

✓



**ESTUDO DA ERODIBILIDADE
DE
ALGUNS SOLOS
DO
ESTADO DE SÃO PAULO**

MARCELO AUGUSTO TAVARES DE ALCÂNTARA



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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

Class.	TESE
Curr.	0165
Tombo	T0043198

31100006997

S/S 942175

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

A347e Alcântara, Marcelo Augusto Tavares de
Estudo da erodibilidade de alguns solos do
Estado de São Paulo / Marcelo Augusto Tavares de
Alcântara. -- São Carlos, 1997.

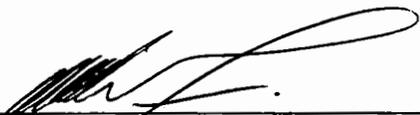
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Área: Geotecnia.
Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar.

1. Erosão. 2. Mecânica dos solos.
3. Erodibilidade. 4. Ensaio. I. Título.

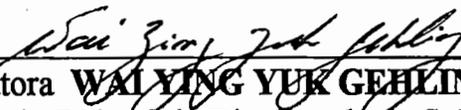
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **MARCELO AUGUSTO TAVARES DE ALCÂNTARA**

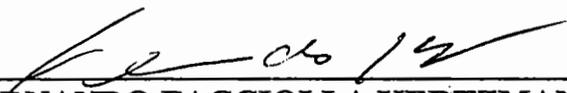
Dissertação defendida e aprovada em 16-12-1997
pela Comissão Julgadora:



Prof. Associado **ORENCIO MONJE VILAR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Profa. Doutora **WAI YING YIK GEHLING**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS)



Doutor **FERNANDO FACCIOLLA KERTZMAN**
(Geotec)



JOSÉ CARLOS A CINTRA
Coordenador da Área de Geotecnia e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Realizar um trabalho é um sonho alcançado.
Nunca acorde antes de terminar um sonho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Orencio Monje Vilar, pela paciência, dedicação, orientação, sobretudo pela amizade cultivada.

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo - FAPESP, pela concessão da bolsa de pesquisa.

Aos Engenheiros Paulo Cesar Burgos, Ronaldo Lima Gomes, Adilson do Lago Leite e Marcos Rogério Malta pela colaboração, discussões, e principalmente pela amizade conquistada.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Geotecnia da EESC/USP com especial agradecimento à José Luis, Oscar, Antônio e Benedito.

À meus pais (João e Carmen), minhas irmãs (Sandra, Márcia e Patrícia) e minha noiva (Adriana), pelo apoio e incentivo prestados.

À todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC/USP.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. GENERALIDADES DO PROCESSO EROSIVO PELA CHUVA	3
2.2. DINÂMICA DO PROCESSO EROSIVO ATRAVÉS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	6
2.2.1. ATUAÇÃO DA GOTA	10
2.3. EROSIVIDADE	14
2.4. ERODIBILIDADE	19
2.4.1. AÇÃO DO FLUXO SUPERFICIAL	19
2.4.2. ASPECTOS GERAIS SOBRE A ERODIBILIDADE DOS SOLOS	20
2.4.3. INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS DE SOLO	25
2.4.4. MEDIDAS DE ERODIBILIDADE	27
2.5. MODELOS PARA CÁLCULO DA EROSÃO	32
2.6. USO DO MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR (1979)	36
2.6.1. ENSAIOS DO MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR (1979)	37
2.7. GENERALIDADES SOBRE OS SOLOS TROPICAIS	38
2.7.1. DETERMINAÇÃO DO FATOR K PELO ÁBACO DE WISCHMEIER (1971):	38
2.7.2. UTILIZAÇÃO DOS VALORES DE K OBTIDOS EM ÁREAS EXPERIMENTAIS:	39
2.7.3. VARIAÇÃO VERTICAL NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS AO LONGO DE PERFIS LATERÍTICOS:	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1. INTRODUÇÃO	42
3.2. MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COLETADOS	46

3.3. ENSAIOS PARA ESTUDO DA ERODIBILIDADE	49
3.3.1. MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR, 1979	49
3.3.2. MÉTODO LNEC (NASCIMENTO & CASTRO, 1976)	52
3.3.3. ESTABILIDADE DE AGREGADOS	55
3.3.4. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE	57
3.3.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	60
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS	61
4.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES	70
4.3. ENSAIOS PARA ESTUDO DA ERODIBILIDADE	75
4.3.1. ESTABILIDADE DE AGREGADOS	75
4.3.2. INFILTRABILIDADE E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO (MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR, 1979)	78
4.3.3. MÉTODO LNEC (NASCIMENTO E CASTRO, 1976)	82
4.3.4. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE	85
4.3.5. RELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS	88
5. CONCLUSÕES	97
6. ANEXO	100
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1-1 - Tipos de erosão (Lal, 1990)</i>	1
<i>Figura 2-1 - Perdas de solo ao longo da distância para erosão em sulcos e inter-sulcos (Meyer et al, 1975)</i>	5
<i>Figura 2-2 - Influência da forma da encosta (Young & Mutchler, 1969b adaptado por Meyer et al, 1975)</i>	6
<i>Figura 2-3 - escoamento laminar uniforme em talude infinito</i>	7
<i>Figura 2-4 - Componentes esquemáticos do balanço hidrológico próximo à superfície (Carson & Kirkby, 1975)</i>	9
<i>Figura 2-5 - Situações de transporte de partículas por splash</i>	11
<i>Figura 2-6 - Velocidade terminal de gotas de chuva</i>	12
<i>Figura 2-7 - Mecanismo de splash - (a) alta resistência ao cisalhamento; (b) baixa resistência ao cisalhamento</i>	13
<i>Figura 2-8 - Mapa de isoerosividade da chuva para o Estado de São Paulo (Bertoni & Lombardi Neto, 1990)</i>	15
<i>Figura 2-9 - Relações entre energia cinética e intensidade de precipitação (Hudson, 1973)</i>	17
<i>Figura 2-10 - Esquema do ensaio de cilindro rotatório</i>	28
<i>Figura 2-11 - Nomograma para obtenção do fator de erodibilidade do solo (K). Multiplicar os valores lidos por 0,13 para convertê-los para ton.h/MJ.mm.</i>	35
<i>Figura 2-12 - Principais Tipos de erosão em solos tropicais.</i>	40
<i>Figura 2-13 - Distribuição de solos tropicais sobre a terra (Gidigas, 1976)</i>	41
<i>Figura 2-14 - Distribuição de solos lateríticos no Brasil</i>	41
<i>Figura 3-1 - Retirada de amostras indeformadas.</i>	42
<i>Figura 3-2 - Baixa a Nenhuma erodibilidade (parte superior da foto) - alta erodibilidade (parte inferior da foto)</i>	44
<i>Figura 3-3 - Baixa a Nenhuma erodibilidade</i>	44
<i>Figura 3-4 - Equipamento para realização de Análise Térmica Diferencial.</i>	47
<i>Figura 3-5 - Equipamentos para ensaio de Adsorção de Azul de Metileno.</i>	49
<i>Figura 3-6 - Ensaio de absorção d'água (Nogami & Villibor, 1979).</i>	50
<i>Figura 3-7 - Ensaio de perda de massa por imersão.</i>	51
<i>Figura 3-8 - Fluxograma para escolha de solos resistentes à erosão.</i>	54
<i>Figura 3-9 - Agregados preparados para análise.</i>	55
<i>Figura 3-10 - Equipamento original do ensaio de cone.</i>	57
<i>Figura 3-11 - Esquema do equipamento para ensaio de penetração de cone.</i>	58

<i>Figura 3-12 - Equipamento do ensaio de penetração de cone.</i>	59
<i>Figura 3-13 - Esquema de saturação do corpo de prova para ensaio de compressão simples.</i>	60
<i>Figura 4-1 - Comparação de curva granulométrica (água x hexametáfosfato de sódio)</i>	64
<i>Figura 4-2 - Curva de compactação Proctor Normal (amostras 07 e 08)</i>	66
<i>Figura 4-3 - ATD da amostra 07.</i>	67
<i>Figura 4-4 - ATD da amostra 08.</i>	67
<i>Figura 4-5 - Classificação do solo através da técnica de adsorção de azul de metileno (Fabbri, 1994).</i>	69
<i>Figura 4-6 - Curvas tensão deformação para as amostras na umidade natural e saturada</i>	73
<i>Figura 4-7 - Resistência à compressão simples x variação de resistência.</i>	75
<i>Figura 4-8 - Diâmetro Médio Ponderado, após ensaio de Estabilidade de Agregados.</i>	77
<i>Figura 4-9 - Areia fina + silte x diâmetro médio ponderado.</i>	78
<i>Figura 4-10 - Gráfico para obtenção do índice de absorção S - Amostra 11 (método de Nogami & Villibor, 1979)</i>	79
<i>Figura 4-11 - Resultados do método de Nogami & Villibor, 1979 (amostras com dimensões normais).</i>	80
<i>Figura 4-12 - Resultados do método de Nogami & Villibor, 1979 (amostras com dimensões modificadas)</i>	81
<i>Figura 4-13 - ρ_d x índice de erodibilidade de Nogami & Villibor, 1979.</i>	82
<i>Figura 4-14 - Resultados do ensaio de limite de absorção - comparação entre w'_A e w_o.</i>	85
<i>Figura 4-15 - Relação entre DP e penetração natural.</i>	87
<i>Figura 4-16 - Variação de penetração (%) - comparação entre as amostras</i>	87
<i>Figura 4-17 - Penetração de cone natural x resist. Compressão simples natural.</i>	88
<i>Figura 4-18 - Penetração de cone saturada x resist. compressão simples saturada.</i>	89
<i>Figura 4-19 - Variação de penetração x variação de resist. compressão simples.</i>	90
<i>Figura 4-20 - Variação de penetração do ensaio de cone x índice de absorção de Nogami & Villibor, 1979.</i>	91
<i>Figura 4-21 - Variação de penetração do ensaio de cone x índice de absorção de Nogami & Villibor, 1979.</i>	91
<i>Figura 4-22 - Variação de penetração de cone x índice de erodibilidade E de Nogami & Villibor, 1979.</i>	92
<i>Figura 4-23 - ρ_d (g/cm^3) x variação de penetração de cone (%).</i>	93
<i>Figura 4-24 - Umidade na saturação x variação de penetração de cone.</i>	94
<i>Figura 4-25 - Agregados < 0,50 mm x variação de penetração.</i>	95
<i>Figura 4-26 - Areia fina + silte x adimensional.</i>	96
<i>Figura 4-27 - Diâmetro médio ponderado x adimensional.</i>	96
<i>Figura 6-1 - Amostra 01.</i>	100

