sigma_{vps} > \sigma_{v0}$  e  $0 < C < 1$ .

A ocorrência de colapso depende do nível de tensão induzido pelo carregamento externo, este é subdividido em:

2.1. não ocorre colapso com a inundação do solo  $\sigma_v < \sigma_{vps}$ ;

2.2. ocorre colapso quando o solo for inundado após carregamento  $\sigma_{vps} < \sigma_v < \sigma_{vpn}$ ;

3. pode ocorrer colapso mesmo sem inundação  $\sigma_v > \sigma_{vpn}$ .

há indefinição quanto a ocorrência do colapso,  
 $\sigma_{vpn} = \sigma_{vps}$  e  $C=1$ .

FUTAI (2000), após analisar dados de ensaios edométricos simples de diferentes tipos de solos e localidades, observou que:

Tabela IV.9 - Identificação de colapso (SILVA FILHO et. al., 1998)

Referência	Expressão	Limites
Feda (1996)	$K = \frac{(w_0/S_r) - w_p}{W_L - w_p} = 2,1 \quad (1)$	0,5 < k < 0,75 - altamente colapsível k=1 - não colapsível 1,5 < k < 2 não colapsível
Código de obras da URSS (1962), citado por Reginato (1970)	$\lambda = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} = 0,21 \quad (2)$	$\lambda > 0,1$ o solo é colapsível
Priklonskiy (1952), citado por Feda (1996)	$K_d = \frac{W_L - w_0}{W_L - w_p} = 0,69 \quad (3)$	Kd < 0 - altamente colapsível Kd > 0,5 - colapsível Kd > 1,0 - expansivo
Gibbs e Bara (1962)	$R = \frac{w_{sat}}{W_L} = 1,46 \quad (4)$	R > 1 - colapsível
Kassif e Henkin (1975)	$K = g_d \cdot w = 3,14 \quad (5)$	K < 15 colapsível
Jennings e Knight (1975)	Cascalho fino..... Areia fina..... Silte argiloso.....	Sr < 6 colapsível Sr > 10 não colapsível  Sr < 50 colapsível Sr > 60 não colapsível  Sr < 90 colapsível Sr > 95 não colapsível
Código de obras da URSS (1977) citado por Resnik (1989)	$Cl = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} = 0,2$ Sr < 80 (6)	Ocorrem colapso para: 1% ≤ w <sub>p</sub> ≤ 10%, Cl < 0,1 10% ≤ w <sub>p</sub> ≤ 14%, Cl < 0,17 14% ≤ w <sub>p</sub> ≤ 22%, Cl < 0,24
Basma e Tuncer (1992)	CP = 48,496 + 0,102.cu - 0,457.w <sub>0</sub> - (-3,533).γ <sub>d</sub> + 2,80.lnσ <sub>w</sub> (7) Ou CP = 48,506 + 0,072.(S-C) - 0,439.w <sub>0</sub> - (-3,123).γ <sub>d</sub> + 2,85.lnσ <sub>w</sub> = 1,57 + 2,85 ln(σ <sub>vi</sub> ) (8)	O resultado corresponde o potencial de colapso.
Handy (1973), citado por Lutenegeger e Saber (1988)	Teor de finos (< 0,002mm) < 16%..... 16 a 24%..... 24 a 32%..... > 32%.....	Alta probabilidade de colapso Provavelmente colapsível Probabilidade de colapso < 50% Geralmente não colapsível

1. os colapsos máximos em areias são maiores que em argilas, com o mesmo índice de vazios inicial;
2. quando maior a plasticidade menor é o colapso máximo;
3. quanto maior índice de vazios, maior será o colapso máximo;
4. quanto maior a sucção (menor o grau de saturação), maior será o colapso máximo para um mesmo solo.

#### **IV.3.2. Apresentação e Análise dos Resultados**

Este ensaio destinado para obtenção de parâmetros realizando esse na forma padrão e utilizaram-se anéis com áreas de 8.000 mm<sup>2</sup>. Quanto as tensões aplicadas foram realizada de forma que o estágio posterior fosse sempre o dobro do anterior, numa razão  $\Delta\sigma/\sigma = 1$ . Em todos os ensaios, o valor de tensão inicial correspondente 5 kPa e o final a 1.280 kPa.

Foi utilizada amostra indeformada, cravada em anel cravador no sentido vertical partindo do topo do bloco. E do material remanescente do acabamento eram coletadas três cápsulas de solo para determinação do teor de umidade.

Os resultados dos ensaios edométricos são normalmente representados através da curva de compressão confinada, que relaciona índice de vazios ( $e$ ) ou deformação volumétrica específica  $\varepsilon(\%)$  em escala linear e tensão de consolidação em escala logarítmica. Esta forma de representação pode conduzir a valores de tensões de cedência questionáveis, os quais foram obtidos pelo método gráfico de Pacheco Silva, que se utiliza às curvas  $e$  vs.  $\log\sigma_v$  (Figura IV.11 e Figura IV.12).

As tensões de cedência obtidas segundo o método de Pacheco Silva, apresentaram valores com diferenças máximas em torno de 15 a 43%. Na Tabela IV.10 estão apresentados os



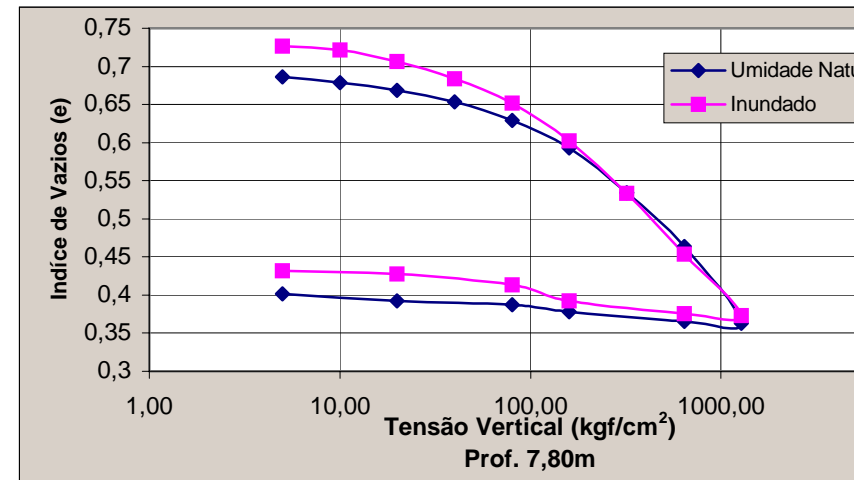
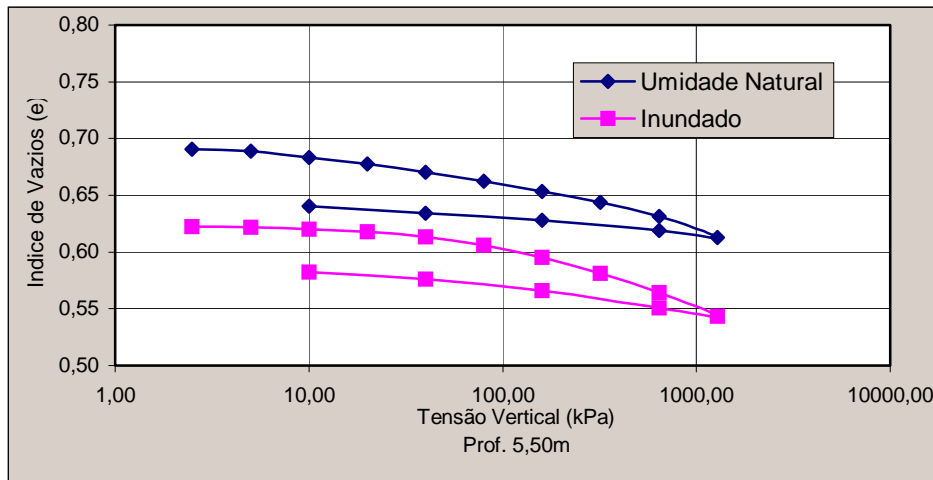
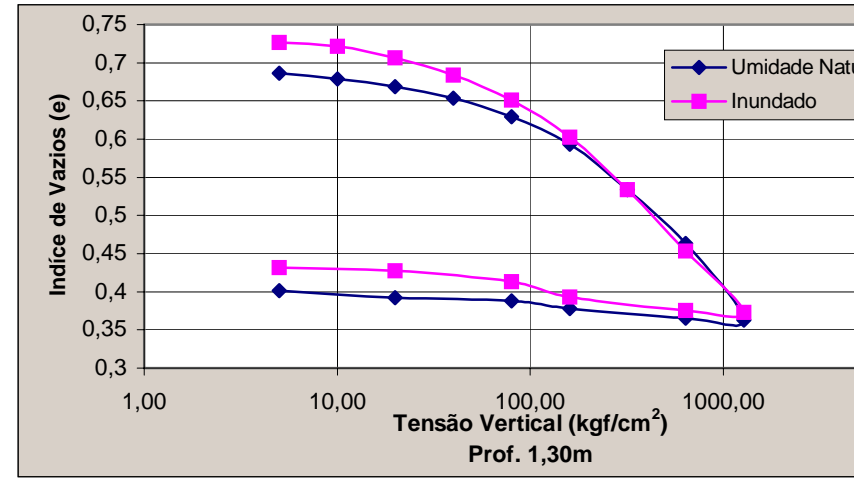
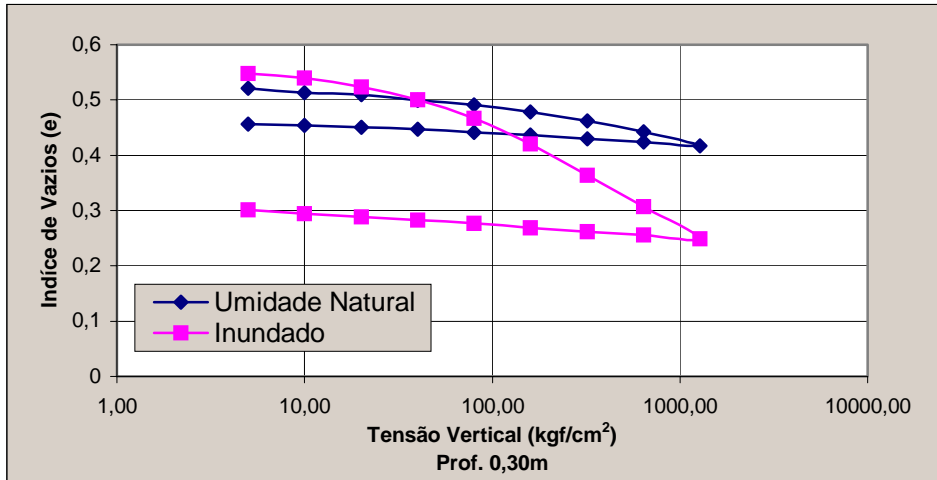


Figura IV.11 - Curvas índice de vazios (e) vs. tensão vertical ( $\sigma_v$ ).

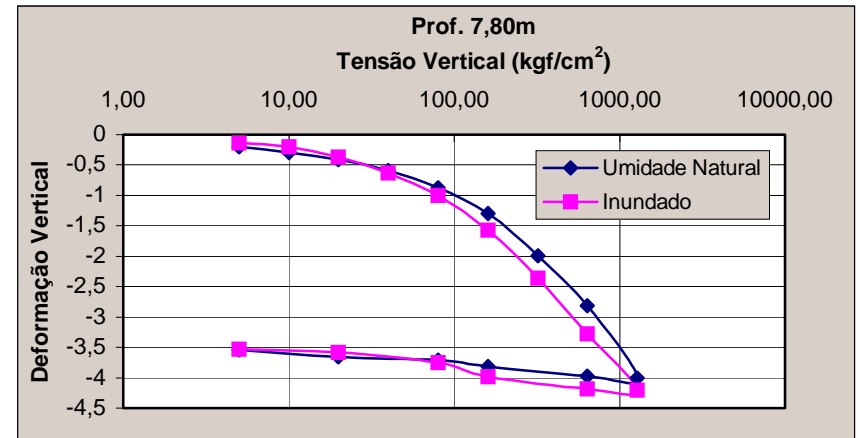
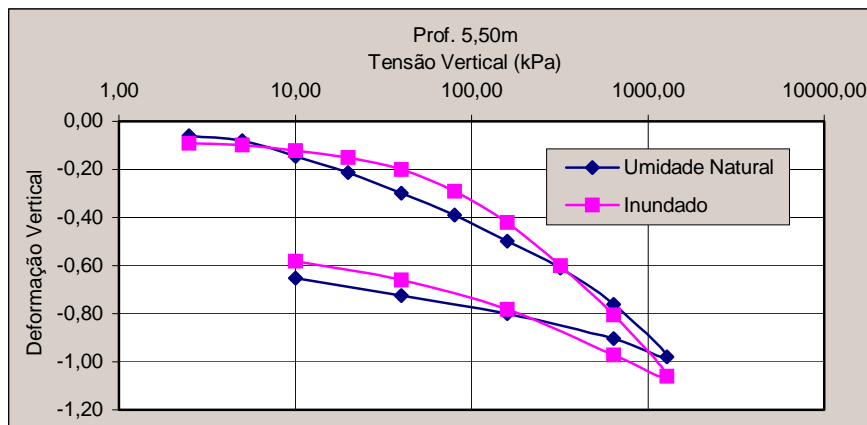
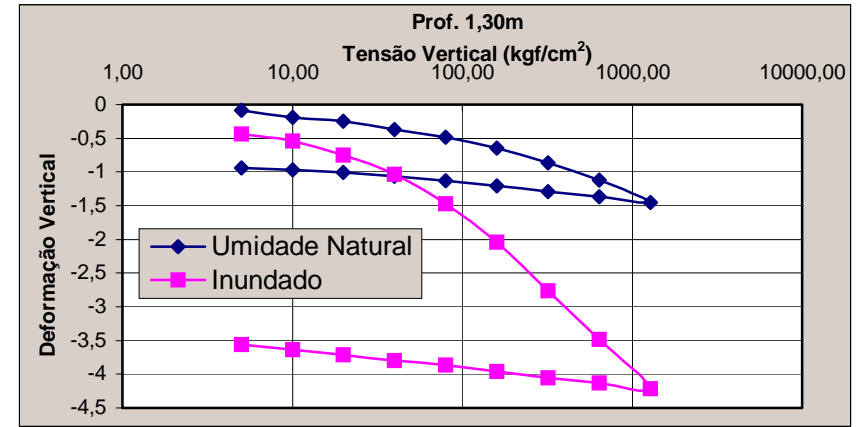
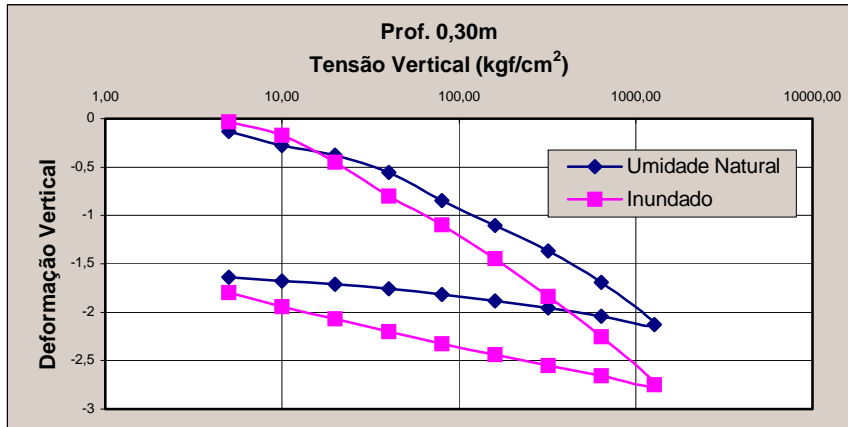


Figura V.12 - Curvas Deformações Volumétricas Específicas vs. Tensões Verticais.

valores de tensões de cedência obtidas a partir das curvas  $e$  vs.  $\log \sigma_v$  dos ensaios em amostras indeformadas (Figura IV.11 e IV.12).

O RPA para o estudo de solos residuais significa dizer que, quando maior o RPA, maior será a resistência das ligações e mais estruturada o solo. Por outro lado, para valores de RPA = 1, as ligações estruturais poderão estar parcialmente ou totalmente destruídas. Conseqüentemente, o efeito da estrutura no comportamento do solo será menos significativo.

Tabela IV.10 - Resumo das tensões de cedência.

Prof. (m)	Tensão de Cedência (kPa)		$\sigma_{vo}$ - Tensão Vertical Efetiva (kPa)	RPA - Razão de Préadensamento ( $\sigma_{vo} / \sigma_{ced}$ )		C (coef. de colapsibilidade)
	Método de Pacheco Silva			Umidade Natural	Inundado	
	Umidade Natural	Inundado				
0,30 (FB)	140	82	5,3	26,41	15,47	0,57
1,30 (FB)	73	42	23,4	3,1	1,8	0,38
5,50 (SR)	8,8	72	102,5	11,64	1,42	0,33
7,80 (SR)	20	17	145,4	0,138	0,117	-3

Observa-se que nas amostras de Solo Residual (7,80m de profundidade) o valor de RPA foi inferior a 1 e nas amostras da Formação Barreiras encontram valores superiores a 1 no RPA. Portanto, conclui-se que as amostras da Formação Barreiras demonstram sua razão de pré-adensamento alta. E na amostra de solo residual na profundidade de

7,80m apresenta no RPA valor inferior a 1 qualificando o efeito da estrutura pouco significativa ao comportamento do solo. E na amostra de solo residual na profundidade 5,50m apresenta um quando inundado um comportamento diferente quando na umidade natural.

#### IV.3.2.1. ESTIMATIVA DE COLAPSIBILIDADE

Na Tabela IV.11 encontram-se os parâmetros necessários dos solos analisados para o estudo da estimativa da colapsibilidade usando critérios de identificação de colapso resumidos em FUTAI & ALMEIDA (1998). Ressalta que para obtenção do parâmetros  $\sigma_w$ , foi obtidos graficamente pelos resultados dos edométricos duplos - fugindo do proposto pela literatura.

Tabela IV.11 - Parâmetros utilizados para estimativa de colapso.

Prof. (m)	$w_0^1$	$S_r^2$	$w_L^3$	$w_P^4$	$w_{sat}^5$	$\gamma_d^6$	$e_0^7$	$C_u^8$	$<0,002mm^9$
0,30(FB)	9,68	11,77	32,8	19,04	31,12	1,54	0,74	138,46	37%
1,30(FB)	7,23	22,81	23,52	19,16	16,11	1,75	0,52	222,08	20%
5,50(SR)	13,1	49,55	58,50	30,37	17,84	1,55	0,69	0,11	75%
7,80(SR)	7,32	48,82	53,19	29,38	15,88	1,78	0,48	155,56	10%

1- Umidade natural; 2- Grau de saturação; 3- Umidade de liquidez; 4- Umidade de plasticidade; 5- Umidade de saturação; 6- Peso específico seco; 7- Índice de vazios natural; 8- Coeficiente de uniformidade; 9- Fração de finos pelo Sistema Internacional.