<i>Figura 6-2 - Amostras 02 e 03.</i>	101
<i>Figura 6-3 - Amostra 04.</i>	102
<i>Figura 6-4 - Amostra 05.</i>	103
<i>Figura 6-5 - Amostra 06.</i>	104
<i>Figura 6-6 - Amostras 07 e 08.</i>	105
<i>Figura 6-7 - Amostra 09.</i>	106
<i>Figura 6-8 - Amostras 10 e 11.</i>	107
<i>Figura 6-9 - Amostra 12.</i>	108
<i>Figura 6-10 - Amostra 13.</i>	109
<i>Figura 6-11 - Amostra 14.</i>	110
<i>Figura 6-12 - Amostra 15.</i>	111
<i>Figura 6-13 - Amostra 16.</i>	112
<i>Figura 6-14 - Amostra 17.</i>	113
<i>Figura 6-15 - Gráfico para obtenção do índice de absorção</i>	118
<i>Figura 6-16 - Figuras da Análise Térmica Diferencial</i>	121

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2-1 - resumo dos fatores que influem na erodibilidade do solo (Lal, 1990)</i>	21
<i>Tabela 3-1 - Informações sobre os pontos amostrados.</i>	45
<i>Tabela 4-1 - Resultados da caracterização dos materiais amostrados.</i>	65
<i>Tabela 4-2 - Parâmetros de compactação.</i>	66
<i>Tabela 4-3 - Resultados da caracterização mineralógica por ATD.</i>	68
<i>Tabela 4-4 - Resultados dos ensaios de compressão simples.</i>	74
<i>Tabela 4-5 - Ensaio de Estabilidade de Agregados.</i>	76
<i>Tabela 4-6 - Resultados do método de Nogami & Villibor, 1979.</i>	79
<i>Tabela 4-7 - Valores de Limites de Absorção (Nascimento e Castro, 1976)</i>	83
<i>Tabela 4-8 - Valores de % que passa na peneira #40.</i>	83
<i>Tabela 4-9 - Faixas A, B e C da Especificação AASHO M 147-55</i>	84
<i>Tabela 4-10 - Resultados do ensaio de penetração de cone.</i>	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AASHO - American Association of State Highway Officials
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ATD - Análise Térmica Diferencial
- BS - British Standard
- CTC - Capacidade de Troca Catiônica
- DMG - Diâmetro Médio Geométrico
- DMP - Diâmetro Médio Ponderado
- IAC - Instituto Agrônomo de Campinas
- LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- MCT - Miniatura - Compactada - Tropical
- NBR - Normas Brasileiras Revisadas
- USLE - Universal Soil Loss Equation
- WEPP - Water Erosion Prediction Project

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	-	Ângulo de atrito do solo
σ	-	Tensão normal
γ	-	Peso específico do solo
γ_d	-	Peso específico seco
$\gamma_{d_{\text{máx}}}$	-	Peso específico seco máximo
τ_e	-	Tensão de erosão
γ_s	-	Peso específico dos sólidos
γ_w	-	Peso específico da água
τ_w	-	Tensão tangencial devida à água
AD	-	Adimensional
c	-	Coesão do solo
C	-	Coefficiente de escoamento; Fator de práticas de cultura
CA	-	Coefficiente de Atividade
DP	-	Varição de penetração (Ensaio de cone)
DR	-	Varição de resistência (ensaio de compressão simples)
E	-	Energia cinética da chuva
E	-	Índice de erodibilidade (Nogami & Villibor, 1979)
Er	-	Coefficiente de erodibilidade (Philliponat, 1993)
G	-	Densidade relativa dos sólidos
GC	-	Grau de compactação
I	-	Intensidade de precipitação
IP	-	Índice de plasticidade
K	-	Fator de erodibilidade do solo
KE>25	-	Energia cinética para intensidades maiores que 25 mm/h
L	-	Distância medida a partir da crista do talude até um ponto arbitrado
I	-	Faixa de largura arbitrada
L	-	Fator de comprimento da encosta
LL	-	Limite de liquidez
LP	-	Limite de plasticidade
P	-	Fator de práticas contra a erosão
P	-	Perda de massa por imersão

- P_F - Percentagem de solo abaixo de um diâmetro arbitrado
- Q - Vazão de água
- R - Fator de erosividade da chuva
- R_c - Resistência a compressão simples
- RD - Relação de dispersão
- RE - Relação de erosão
- RP - Relação de percolação
- s - Resistência ao cisalhamento do solo
- S - Fator de inclinação da encosta
- S - Índice de absorção (Nogami & Villibor, 1979)
- S_r - Grau de saturação
- u - Velocidade de escoamento
- VA - Quantidade de azul de metileno consumida por 1g de solo
- V_u - Volume de enxurrada
- w - Teor de umidade
- w'_A - Limite de absorção do solo
- w_o - Teor de umidade calculado na saturação
- w_{ot} - Teor de umidade ótima

RESUMO

A erosão do solo causada pela água da chuva pode ser entendida como um conjunto de processos que resultam no destacamento e posterior transporte das partículas de solo.

Uma série de fatores contribui para o surgimento e evolução do problema. Dentre esses fatores, podem ser destacados a ação erosiva da água de chuva que se precipita e a erodibilidade do solo. A erodibilidade pode ser entendida como a maior ou menor facilidade com que as partículas de solo podem ser destacadas e posteriormente transportadas e reflete características próprias que interferem diretamente no processo erosivo.

As medidas de erodibilidade dos solos são poucas principalmente se considerada a abordagem geotécnica. Este trabalho trata das características de erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo.

Neste estudo buscou-se analisar diferentes solos, através da comparação de seu comportamento in situ e resultados de ensaios de laboratório. Na avaliação quantitativa da erodibilidade foram utilizadas a proposta de Nogami & Villibor (1979), um critério de seleção de solos proposto por Nascimento e Castro (1976), a análise granulométrica com e sem a utilização de defloculante, a estabilidade de agregados através de peneiramento em água, ensaios de compressão simples e um teste de penetração de cone, especialmente desenvolvido para esta finalidade, bem como toda avaliação das características físicas dos solos.

Encontrou-se que os métodos de análise se mostraram eficazes, pois conseguiram separar amostras com diferentes comportamentos frente à erosão. O ensaio de penetração de cone mostrou-se promissor, visto que seus resultados permitiram separar satisfatoriamente os solos erodíveis dos não erodíveis.

Utilizando os resultados obtidos por meio do método de Nogami & Villibor (1979) em conjunto com os resultados do teste de penetração de cone, as relações $DP = 46,4 S + 25$ e $DPA = 21,4 S + 20$ separam todas as amostras estudadas com comportamentos diferentes quanto à erodibilidade.

Palavras-chave: Erosão; Erodibilidade; Mecânica dos Solos; Ensaios.

ABSTRACT

Sol erosion is a process commanded by many factors which contribute to detach and transport soil particles.

In rainfall erosion the erosive potential of rain and soil erodibility are among the main factors which interfere in the process. Sol erodibility is a measure of the soil ability to sustain the stress imposed by the erosive agents and represents some soil characteristics which directly interfere in the process.

Measurements of soil erodibility are difficult and have deserved little attention from Soil Mechanics researchers. This paper deals with the erodibility of some soils from São Paulo state.

In this paper, soils of different origins were studied through the observation of their in situ responses to erosive agents which were compared with some laboratory results.

Laboratory tests included proposals Nogami & Villibor (1979), Nascimento & Castro (1976), grain size analysis performed with and without deflocculant, aggregate stability, simple compression tests and a cone penetrometer test specially developed for this work.

It was found that Nogami & Villibor (1979) and Nascimento & Castro (1976) were effective in separating the soils according to their behaviour against rain erosion and that the proposed cone test showed to be feasible since it was also able to separate erodible soils from non-erodible ones.

Keywords: Erosion; Erodibility; Sol Mechanics; Tests.

1. INTRODUÇÃO

Erosão é o conjunto de fatores físicos, químicos e biológicos naturais responsáveis pela destruição das formas salientes e pelo modelado do relevo terrestre, que pode ser acelerada pela intervenção do homem através do desmatamento, obras civis e outras modificações no meio físico. Encontra-se diretamente ligada às ações climáticas de onde advém a erosão pluvial, marinha, eólica, fluvial, etc. Uma vez erodido, o solo é considerado sedimento e o processo de sedimentação ocorre quando o sedimento é depositado, assoreando rios e vales.

A Figura 1-1 apresenta os diferentes tipos de erosão causada por diferentes agentes (Lal, 1990)

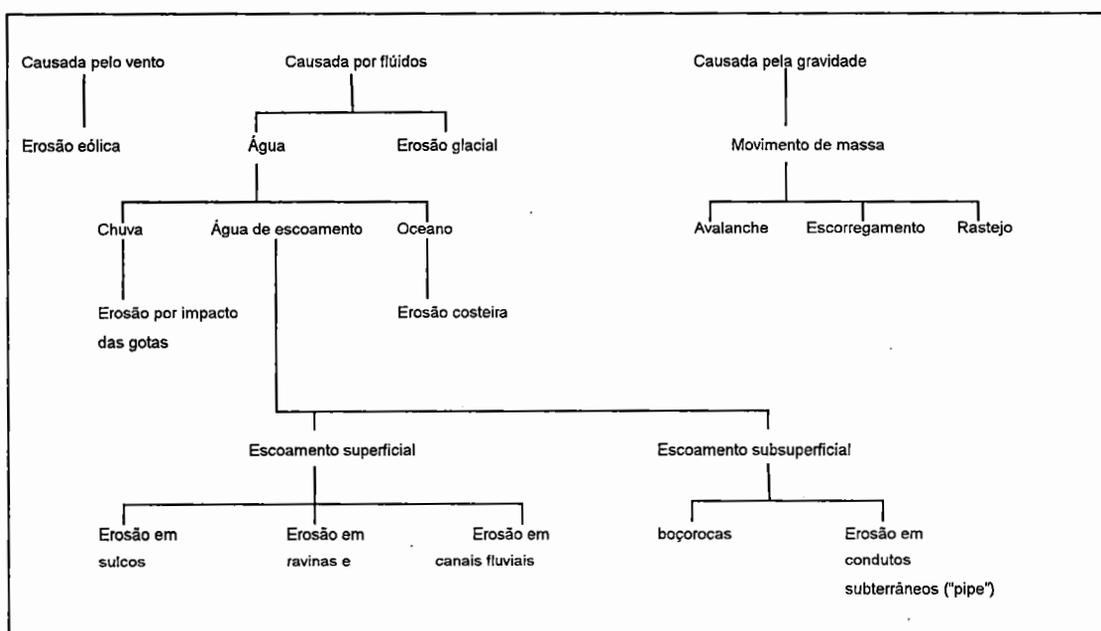


Figura 1-1 - Tipos de erosão (Lal, 1990)

Ellison (1947) descreve a erosão do solo como sendo um processo de desagregação e transporte das partículas de solo pelos agentes erosivos, que no caso da chuva são o impacto da gota e o escoamento superficial.

Costuma-se dividir a erosão em duas classes, que denominam-se geológica e acelerada. A erosão geológica (erosão natural ou normal) é um processo lento e contínuo de evolução da superfície da terra, enquanto o processo erosivo acelerado, em geral induzido pelas atividades humanas, caracteriza-se por intensa remoção de solo em curto espaço de tempo.

De acordo com Kirkby (1980), uma atitude comum é comparar a erosão do solo com outros processos de denudação de *landscapes*, mas a erosão do solo deve ser reconhecida como o problema dominante apenas, quando e onde o processo se torna mais acelerado.

Nascimento e Castro (1976) assinalam que em países de clima tropical úmido ocorrem graves problemas ocasionados pela erosão. Devido aos intensos processos de intemperização, ocorre a produção de espessos perfis de solo, que quando sujeitos à técnicas errôneas de manuseio, para qualquer que seja o fim de sua utilização, são inteiramente afetados pelos processos erosivos.

No âmbito da Mecânica dos Solos são reduzidas as proposições e modelos que tratam da medida dessa propriedade do solo, que em última análise, deve ser função de sua resistência ao cisalhamento.

O objetivo deste trabalho é estudar a erodibilidade de alguns solos típicos do Estado de São Paulo através de alguns métodos propostos na literatura geotécnica e através de um ensaio de penetração de cone especialmente desenvolvido para este trabalho.

O trabalho apóia-se na descrição qualitativa do comportamento frente à erosão dos solos no campo que é cotejado com resultados quantitativos das diversas técnicas experimentais empregadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GENERALIDADES DO PROCESSO EROSIVO PELA CHUVA

A dinâmica do processo erosivo pela chuva pode ser esquematizada segundo quatro sub processos (Ellison, 1947).

1. Destacamento de partículas pela gota da chuva.
2. Transporte do sedimento pela gota.
3. Destacamento pelo fluxo superficial.
4. Transporte pelo fluxo.

A água ao atingir o solo principia a infiltrar-se e, ao ser superada a capacidade de infiltração do solo, dá-se início ao escoamento superficial. Em pequenas áreas, o fluxo superficial movimenta-se como uma película praticamente uniforme na direção do maior gradiente. Pequenas variações de cotas e inclinações, obrigam que o fluxo se concentre, primeiramente segundo minúsculos filetes e, à medida que aumenta a vazão, segundo micro-canais ou sulcos (Meyer & Monke, 1965; Young & Mutchler, 1969; Foster & Meyer, 1972; Emmett, 1970).

Essa disposição que o fluxo toma sugere a separação do processo erosivo de acordo com as áreas de ocorrência do escoamento superficial. Em cada uma dessas regiões tem-se constatado certas particularidades de ação dos diversos sub processos erosivos. Tendo-se assim, a erosão em sulcos e a erosão inter-sulcos (Meyer et al., 1975; Foster & Meyer, 1972; 1975).

Em resumo, pode-se dizer que a característica principal da erosão inter-sulcos é o predomínio da atuação da gota, destacando e transportando partículas e ampliando a capacidade de transporte do fluxo. Com relação a erosão em sulcos, ela se encarrega de transportar partículas movimentadas pela gota, além de erodir e transportar partículas do seu próprio leito.

Existe uma associação entre vegetação, chuva e erosão. Intuitivamente, associa-se maior quantidade de chuva com maior erosão, o que nem sempre ocorre, sob qualquer condição, visto que a vegetação condicionará o processo.

Em terras cultivadas à medida que a folhagem se densifica, a erosão se torna menor, acentuando-se esse efeito quando a cobertura vegetal supera cerca de 30% da área plantada, segundo Elwell & Stocking (1976) na ex-Rodésia.

Em contrapartida, quando da retirada da vegetação, tem-se observado um crescimento grande da erosão, quando mais de 30% da área total passa a ser desprotegida (Copeland, 1965).

Os principais efeitos da vegetação, são:

1. Interceptação e retenção da chuva, além da evapotranspiração;
2. Proteção do solo contra a atuação da gota e aumento da resistência aos escoamentos superficiais, conseqüentemente produzindo a deposição de partículas por interceptação ou por redução de velocidade;
3. Retenção e aglutinação do solo por ação das raízes, formando agregados mais estáveis e aumentando as taxas de infiltração.

Além da vegetação, existe uma forte relação entre a topografia e a erosão. Dos fatores topográficos, ressaltam-se o comprimento, a declividade e a forma da encosta.

A quantidade de solo removida de uma área tem sido relacionada ao comprimento, segundo uma expressão potencial da distância (Zingg, 1940; Wischemeier & Smith, 1978; Bertoni, 1959), onde a erosão média que reflete a contribuição global da área é função do comprimento da encosta elevado a um expoente comumente variando entre 0,2 e 0,8 (0,63 para solos paulistas, segundo Bertoni (1959)).

De maneira geral onde há predominância de sulcos ocorre um maior crescimento da erosão enquanto que a erosão inter-sulcos tende a um valor constante à medida que crescem as distâncias (Figura 2-1), segundo ensaios efetuados com um solo siltoso submetido a uma chuva artificial de 62,5 mm/h por 2 horas (Meyer et al., 1975).

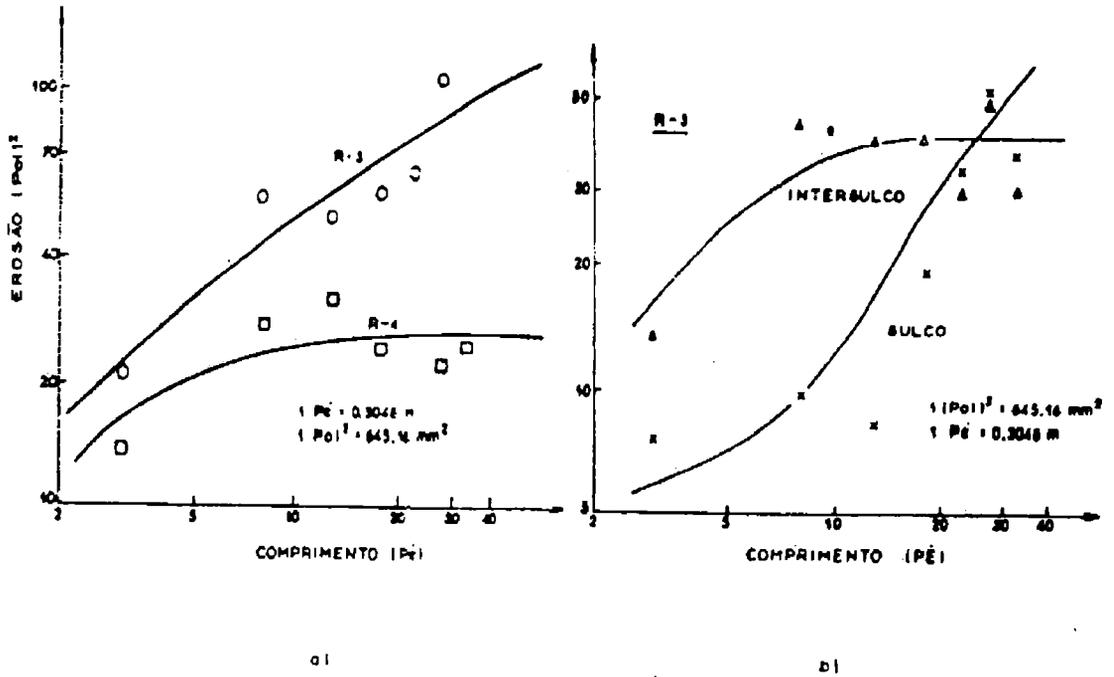


Figura 2-1 - Perdas de solo ao longo da distância para erosão em sulcos e inter-sulcos (Meyer et al, 1975)

Em relação à declividade os resultados experimentais de Young & Onstad (1978) e de Meyer et al. (1975) atribuem uma pequena dependência da erosão inter-sulcos em relação à declividade, enquanto que a erosão pelo fluxo nos sulcos, por ser função da tensão cisalhante provocada, depende diretamente da declividade.