Na utilização dos parâmetros para identificação do colapso baseado nos índices físicos e limites de Atterberg. Observa-se discrepância nos resultados encontrados, devido à utilização de índices que não podem identificar estruturas dos solos com potencial de colapso. O arranjo estrutural é um dos aspectos mais importantes na colapsibilidade dos solos, podendo ocorrer colapso em argilas porosas (ver Tabela IV.12).

O coeficiente de colapsibilidade (Reginatto e Ferrero, 1973 - C) calculado nas amostras analisadas apresentou

resultados que podem ser observados na Tabela IV.10. Os solos da camada da Formação Barreiras apresentam comportamento não colapsível quando inundado, também encontrado este comportamento no Solo Residual na profundidade de 5,50m. O Solo Residual (7,80m de profundidade) apresenta comportamento verdadeiramente colapsível.

Tabela IV.12 - Utilizando critérios resumidos em FUTAI (1998).

Expressão	Resultado	Análise
$K = \frac{(w_0/S_r) - w_p}{w_L - w_p} = 2,1 \quad (1)$	0,30m -1,324	Todos abaixo do limite.
	1,30m -4,322	
	5,50m -1,100	
	7,80m -1,228	
$K_d = \frac{w_L - w_0}{w_L - w_p} = 0,69 \quad (3)$	0,30m 1,680	Todos solos são expansivos.
	1,30m 3,736	
	5,50m 1,614	
	7,80m 1,927	
$R = \frac{w_{sat}}{w_L} = 1,46 \quad (4)$	0,30m 0,949	Todos solos não são colapsíveis.
	1,30m 0,685	
	5,50m 0,305	
	7,80m 0,299	
$K = \gamma_d \cdot w = 3,14 \quad (5)$	0,30m 14,91	Todos não são colapsíveis.
	1,30m 12,65	
	5,50m 20,32	
	7,80m 13,03	
Areia fina.....	0,30m Sr = 11,77	Todos são colapsíveis.
	1,30m Sr = 22,81	
	5,50m Sr = 49,55	
	7,80m Sr = 48,82	
$CP = 48,496 + 0,102 \cdot cu - 0,457 \cdot w_0 - (-3,533) \cdot \gamma_d + 2,80 \cdot \ln \sigma_{wi} \quad (7)$	0,30m 75,88	São os potenciais de colapso.
	1,30m 91,52	
	5,50m 60,26	
	7,80m 78,80	
Teor de finos(<0,002mm)	0,30m 37%	Geralmente não colapsível.
	1,30m 20%	Provavelmente colapsível.
	5,50m 75%	Alta probabilidade de colapso.
	7,80m 10%	Alta probabilidade de colapso.

#### IV.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Nos ensaios de cisalhamento direto convencional utilizados, principalmente, para obtenção da redução de

coesão. Pois em solos argilosos é a coesão encontrada na estrutura do solo que impede a ocorrência da erodibilidade.

A estabilidade dos agregados é uma propriedade que avalia a resistência dos agregados frente às tensões provocadas pelo umedecimento. A mensuração da estabilidade é complexa, por ser função não só das propriedades do solo - como a geometria dos poros, os agentes ligantes e o tipo de fluído intersticial (YODER, 1936; MARSHALL et. al., 1996) - como também do método de umedecimento. De fato, quando o solo é seco ao ar, ocorre contração e formação de descontinuidades nas zonas de menor resistência ao cisalhamento (YODER, 1936). Quando a saturação é lenta, por capilaridade, a desintegração é menor, mas quando rápida, a água penetra inicialmente pelas descontinuidades maiores comprimindo o ar nos pequenos capilares, gerando pressões de até 10 kPa (MARSHALL et. al., 1996), suficientes para desagregar o solo numa série de pequenos agregados, teoricamente estáveis a estas forças, os chamados agregados estáveis em água (YODER, 1936). É possível separar os agregados dos solos em microagregados (< 0,25 mm), mais densos e mais estáveis à saturação, dos macroagregados (> 0,25 mm), que tendem a ser mais porosos e instáveis (BRYAN, 2000).

Numa análise mecânica simplificada do problema de erosão por fluxo superficial em talude ou encosta, como aquela apresentada por NASCIMENTO & CASTRO (1976), conclui-se que a oposição ao movimento dos grãos pela ação de um fluxo na superfície é dada pela resistência ao cisalhamento entre a camada de grãos superficial e a camada subjacente. Essa resistência ( $\tau$ ) é regida pela lei de Mohr-Coulomb, função dos parâmetros coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ):

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tang}\phi$$

Equação (IV.4)

Para valores pequenos de tensão normal ( $\sigma$ ), encontrados na superfície do talude ou do solo da encosta sujeitas à erosão, o parâmetro coesão assume maior importância, assim como todos os fatores que o governam.

Em BENDER (1985), a erosão é decididamente encarada como um problema de resistência ao cisalhamento, dada em função da coesão do solo na superfície, alterada durante infiltração da água da chuva. O autor enfatiza que a coesão é o parâmetro mais adequado para avaliar a estabilidade à erosão de solos saprolíticos. Esta coesão depende do estado de tensões e do teor de umidade no início da erosão. A grande vantagem na definição da resistência à erosão baseada na resistência ao cisalhamento é atribuída ao fato de que é correta do ponto de vista físico e mecânico e são baseados em ensaios de Mecânica dos Solos, consolidados na engenharia geotécnica (BENDER, 1984).

Estudando as propriedades dos solos relacionadas a erodibilidade, NOGAMI & VILLIBOR (1995) também analisam de forma isolada a coesão. Os autores colocam que solos altamente coesivos, independente do teor de umidade, não são erodíveis, enquanto aqueles pouco ou não coesivos são altamente erodíveis, tanto sob a ação da gota da chuva como pelo fluxo superficial. Entretanto, destacam como grande dificuldade na avaliação da coesão superficial dos solos sua variabilidade espacial, temporal e climática, principalmente para solos residuais não saturados. Outra dificuldade decorre da possibilidade do desenvolvimento de trincas e fissuras em solos argilosos por perda de umidade, cuja simulação experimental é muito difícil. O surgimento de trincas pode provocar o "empastilhamento" do solo, fazendo com que o material coesivo assumira comportamento granular. Devido a estes entraves, segundo o ponto de vista dos autores, raramente a isolada determinação da coesão

pelo uso de métodos "sofisticados" da Mecânica dos Solos é suficiente na avaliação da erodibilidade.

Segundo CONCIANI (1998), a cimentação presente nos solos lateríticos determina a maior resistência à erosão destes solos na maioria dos casos. Por outro lado, sendo o solo não saturado, a resistência ao cisalhamento é acrescida da parcela de sucção matricial. Logo, solos menos cimentados têm na sucção a principal responsável pela variação de resistência.

Segundo BASTOS et. al. (1999), baseado no princípio de Mohr-Coulomb, de onde se conclui que a coesão é responsável pela resistência ao deslocamento relativo de partículas quando a tensão normal tende a zero, julga-se possível analisar por este parâmetro de resistência a fragilidade do solo a superfície quando do umedecimento por um evento de chuva. A redução na coesão destes solos com o aumento de umidade ou, no caso extremo, com a inundação é destacada. Esta redução de coesão ( $\Delta c$ ) pode ser representada por uma relação do tipo:

$$\Delta c = [(c_{wnat} - c_{inund}) / c_{wnat}] \times 100\% \quad \text{Equação (IV.5)}$$

Onde:  $c_{inund}$  é a coesão em ensaios inundados e  $c_{wnat}$  é a coesão em ensaios na faixa de umidade de campo.

BASTOS (1999), consolida-se a opinião de que a erodibilidade e a resistência ao cisalhamento, em particular para solos tropicais, estão intimamente relacionadas. Muitas vezes esta relação não é expressa diretamente, mas os peculiares fatores que governam a resistência ao cisalhamento dos solos de clima tropical e subtropical não saturados (lateríticos e saprolíticos): cimentação, macroestrutura de origem pedológica ou



geológica e sucção, são os mesmos que influenciam decididamente na erodibilidade destes materiais. Cabe destacar que a estrutura e a sucção não só influenciam a erodibilidade específica dos solos tropicais, como também governam a condutividade hidráulica destes solos, e assim os fatores hidrológicos da erosão.

HANSON (1996) destaca que índices de resistência têm sido usados na caracterização da erodibilidade dos solos porque são mais facilmente e rapidamente obtidos que os próprios parâmetros de erodibilidade, podem ser medidos ao longo da profundidade e estão intimamente relacionados à grande maioria dos fatores que afetam a erodibilidade. Segundo o autor, como a resistência à erosão é oferecida pelas forças de ligação entre as partículas do solo e outros materiais na sua matriz, manifestada na sua resistência ao cisalhamento, esta última propriedade pode, em teoria, caracterizar diretamente a erodibilidade dos solos. Entretanto, alerta que evidências experimentais neste sentido são limitadas.

#### **IV.4.1. Procedimentos dos Ensaio**

Foram utilizados prensa de cisalhamento direto convencional, com sistemas de cargas (carregamento vertical) através de peso em pendural. Nas leituras das deformações verticais e deslocamento horizontal utilizou-se extensômetros com sensibilidade de 0,01mm e anel de carga para determinação das forças horizontais aplicadas aos corpos de prova.

Os ensaios foram realizados na umidade natural e também no estado inundado, depois de moldados eram transferidos para caixa de cisalhamento. Onde são aplicadas as tensões verticais antes iniciava o adensamento até 5% de deformação

entre leituras seguidas. As tensões verticais, geralmente, utilizadas foram: 50kPa; 100kPa; 150kPa; 200kPa.

A velocidade de cisalhamento adotada é em função do tempo necessário para que ocorra o adensamento primário ( $t_{100}$ ), definido a partir da curva que relaciona a deformação e o tempo, método gráfico de Taylor. E a velocidade determinada pelo procedimento proposto por HEAD (Vol. 2), utilizando a seguinte expressão:

$$v = \frac{\varepsilon_f L}{100 t_f} \quad \text{mm / min} \quad \text{Equação (IV.6)}$$

$$\text{Onde } t_f = 12,70 \times t_{100} \quad \text{Equação (IV.7)}$$

Sendo:

$\varepsilon_f$  = deformação na ruptura;

L = largura da caixa de cisalhamento;

$t_f$  = tempo final (ruptura).

#### IV.4.2. Apresentação e Análise dos Resultados

A velocidade do ensaio foi obtida através do adensamento primário ( $t_{100}$ ) como mencionando no item anterior, sempre levando em consideração 180 minutos de ensaio como padrão. A Tabela IV.13 mostra as velocidades aplicadas.

Tabela IV.13 - Velocidade de cisalhamento aplicada.

<b>Profundidade(m)</b>	Amostra na umidade natural	Amostra inundada
0,30 (FB)	0,15 mm/min	0,0483 mm/min
1,30 (FB)	0,483 mm/min	0,0483 mm/min
5,50 (SR)	0,48 mm/min	0,24 mm/min
7,80 (SR)	0,0483 mm/min	0,0483 mm/min

Alguns critérios de ruptura foram tomados, devido a certos ensaios a máxima tensão de pico não foi bem

definida, apresentando sempre valores crescentes de  $\tau$  com o deslocamento horizontal. Em função destas variações de comportamento, foi adotado o seguinte critério de ruptura (Figuras IV.13 e IV.14):

- 1) adotou-se sempre os valores máximos das tensões cisalhante, quando estas foram bem definidas;
- 2) quando a tensão cisalhante apresentava-se crescente com o deslocamento, adotou-se a tensão correspondente ao máximo deslocamento horizontal permitido pelo equipamento (geralmente em torno de 14 mm).
- 3) quando a tensão cisalhante a partir da curva tensão vs. deformação apresentava-se inclinação ( $\alpha$ ) constante.

Na realização dos ensaios definiu-se fazê-los em diferentes condições de umidade, tentando avaliar qualitativamente peculiaridades de comportamento. Dentre os comportamentos que podem ser observados ressalta a influência da sucção no solo, pois elevado teor de sucção no solo implica em um aumento na coesão refletido no resultado dos ensaios. E para demonstrar esse comportamento foram realizados ensaios em amostras na umidade natural e em amostras inundadas (ver Figura IV.15).

A umidade natural dos solos ensaiados é: na profundidade de 0,30m (Formação Barreiras) era em torno de 9,678% com grau de saturação 11,77%; na profundidade de 1,30m (Formação Barreiras) a umidade natural era em torno de 7,23% com grau de saturação 22,81%; na amostra 5,50m de profundidade (Solo Residual) a umidade natural 12,66% e o grau de saturação de 45%; e na profundidade de 7,80m (Solo Residual) a umidade natural era em torno de 7,32% com grau de saturação 48,82%.

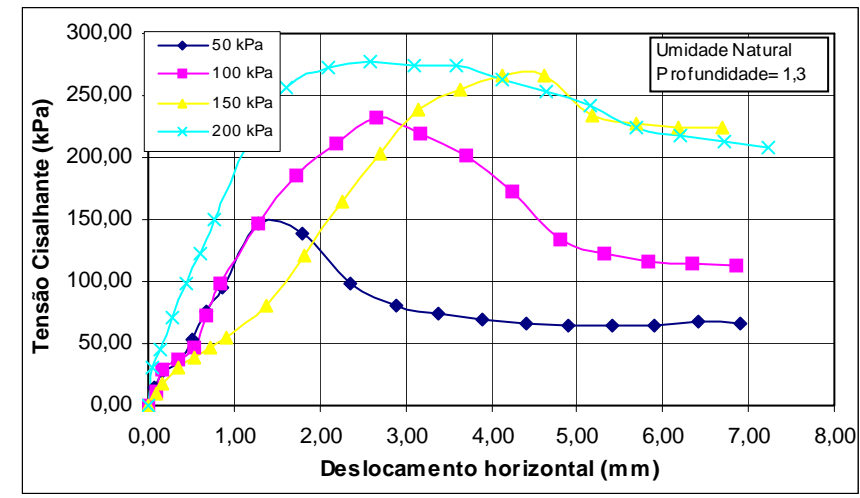
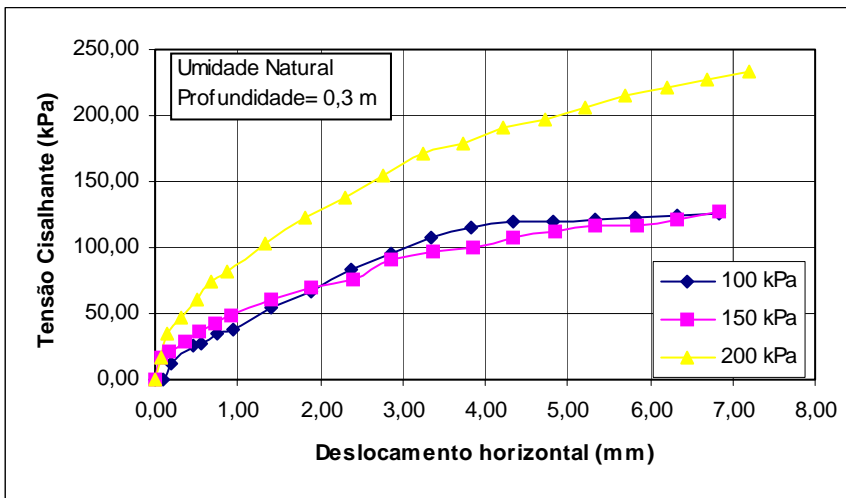
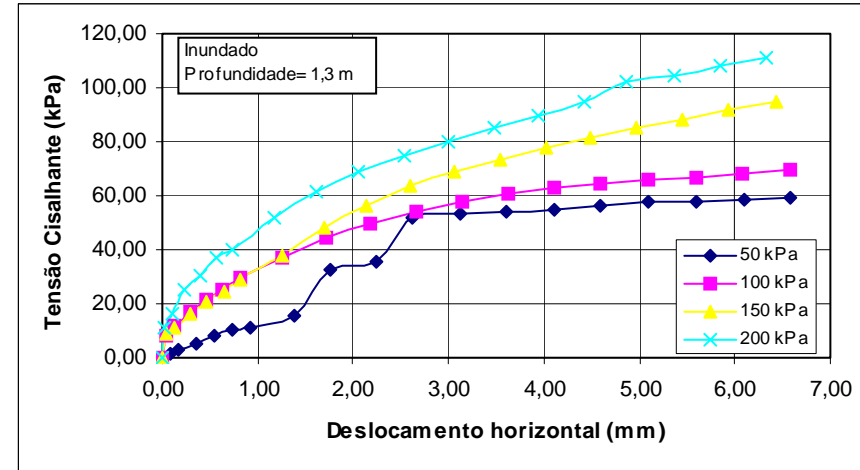
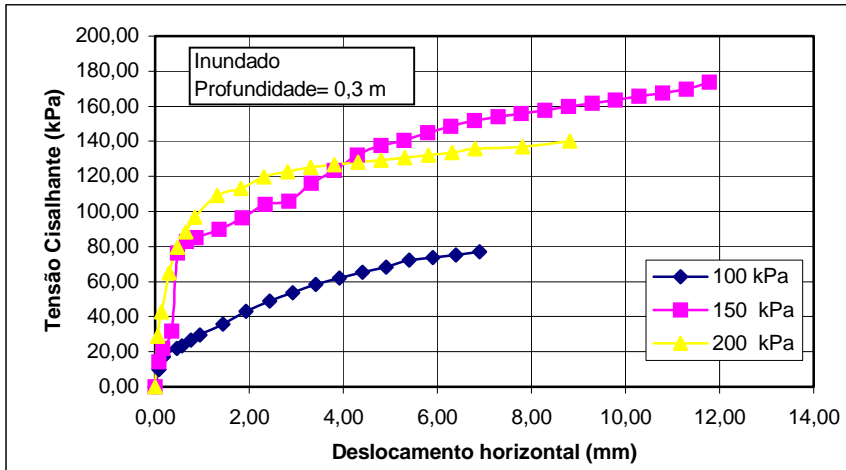


Figura IV.13 - Resultado comparativos de ensaios inundados e na umidade natural - Camada Formação Barreiras.