Com relação à forma das encostas Young & Mutchler (1969b) assinalam que uma encosta retilínea perde mais solo que uma encosta côncava, porém menos que uma encosta convexa, fato que pode ser constatado através da Figura 2-2.

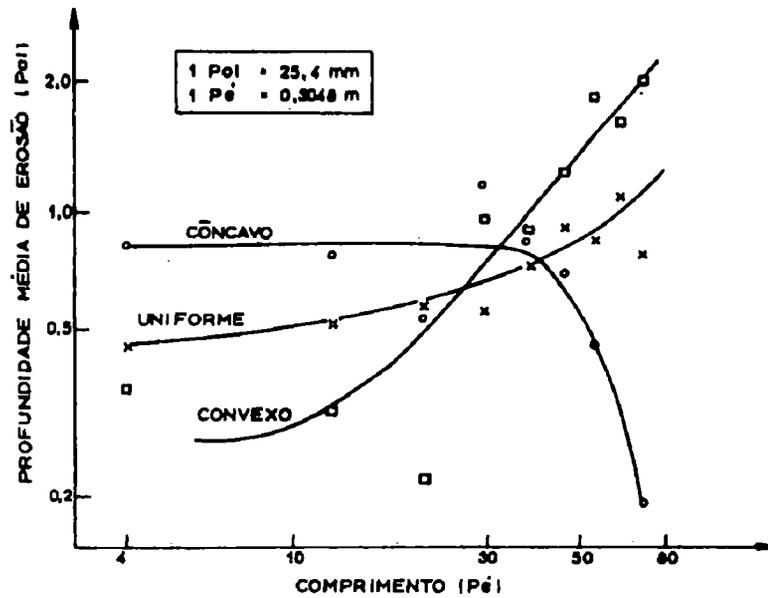


Figura 2-2 - Influência da forma da encosta (Young & Mutchler, 1969b adaptado por Meyer et al, 1975)

2.2. DINÂMICA DO PROCESSO EROSIVO ATRAVÉS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A erosividade das chuvas, isto é, a sua qualidade de provocar erosão nos solos, é devida como já foi visto a dois fatores principais: a energia de impacto no solo das gotas de chuva e a força de arrastamento do fluxo de água sobre a superfície do terreno.

Com relação ao fluxo de água (escoamento), o mecanismo genérico pelo qual ele promove a erosão pode ser esquematizado do seguinte modo:

Na Figura 2-3 a lâmina d'água formada pelo escoamento superficial sobre a face do talude apresenta-se como uma camada de espessura uniforme (Nascimento e Castro, 1976).

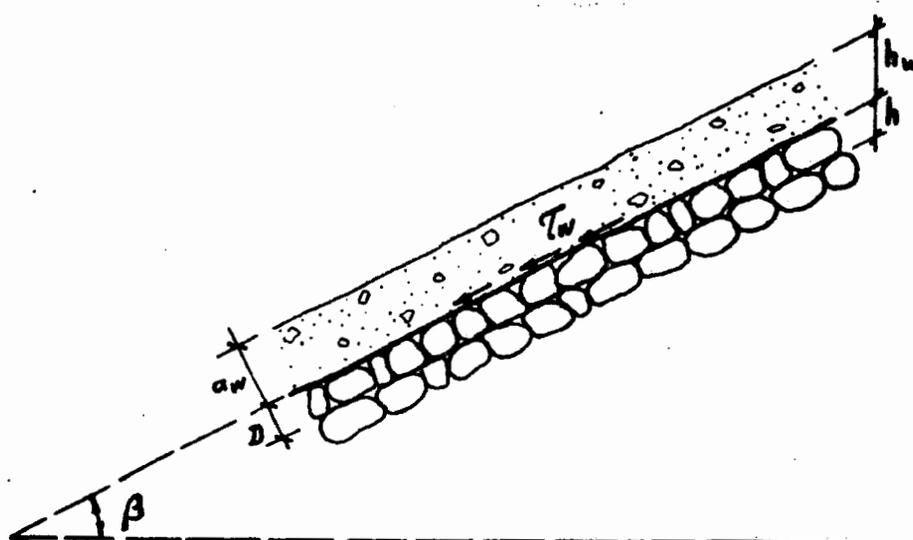


Figura 2-3 - escoamento laminar uniforme em talude infinito

Essa camada líquida exerce sobre a superfície do solo uma tensão tangencial τ_w que, supondo o talude infinito, é dada pela conhecida expressão relativa aos taludes infinitos.

$$\tau = \gamma h \operatorname{sen}\beta \cos\beta \quad \text{Equação 2-1}$$

Que não é impedida de se aplicar também à camada líquida, desde que seja substituído o peso específico do solo pelo da água, daí tem-se.

$$\tau_w = \gamma_w a_w \operatorname{sen}\beta \quad \text{Equação 2-2}$$

Essa tensão é denominada de “tractive force” ou “força de arrastamento” considerada em hidráulica na erosão de canais, uma vez que $\operatorname{sen}\beta$ é o gradiente hidráulico do canal, praticamente igual à inclinação ($\tan\beta$) quando esta é pequena.

Se esta força de arrastamento atinge um certo valor limite, as partículas do solo começam a deslocar-se, iniciando assim a erosão. Essa tensão é denominada de tensão de erosão (τ_e).

Se a lâmina de água que escoar pelo talude é constituída apenas por água limpa proveniente da chuva, a sua espessura a_w pode ser deduzida da expressão seguinte.

$$Q = l a_w u \quad \text{Equação 2-3}$$

onde:

Q: vazão d'água que escoar com velocidade u (m/min) ao longo de uma faixa do talude de largura l .

O valor dessa lâmina a uma distância L (m) medida a partir da crista do talude e correspondente à faixa de largura l (m) será dada pela expressão abaixo.

$$Q = C i L \text{ (litros/min)} \quad \text{Equação 2-4}$$

onde C é o coeficiente de escoamento e $i = \Delta p / \Delta t$ é a intensidade de precipitação em mm/min.

Igualando a equação 2-3 com a equação 2-4 tira-se o valor de a_w e substituindo-se na equação 2-2 obtêm-se a seguinte expressão para a tensão de arrastamento

$$\tau_w = C \gamma_w (l / u) L \text{ sen} \beta \quad \text{Equação 2-5}$$

O escoamento superficial, ao mesmo tempo que realiza o destacamento, transporta e deposita as partículas de solo. O volume de escoamento sobre a superfície do solo é basicamente determinado pela quantidade de chuva, capacidade de infiltração e capacidade de retenção superficial.

Um melhor entendimento da distribuição e dos movimentos de água pode ser obtido através da Figura 2-4 (Carson & Kirkby, 1975).

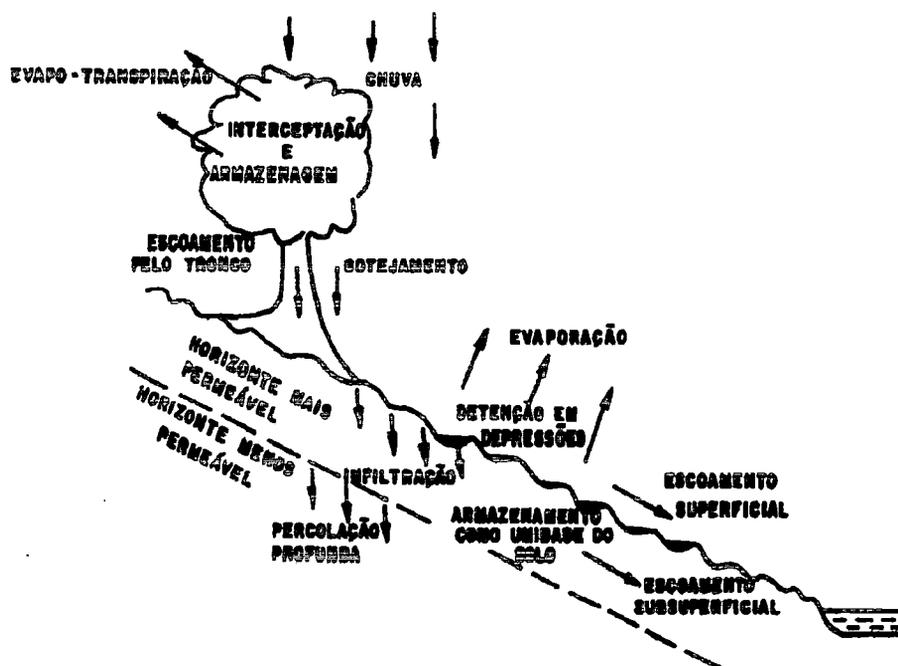


Figura 2-4 - Componentes esquemáticos do balanço hidrológico próximo à superfície (Carson & Kirkby, 1975).

De acordo com Carson & Kirkby (1975) apud Nishiyama (1995), a água da chuva ao alcançar a superfície do terreno se subdivide em vários componentes. Parte da chuva que é interceptada pela vegetação, permanece sobre a superfície foliar e posteriormente evapora, enquanto que o restante chega à superfície do solo por gotejamento após sofrer um retardamento. Parte da água da chuva que atinge a superfície do terreno, direta ou indiretamente, preenche pequenas irregularidades da superfície, produzindo o armazenamento superficial; outra parte percola no solo; e uma terceira parcela produz o escoamento superficial. A água que percola através da superfície do solo pode ser incorporada neste sob forma de umidade, ou então, continuar percolando até atingir o nível d'água. No entanto, ocorrem situações em que os horizontes de solo menos permeáveis ou ainda a presença de substrato rochoso, faz com que a água de percolação movimente-se lateralmente formando um fluxo subsuperficial (*throughflow*).

2.2.1. ATUAÇÃO DA GOTA

Segundo Ellison (1944), o impacto das gotas de chuva, atuando na desagregação das partículas do solo, é a fase mais importante do processo erosivo.