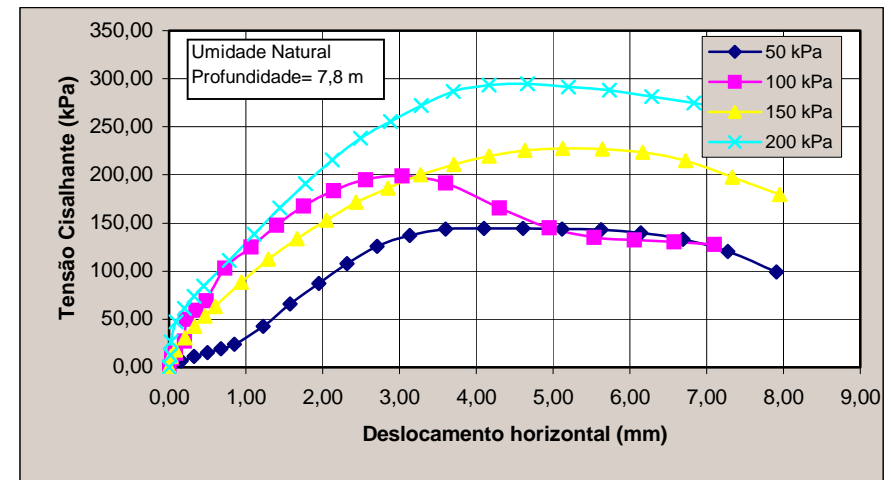
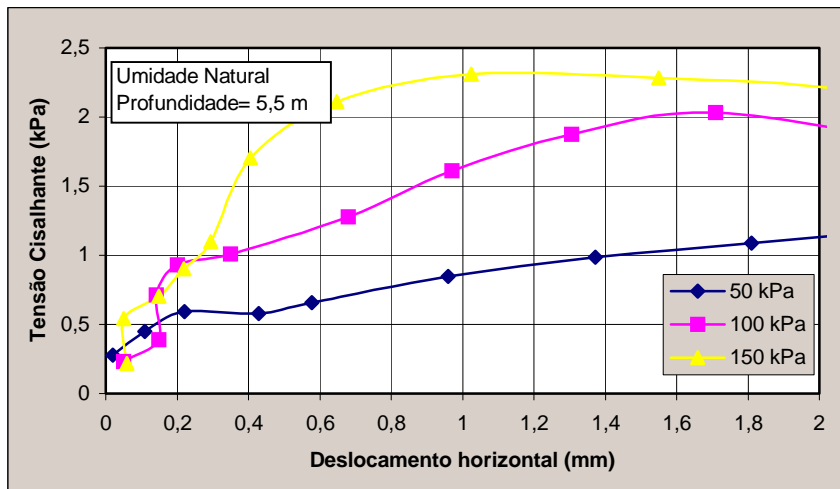
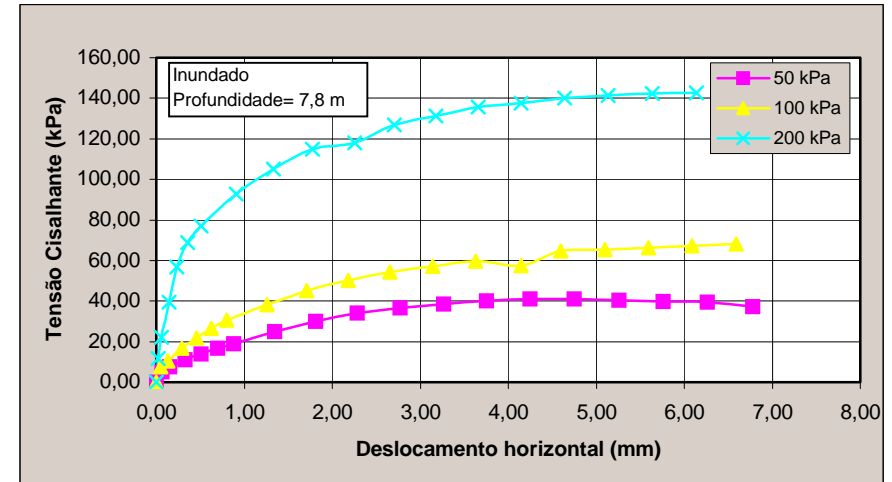
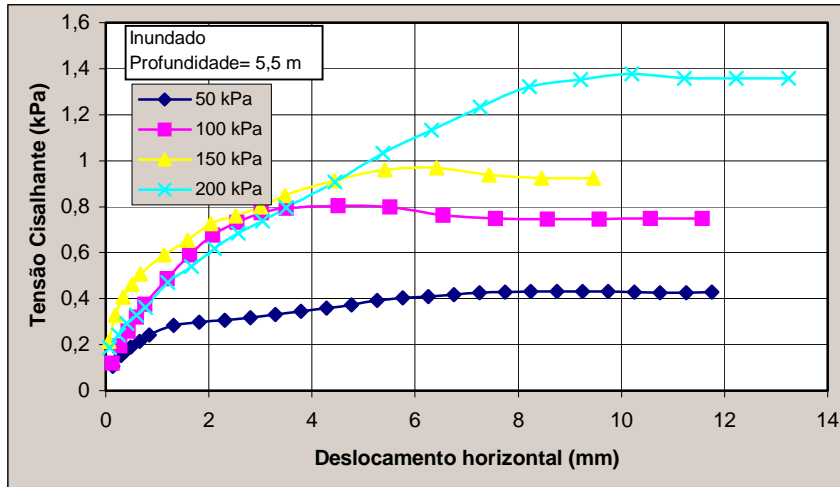


Figura IV.14 - Resultado comparativos de ensaios inundados e na umidade natural - Camada de Solo Residual.

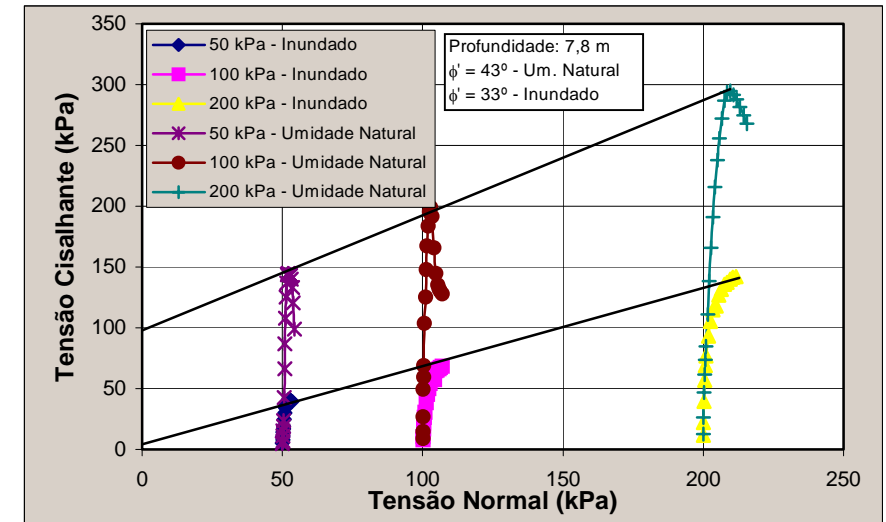
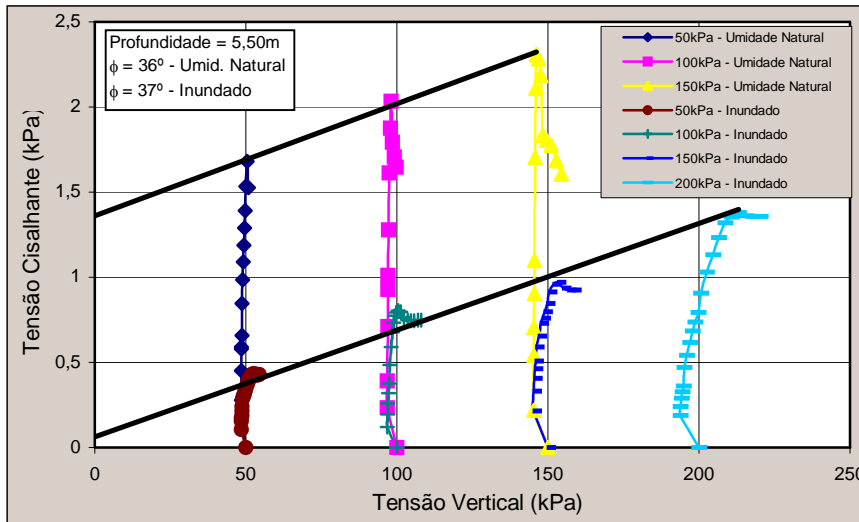
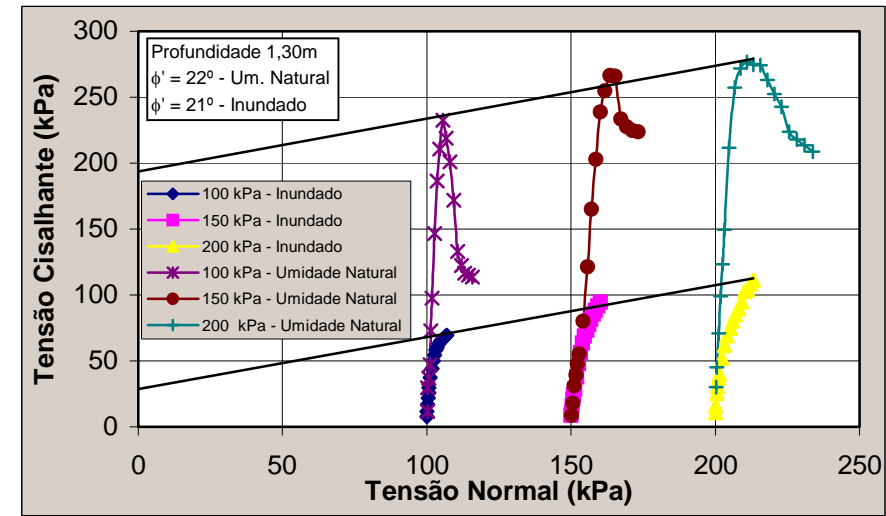
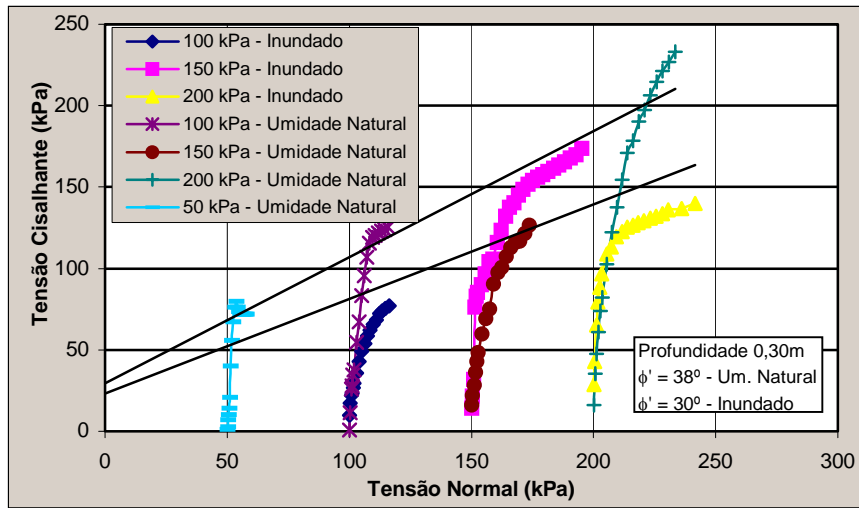


Figura IV.15 - Envoltória de Mohr Coloumb

Segundo BASTOS et. al. (1999) a redução de coesão poderá demonstra a fragilidade do solo. Nas amostras analisadas e segundo a Equação IV.5, os valores obtidos da redução de coesão foram superiores a 85%, isto é, com a inundação a coesão reduz-se a menos de 1/15 do valor na umidade natural.

Tabela IV.14 - Valores da redução de coesão.

<b>Prof. (m)</b>	<b><math>C_{\text{wnat}}^1</math></b>	<b><math>C_{\text{inund}}^2</math></b>	<b><math>\Delta c^3</math></b>
0,30 (FB)	29,655	23,123	22,02
1,30 (FB)	193,72	28,821	85,122
5,50 (SR)	1,6	0,15	90,625
7,80 (SR)	98,11	28,821	85,122

1- Coesão na umidade natural; 2- Coesão inundado e 3 - Redução de coesão.

Ressalta apenas, na profundidade de 0,30m (Formação Barreiras) que a redução de coesão foi de 22%, porém ainda de valor significativo (ver Tabela IV.14). Observa-se no gráfico relativo a esta profundidade, a linha obtida na regressão linear para obtenção da coesão na umidade natural apresentou os pontos desalinhados, com isso indicando que o ensaio foi realizado à baixa tensão de cisalhamento necessitando pontos a alta tensão de cisalhamento a fim de comprovar a linha de regressão.

Segundo SOUZA PINTO (1998), para baixas tensões confinantes, o comportamento é governado pela cimentação; a tensão desviadora atinge um valor máximo, associado à destruição da cimentação, e cai para um nível menor, referente ao atrito entre os grãos. E para tensões confinantes maiores do que a tensão de cedência, a cimentação se destrói já durante o confinamento, e o

comportamento no carregamento axial é de um material puramente granular.

Observa-se que na amostra a 0,30m de profundidade - Formação Barreiras - apresentam tensão de cedência 140 e 82 kPa (Tabela IV.10) demonstrando a possibilidade de ocorrência do fenômeno da cimentação mascarando os picos de tensões na envoltória. Este fenômeno não foi observado nas outras camadas de solo analisadas.

Ressalta que a camada encontrava-se mais superficialmente, e portanto, também poderá ocorrer o fenômeno devido a sucção característicos de solos lateríticos. Este fenômeno, segundo SOUZA PONTO (1998) é o desenvolvimento de pressão neutra após a máxima tensão desviadora, caracterizando uma envoltória em tensões efetivas, para grandes deformações.

#### **IV.5. PERMEABILIDADE**

A permeabilidade obtida nas camadas escolhidas terá o intuito de conhecer as camadas não permeáveis. Onde estas são facilitadoras do processo de erosão, pois permite a lavagem do solo devido a água da chuva encontrar dificuldades em infiltrar, e isto irá depender da profundidade em que se encontra as camadas não permeáveis.

##### **IV.5.1. Procedimentos dos Ensaios**

Foi utilizado o sistema Tri-flex 2 que é um aparelho feito para determinar a permeabilidade. Os procedimentos do ensaio foram retirados no manual do mesmo, segue em resumo:

1. Ligar o painel de controle e esperar 30 min. Para que ocorra estabilização.



2. Encher o canal da bureta. Quando atingir o nível desejado, girar a válvula de controle para a posição "Cell Operation". Repetir esta operação até as três buretas estarem com o nível desejado;
3. Fazer a desaeração do canal da bureta removendo a entrada de ar. O canal estará desareado quando não houver bolhas de ar perceptível. Este processo tem durabilidade de 5 a 10 min.
4. Instalar a amostra na célula de permeabilidade.
5. Encher a célula de ensaio, verificando se no final não existem bolhas de ar na sua superfície.
6. Aplicar a pressão lateral.
7. Remover o ar das pedras porosas e das linhas das tubulações, drenando um pouco de água até todas as bolhas de ar desaparecerem.
8. Com aproximadamente 24h verificar se a mostra está saturada, calculando o parâmetro B. Para tal procedimento utilizar um transdutor com leitura externa de poro-pressão.
9. Iniciar o procedimento do ensaio após a saturação, com aplicação de pressão na amostra, observando-se que a pressão lateral deve ser maior que a da base e esta maior que a pressão de topo.
10. Marcar o tempo das leituras. Quando o tempo estabilizar, calcular o valor da permeabilidade pela seguinte expressão:

$$K = \frac{V(t_1, t_2) L}{P_B A T} \text{ cm / seg} \quad \text{Equação (IV.8)}$$

Onde:

$V(t_1, t_2)$  = volume do fluxo entre  $t_1$  e  $t_2$  em  $\text{cm}^3$ ;

$L$  = altura da amostra em cm;

$P_B$  = gradiente em cm de  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{psi} \times 70,37 \text{ cm/psi}$ );

A = área da amostra em cm<sup>2</sup>;

T = diferença do t<sub>1</sub> para o t<sub>2</sub> em segundos.

#### IV.5.2. Apresentação e Análise dos Resultados

Para obtenção dos valores de condutividade hidráulica do solo foi utilizado o aparelho Tri Flex-2. A saturação do corpo de prova foi obtida com aplicação de contra pressão durante 24 horas no mínimo a fim de obter o parâmetro B = 1, ao final do ensaio era confirmada novamente a saturação. Os parâmetros e os valores obtidos podem ser observados na Tabela V.15, o qual observa-se uma camada menos permeável na profundidade 0,30m (Formação Barreiras) e seguidas por camadas mais permeáveis a medida que se aprofunda (sendo 1,30m de profundidade - amostra da Formação Barreiras, e a de 7,80m de profundidade - amostra do Solo Residual).

Tabela IV.15 - Valores obtidos da Condutividade Hidráulica.

Profundidade (m)	$\sigma_{\text{topo}}$ (kPa) <sup>1</sup>	Gradiente (kPa)	$\sigma_h$ <sup>2</sup>	$K_s$ <sup>3</sup> (cm/s)
0,30	5	2	2	$2,99 \times 10^{-5}$
1,30	20	3	2	$2,90 \times 10^{-4}$
7,80	40	3	2	$2,25 \times 10^{-4}$

1- Tensão no topo da amostra; 2- Tensão horizontal e 3- Permeabilidade saturada.

#### IV.6. RESUMOS - COMENTÁRIOS

Granulometricamente, os solos analisados caracterizam-se por apresentar uma textura fina e grossa. Sendo a camada 0,30m de profundidade (Formação Barreiras) e a camada a 5,50m de profundidade (Solo Residual) apresentaram textura fina. E as camadas a 1,30m de profundidade (Formação

Barreiras) e a 7,80m de profundidade (Solo Residual) apresentam textura grossa. Os solos analisados apresentam percentual de dispersão variando de 42,9 a 3,4; indicando potencial de erodibilidade apenas nas camadas da Formação Barreiras e na camada a 7,80m de profundidade de Solo Residual.

Os valores da densidade real dos grãos (Gs), estiveram compreendidos entre 2,633; 2,664; 2,63 e 2,675. para camadas respectivas de 0,30m (FB); 1,30m (FB); 5,50m (SR) e 7,80m (SR). Estes valores estão associados à grande quantidade de óxido de ferro presentes nestes materiais, como também a quantidade de mica.

Quanto às propriedades plásticas, os solos analisados apresentavam na primeira camada na profundidade de 0,30m - Formação Barreiras, uma média plasticidade (IP = 13,76); na camada intermediária da Formação Barreiras, profundidade de 1,30m, uma baixa plasticidade (IP = 4,35); e nas camadas de Solo Residual apresentaram uma elevada plasticidade (camada a 5,50m de profundidade com IP = 28,12 e a camada a 7,80m de profundidade com IP = 23,80). Nas últimas camadas a plasticidade do solo pode estar associada à elevada quantidade de mica, conduzindo a um aumento fictício no índice de atividade.

Quanto aos ensaios de compactação foram utilizadas duas metodologias: Ensaio Mini-compactação (DNER - ME 228/94) e Compactação Proctor normal (ABNT - 7182/86). Com o objetivo de encontrar uma boa correlação entre as duas metodologias. Deve-se destacar quanto ao desuso do ensaio Mini-compactação quanto houver necessidade de parâmetros mais criteriosos. Apresenta-se na camada da Formação Barreiras a 0,30m de profundidade uma umidade ótima e massa específica aparente seca respectivamente de 13,2% e de 1,8 g/cm<sup>3</sup> com relação ao ensaio Proctor Normal e quanto ao ensaio Mini-compactação apresentou respectivamente 15% e 1,7 g/cm<sup>3</sup>.

Ainda na Formação Barreiras a 1,30m de profundidade a umidade ótima e a massa específica aparente seca foi de 14% e 1,8 g/cm<sup>3</sup> no ensaio Proctor normal e 13,2% e 1,8 g/cm<sup>3</sup> no ensaio Mini-compactação. Na camada de solo Residual a 7,80m de profundidade a umidade ótima e a massa específica aparente seca foram de 9,9% e 1,8 g/cm<sup>3</sup> no ensaio Proctor Normal e de 15,4% e 1,7 g/cm<sup>3</sup> no ensaio Mini-compactação.

Quanto às classificações adotadas, a UCSS foi adotada como padrão. Definiu-se a classificação do solo como CL (areia de baixa plasticidade) na profundidade 0,30m - Formação Barreiras. Ainda na Formação Barreiras na profundidade de 1,30m foi classificada como SM (areia siltosa). E no Solo Residual na profundidade 5,50m foi classificada como CH (argila de alta plasticidade) e na profundidade 7,80m foi classificado como SC (areia argilosa). Na classificação MCT mostrou-se insatisfatória classificando o solo como NG' indicando solo não laterítico. Isto significa que os solos estudados não apresentam comportamento laterítico quando compactado. Não significa que o solo não possuir propriedades índices de laterização, o qual pode ser observado em campo. Já no uso da classificação MCT modificada esta se apresentou satisfatória classificando os solos em TG`, solos transicionais e com grau de erosão dois (talude medianamente erodido com sulcos freqüentes).

Os solos analisados apresentam índice de vazios na faixa de 0,74 a 0,48. Nas curvas de compressão confinada estes materiais não apresentam trechos virgens bem definidos, sugerindo um estado estruturado.

As tensões de cedência ( $\sigma_{ced.}$ ) determinada através do método gráfico de Pacheco Silva, apresentam diferenças máximas em torno de 15 a 43%, entre os ensaios inundados e na umidade natural. Sendo na profundidade 0,30m (Formação Barreiras) variando de 140 a 82kPa, na profundidade 1,30m

(Formação Barreiras) variando de 73 a 42kPa, na profundidade 5,50m (Solo Residual) variando 72 a 8,8 kPa e na profundidade 7,80m (Solo Residual) variando de 20 a 17kPa, respectivamente. Em solos residuais, estudos indicam que quanto maior o RPA, maior será a resistência das ligações e mais estruturado o solo. Observa-se que na camada de solo residual a 5,50m apresentou um valor de RPA de 11,64 a 1,42 e a 7,80m apresentou um valor de RPA de 0,138 a 0,117 indicando um solo pouco estruturado nesta última camada. Portanto, a camada referida anteriormente apresenta potencial de erodibilidade devido apresentar uma camada pouco estruturada com ligações mais fracas, pois são estas que permitem ao desprendimento dos grãos e remoção por lamina d'água. Nas camadas da Formação Barreiras estas apresentam um valor superior a 1 no RPA indicando solos mais estruturados.

Quanto ao estudo da estimativa de colapsibilidade foram utilizadas vários métodos empíricos. Primeiramente fez uso de várias propostas resumidas por SILVA FILHO et. al. (1998), onde se observou muita discrepância nos resultados obtidos, variando de solo expansivo a solo altamente colapsível. Posteriormente utilizou-se do coeficiente de colapsibilidade proposto por Reginatto e Ferrero (1973), indicando nas camadas da Formação Barreiras e de Solo Residual na profundidade de 5,50m apresentaram comportamento não colapsível quando inundado; e no Solo Residual apresentou comportamento verdadeiramente colapsível, na camada a 7,80m de profundidade.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em solos na umidade natural e inundados a fim de obter a redução da coesão. Estes apresentaram na profundidade 0,30m (Formação Barreiras) uma redução de 22,02 e ângulo de atrito variou de 30° a 38°; na profundidade de 1,30m (Formação Barreiras) a redução da coesão foi de 85,122 e o ângulo de atrito variou de 21° a 22°; na profundidade 5,50m

Tabela IV.16 - Resumo dos parâmetros geotécnicos.

Prof. (m)	Desc. Geológica	PD <sup>1</sup>	H <sub>ot.</sub> <sup>2</sup>	W <sub>nat</sub> <sup>3</sup>	S <sup>4</sup>	MEA <sup>5</sup>	LL <sup>6</sup>	LP <sup>7</sup>	IP <sup>8</sup>	C <sup>9</sup>	e <sup>10</sup>	n <sup>11</sup>	C <sub>wnat</sub> <sup>12</sup>	C <sub>inund</sub> <sup>13</sup>	Δc <sup>14</sup>	K <sup>15</sup> (cm/s)
0,30	<b>Formação Barreiras</b>	22,32	13,2	9,67	11,8	1,89	32	19	13	0,57	0,74	100,4	29	23	22	2,9x10 <sup>-5</sup>
1,30	<b>Formação Barreiras</b>	18,60	13,3	7,23	22,8	1,89	23	19	4	0,38	0,52	100,3	193	28	85	2,9x10 <sup>-4</sup>
5,50	<b>Solo Residual</b>	3,43	_	12,7	45,0	_	58	30	28	0,33	0,69	100,4	1,6	0,15	90	_
7,80	<b>Solo Residual</b>	16,74	9,95	7,32	48,8	1,79	53	29	23	-3	0,48	100,3	98	28	85	2,2x10 <sup>-4</sup>

1- Potencial de dispersão; 2- Umidade ótima; 3- Umidade natural; 4- Grau de saturação; 5- Massa específica aparente; 6 - Limite de liquidez; 7- Limite de plasticidade; 8- Índice de plasticidade; 9- Coeficiente de colapsibilidade; 10- Índice de vazios; 11- Porosidade; 12- Coesão na umidade natural; 13- Coesão inundado; 14- Redução de coesão e 15- Permeabilidade saturada.

(Solo Residual) a redução de coesão foi de 90,625 e o ângulo de atrito variou de 36 a 37°; e por fim na profundidade de 7,80m (Solo Residual) a redução da coesão foi de 85,122 e o ângulo de atrito variou de 33° a 43°. Em BASTOS et. al. (1999) os valores obtidos de redução de coesão superiores a 85% são indicadores de potencial de erodibilidade. Portanto apenas a camada da Formação Barreiras a 0,30m de profundidade não apresentou potencial de erodibilidade.

Em ambas camadas, o tipo de estrutura do solo confere uma permeabilidade numa faixa  $10^{-5}$  a  $10^{-4}$  cm/s. Observando uma camada menos permeável a 0,30m de profundidade (Formação Barreiras) e seguidas por camadas (Formação Barreiras e Solo Residual) mais permeáveis à medida que se aprofunda.

Na Tabela IV.16 apresenta um resumo dos parâmetros geotécnicos encontrados nos solos analisados.

## CAPÍTULO V ERODIBILIDADE

### V.1. INTRODUÇÃO

Nesta fase do estudo foram realizados ensaios laboratoriais com amostras indeformadas retiradas do local em estudo, com objetivo de conhecer e definir o potencial erodível do solo.

Segundo BACELLAR (2000), erodibilidade expressa a suscetibilidade à erosão de um material a um determinado agente erosivo. No caso da erosão hídrica, a erodibilidade pode ser visualizada como dependente do balanço de forças opostas, as forças atuantes do agente erosivo e as resistentes do material (coesão e atrito). A erodibilidade depende da composição química e mineralógica do solo, de sua textura e estrutura, (BRYAN, 1976; LAL, 1990):

- GRANULOMETRIA - de acordo com o experimento de HJULSTROM (1935, apud COSTA & BEKER, 1981), grãos grosseiros, como as areias grossas e seixos, são mais resistentes à erosão, pois a energia necessária para transportá-los é alta; siltes e areias finas são teoricamente os mais erodíveis, enquanto que a argila só o seria quando dispersíveis, pois normalmente resistem ao destacamento devido à coesão;
- COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA - a composição química dos fluídos intersticiais e a natureza dos minerais, principalmente na fração argila - onde as forças de atração eletroquímica são mais atuantes -, influenciam na erodibilidade; estes parâmetros são mais importantes nos solos de comportamento



geotécnico dispersível, como os ricos em argila do grupo da esmectita (SHERARD et. al.,1976; MITCHEL, 1976);

- ESTRUTURA - processos pedológicos podem levar à agregação das partículas, com formação de agregados estáveis de maiores dimensões e, conseqüentemente, de agregados se aglomeram por ação de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio; nos saprolitos, a estrutura herdada da rocha pode ser muito importante, quando confere anisotropia mecânica e/ou hidráulica.

## **V.2. ENSAIOS DE ERODIBILIDADE**

Numa terceira etapa dos trabalhos consistem no conhecimento do potencial erodível das camadas escolhidas, partindo de ensaios laboratoriais na tentativa de quantificar empiricamente.

A escolha dos ensaios de erodibilidade fez-se pelos ensaios mais conhecidos para obtenção do potencial, e seriam: ensaios de dispersão rápida e furo de agulha. Como também se utilizam ensaios menos conhecidos como o ensaio de desagregação. Ensaio que tentam simular o processo ocorrido no campo em laboratório - ensaio de Inderbtzen. E ensaios coma a finalidade de utilizar os resultados obtidos em metodologias de obtenção do potencial de erodibilidade - Metodologia MCT - como os ensaios de infiltração e de perda por imersão (usado na classificação MCT). E finalizando com correlação de resultados de ensaios de erodibilidade para obtenção do potencial erodível das camadas de solo escolhidas.

### V.2.1. ENSAIO DE DISPERSÃO RÁPIDA

Consistem num torrão de aproximadamente 3g de solo, que é colocado num recipiente (becker) com água e tem seu comportamento avaliado visualmente com relação à erosão (ver Figura V.1).

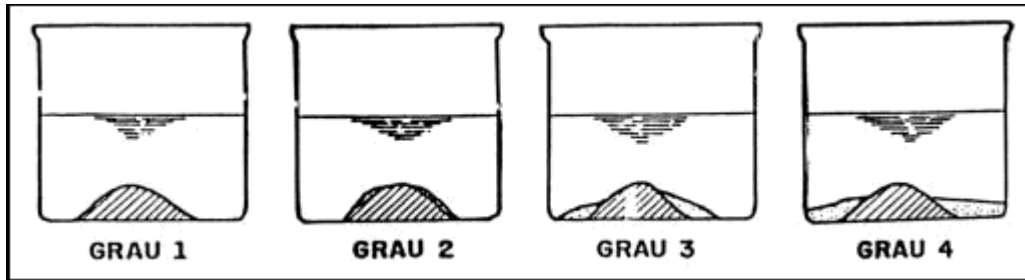


Figura V.1 - Esquema do ensaio de dispersão rápida.  
(SILVEIRA et. al., 1972)

A classificação proposta por SHERARD et. al. (1972), foi modificada por SILVEIRA et. al. (1974) e pode ser observada na Tabela V.1.

Tabela V.1 - Classificação proposta para o ensaio de Dispersão Rápida (modificado de SILVEIRA et. al., 1974)

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Não Dispersiva	O torrão pode espalhar-se no fundo do recipiente, porém não se observa sinal de turveis causada por colóide em suspensão.
Levemente Dispersiva	Aparecimento de turveis na superfície do torrão.
Moderadamente Dispersiva	Aparecimento de nuvem de colóide em suspensão facilmente reconhecível, freqüentemente espalhando-se em finas estrias na base do recipiente, e não chegando a cobrir toda a sua área.
Altamente Dispersiva	Nuvem coloidal cobrindo toda a base do recipiente freqüentemente em uma camad muito fina. Em casos extremos a água torna-se turva.

### V.2.1.1. Apresentação e Análise dos Resultados

Este ensaio foi realizado utilizando-se de água destilada e de tempo de observação de uma hora, desta forma padronizando e diminuindo as imperfeições. Ressalta-se que o ensaio é pouco preciso, pois o mesmo é de caráter observacional sem quantificar o potencial erodível do solo.

Tabela V.2 - Valores obtidos no Ensaio de Dispersão Rápida.

Profundidade (m)	Peso (g)		Grau de erosibilidade
0,30 (FB)	5,08	5,33	1
1,30 (FB)	2,77	4,12	1
5,50 (SR)	3,0	3,0	1
7,80 (SR)	2,89	4,38	1

Nas amostras onde foram realizadas obteve em todas um grau de erodibilidade nível 1 (um), ver Tabela V.2, a Foto V.1 demonstra o ensaio. E pela classificação proposta por SILVEIRA et. al. (1974) as amostras se enquadram no não dispersiva, isto indica que potencial de erodibilidade das amostras não é tão elevado.



Foto V.1 - Ensaio de Dispersão Rápida.

### V.2.2. ENSAIO FURO DE AGULHA

O Ensaio de Furo de Agulha é definido pela NBR 6502/1995 e consiste num ensaio de caráter classificatório, onde uma amostra cilíndrica com um furo de aproximadamente 1mm no centro é submetida há uma vazão com a ação de cargas piezométricas diferentes. Ao fim das sucessivas aplicações de carga, o cilindro é desconectado, o corpo de prova extrudado e partido com o objetivo de se examinar a dimensão do furo. Como também, na execução do ensaio é examinado a turbidez da água coletada num recipiente graduado (Figura V.2).

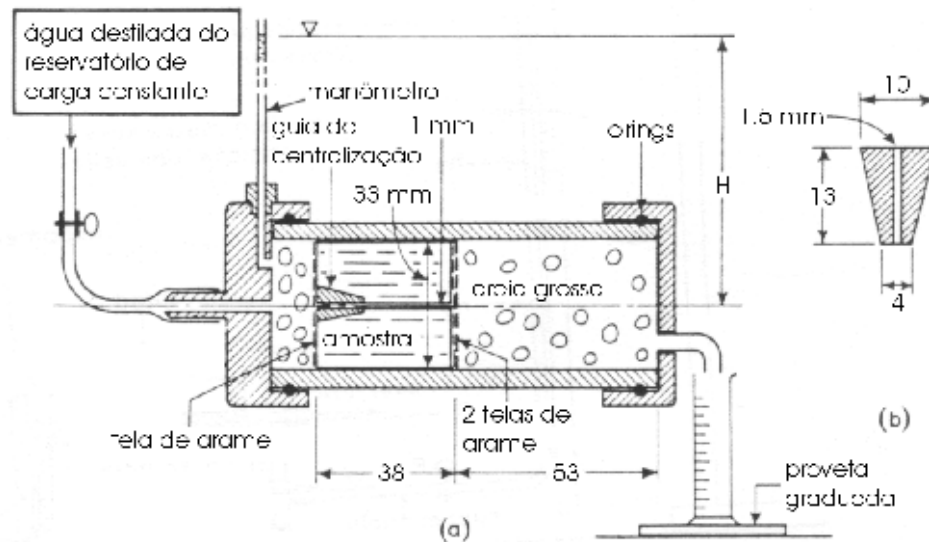


Figura V.2 - Esquema do ensaio Furo de Agulha (CESP/MSL-12).

#### V.2.2.1. Apresentação e Análise dos Resultados

Foram realizados ensaios nas profundidades 0,30m (Formação Barreiras), 1,30m (Formação Barreiras) e 7,80m (Solo Residual), onde foi encontrado o resultado não dispersivo. Pois ao final dos ensaios a amostra não apresentava turveis na água coletada e o furo não ampliava.

A Figura V.3 apresenta o gráfico vazão vs. Carga hidráulica.

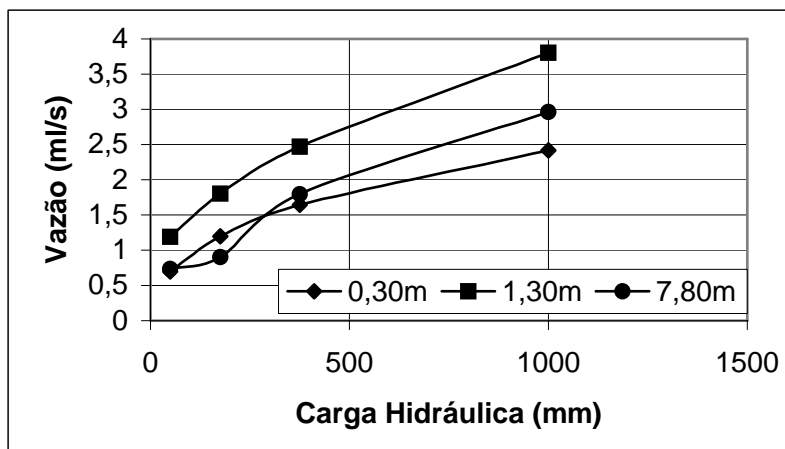


Figura V.3 - Gráfico Carga hidráulica vs. Vazão, obtido no ensaio de Furo de Agulha.

Para avaliação de erosão por lavagem em túneis, existe o ensaio do furo de agulha ("*pinhole test*", de SHERARD et. al., 1976). Neste ensaio, mede-se a suscetibilidade à erosão sob gradientes hidráulicos crescentes em amostras cilíndricas de solo, com um furo interno de diâmetro milimétrico. Este ensaio foi originalmente proposto para avaliação da erodibilidade de solos com argilas dispersíveis, para uso em barragens, mas recentemente tem-se demonstrado sua validade para caracterizar a suscetibilidade a erosão por túneis em solos tropicais não agregados (SANTOS, 1997; SILVA, 2000; BACELLAR, 2000 e MORAES, 2000).

Conclui-se que o ensaio presente não deve ser utilizado para o estudo da erodibilidade em questão, pois sua metodologia não é bem correlacionada aos casos de erodibilidade devido à erosão hídrica superficial em que o fenômeno não se correlaciona a pressões hidráulicas internas no solo.

### V.2.3. ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

Consistiam na colocação de amostras dentro de uma bandeja com água, observando-se então as suas reações ao processo de submersão. As amostras eram cortadas em forma de cubos com 6 cm de lado e colocadas em duas bandejas. Na primeira delas, as amostras foram submetidas à imersão total desde o início do ensaio prosseguindo sob esta condição até o final do ensaio, 24 horas depois. Já na segunda bandeja, as amostras foram colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com o nível d'água mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos. A seguir, a altura d'água era 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 prosseguia até o período de 24 horas, SANTOS et. al. (1998).

Estágios:

- (a) Água destilada na base por 30 min;
- (b) Água destilada a 1/3 e 2/3 da amostra por períodos de 15 min e
- (c) Submersão total, permanecendo por 24 horas.



Foto V.2 - Esquema do Ensaio de Desagregação.

PRANDI & VILAR (1993) relata que NOGAMI & VILLIBOR (1979) propõe uma relação entre o peso seco inicial e o peso do solo desagregado (fator P numa amostra imersa 24h). A relação entre a altura de ascensão (em cm) e raiz do tempo obtém-se o fator p numa amostra submetida a estágio de imersão. Foram analisados solos no Estado de São Paulo e verificou-se uma relação  $E = 52 \times p/P$ , e este, quando encontrados resultados inferiores a 1, traduzem-se em solos erodíveis. Posteriormente PEJON & ZUQUETTE (1992) observaram que o coeficiente da relação p/P deveria ser 1, isto para solos que apresentem  $E > 40$ .