Os modelos modernos de erosão do solo reconhecem que o impacto das gotas de chuva tem um papel importante na erosão entre os sulcos ou linhas de fluxo concentrado. No passado, a pesquisas tinham se concentrado sobre o mecanismo de *splash*, como sendo o principal mecanismo de transporte das partículas de solo, em áreas de erosão laminar e entre canais, mas recentemente, a ação do impacto da gota de chuva, colaborando com o potencial erosivo do escoamento superficial, tem recebido maior atenção. Um processo de transporte chamado transporte pelo fluxo induzido da gota de chuva, é a base para o entendimento de um mecanismo de transporte que desloca algumas partículas de solo que sofreram a ação do *splash* e partículas destacadas do solo matriz em áreas cobertas por fluxos rasos, para um escoamento superficial em áreas circundantes (Kinnell, 1991).

Ellison (1944), observou que a gota de chuva quando colide com a superfície do solo, lança uma série de fragmentos de solo ao ar (*splash*). As partículas lançadas atingem alturas variadas, podendo chegar a 60 cm ou mais e se deslocam horizontalmente por mais de 150 cm. O mesmo autor chama a atenção para a incidência de gotas de chuva sobre taludes com mais de 10% de inclinação, sem influência do vento, onde cerca de $\frac{3}{4}$ das partículas de solo lançadas pelo impacto das gotas, movem-se em direção à jusante do ponto de colisão, enquanto que $\frac{1}{4}$ à montante (Figura 2-5).

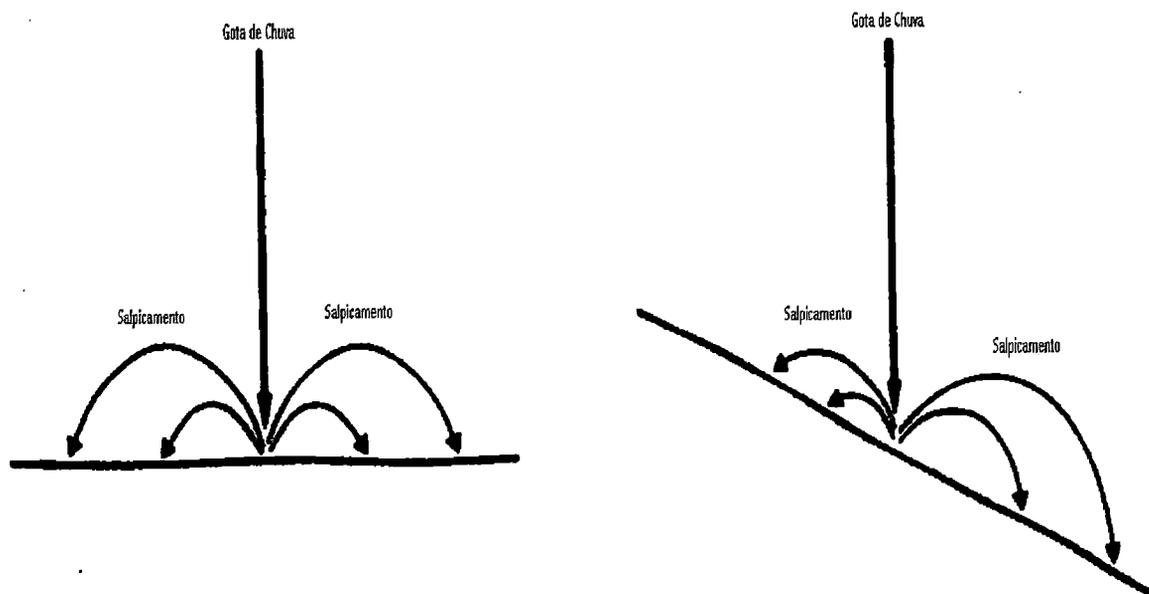


Figura 2-5 - Situações de transporte de partículas por *splash*

A interação do tamanho da gota de chuva, velocidade e forma, duração de chuva e o espalhamento, controlam o poder erosivo da chuva. O momentum de uma gota de chuva (massa x velocidade) aumenta rapidamente com o tamanho da gota até cerca de 4mm de diâmetro (Figura 2-6). A velocidade de queda de uma gota de chuva não cresce indefinidamente, porque a resistência oferecida pelo ar faz com que a gota atinja uma velocidade limite ou velocidade terminal (Wischmeier & Smith, 1958).

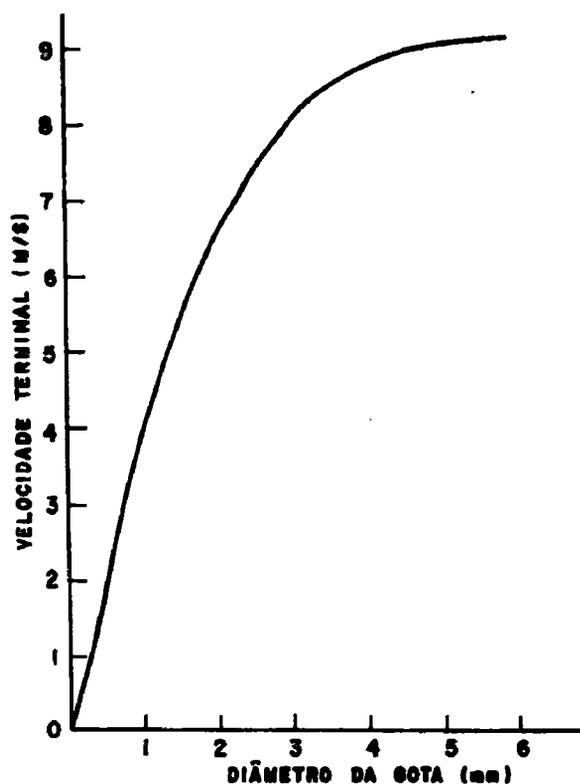


Figura 2-6 - Velocidade terminal de gotas de chuva

Al-Durrah & Bradford (1982b) utilizaram câmeras de alta velocidade para obter fotografia do lançamento de partículas de gota, tendo como variável o potencial da água, volume e valores de resistência ao cisalhamento. Dessa maneira os autores constataram que a configuração da trajetória das partículas lançadas é influenciada pela resistência ao cisalhamento da superfície do solo (Figura 2-7). Encontraram também que duas outras características variavam com a resistência ao cisalhamento: a velocidade das partículas lançadas e as dimensões da cavidade formada pelo impacto (diâmetro e profundidade).

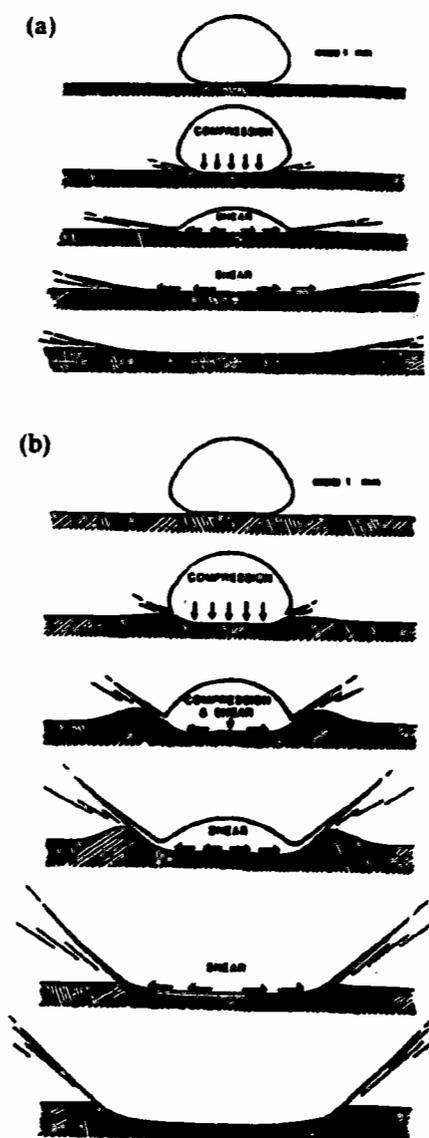


Figura 2-7 - Mecanismo de splash - (a) alta resistência ao cisalhamento; (b) baixa resistência ao cisalhamento

A interação entre gota e película de água recobrindo o solo já foi constatada por Hudson (1957) apud Vilar (1987). Duas parcelas de solo com 1,5m de largura por 27,5m de comprimento foram submetidas à ação da chuva, sendo que uma delas encontrava-se protegida por uma tela que dissipava a energia da gota. As perdas de solo observadas foram cerca de 100 vezes maiores na parcela desprotegida, o que além de mostrar a eficiência da combinação de sub-processos, mostra também que o fluxo superficial pouco profundo, tal como ocorre nas áreas inter-sulcos, dispõe de pequeno potencial erosivo.

De acordo com Wischmeier (1973), a cobertura do solo, isoladamente, é o fator de maior importância relativa no controle da erosão hídrica. Os resíduos, quando mantidos sobre a superfície do solo, evitam o impacto direto das gotas de chuva, prevenindo a desagregação e o selamento superficial e mantendo elevadas as taxas de infiltração de água no solo. Além disso, reduzem acentuadamente a velocidade do escoamento superficial, diminuindo a capacidade de desagregação e transporte da enxurrada.

Os experimentos de erosão sob chuva natural (Eltz, 1977), têm evidenciado que os sistemas de manejo que mantêm os resíduos culturais protegendo a superfície do solo (plantio direto e preparo mínimo) são mais eficazes no controle das perdas de solo do que os sistemas em que esses resíduos são totalmente incorporados ao solo ou queimados (preparo convencional)

2.3. EROSIVIDADE

A erosividade pode ser entendida como a força erosiva que um dado evento de chuva pode dissipar sobre o solo. O melhor estimador da erosividade de uma chuva local, é obtido através do estudo de correlação entre as características da chuva e a respectiva perda de solo (Wischmeier, 1959; Hudson, 1973; Wischmeier & Smith, 1978).