#### **V.2.3.1. Apresentação e Análise dos Resultados**

Na realização deste ensaio utilizou-se de água destilada na tentativa de minimizar as imperfeições do ensaio. As amostras que passavam por estágio de submersão, foram observadas que nos primeiros 15 minutos (1º estágio) era o tempo necessário para as frentes de saturação envolver todo corpo de prova, e após, nos outros estágios, se observa diferenças relativas ao tipo de solo.

Na amostra da camada de solo a 0,30 metro de profundidade no 2º estágio de submersão inicia-se o processo erodível nas quinas da amostra, que se estagna no 3º estágio após 6 segundos de iniciado. A amostras ao final do ensaio apresentou erodida com as bases ao centro intactas. No segundo corpo de prova submetido à submersão total após 3 minutos e 40 segundos de ensaio o mesmo erodiu parcialmente o lado direito estagnando-se até o final do ensaio.

Na amostra da camada de solo a 1,30 metro de profundidade o comportamento do solo assemelha-se ao anterior no corpo de prova submetido a estágio de submersão. E no corpo de prova submetido à submersão total

após uma hora de ensaio o corpo de prova encontrava-se erodido e restando-lhe apenas a parte central inferior, o qual estagnou-se até o final do ensaio.

Na amostra da camada de solo a 7,80 metros de profundidade o corpo de prova submetido a estágio apresentou no segundo alta turveis e os lados erodidos com 6 segundos e após estagna-se. No 3° estágio aumenta a turveis e o corpo erode por completo com 30 segundos. No corpo de prova submetido à submersão total no inicio apresenta alta turveis e este erode por completo aos 15 minutos de ensaio.

Apesar das amostras apresentarem-se erodidas ao final do ensaio, utilizando as metodologias encontradas em VILAR (1993), observa-se que apenas a amostra a 7,80 metros de profundidade é que não apresentava potencial de erodibilidade (Tabela V.3), pois esta apresenta uma relação p/P superior a 1 e um E acima de 40.

Tabela V.3 - Determinação da erodibilidade por ensaio de desagregação.

Prof. (m)	p(1)	P(2)	P/P	E(3) = 52 p/P
0,30 (FB)	1,16847	9,1895	0,12715	6,6119
1,30 (FB)	1,278	6,0549	0,21107	10,97557
7,80 (SR)	1,3145	1	1,3145	68,354

1 -relação entre a altura de ascensão e a raiz do tempo (amostra submetida a estágio de imersão; 2 - relação entre o peso seco inicial e o peso do solo desagregado (amostra imersa 24h); 3 - coeficiente de erodibilidade

#### V.2.4. ENSAIO DE INDERBTZEN

Idealizado por Inderbitzen em 1961 (FÁCIO, 1991), este ensaio utiliza um aparelho cujo princípio de funcionamento baseia-se no escoamento de uma lâmina d'água sobre uma



rampa, de maneira que uma amostra de solo indeformada, posicionada tangencialmente ao plano da rampa em sua extremidade inferior, seja atingida uniformemente por esta lâmina, ocasionando erosão superficial no solo por um tempo determinado. No entanto vale ressaltar que neste ensaio não é possível supor a influência do impacto das gotas de chuvas no terreno, que por sua vez ocasionam a desagregação de partículas da superfície do solo, denotando um escoamento superficial com teor de sedimentos maior do que o representado neste experimento.

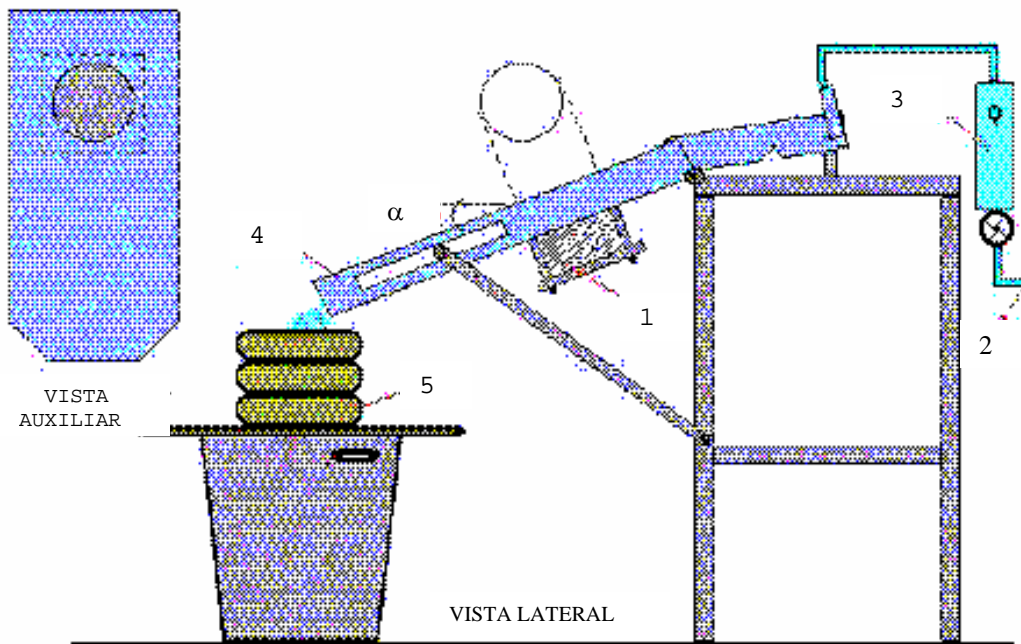


Figura V.4 - Esquema do equipamento de inderbtzen: 1 - amostra de solo, 2 - entrada d'água, 3 - medidor de vazão, 4 - rampa e 5 - peneiras (BASTOS et. al., 1999).

A rampa é de inclinação variável através da qual uma amostra indeformada de 10 cm de diâmetro disposta rente ao fundo é sujeita a fluxo uniforme, dada uma vazão escolhida. É medida a perda em peso de solo seco erodido com relação à área da amostra e ao tempo de fluxo, BASTOS et. al. (1998b).

O equipamento é o primeiro Norte e Nordeste, e foi confeccionado utilizando o padrão do equipamento encontrado na Dissertação de FACIO (1991), Universidade de Brasília.

Em laboratório, o ensaio iniciou-se com a saturação das amostras, após acondiciona-la em modelador (Foto V.3), que objetivou eliminar as forças de sucção que pudessem intervir no processo, esta etapa era finalizada com 15 minutos de embebecimento da amostra em uma piscina d'água com altura constante (Foto V.4).

Utilizou-se declividade de rampa de 10° e vazão fixa de 50 ml/s até os 60 minutos, com material erodido sendo coletado depois de decorridos os seguintes intervalos de tempo; 1, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos. O material foi coletado em recipientes de 20 litros, onde se separou o sedimento da água em peneira de malha # 200, tendo sido armazenado em cápsulas de alumínio e secado em estufa à temperatura de 105° C. Após secagem, todo o material de solo erodido foi pesado em balança analítica.

Ao material que passava na peneira de malha # 200, era medido indiretamente, a partir de uma amostra representativa da mistura de água com finos, obtida do balde após cuidadosa homogeneização. Faz-se a diferença entre o peso do recipiente com água limpa e o peso do recipiente com a mistura de finos retirados ao final do ensaio. Ressalte-se que deve ser a mesma quantidade de líquido nos recipientes. Tendo uma quantidade percentual de finos que se encontram na água ao final do ensaio, obtendo-se por extrapolação a quantidade total.

De acordo com BASTOS et al.(1999), a tensão cisalhante hidráulica aplicada nos ensaios, expressa em Pa, é estimada simplifcadamente através da equação abaixo, oriunda da hidráulica de canais:

$$\tau_h = \gamma \cdot h \cdot d$$

$$\text{Equação (V.1)}$$

Onde:  $\gamma$  = peso específico da água (N/cm<sup>3</sup>), h = altura da lâmina de fluxo (cm) e d = declividade do escoamento (cm/cm). Para determinar a altura da lâmina de fluxo (h) sabe-se que:

$$q = v \times a \text{ onde } 1:$$

$$q = \text{vazão}$$

$$v = \text{velocidade}$$

$$a = \text{área}$$

A área do equipamento no ensaio é um quadrilátero, portanto teremos?

$$A = Ab \times h' \quad 2$$

Sendo a altura (h') é a tira do corpo (equipamento) + altura da lâmina de fluxo. Então teremos:

$$h' = h_e + h \quad 3$$

Substituindo "3" e "2" em "1":

$$q = v \times Ab + (h_e + h)$$

$$h_e + h = \frac{q}{v + Ab}$$

$$h = \frac{q}{v + Ab} - h_e$$

Relacionando os valores para os solos nas diferentes condições de umidade:

- Tensão cisalhante hidráulica crítica ( $h_{crít}$ ) - tensão cisalhante hidráulica para mínima perda de solo e
- Taxa de erodibilidade (K) - taxa da perda de solo por unidade de área com a tensão cisalhante hidráulica aplicada.

#### V.2.4.1. Apresentação e Análise dos Resultados

Na realização do ensaio, algumas dificuldades surgiram sendo sanadas a medida em que eram encontradas, confeccionado na UFPE.



Foto V.3 - Vista Frontal do equipamento

Algumas das observações e recomendações referentes ao equipamento de ensaio:

- a) Induzir a torneira a uma vazão constante de 50ml/s, como o padronizado por FÁCIO (1991);
- b) Utilizar mangueira para enchimento do recipiente de deposito d'água do aparelho;
- c) Utilizar um recipiente de recebimento da vazão com escoamento de água, com volume mínimo de 180.000ml;
- d) Nivelamento da rampa;



Foto V.4 - Vista Lateral do equipamento confeccionado na UFPE.



Foto V.5 - Acondicionamento da amostra.



Foto V.6 - Embebecimento por 15 minutos da amostra para chegar ao estágio de saturação.

- e) Rosqueamento de encaixe da amostra de espessura maior, pois quantidades de solo ficam entre o rosqueamento prejudicando o encaixe;
- f) Utilizar recipiente de depósito d'água do equipamento de textura incolor ou usar uma mangueira para indicar o nível d'água no interior;

Algumas dificuldades listadas nos itens "d", "e" e "f" não foram contornadas. Para o nivelamento da rampa (item "d"), induziu-se que a lamina d'água percorresse toda a amostra. Como nos itens restantes não traziam danos aos resultados finais do ensaio, continuou-se com estas falhas.

Foram inicialmente realizados ensaios sem manter constante a velocidade de vazão a 50 ml/s, podemos verificar as diferenças encontradas pela Figura V.5.

As diferenças em manter-se a velocidade de vazão constante, além de padronizar os ensaios, fez-se notar pela quantidade de perda de solo, em que os ensaios padronizados tiveram valores iniciais superiores nessa quantidade removida pela lamina d'água em relação ao ensaio não padronizado.

Na Figura V.6 obtém-se o gráfico padrão da Perda de Solo ( $10^{-13}$  g/cm<sup>3</sup>/min) versus o Tempo em minutos, observa-se perdas maiores nos primeiros 5 minutos e após este instante o ensaio inicia estagnação, como o encontrado na literatura.

Na Figura V.7 apresenta-se o gráfico Perda de Solo vs. Tensão cisalhante hidráulica (h) aplicada nos ensaios, expressa em Pa, e é estimada através da Equação V.1.

O gráfico (Figura V.7) apresenta as tensões cisalhantes hidráulicas para uma declividade de 10°, e demonstra que nas amostras analisadas apresentam resultados dispersos. Portanto faz-se necessário a realização de outros ensaios em declividades diferentes para melhor comparação. Podendo também ser feito em amostras compactada para discutir a sua influência no ensaio.

As curvas relativas ao ensaio na profundidade de 7,80m (Solo Residual) apresentam um comportamento diferenciado, mas não forje ao encontrado na literatura quanto à tendência do ensaio. Acredita-se de uma má leitura, ou melhor, de uma influência externa resultando no gráfico com pontos fora do padrão esperado.

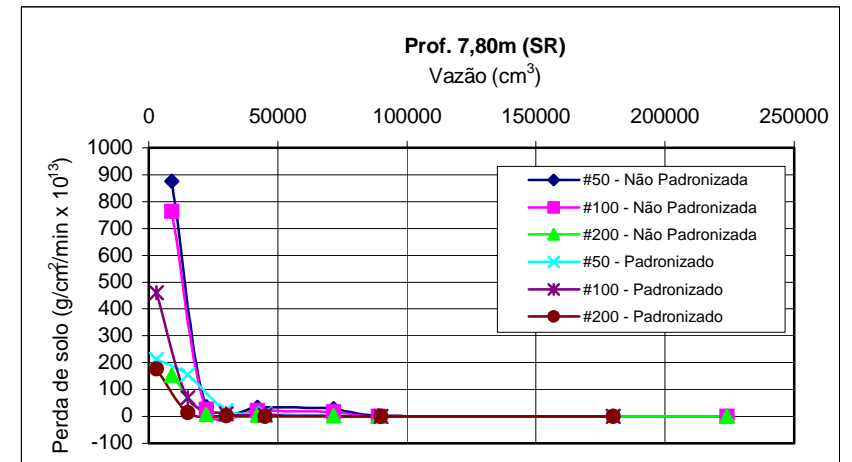
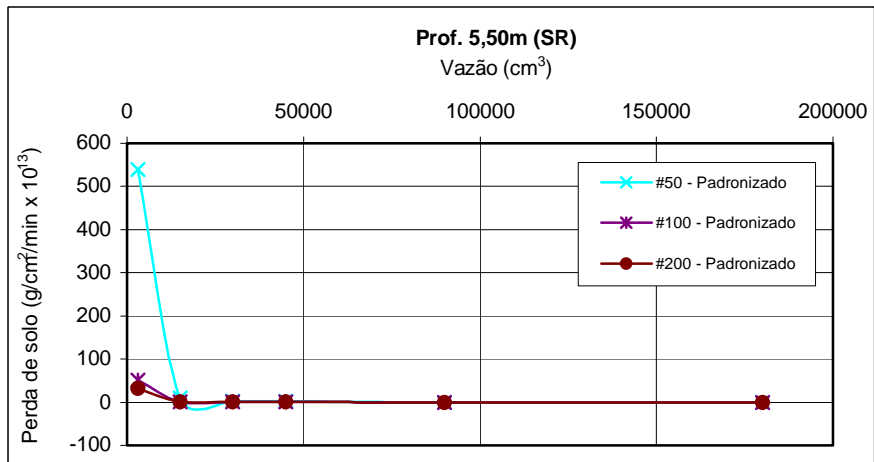
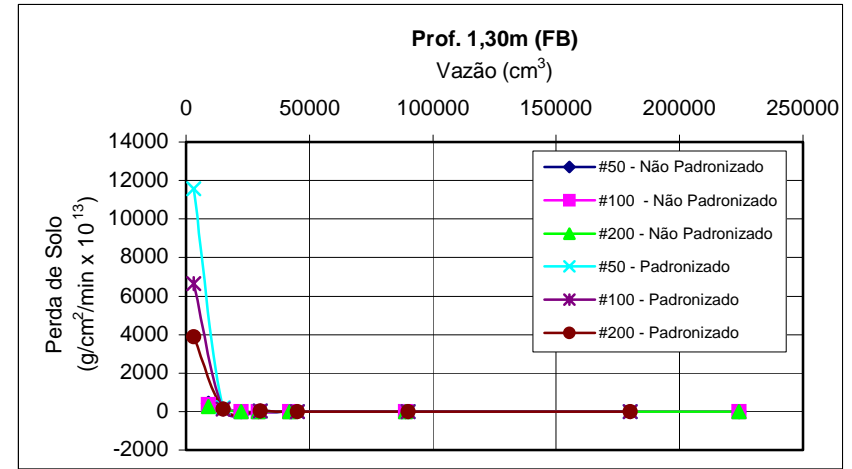
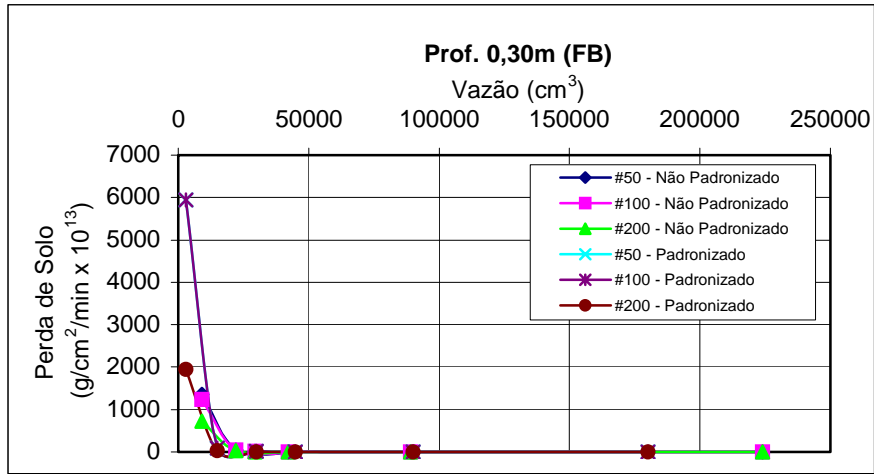


Figura V.5 - Gráfico Perda de Solo vs. Vazão em ensaio não padronizado e padronizado.



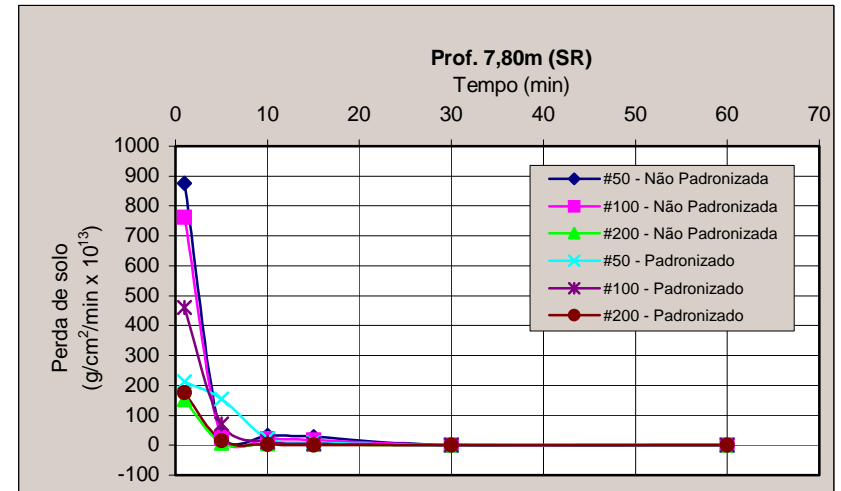
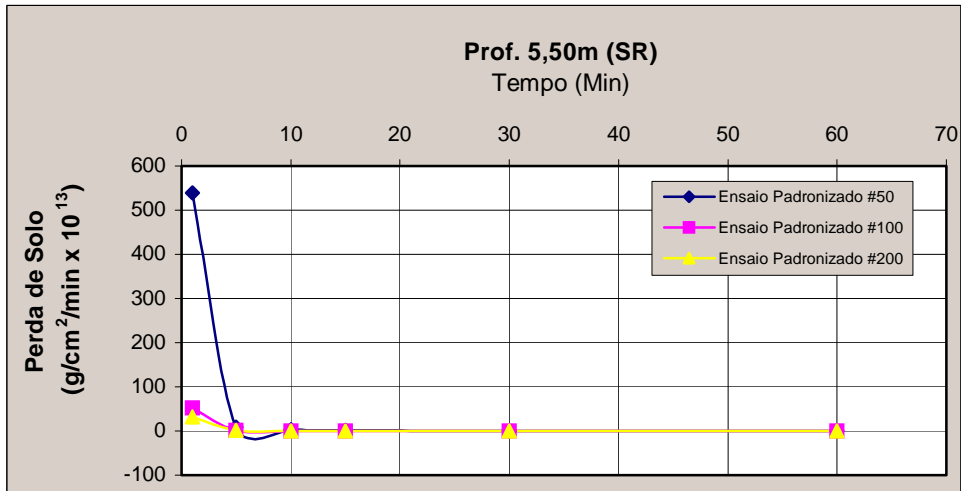
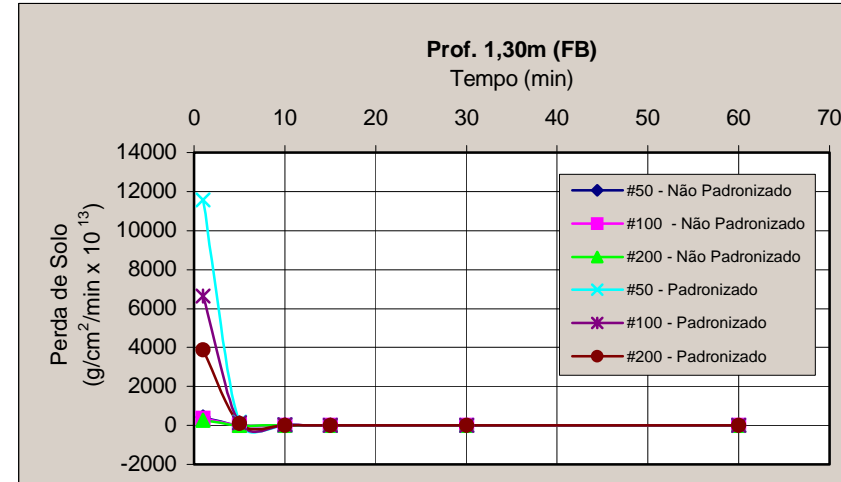
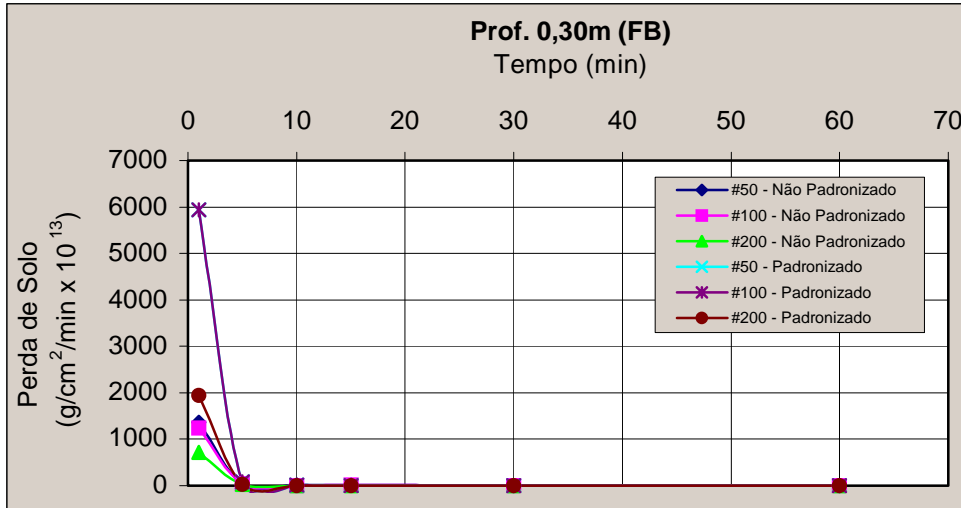


Figura V.6 - Gráfico Perda de Solo vs. Tempo em ensaio padronizado.

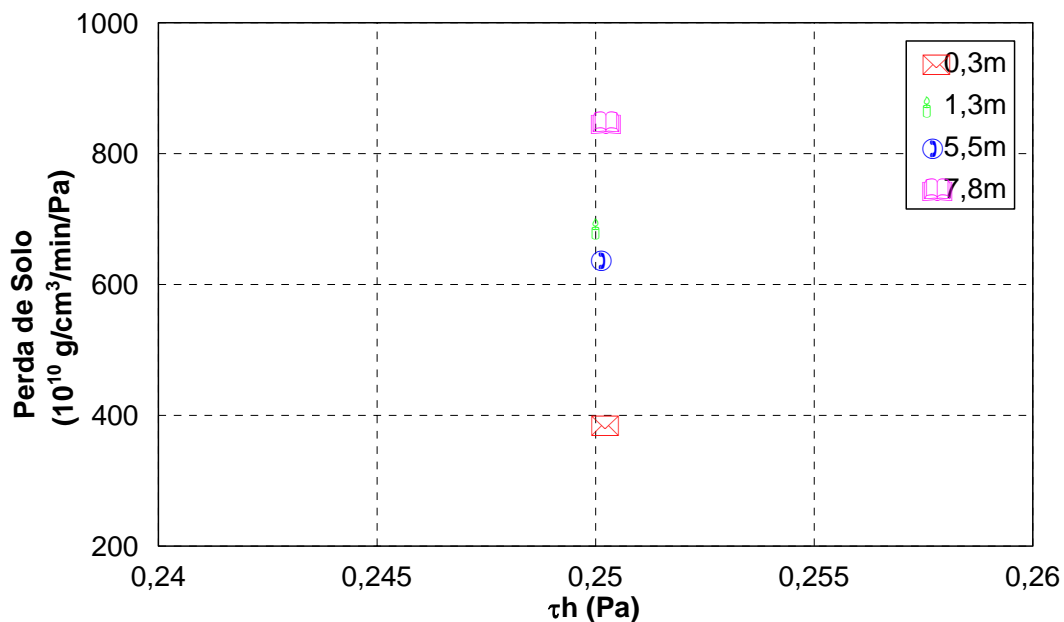


Figura V.7 - Gráfico Perda de Solo vs. Tensão Cisalhante Hidráulica

Observa-se que os resultados obtidos neste ensaio correspondente a taxa de erodibilidade apresentaram-se alta em todas as camadas analisadas de solo, e ressalta-se ao uso neste ensaio de amostradas indeformadas.

Tabela V.4 - Resultado do ensaio Inderbtzen quanto à taxa de erodibilidade

CAMADA	Perda de Solo ( $10^{10} \text{ g/cm}^3/\text{min/Pa}$ )	$\tau_{h\text{crit}}$ (Pa)	K ( $10^{10} \text{ g/cm}^3/\text{min/Pa}$ )
0,30m (FB)	387,6316	0,25	1292,105
1,30m (FB)	688,6953	0,25	4591,302
5,50m (SR)	640,3735	0,25	1829,639
7,80m (SR)	849,6018	0,25	3398,407

A proposta de BASTOS (1999) de utilizar duas inclinações, a variação destas não define potencial de

erodibilidade, pois apenas informa a diferença da perda de solo. Ainda não foi definida uma faixa de perda de solo que seja considerada e identifique solos erodíveis. Os solos analisados apresentaram perda de solo variáveis, dificultando uma análise do potencial de erodibilidade nas camadas.

#### V.2.5. ENSAIO DE INFILTRAÇÃO

Segundo NOGAMI & VILLIBOR (1995), desconhece-se uma designação consagrada para essa propriedade dos solos não saturados, caracterizados pela quantidade de água que penetra (ou infiltra) através de sua superfície, quando em contato com água livre. Essa propriedade tem sido designada, às vezes, como permeabilidade não saturada ou capilar e é caracterizada por coeficientes apropriados. O uso do termo permeabilidade não é recomendável, porquanto o coeficiente que a caracteriza difere bastante da permeabilidade saturada. Enquanto que o coeficiente de permeabilidade é independente do tempo, o coeficiente que caracteriza a infiltrabilidade dele depende. Na infiltrabilidade, a penetração d'água é motivada, sobretudo pela tensão de sucção do solo, mas, em muitas circunstâncias, também é necessário considerar outros fenômenos, como inchamento e pressões hidrostáticas.

Os corpos de provas são compactados, ou pode utilizar amostras indeformadas, após e submetido à secagem em umidade natural, a fim de chegar a umidade higroscópica.

Ao início do ensaio é colocada uma pedra porosa na base e na amostra sobre ela, a régua milimetrada é posicionada ao lado com o objetivo de medir o avanço da frente de saturação. Os tempos relativos a leitura são realizados no  $t = 1, 2, 4, 8, 15, \dots, n^2$  minutos no período mínimo de 16h. No instante  $t = 0$  deve-se preencher com o nível d'água

até o nível da pedra porosa e mantê-lo até o final do ensaio.

O coeficiente de sorção é dado pela fórmula:

$$S = \frac{(L_b - L_a) \times S}{10 \times (t_b - t_a) \times A} \quad \text{Equação (IV.8)}$$

Onde:

$s$  = coeficiente de sorção em  $\text{cm} / (\text{minutos})^{1/2}$ ;

$L_a, t_a$  = coordenadas do ponto  $a$ , da parte retilínea da curva obtida;

$S$  = seção do tubo horizontal, em  $\text{cm}^2$ ;

$A$  = seção do corpo de prova, em  $\text{cm}^2$ .



Foto V.7 - Esquema do Ensaio de Infiltração.

Segundo NOGAMI & VILLIBOR (1995), a curva obtida pode apresentar nítido encurvamento após um trecho retilíneo bem desenvolvido, prosseguindo com tendência sensivelmente horizontal; isso significa que a frente de umidade atingiu

o topo do corpo de prova. Nessa circunstância, será possível determinar a velocidade aproximada de caminamento da frente de umidade, pelo uso da fórmula seguinte:

$$V_f = \frac{H_f}{10 \times t_f} \quad \text{Equação (IV.9)}$$

Onde:

$V_f$  = velocidade da frente de umidade, em mm/(minutos)<sup>1/2</sup>;

$H_f$  = altura do corpo de prova, em mm;

$t_f$  =  $t_{ff} - t_{fi}$ , em que  $t_{ff}$  é o valor da abcissa da intersecção da parte retilínea inclinada com a parte "horizontal" da curva a que se refere acima e,  $t_{fi}$ , a abcissa da intersecção da parte retilínea da mesma curva (ou de seu prolongamento) com o eixo de ordenada zero. Quase sempre, a referida reta passa pela origem do gráfico.

Ao realizar o ensaio, tentativas foram realizadas a fim de obter-se o fator de petrificação. Com isso ao final do ensaio, à frente de saturação chegar ao topo, continuava-se com o intuito de obter a umidade necessária para saturar a amostra utilizado-se da estabilização no peso de solo úmido. Determina-se assim o limite de absorção ( $W'_A$ ), o qual é comparado com o teor de umidade ( $W_0$ ) necessário para saturar, sem variação de volume - identificando o fator de petrificação.

#### **V.2.5.1. Apresentação e Análise dos Resultados**

Na realização deste ensaio foram utilizadas as amostras compactadas pelo ensaio Mini-Compactação, desta forma utilizou várias amostras com umidade de compactações diferentes. Ressalta que a amostra considerada para obtenção do índice de sorção era a compactada na ótima.

Após a compactação da amostra esta era seca ao ar, e seguia os procedimentos normais da realização do ensaio.

Observou-se diferenciação no resultado do ensaio na mesma amostra devido ao uso de compactação em umidades diferentes. Apresentando desta forma amostras com índice de vazios maior. E, portanto, uma velocidade da frente de saturação maior (Figura V.8).

Tabela V.5 - Determinação do coeficiente de sorção e da velocidade da frente de saturação.

Profundidade (m)	Coeficiente de sorção (cm / min <sup>1/2</sup> )	Velocidade da frente de saturação (mm / min <sup>1/2</sup> )
0,30 (FB)	0,084	0,011
1,30 (FB)	0,037	0,006
7,80 (SR)	0,035	0,006

Para obtenção do coeficiente de sorção a metodologia apresentada no item V.2.5. Gráficos que demonstram o volume de água infiltrada vs. raiz do tempo pode ser observado na Figura V.9. Na Tabela V.5 observa-se o valor do coeficiente de sorção e a velocidade da frente de saturação.

Na tentativa de obter o índice de petrificação os valores obtidos podem ser observados na Tabela V.5. Observa-se que o valor menor relativo ao índice de petrificação é o encontrado na profundidade de 1,30 metros, seguindo pela amostra a 0,30 metros. Sendo a erodibilidade mais quantitativa nos valores de petrificação menores, ou seja, é inversamente proporcional a este índice.

Tabela V.6 - Determinação do índice de petrificação.

Profundidade (m)	Umidade de absorção (W' <sub>a</sub> )	Umidade inicial (W <sub>o</sub> )	Petrificação (W' <sub>a</sub> - W <sub>o</sub> )
0,30 (FB)	14,11	1,032	13,08
1,30 (FB)	9,62	0,600	9,02
7,80 (SR)	21,45	0,781	20,67

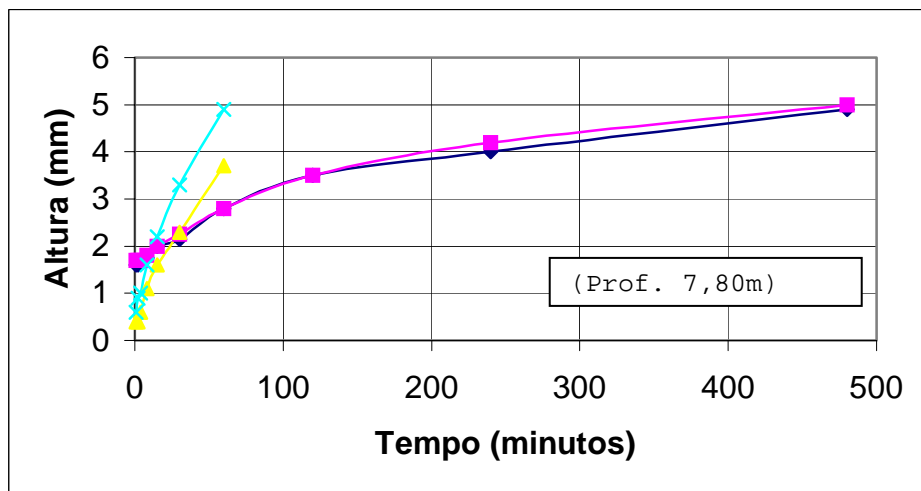
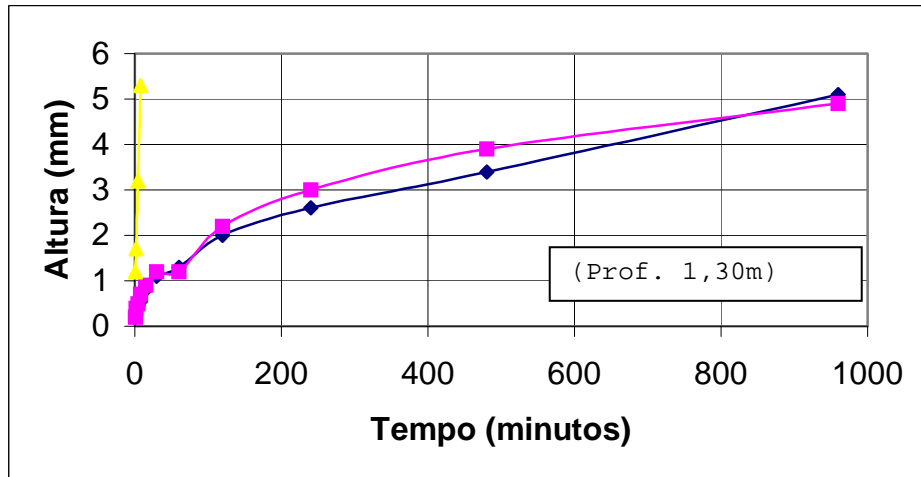
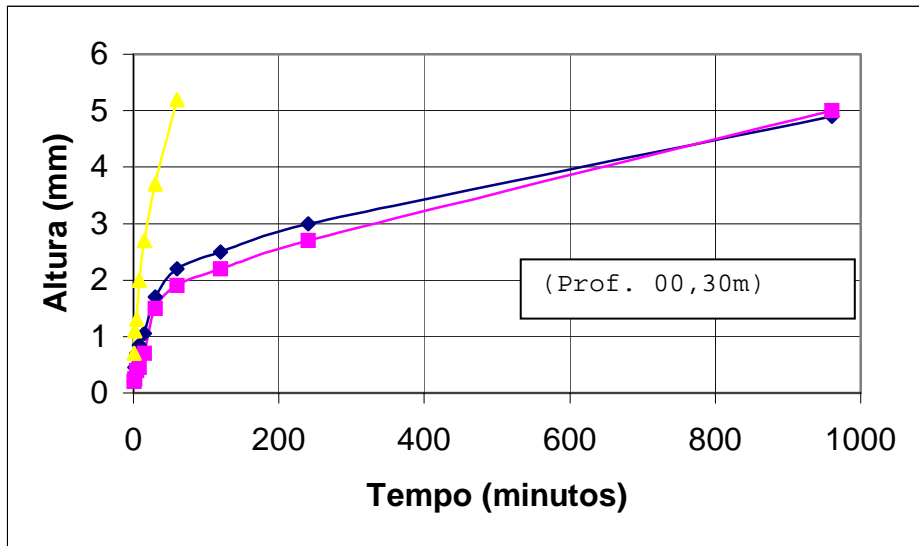


Figura V.8 - Gráficos Altura (mm) vs. Tempo (minuto)