Wischmeier & Smith (1958) encontraram que a melhor variável simples para avaliar a erosão em solo permanentemente cultivado é o produto da energia cinética total da chuva (E) e sua intensidade máxima em 30 minutos (I₃₀), o que se expressa como índice EI₃₀. De acordo com Wischmeier (1959), este produto avalia bem as três fases da erosão dos solos, ou seja: o impacto das gotas das chuvas, o salpicamento das partículas e a turbulência do fluxo, combinados com a enxurrada que transporta as partículas desagregadas do solo. Segundo Lal (1976), a relação empírica obtida por Wischmeier & Smith (1958) subestima a energia cinética das chuvas tropicais. As fontes de erro podem ser a velocidade do vento, a distribuição do tamanho das gotas e a elevada intensidade dessas chuvas.

Especificamente, o encrostamento superficial reduz a infiltração de água no solo. Duley (1939) constatou que essa redução foi da ordem de 85 % em condições de solo sem cobertura e encrostado, em relação àquele completamente coberto e sem crosta.

Founier (1960) determinou o coeficiente de chuva mediante valores quantitativos de precipitação e Lombardi Neto (1977) obteve altas correlações entre média mensal do índice de erosão e a média mensal do coeficiente de chuva, para a estimativa do potencial erosivo das chuvas para o estado de São Paulo.

Morais et al. (1988) e Carvalho et al. (1989) relataram que índice de erosão das chuvas avaliadas para condições específicas do Rio Grande do Sul e de São Paulo representou o melhor parâmetro para a estimativa de perdas de solo.

Segundo Rufino et al. (1993) a estimativa do fator R, da equação universal de perdas de solo atende a interesses de conservação do solo e a outros modelos de predição de perdas de solo para planejamento conservacionista.

A obtenção de um índice de erosividade, que venha a representar as condições climáticas de um determinado local, requer o estudo de correlação entre inúmeras variáveis da chuva e as perdas de solo correspondentes. Esses dados devem ser obtidos experimentalmente em condições de parcela padrão sob chuva natural e por longo tempo (Wischmeier, 1959; Hudson, 1973; Wischmeier & Smith, 1978). Para o referido estudo, tanto da erosividade da chuva como da erodibilidade do solo, este método é racional e lógico, uma vez que trabalha diretamente com as variáveis da causa e efeito envolvidas no processo (Carvalho et al., 1989).

Desde o final dos anos cinquenta, pesquisadores de todo mundo vêm tentando obter os mais significativos índices para representar a erosividade da chuva (Wischmeier, 1959; Hudson, 1973; Wischmeier & Smith, 1958; Lal, 1976; Lombardi Neto, 1977, 1979; Carvalho et al., 1989).

Algumas discrepâncias observadas, dentre elas valores superestimados para chuvas em climas tropicais, levaram Wischmeier & Smith (1978) a rever a proposição original e a limitar a máxima precipitação para 63,5 mm/h.

Wischmeier & Smith (1958), nos Estados Unidos concluíram que tal índice EI ou EI30, de efeito linear sobre as perdas, reflete as capacidades erosivas combinadas do impacto da gota da chuva e da enxurrada, e em trabalho de correlação entre as variáveis da chuva e as perdas de solo, Wischmeier (1959) obteve nos EUA coeficientes de correlação entre 0,84 e 0,98 para o índice EI30.

Por outro lado, Hudson (1973) determinou que o índice EI30 não se apresentou tão eficientemente na Nigéria, como havia sido constatado nos Estados Unidos. Naquelas condições, foi observada uma elevada correlação entre erosão e energia cinética da chuva, quando foram omitidas as energias das chuvas ou dos segmentos de chuva que apresentassem intensidades menores do que 25,4 mm/h, o qual foi chamado de índice $KE > 25$ (Figura 2-9), e que apresentou coeficientes de correlação entre 0,92 e 0,96 para regressões estabelecidas entre o índice $KE > 25$ e as perdas de solo.

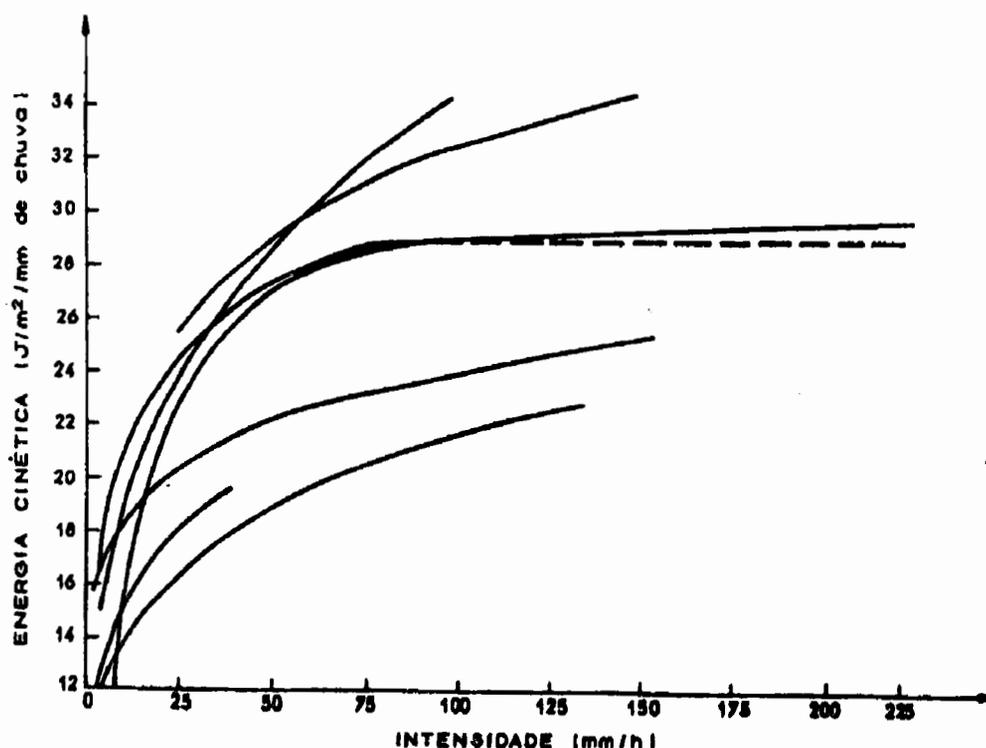


Figura 2-9 - Relações entre energia cinética e intensidade de precipitação (Hudson, 1973)

Biscaia et al. (1981) encontraram, no Estado do Paraná, respectivamente para Londrina e Ponta Grossa, coeficientes de correlação de 0,72 e 0,77, entre o EI30 e a perda de solo.

No Brasil, os estudos de correlação entre as variáveis da chuva e as perdas de solo vêm evidenciando não haver diferença significativa entre os coeficientes de correlação dos índices EI30 e $KE > 25$ (Morais et al., 1988; Carvalho et al., 1989).

Foster et al. (1982) pesquisaram um fator de erosividade da chuva-enxurrada para as chuvas individuais ocorridas em dez localidades dos Estados Unidos. Quando comparados entre si, (modelos lineares dos índices EI30 e volume de enxurrada (Vu)), observou-se que o primeiro apresentou, em seis localidades, maiores valores de coeficiente de correlação.

No trabalho de Carvalho et al. (1993), o volume total de enxurrada (Vu), era obtido diretamente no tanque coletor da parcela de campo. O índice Vu apresentou coeficiente de correlação de 0,83, mostrando-se bastante compatível com os obtidos por Foster et al. (1982) nos Estados Unidos.

Segundo Carvalho et al. (1993), o volume de enxurrada (Vu) foi o melhor índice avaliador da erosividade da chuva de Campinas (SP). Assim, nas condições tropicais paulistas, o efeito da enxurrada sobre a erosão, quando comparado com o índice EI30, foi sobremaneira superior. Portanto, devido também à sua extrema facilidade de obtenção, quando em confronto com o EI30 conclui-se haver necessidade de maior detalhamento de sua pesquisa, visando-se validá-lo como fator de erosividade da equação universal de perda de solo para as condições brasileiras.

2.4. ERODIBILIDADE

2.4.1. AÇÃO DO FLUXO SUPERFICIAL

A erodibilidade de um solo em relação às chuvas é tanto menor quanto maior for a resistência que o solo oferece à sua ação erosiva.

A força que se opõe ao arrastamento dos grãos de solo ao longo do talude é a resistência que se desenvolve entre a camada dos grãos superficiais e a camada subjacente (Figura 2-3). Essa resistência, em princípio, não é mais do que a resistência ao cisalhamento dada pela lei de Mohr-Coulomb e expressa pela equação abaixo:

$$s = c + \sigma \operatorname{tg}\phi \quad \text{Equação 2-6}$$

onde:

ϕ : ângulo de atrito interno do solo

σ : é a tensão normal na superfície de separação das camadas, dada pela expressão abaixo

$$\sigma = \gamma h \cos^2\beta \quad \text{Equação 2-7}$$

No caso da Figura 2-3, h corresponde aproximadamente à dimensão dos grãos, indicada por D , e o peso específico a ser considerado deverá ser o peso específico submerso.

sabendo-se que $D = h \cos\beta$, têm-se:

$$\sigma = \gamma' D \cos\beta \quad \text{Equação 2-8}$$

substituindo-se na equação 2-6, tem-se:

$$s = c + \gamma' D \cos\beta \operatorname{tg}\phi \quad \text{Equação 2-9}$$

Sabe-se que as condições especiais em que se manifesta a resistência de atrito são muito diferentes daquelas para as quais é usualmente definido ϕ e, também, o peso $\gamma'D$. Basta que a velocidade de escoamento seja suficientemente elevada e o escoamento passe de laminar a turbulento, para que os grãos de solo fiquem sujeitos à vibrações que diminuem a referida resistência de atrito. Para levar em conta essas condições especiais, de uma forma global, utiliza-se um coeficiente b cujo valor deverá estar compreendido entre 0 e 1 (Nascimento e Castro, 1976).

Da equação 2-9 obtêm-se a seguinte forma da lei de Mohr-Coulomb, generalizada ao escoamento superficial em taludes.

$$sw = c + b \gamma'D \cos\beta \operatorname{tg}\phi \quad \text{Equação 2-10}$$

2.4.2. ASPECTOS GERAIS SOBRE A ERODIBILIDADE DOS SOLOS

Com relação à erodibilidade dos solos, podemos defini-la como sendo a maior ou menor facilidade com que as partículas são destacadas e transportadas. A erodibilidade fica condicionada, em geral, pela resistência que o solo pode opor à ação dos agentes erosivos. Em suma pode-se entender a erodibilidade como sendo a maior ou menor facilidade com que os solos são erodidos, fixados os demais fatores que contribuem para o desenvolvimento do processo erosivo. Assim a erodibilidade reflete características próprias que interferem diretamente no processo erosivo.

A susceptibilidade do solo à erosão é influenciada pelas suas propriedades físicas, hidrológicas, químicas, mineralógicas, biológicas e bioquímicas, além das características do perfil, como pode ser visto na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - resumo dos fatores que influem na erodibilidade do solo (Lal, 1990)

PROPRIEDADES	FATORES	CARACTERÍSTICAS
mecânicas	textura	<ul style="list-style-type: none"> • influi no destacamento e carreamento das partículas do solo. • determina a facilidade com que o solo é dispersado. • determina a força limite necessária para o destacamento.
	estrutura	<ul style="list-style-type: none"> • formação de agregados que resistem à dispersão, aos efeitos abrasivos da água de escoamento e ao destacamento. • grau de agregação e distribuição de agregados estáveis. • tamanho dos agregados.
	tamanho dos torrões e cultivo do solo	<ul style="list-style-type: none"> • superfície rugosa e cheia de torrões - possuem elevada capacidade de retenção. • resistência à desagregação pela chuva e erosão pelo vento.
	formação de crosta	<ul style="list-style-type: none"> • responsável pela alta taxa de escoamento superficial. • desenvolve-se em solos com baixa porcentagem de matéria orgânica.
resistência	resistência ao cisalhamento	<ul style="list-style-type: none"> • importante no destacamento de partículas de solo (impacto e escoamento superficial). • rolamento e deslizamento de grãos.
hidrológicas	retenção de água	<ul style="list-style-type: none"> • o estado de energia da água do solo ou pressão neutra influencia a resistência ao cisalhamento do solo. • resistência do solo ao arrastamento pela água é influenciado pela umidade inicial. • solos secos são mais susceptíveis à erosão pelo vento e pela água do que solos úmidos. • a umidade fornece coesão entre as partículas.
	transmissão de água no solo - infiltração	<ul style="list-style-type: none"> • taxa de infiltração determina o maior ou menor volume de escoamento superficial.
	permeabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • solos com permeabilidade extremamente baixa a moderada geram mais escoamento superficial.
reológicas	sistema solo/água	<ul style="list-style-type: none"> • a umidade do solo influi na susceptibilidade à erosão por afetar a coesão, a resistência ao cisalhamento, consistência e plasticidade.
<i>Continua...</i>		

Continua... químicas e mineralógicas	matéria orgânica argilo-minerais	<ul style="list-style-type: none"> • influencia a distribuição granulométrica, propriedades de retenção e transmissão de água. • fortalece as ligações que estabilizam as unidades estruturais e mantém um balanço favorável entre retenção e transmissão nos poros. • diminui o efeito da compactação. • concentração de matéria orgânica nos micro-agregados aumentando a sua resistência à desagregação (slaking) e à dispersão. • a estrutura do solo e a sua resistência são influenciadas pela quantidade e natureza dos argilo-minerais. • a fração fina do solo interage com a M.O. para formar agregados estáveis que resistem ao impacto das gotas da chuva.
características do perfil	diretos ou indiretos	<ul style="list-style-type: none"> • influencia a erosão direta ou indiretamente. • influência sobre o escoamento subsuperficial de água em decorrência de mudanças nas propriedades hidrológicas de diferentes horizontes. • influência sobre o crescimento vegetal.

No âmbito da mecânica dos solos, tem sido pequeno o esforço no sentido de procurar estabelecer os fatores que condicionam a resistência à erosão. A sua medida esbarra em dificuldades práticas, além de ser necessário representar, por vezes, as condições ambientais (umedecimento, secagem, etc.).

De acordo com Wischmeier & Mannering (1969) para se manejar o solo com mínima erosão hídrica, faz-se necessário o conhecimento dos fatores que a determinam, da magnitude de cada fator e das interações entre eles. Um desses fatores é a erodibilidade do solo, que é a medida da susceptibilidade que o solo apresenta perante a erosão hídrica, sendo uma função de suas propriedades.

Segundo Lima et al. (1990), índices de erodibilidade (fator K), com base nos resultados de análise granulométrica com emprego de dispersantes químicos fornecem resultados que geralmente superestimam a resistência do solo à erosão, comparativamente a valores obtidos por métodos diretos (mais notado nos latossolos).

Henklain & Freire (1983) utilizando tais métodos (ex: nomograma de Wischmeier et al., (1971)) para latossolo roxo e vermelho-escuro, encontraram valores reduzidos comparativamente àqueles obtidos em condições de chuva natural e simulada, e salientaram a necessidade da inclusão de novos parâmetros para a elaboração de um método indireto específico para esses solos.

De acordo com Wischmeier et al., (1971) o teor de silte constitui um dos mais importantes parâmetros influenciadores da erodibilidade, havendo semelhança de comportamento da fração areia muito fina com o silte no solo. Os latossolos são por via de regra, relativamente pobres em siltes. A estrutura granular, comum nesses solos, proporciona elevada permeabilidade e pode, devido à acentuada estabilidade, conferir às partículas de argila o comportamento de silte e areia muito fina, notadamente nos latossolos com maiores teores de óxidos, sobretudo de alumínio (gibsitita).

Bertoni & Lombardi Neto (1985) relacionaram, para o grupo de latossolos do Estado de São Paulo, valores de erodibilidade do solo variando entre 0,0224 e 0,0112 t ha h / ha MJ mm. O valor do fator K determinado para o latossolo roxo foi de 0,0122 t ha h / ha MJ mm. Por outro lado, para o grupo dos podzólicos, tais valores ficaram entre 0,0550 e 0,0183 t ha h / ha MJ mm. Para os solos dos Estados Unidos, Foster et al. (1981) classificaram os valores do fator K iguais a 0,01; 0,03 e 0,06 t ha h / ha MJ mm, respectivamente, como: baixo, moderado e alto.

Segundo Barnett et al. (1965), A textura é mais importante na determinação da erodibilidade do que foi considerada na estimativa original do valor do fator K. A erodibilidade do solo tende a aumentar para os solos com textura na faixa de areia a silte argiloso.

De acordo com Barnett et al. (1965), deve ser lembrado que o fator K é baseado em perdas de solo que ocorrem se um dado solo sem cultivo estiver localizado sobre um talude com 9% de declividade e 72,6 pés de comprimento. Apesar de que muitos desses solos sejam levemente não erodíveis em taludes nos quais eles são encontrados, eles se tornariam altamente erodíveis se estivessem localizados em taludes com 9% de declividade.

Baptista et al. (1994), através de vários trabalhos de campo realizados em solos tropicais e subtropicais vêm questionando os diferentes tipos de comportamento dos horizontes de solos frente aos problemas erosivos. Estudos de resistência ao cisalhamento feitos em solos laterizados do planalto do Rio Grande do Sul e de solos oriundos de rochas cristalinas da região metropolitana de Porto Alegre têm mostrado que existe uma relação entre resistência ao cisalhamento e os processos erosivos. A resistência ao cisalhamento dos solos tropicais é um assunto complexo, uma vez que estes solos são em geral parcialmente saturados e apresentam uma pressão de sucção que tende a desaparecer com o aumento do grau de saturação.

Carvalho et al. (1994), num estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal, utilizaram o equipamento baseado no de Inderbitzen (1961), utilizando uma vazão de 50 ml/s, inclinação de rampa de 10° e duração do ensaio de 20 min. Os resultados mostraram que é possível se obter uma boa correlação entre erodibilidade medida e a prevista a partir de modelo linear múltiplo, considerando-se parâmetros de grau de laterização, granulometria e índice de vazios. Eles tentaram obter um modelo que permitisse determinar a erodibilidade dos solos a partir de parâmetros físico-químicos de laboratório. O número de dados foi pequeno para se inferir ao modelo um alto grau de confiabilidade. Através dos estudos para o Distrito Federal, chegou-se a conclusão que a perda de solo por erosão poderia ser estimada a partir de duas equações obtidas de correlações lineares múltiplas, e que correlações da erodibilidade destes solos com parâmetros isolados são ruins.

2.4.3. INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS DE SOLO

As partículas de areia, silte e argila, encontram-se em condições naturais, aglomeradas em partículas compostas referidas com frequência como agregados ou torrões, que têm formato e tamanho variados, estando separados uns dos outros por pequenos fendilhamentos, determinando a estrutura do solo.

A estabilidade do agregado é uma importante propriedade do solo porque ela pode inferir a taxa de erosão do solo ou suas características hidráulicas, tais como sua taxa infiltração.

A estabilidade do agregado (indicativo da resistência do solo) pode ser medida pelo peneiramento do agregado em água, por taxas controladas de umedecimento ou pelo impacto de uma gota de chuva simulada (Young, 1984).

Quando há possibilidade de agregação de partículas, formando grumos que permanecem estáveis sob ação dos esforços devidos à gota e ao escoamento, tem-se observado que, quanto maior a proporção de grumos com diâmetros inferiores a 0,5 mm, maior é a erodibilidade dos solos (Bryan, 1968), grumos estes comumente mais estáveis, através da presença de argila e de matéria orgânica.