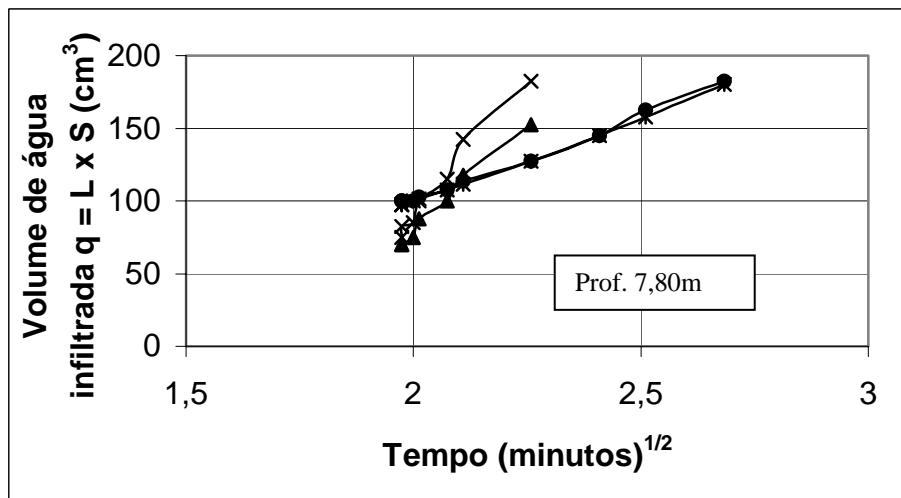
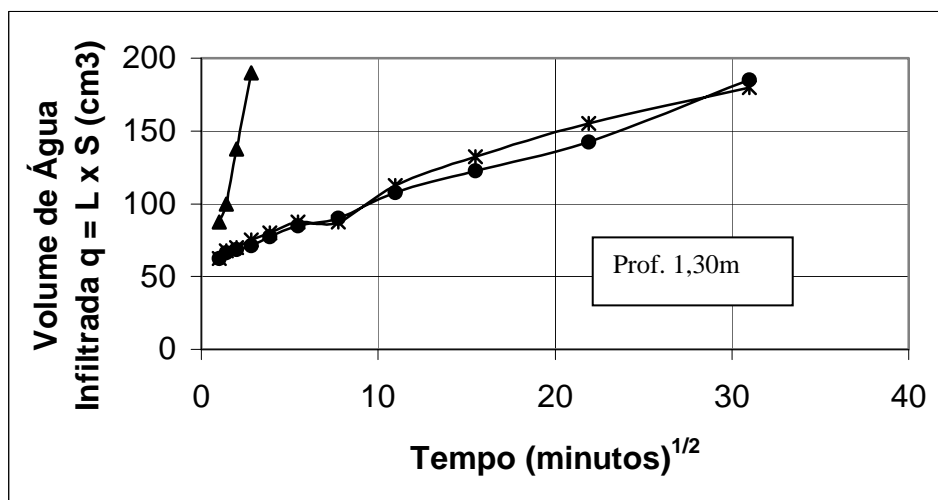
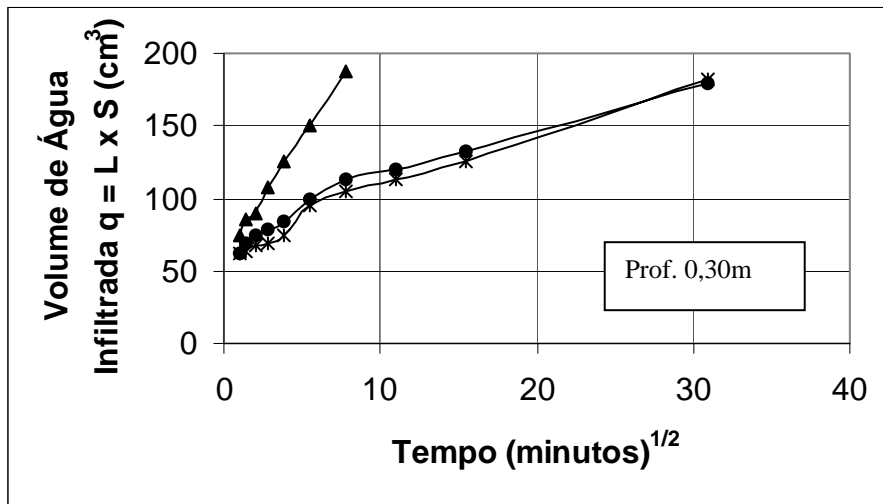


Figura V.9 – Volume de água infiltrada vs. raiz de tempo

## V.2.6. METODOLOGIA MCT

BASTOS et al. (2000), propõe a avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos através de dois ensaios: infiltração e perda por imersão. No ensaio de infiltração é quantificada a velocidade de ascensão capilar em amostras cilíndricas 5x5 cm, através do coeficiente de sorção (s) dado em  $\text{g}/\text{cm}^{1/2}$ . No ensaio de perda por imersão é avaliada a porcentagem de solo seco desagregada (pi) quando amostras cilíndricas 5 x 2,5 cm são imersas em água por 20 horas, BASTOS et. al.- 1998b (ver item IV.2.2.).

Para identificação da erodibilidade do solo a metodologia propõe o uso de critério baseado nos resultados dos ensaios mencionados anteriormente (Figura V.10).

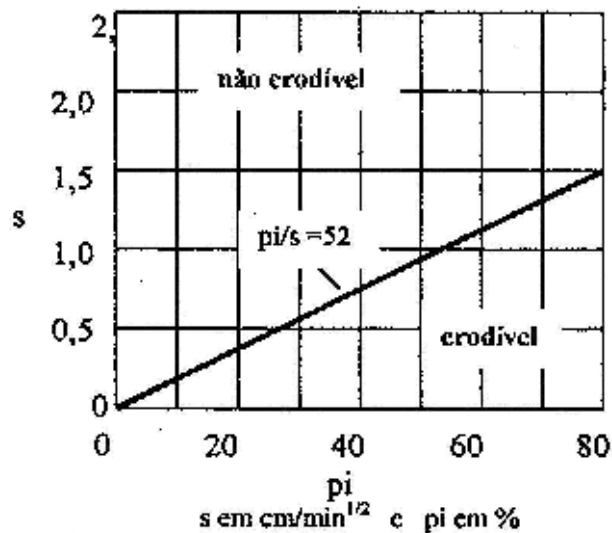


Figura V.10 - Aplicação do critério de erodibilidade da metodologia MCT (BASTOS et. al., 2000).

### V.2.6.1. Apresentação e Análise dos Resultados

Para utilização desta metodologia faz-se necessário a obter os resultados do ensaio de classificação MCT e do ensaio de infiltração. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela V.7.

Tabela V.7 - Valores obtidos para metodologia MCT.

Prof. (m)	Pi (%)	S (cm/mom <sup>1/2</sup> )
0,30 (FB)	170,79	0,0838007
1,30 (FB)	247,19	0,0371628
7,80 (SR)	191,01	0,0352722

Na Figura V.11 apresentam dados plotados das amostras analisadas para obtenção da metodologia MCT. Observa-se que os pontos encontram-se na parte inferior do gráfico, segundo esta compreende a área de concentração de solos erodíveis.

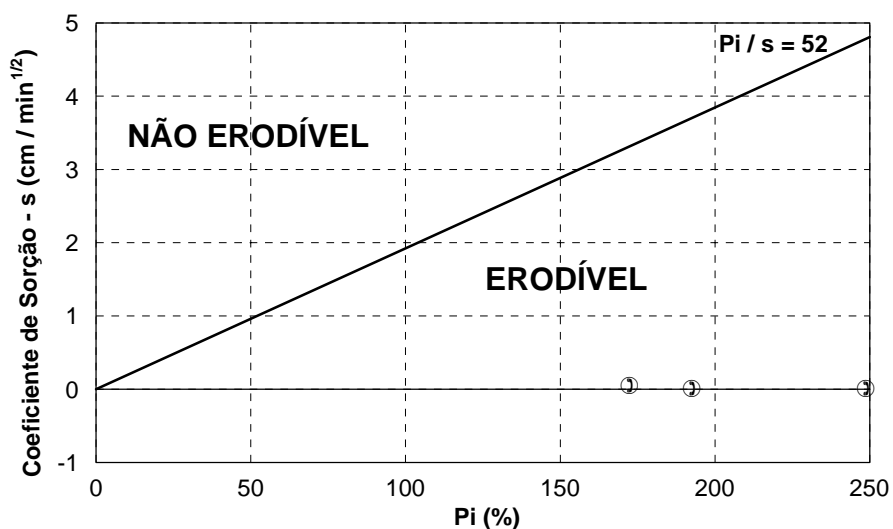


Figura V.11 - Aplicação do critério de erodibilidade da metodologia MCT aos solos estudados.

#### V.2.7. CORRELAÇÃO PARA OBTENÇÃO DA ERODIBILIDADE DO SOLO

PRANDI & VILAR (1993), relata que MIDDLETON (1930) propôs com a medida da estabilidade de grumos de partículas em água, a relação de dispersão (PD): conjunto com a capacidade de infiltração, relação de percolação (RP) uma relação de erosão (RE) que consiste no quociente entre PD e RP. Entre os solos ensaiados por MIDDLETON, os não erodíveis apresentaram  $RP > 1,5\%$ ;  $PD < 15\%$  e  $RE, 10\%$ .

### V.2.7.1. Apresentação e Análise dos Resultados

O cálculo para obtenção desta correlação necessita do potencial de dispersão, obtido pelas curvas granulométricas, e a capacidade de infiltração, obtida pelo ensaio de infiltração. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela V.8.

Tabela V.8 - Valores obtidos da relação de erosão.

Prof. (m)	PD (%) <sub>1</sub>	RP (%) <sub>2</sub>	RE (%) <sub>3</sub>
0,30m (FB)	22,326	0,0838007	266,418
1,30m (FB)	18,604	0,0371628	500,608
7,80m (SR)	16,744	0,0352722	474,708

1 - relação de dispersão; 2 - relação de percolação;

3 - relação de erosão.

Observa-se que os valores do potencial de dispersão são superiores a 15% e que os valores da relação de percolação são inferiores a 1,5% o que indica valores superiores a 10% para a relação de erosão. Como se observa na Tabela V.8, os valores obtidos da relação de erosão são elevados indicando um potencial de erodibilidade dos solos analisados.

### V.3. RESUMOS - COMENTÁRIOS

Quanto ao estudo da erodibilidade pelo ensaio de Dispersão Rápida, as amostras analisadas apresentaram grau de erodibilidade 1 indicando nível de erodibilidade baixo. E pela classificação proposta por SILVEIRA et. al. (1974) as amostras se enquadram no não dispersiva, isto indica que potencial de erodibilidade das amostras é baixo. Ressalta-se a imprecisão do ensaio, pois este quantifica o potencial erodível com bases na observação do laboratorista.

No ensaio Furo de Agulha as amostras analisadas apresentaram todas com o grau de não dispersivo. Isto indica que o ensaio não deve ser utilizado para estudo de erosão hídrica superficial, e sim para fenômenos de erosão correlacionados a pressões hidráulicas internas no solo.

No ensaio de Desagregação foi utilizada metodologia encontrada em PRANDI & VILAR (1993) para determinação da erodibilidade. Resultando nos solos analisadas as camadas superficiais apresentaram potencial de erodibilidade, e apenas na profundidade de 7,80m (Solo Residual) não apresentava potencial de erodibilidade.

No ensaio de Inderbizen foram encontradas algumas dificuldades como: utilizar mangueira para enchimento do recipiente de depósito d'água do aparelho; utilizar um recipiente de recebimento da vazão com escoamento de água, com volume mínimo de 180.000ml; nivelamento da rampa; rosqueamento de encaixe da amostra de espessura maior, pois quantidades de solo ficam entre o rosqueamento prejudicando o encaixe; utilizar recipiente de depósito d'água do equipamento de textura incolor ou usar uma mangueira para indicar o nível d'água no interior. Algumas modificações foram realizadas com intuito de aperfeiçoar o ensaio, para o nivelamento induziu-se a lamina d'água a percorrer toda a amostra. Ficando por melhorar quanto ao rosqueamento de encaixe e o recipiente de depósito d'água, podendo continuar com estas falhas.

Quanto aos resultados obtidos pelo ensaio de Inderbizen, apresentam uma tendência a perdas de solo nos primeiros cinco minutos, como o encontrado em FACIO (1991). E os resultados realizados fora do padronizado apresentaram perda iniciais superiores.

No ensaio de Infiltração foi realizado com intuito de obter o coeficiente de sorção e a velocidade da frente de saturação, sendo estas variando respectivamente entre

0,0838 a 0,0353  $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$  e 0,0113 a 0,00583  $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ . Tentou-se obter o índice de petrificação que foi de 13,08 na profundidade 0,30m (Formação Barreiras); 9,02 na profundidade 1,30m (Formação Barreiras) e 20,67 na profundidade 7,80m (Solo Residual). Caracterizando maior erodibilidade índices menores de petrificação.

Para obtenção da erodibilidade pela metodologia MCT as amostras analisadas apresentaram-se na parte inferior da curva proposta indicando solos erodíveis.

Uma obtenção da erodibilidade através dos índices obtidos pelos ensaios de infiltração e granulometria, apresentou nas amostras analisadas elevado potencial de erodibilidade, variando a relação de erodibilidade de 266,4 a 500,6.

Partindo das informações obtidas nos ensaios de erodibilidade, metodologias e correlação a fim de obter o potencial de erodibilidade encontraram-se discrepância entre aqueles como podem ser observados na Tabela V.9. Observa-se no ensaio de furo de agulha não é aconselhado para identificar potencial de erodibilidade nos casos de erosão hídrica laminar. O ensaio de desagregação apresenta algumas dificuldades na obtenção dos dados, faltando precisão. E este ensaio não é aconselhado a solos argilosos, pois apresentam uma coesão aparente que disfarça os resultados obtidos e principalmente nas camadas da Formação Barreiras. Com relação ao resultado de potencialidade de erodibilidade obtida pelo índice de petrificação observou-se que as camadas da Formação Barreiras apresentam potencial devido a estas necessitarem menos de quantidades d'água para alcançar o estado saturado. E quanto ao Solo Residual este necessita de maior quantidade d'água, desta forma não apresentar potencial de erodibilidade.

Tabela V.9 - Resumo dos resultados do potencial de erodibilidade.

<b>CAMADA</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>POTENCIAL DE ERODIBILIDADE</b>
0,30 m (Formação Barreiras)	Ensaio de dispersão rápida	NÃO APRESENTA
	Ensaio furo de agulha	NÃO APRESENTA
	Ensaio de desagregação	NÃO APRESENTA
	Ensaio de Inderbtzen	APRESENTA
	Índice de petrificação	APRESENTA
	Metodologia MCT	APRESENTA
	Correlação	APRESENTA
1,30 m (Formação Barreiras)	Ensaio de dispersão rápida	NÃO APRESENTA
	Ensaio furo de agulha	NÃO APRESENTA
	Ensaio de desagregação	NÃO APRESENTA
	Ensaio de Inderbtzen	APRESENTA
	Índice de petrificação	APRESENTA
	Metodologia MCT	APRESENTA
	Correlação	APRESENTA
5,50 m (Solo Residual)	Ensaio de dispersão rápida	NÃO APRESENTA
	Ensaio de Inderbtzen	APRESENTA
7,80m (Solo Residual)	Ensaio de dispersão rápida	NÃO APRESENTA
	Ensaio furo de agulha	NÃO APRESENTA
	Ensaio de desagregação	APRESENTA
	Ensaio de Inderbtzen	APRESENTA
	Índice de petrificação	NÃO APRESENTA
	Metodologia MCT	APRESENTA
	Correlação	APRESENTA

CAPÍTULO VI  
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Baseado nos resultados obtidos no presente estudo pode-se concluir que:

- No estudo dos processos que determinaram o desenvolvimento do processo erosivo, identificou-se a ocorrência da erosão superficial com formação de voçorocas. O solo analisado apresentou nas camadas superficiais, solos menos permeáveis, aumentando o número de águas escoando do que infiltrando. No desenvolvimento do processo erosivo as águas de escoamento iniciam pela formação de sulcos erosivos e estes desenvolvem-se para formação de voçorocas, originando o cenário analisado.
- Os parâmetros geotécnicos encontrados nos solos analisados descrevem características semelhantes na camada da Formação Barreiras indicando solos mais finos, menos permeáveis na superfície e mais permeável com a profundidade apesar de ser mais poroso na superfície. Na camada de Solo Residual indicam solos siltosos na superfície e mais grossos com a profundidade, apresentam mais permeáveis e maior porosidade na superfície e menos poroso com a profundidade.
- No estudo da compressibilidade, a tentativa de obtenção do coeficiente de colapsibilidade é realizada empiricamente. Onde na camada de solo residual apresentou resultado de verdadeiramente colapsível. E na outras camadas apresentaram comportamento colapsível quando inundados.



- No ensaio de cisalhamento direto na camada da Formação Barreiras, amostra a 0,30m de profundidade, apresentou falha na regressão linear da umidade natural necessitando pontos em altas tensões. Induzindo a uma redução de coesão pequena, diferente das outras camadas que apresentaram uma redução de coesão superior a 85% indicativo de potencialidade de erodibilidade.
- Conclui-se também que os valores obtidos pelos ensaios de erodibilidade, correlações e metodologias apresentaram muitas discrepâncias, devendo-se observar quanto à correlação do fenômeno erosivo e a escolha do ensaio para determinar o potencial de erodibilidade.
- O ensaio de dispersão rápida considera-se um ensaio preliminar de comportamento erodível do solo, pois este quantifica o potencial erodível com bases na observação do laboratorista. Nas amostras analisadas apresentarem grau de erodibilidade 1 (um) e classificação proposta por SILVEIRA et. al. (1974) não dispersivo, indicando baixo potencial erodível.
- O ensaio furo de agulha foi constatado falta de eficiência para demonstrar o potencial de erodibilidade, devido ao processo de erosão no local está limitado a pressões hidráulicas superficiais. Este ensaio foi idealizado para estudar o comportamento das pressões hidráulicas sub-superficiais em barragens de terra, portanto não é aconselhado aos estudos do fenômeno de erosão hídrica superficial.
- O ensaio de desagregação apresenta algumas dificuldades na obtenção dos dados, tornando os resultados empíricos. E esta metodologia não é

aconselhada para solos argilosos, pois este tipo de solo apresenta uma coesão aparente que disfarça os resultados obtidos e principalmente nas camadas da Formação Barreiras.

- O ensaio Inderbtzen apresentou algumas dificuldades quanto ao seu uso, este fato deve-se na confecção do equipamento. A principal dificuldade refere-se ao uso de lamina de aço inoxidável para confecção da rampa, aconselha-se material plástico. Pois este não provocará atrito, permitindo a lâmina d'água percorrer de forma contínua.
- O ensaio Inderbizen apresentou taxa de erodibilidade alta em todas as camadas, ressalta-se que estes valores foram próximos ao encontrados nos resultados da correlação entre o ensaio de infiltração o de granulometria, apenas diferindo na camada superficial da Formação Barreiras e na unidade.
- No ensaio Inderbtzen os resultados encontrados não apresentam critérios que definam uma faixa de potencial de erodibilidade, indicativo de ocorrência ou não de processo erosivo.
- Com relação ao resultado do potencial de erodibilidade obtido pelo índice de petrificação observou-se que as camadas da Formação Barreiras apresentam alto potencial de erodibilidade devido a estas necessitarem menos de quantidades d'água para alcançar o estado saturado. E quanto ao Solo Residual por necessita de maior quantidade d'água, desta forma não apresenta potencial de erodibilidade.

- Na utilização da Metodologia MCT apresentaram-se na parte inferior da curva proposta indicando erodíveis.
- A correlação entre os resultados obtidos pelos ensaios de sedimentação e infiltração, na utilização desta proposta encontrou-se relação de erosão superior a 10% indicativo de alto potencial de erodibilidade.
- Pode-se observar ensaios de erodibilidade assemelharem-se ao processo de erosão superficial, a exemplo: ensaio Inderbizen, Metodologia MCT e Correlação dos resultados dos ensaios de sedimentação e infiltração. No ensaio de dispersão rápida não quantifica erodibilidade devido algum processo de erosão, e sim ao potencial do solo a resistir a erosão submerso. O ensaio furo de agulha quantifica erodibilidade assemelhando o ensaio ao processo de erosão interna. E o índice de petrificação é indicado apenas a medir potencial de erodibilidade em solos argilosos. Por fim, no ensaio de desagregação limita-se também ao estudo do fenômeno em resistir a erosão submerso ou estágio de submersão, e não é aconselhado em solos argilosos. Por fim no ensaio de desagregação limita-se também ao estudo do fenômeno em resistir a erosão submerso ou em estágios de submersão, e não é aconselhado em solos argilosos.

Para dar continuidade ao entendimento do processo erosivo, sugere-se:

- Estudo das propriedades mineralógicas dos materiais.
- Ampliar ao estudo da correlação dos ensaios de compactação.

- Estudo da resistência através de ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada.
- Estudo do ensaio de Inderbizen com material compactado e com declividades diferentes.

## BIBLIOGRAFIA

- ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (1991). "Diretrizes para Execução de Sondagens". São Paulo.
- ALCÂNTARA, M. A. T. (1997). "Aspectos Geotécnicos da Erodibilidade dos Solos". Dissertação de Mestrado, EESC / USP, São Carlos, SP, Brasil.
- ALHEIROS, M. M. & FERREIRA, M. (1991). " A Formação Barreira - Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte". UFPE, vol. 10, pp. 77-88.
- ANDRADE, G. O. (1955). "Itamaracá - contribuição para o estudo geomorfológico da costa Pernambucana". Recife, imprensa Oficial, pp. 84.
- ARAÚJO, F. A. R. (1994). "Contribuição ao estudo da erodibilidade de solos tropicais baseada em ensaios de sucção e na metodologia MCT". Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia de Aeronáutica, Centro Técnico Aeroespacial. São José dos Campos, SP.
- BACELLAR, L. A. P. (2000). "Condicionantes Geológicos, Geomorfologicos e Geotécnicos dos Mecanismos de Voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG". Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- BASTOS, C. A. B.; MILITITSKYY, J.; DIAS, R. D. (1997). "Avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais da região metropolitana de Porto Alegre". In:

Anais do VI Simpósio Nacional de Controle de Erosão,  
Presidente Prudente, SP.

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y. e DIAS, R. D. (1998).  
"Avaliação da Erodibilidade de Perfis de Solos  
Residuais da Grande Porto alegre". XI Congresso  
Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia  
Geotécnica, XI COBRAMSEG, Vol. I, pp. 557 - 563.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J. e GEHLING, W. Y. Y.  
(1999). "Emprego do Ensaio de inderbtzen e da  
Metodologia MCT no Estudo da Erodibilidade de Solos  
Residuais da Grande Porto Alegre". IX CBGE.

BASTOS, C. A. B. (1999<sup>a</sup>) "Estudo Geotécnico sobre a  
Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados". Tese  
de Doutorado, UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil.

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y. e MILITITSKY, J.  
(2000). "Avaliação Geotécnica da Erodibilidade dos  
Solos". II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica  
da Região Sul, GEOSUL, pp 203 - 211.

BENDER, H. (1985). "Erosion: Um Probleme de resistance au  
cisaillement em fonction du chemin des contraintes  
pendant l'infiltration". In: 1<sup>o</sup> INTERNACIONAL  
CONFERENCE ON GEOMECHANIS IN TROPICAL LATERITIC AND  
SAPROLITIC SOILS, Brasília / DF. Proceedings...,  
Brasília / DF: ABMS, v. 2, p. 15-25.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (1985). "Conservação do  
solo". Piracicaba, Livroceres.

BIGARELLA, J. J. & ANDRADE, G. Q. (1964). "Considerações  
sobre a estatigrafia dos sedimentos cenozóicos em

- Pernambuco (Grupo Barreiras)". Arq. Inst. Ciênc. Terra, Univ. Recife, v. 2, pp. 1-14.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. (1994). "Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais". Vol. 1 e 2, Editora da UFSC, Florianópolis.
- BOUYOUCOS, G. J. (1935). "The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion". Journal of American Society Agronomy, v.27, p.738-774.
- BRANCO, S. M. & ROCHA, A. A. (1987). "Elementos de Ciências do Ambiente". CETESB / ACETESB, São Paulo, SP.
- BRANNER, J. C. (1920). " Geology of rhe northeast coast of Brazil". Geol. Soc. América Beill.,13, pp. 41-98.
- BRYAN, R. B. (1976). "Considerations on Soil Erodibility Indices and Sheetwash". Catena, vol. 3, 99-111, Giessen.
- BRYAN, R. B. (2000). "Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope". Geomorphology, v. 32, pp. 385-415.
- BUERLEN, K. (1970). "Geologie von Brasilien Berlin. Gebr. Borntraeger". Cap VI, Die tertear-quartare aus geshaltee ng, 3, Nordest Brasilien, pp. 336-353.
- BURGOS, P. C.; VILAR, O. M. e DE ALCÂNTARA, M. A. T. (1999). "Um Estudo Preliminar da Erodibilidade de alguns solos da Cidade de Salvador - BA". 4º CBGE, REGEO'99. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP.

CAMPOS, T. M. P.; ANDRADE, M. H. N.; GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS, E. A. (1998). "Análisis of the failure of a saturated gneissic residual soil slope in Rio de Janeiro, Brazil. Caracterização Geotécnica de Movimentos de Taludes no Contexto Brasileiro". Mini-Curso, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro.

CESP. "Manual de Laboratório Central de Engenharia Civil". MSL-12.

CONCIANI, W. (1998). "Surgimento de voçorocas em áreas de solo colapsível". 6º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CONTROLE DE EROÇÃO, Presidente Prudente / SP. Anais...Presidente Prudente / SP: ABGE (em CD).

COSTA, F. de Q. (1996). "Problemas de estabilidade de taludes em solo residual de gnaisse - Análise do escorregamento do Espinhaço da Gata, PE - 89 / Pernambuco". Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UFPE. Recife, PE.

COUTINHO, R. Q.; OLIVEIRA, J. R.; DE LIMA FILHO, M. F.; SANTOS, L. M.; GOMES, F. S.; DA SILVA, E. P.; NUNES, A. P. S.; COELHO, F. A. B.; DE MELO, D. P. (1999). Relatório Técnico. "Análise Técnica Preliminar da Erosão no Cabo de Santo Agostinho (Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti)". FUNCEF, Recife, PE.

COUTINHO, R. Q.; OLIVEIRA, J. R.; DE LIMA FILHO, M. F.; COELHO, F. A. B.; SANTOS, L. M. (1999a) "Estudo da Erosão da Encosta do Horto de Dois Irmãos - PE". Anais em CD. 9º CBGE.



- COUTINHO, R. Q. & FRANÇA, A. E. (1998). "Estudo da Erosão do Horto de Dois Irmãos". Relatório Técnico II. UFPE, Recife, v. 1.
- DAEE (1990). "Controle de Erosão: Bases Conceituais e Técnicas; Diretrizes para o Planejamento Urbano e Regional; Orientações para o Controle de Boçorocas Urbanas". São Paulo, DAEE - IPT, 1989, 2º Edição.
- DEERE, D. U. & PATTON, F. D. (1974). "Slope Stability in Residual Soils". Proc. 4<sup>nd</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Jua. Vol. 1, pp.98-170.
- EMBRAPA (1997). "Manual de Métodos de Análise de Solo" Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 2ª. Edição. Rio de Janeiro, RJ.
- EMBRAPA (1999). "Sistema Brasileiro de Classificação de Solos" Brasília, DF.
- FÁCIO (1991) J. A. "Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal". Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. UNB. Brasília.
- FERNANDES, M. do C. (1998). "Geologia do Maciço da Tijuca - RJ: uma abordagem Geo-hidroecológica". Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. UFRJ. Rio de Janeiro.
- FERREIRA, S. R. de M. (1982). "Compressibilidade de uma argila orgânica mole do Recife". Dissertação de Mestrado. COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

- FUTAI, M. M. (2000) "Comportamento Colapsível de Solos Tropicais Brasileiros: Brazilian Tropical Soils Collapsible Behavior". VII Congresso Nacional de Geotecnia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, Porto. Vol. 1, p.p. 193 - 203.
- GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (1998). "Geomorfologia e Meio Ambiente". Editora Bertrand Brasil, 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ.
- GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (1998). "Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos". Editora Bertrand Brasil, 3ª Edição. Rio de Janeiro, RJ.
- GUSMÃO FILHO J. A.; MELO, L. V. e MALHEIROS, M. M. (1992) "Estudo das encosta de Jaboaão dos Guararapes". 1ª. COBRAE, Vol 1, pp 191.
- HANSON, G. J.(1996). "Investigating soil strength and stress-strain indices to characterize erodibility". Transactions of ASAE, V. 39, n.3, p. 883-890.
- HEAD (Vol. 2). "Manual of Soil Laboratory Testing - Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests" Second Edition, John Wiley & Sons, INC. New York - Toronto.
- IG-SP: Instituto Geológico - São Paulo (1996). "Mapeamento da suscetibilidade à erosão na bacia do rio Quilombo-SP". Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Coordenadoria de Informações Técnicas, Documentação e Pesquisa Ambiental. Boletim nº 12.

- IG: Instituto Geológico (1996) "Mapeamento de suscetibilidade à erosão na bacia do rio Quilombo - SP" São Paulo.
- INFANTI JR., N. e FORNASARI FILHO, N.(1998) "Processos de Dinâmica Superficial". In: Geologia de Engenharia, ed. Antônio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves de Brito, São Paulo, ABGE, cap. 9, p. 131-152.
- ISSMFE (1985). "Peculiarities of Geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils - Progress Report". Committee on Tropical Soils of the ISSMFE, ABMD, São Paulo.
- JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. (1957). "The Additional Settlement of Foundations due to a collapse of Structure of Sand Subsoils on Wetting". Proc. 4<sup>nd</sup> ISSMFE, vol. 1, pp. 316-319.
- JORNAL DO COMMERCIO, Informe especial "*Onde tudo começou*". Recife, 19 de janeiro de 2001.
- KEGEL, W. (1957). "Contribuição ao estudo da bacia costeira do Rio Grande do Norte". D. N. P. M., Div. Geol. Min-Bol., pp.52.
- LAFAYETTE, K. P. V. (2000). "Comportamento Geomecânico de solos de uma topossequência na Formação Barreiras em uma encosta na área urbana do Recife - PE". Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UFPE. Recife, PE.
- LAL, R. (1990). "Soil Erosion in the tropics". New York, McGraw Hill.

- LAMBE, P. C. (1996). "Residual Soils". LANDSLIDES - Investigation and Mitigation Special Report 247. Transportation Research Board - National Research Council. USA. Vol. 1, pp. 507-524.
- LIMA FILHO, M. F. (1998). "Análise Estrutural e Estratigráfica da Bacia Pernambuco". Tese de Doutorado. IG-USP. 136p.
- LLOPIS TRILLO, G. (1999). "Control de la erosión y obras de desagüe" - *Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes*. Entorno Grafico S. L., Madri.
- MABESOONE, J. M. (1966). "Relief on northeastern Brazil and its correlated sediments". Geomorf Feitsch, Berlim, NF10, pp. 419-453.
- MABESOONE, J. M. (1967). "Sedimentologia da faixa sedimentar costeira Recife - João Pessoa". Bol. Soc. Bras. Geol., São Paulo, 16(1), pp. 57-72.
- MABESOONE, J. M. (Coord.), (1987). "Revisão da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, e do seu embasamento". Univ. Fed. de Pernambuco, FINEP/PADCT, relat. Interno, 60 p. mimeografado.
- MARSHALL, T. J.; HOLMES, J. W.; ROSE, C. W. (1996). "Soil Physics". Cambridge University Press.
- MATTOSO, S. Q. & ROBERTSON, f. S. (1959). "Uso Geológico do termo Barreiras". Bol. Técn. Petrobrás, 2 (3), pp. 37-43.

- MELO, L. V. (1990). "A Erosão Urbana e seus Impactos Ambientais nos Morros da Cidade do Recife" 6<sup>a</sup>. CBGE, IX COBRAMSEF, Vol. 1, pp 353. ABMS E ABGE.
- MIDDLETON, R. E. (1930). " Properties of soils wich influence soil erosion". V. S. Dept. Agric. Tech. Bull. 178, pp.16
- MORAIS SILVA, T. R. (2000) "Caracterização e erodibilidade dos solos de uma voçoroca na região de Ouro Preto, Minas Gerais". Tese de Mestrado. COPPE / UFRJ.
- MOREIRA, C. V. R. & PIRES NETO, A. G. (1998) "Clima e Relevo". Geologia de Engenharia. Cap. 5, pp. 69. ABGE.
- MOTA, S. (1981). "Planejamento Urbano e Preservação Ambiental". Edições UFC, Fortaleza.
- MOTA, S. (1997). "Introdução à Engenharia Ambiental". Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, Rio de Janeiro, RJ, pp 81 - 88.
- NASCIMENTO, V. & CASTRO, E. (1974). "Preventive measure against slope erosion; criteria for soil selection". In: Anais do IAEG Congress, v. 2, tema 5, São Paulo.
- NASCIMENTO, V. & CASTRO, E. (1976). "Erosão. Critérios de Seleção de solos". Geotecnia, v. 20, pp. 17-33.
- NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. (1995). "Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos". Editora Vilibor. São Paulo, SP.
- Normas do DNER.

Normas da ABNT.

PINTO, C. S. (2000). "Curso Básico de Mecânica dos Solos"  
Oficina de Textos. São Paulos, SP.

POPP, J. H. (1998). "Geologia Geral". LTC - Livros Técnicos  
e Científicos Editora S. A. Rio de Janeiro, RJ.

REGINATTO, A. R. & FERRERO J. C. (1973). "Collapse  
Potencial of Soils and Soil Water Chemistry". VIII  
ICSMFE, Moscow, vol.2.2, pp. 177-183.

REZENDE, S. B. & RESENDE, M. (1996). "Solos dos mares de  
morros: Ocupação e Uso". In: O solo nos grandes  
domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento  
sustentável, Ed. UFV, pp. 262-288, Viçosa, MG.

ROSA, R. (1995). "Introdução ao Sensoriamento Remoto"  
Editora da Universidade Rederal de Uberlândia.  
Uberlândia, MG.

SANTOS, R. M. M. e CARVALHO, J. C. (1998) "Ensaio de  
Erodibilidade em Voçorocas do Município de Goiânia". XI  
COBRAMSEG, Vol I, pp. 581 - 588.

SANTOS, L. M. (2001). "Caracterização Geotécnica de um Solo  
Não Saturado sob Processo Erosivo". Dissertação de  
Mestrado DEC - UFPE. Recife-PE.

SANTOS, A. R. & NAKASAWA, V. A. (1992). "Erosão e  
assoreamento na região metropolitana de São Paulo". In:  
Problemas Geol. e Geotécnicos na Região Metropolitana  
de São Paulo, ABGE, pp. 177-194, São Paulo.

SANTOS, R. M. M. (1997). "Caracterização e Erodibilidade dos solos de uma voçoroca na região de ouro Preto - MG". Dissertação de Mestrado, PEC - COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA FILHO, F. C.; ALMEIDA, M. S. S.; FUTAI, M. M. (1998). "Avaliação de um Modelo Elatoplástico em Solos Colapsíveis via Método dos Elementos". XI COBRAMSEG, Vol I, pp. 341 -348.

SKEMPTON, A. W. (1953) "The Colloidal Activity of Clays". Proc. III Inter. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Zurich. Vol. 1, pp. 57-61.

SOUZA NETO, J. B. (1998). "Características Geotécnicas do solo residual de gnaiss da encosta Espinhaço da Gata, PE - 89, Machados - PE." Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UFPE. Recife, PE.

SOUZA PINTO, C. (1998). "Propriedades dos solos". Fundação - Teoria e Prática. ABMS / ABEF, Edt. Pini. 2º edição, pp. 51 - 117. São Paulo, SP.

SOUZA PINTO, C. (2000). "Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas". Ed. Oficina de Textos, São Paulo, SP.

THORNES, J. B. (1990). "Vegetation and Erosion - Processes and Environments". John Wiley & Sons Ed., Baffins Lane - Chichester, England.

TOWNSEND, F. C. (1985). "Geotechnical Characteristics of Residual Soils". JSMFED, ASCE. Vol. 111, nº 1, pp. 77-94.

- VARGAS, M. (1973). "Structurally unstable soils in Southern Brazil". In: Proceedings of VIII international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 2, pp. 239-246, Moscou.
- VERTAMATTI, E. & ARAÚJO, F. A. R. (1990). "Critério para previsão do potencial erosivo de solos tropicais". 24º Reunião Anual de Pavimentação, Belém, PA. Anais... Rio de Janeiro / RJ: ABPv, vol. 1, pp. 328-348.
- VERTAMATTI, E.; ARAÚJO, F. A. R.; PAPPALARDO, F. R. (1990). "Um estudo da erodibilidade de solos tropicais". In: Anais do VI CBGE/IX COBRAMSEF, vol. 1, pp. 363-369, Salvador.
- VERTAMATTI, E. & ARAÚJO, F. A. R. (1998). "Elaboração de ábaco de erodibilidade de solos tropicais". In: II COBRAMSEG, Brasília, DF. Anais ... Brasília / DF: ABMS. Vol. 1, p. 573-579.
- VILAR, O. M. & PRANDI, E. C. (1993). "Erosão dos Solos". Solos do Interior de São Paulo. ABMS E USP. São Carlos, SP.
- VILIBOR, D. F.; NOGAMI, J.S.; FABBRI, G. T. P. (1986). "Proteção à Erosão em Pavimentos de Baixo Custo". Anais da 21º Reunião Anual de Pavimentação. Salvador, vol. II, 412/430. ABPv. Rio de Janeiro, RJ.
- WALKER, R. G. (1992). "Clastic Sediments" - *Undertanding the Earth - a new synthesis*. Edit. G. C. Brown, Great Britain.



- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1958). "Rainfall energy and its relationship to soil loss". Trans. Am. Geophys. Um., 39:258-291.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1962). "Soil loss estimation as a tool in soil and water manegement planing". Int. Assoc. Scinet. Hydrol. Pub.,59:148-159.
- WOLLE, C. M. (1998). "Landslides in Serra do Mar, Southeastern Brazil. Caracterização Geotécnica de Movimento de Taludes no Contexto Brasileiro". Mini-curso, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- YODER, R. E. (1936). "A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses". Journal of the American Society Agronomy, V. 28, p. 337-351.