Uma síntese de métodos de avaliação de erodibilidade foi efetuada por Bryan (1968) que submeteu cerca de 90 amostras de diferentes solos a precipitações artificiais. A conclusão principal do trabalho é que nenhum índice reflete com eficiência a erodibilidade dos solos, porém, o caminho mais promissor parece estar relacionado à capacidade de agregação de partículas. A quantidade de grumos estáveis com diâmetros superiores a 3mm, secundada pelos grumos superiores a 0,5mm, constituíram os fatores mais significativos na avaliação da erodibilidade dos solos ensaiados. Bryan (1976) ampliou o universo de solos ensaiados e corroborou as conclusões iniciais, porém acrescentou que o conjunto de solos estudados tinha sua erodibilidade melhor avaliada pela percentagem de agregados superiores a 0,5mm.

Análises do impacto da gota podem ser mais indicativas da resistência do agregado à quebra pela precipitação (caso da erosão intersulcos), enquanto que análises pelo peneiramento saturado é mais indicativo da resistência à quebra pelo fluxo de água (caso da erosão em sulcos).

O método do impacto da gota (ou alguma modificação dele) não é comumente usado para estudar a estabilidade da agregado, mas tem um bom potencial para medir não apenas a estabilidade do agregado, mas também as características de erodibilidade dos solos (Nearing & Bradford, 1985; Young, 1984).

Variações ao longo do tempo nas propriedades do solo tais como a estabilidade da agregado podem ser causadas por muitos fatores, inclusive atividades agrícolas, climáticas e atividades biológicas.

Um problema relevante são as argilas susceptíveis de erosão originada por dispersão de suas partículas coloidais. Essas Argilas não podem ser identificadas pelos ensaios convencionais de Mecânica de Solos, porque apresentam características semelhantes às argilas não erodíveis.

A característica determinante do comportamento dessas argilas é a presença predominante de cátions sódio na água adsorvida, em relação aos cátions cálcio e magnésio (Sherard et al., 1976).

Vários aspectos que contribuem para a erosão interna das argilas dispersíveis estão também relacionados com a erosão superficial, como mostram os resultados de vários pesquisadores (Arumugan, 1974; Arulanandan et al., 1973, apud Vilar, 1987).

As partículas de argila, com carga elétrica negativa, atraem para sua superfície os cátions hidrogênio (H^+) da água e outros cátions, tais como cálcio (Ca^{++}), potássio (K^+), alumínio (Al^{+++}) e sódio (Na^+). Como as moléculas de água são polarizadas, o seu polo negativo pode-se ligar a outros cátions, os quais, por sua vez, podem atrair outras moléculas de água. Assim cada partícula de argila tem em sua superfície uma camada de água (água adsorvida) que em função de sua ligação com os diversos cátions, pode ser mais ou menos espessa.

Os cátions sódio aumentam a espessura dessa camada, tendendo, conseqüentemente, a reduzir as forças de atração inter-partículas. Desequilibrando-se as forças, as partículas se destacam da massa integral de solo, podendo ser arrastadas, no caso de uma situação favorável para tal ocorrência, como um fluxo de água por exemplo.

Os métodos para identificação de argilas dispersivas são o "pin-hole test", originalmente criado para se estudar a dispersão em maciços de terra compactados e os ensaios químicos para identificação dos sais dissolvidos na água intersticial.

No caso do "pin-hole test" o ensaio consiste em se percolar água, com diferentes cargas, através de um pequeno furo na amostra de solo. Em função da água que emerge, tem-se um dado qualitativo acerca da dispersibilidade da argila.

Os ensaios para determinação de sais dissolvidos consistem, basicamente, em reagir uma pasta de solo com acetato de amônio ou cálcio. Completada a reação extrai-se, adequadamente, uma pequena quantidade de água do solo com o intuito de determinar as quantidades dos principais cátions metálicos em solução.

2.4.4. MEDIDAS DE ERODIBILIDADE

Moore & Masch (1962) utilizaram um equipamento de ensaio, que consiste basicamente na ação de um jato de água sobre a amostra de solo para medir a taxa de erosão em amostras de solos coesivos amolgados e amostras de solos indeformadas. Os resultados obtidos indicaram que a erosão era proporcional ao logaritmo do tempo durante o qual a erosão ocorria.

Em um esforço para minimizar os efeitos da variação da tensão de cisalhamento atuante sobre a superfície do solo, Moore & Masch (1962) introduziram o ensaio de cilindro rotatório (Figura 2-10), que se constitui numa opção para a determinação da resistência à erosão de solos coesivos e, principalmente, de solos estabilizados quimicamente, uma vez que até mesmo solos de comportamento laterítico ao serem saturados sofrem expansão em alguns pontos localizados e se desintegram. Desta forma o corpo de prova tem sua forma modificada impedindo seu aproveitamento na realização do ensaio, tornando-se extremamente difícil determinar quanto foi erodido por aplicação de tensão cisalhante.

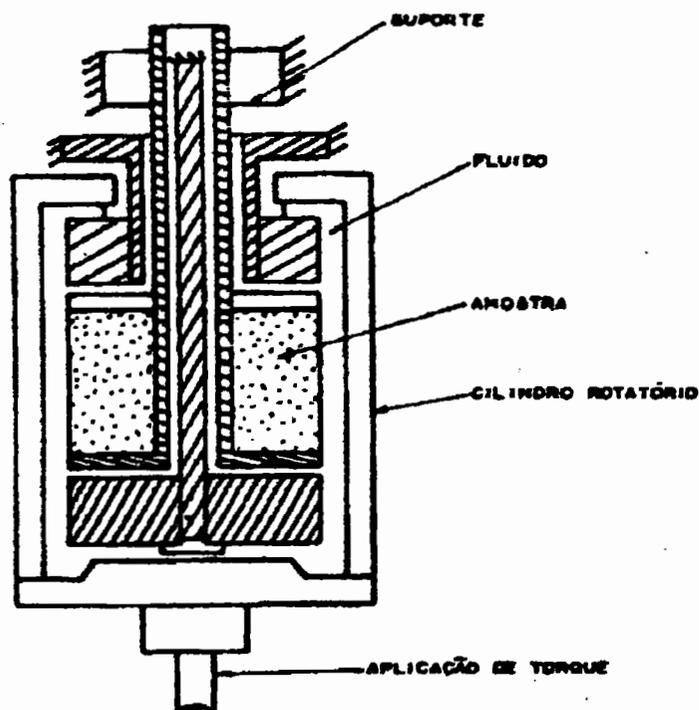


Figura 2-10 - Esquema do ensaio de cilindro rotatório

O ensaio de Inderbitzen (1961) consiste em submeter uma amostra de solo de seção circular, com diâmetro de 15 cm e altura de 4,60 cm, a um caudal de água. A amostra é colocada em uma rampa, que pode ter sua inclinação variada e, em seguida, escoar-se água por sobre ela segundo vazões constantes e recolhe-se o solo erodido.

Estudos realizados com este ensaio e empregando solos de alteração de gnaisse de taludes da Via Dutra revelaram que uma velocidade de erosão de 7,0 g/cm²/hora, para uma vazão de 314 cm³/s, limitou a faixa dos solos resistentes à erosão. Velocidades situadas entre 7 e 50 g/cm²/hora limitaram os solos com resistência regular à erosão e velocidades superiores a 50 g/cm²/hora caracterizaram os solos com mau desempenho frente à erosão tal como observado no talude teste (Verçosa, 1978; Ferreira, 1981; Fonseca, 1981).

Para medir a erodibilidade dos solos tropicais de Madagascar, Philipponat (1973) propôs um ensaio que consiste em submeter uma das faces de um corpo de prova cilíndrico, inclinada a 45°, à ação de um jato d'água com velocidade e vazão constantes. O coeficiente de erodibilidade E_r apresentado através da equação 2-11 é definido como o produto entre a profundidade do furo produzido (h) e o peso de solo removido (P).

$$E_r = h \times P \text{ (g.cm)}$$

Equação 2-11

A partir de observações empíricas, Philipponat propõe as seguintes subdivisões:

$E_r < 30$	solo não erodível
$30 < E_r < 60$	solo ligeiramente erodível
$60 < E_r < 200$	solo muito erodível
$E_r > 200$	solo eminentemente erodível

Na caracterização e quantificação da erodibilidade dos solos, a atitude dos pesquisadores tem sido buscar medidas indiretas que possam representar os diversos aspectos de ocorrência, mas certamente, a granulometria é a propriedade mais estudada na tentativa de avaliar a erodibilidade do solo. De maneira geral, os solos mais erodíveis, segundo diversos autores, são os solos de comportamento granular, com partículas da ordem de siltes às areias finas e com pouca quantidade de argila (Wischmeier & Mannering, 1969; Swanson et al., 1969; Evans, 1980; Young, 1980).

As muitas indicações de que a erodibilidade está relacionada à facilidade com que os solos se desagregam em água, bem como à sua capacidade de infiltração, motivaram diversas propostas de emprego dessas características para a avaliação deste parâmetro.

Middleton (1930) propôs como medida da estabilidade de grumos de partículas em água, a relação de dispersão (RD), quociente entre a quantidade de silte e argila dispersa em água e o mesmo valor determinado por simples peneiramento. Para retratar a capacidade de infiltração, foi proposta a relação de percolação (RP), que consiste na quantidade de partículas em suspensão em

água dividida pela umidade equivalente. A relação de erosão (RE) consiste no quociente entre RD e RP. Entre os solos ensaiados por Middleton, os não erodíveis apresentaram $RP > 1,5\%$; $RD < 15\%$ e $RE < 10\%$.

Lombardi Neto & Bertoni (1975), empregando os conceitos de Middleton (1930), estimaram o fator de erodibilidade (K) da USLE para diversos solos do Estado de São Paulo e foi constatado que os solos podzolizados são mais susceptíveis à erosão do que os latossolos.

Anderson (1950) num estudo dos solos da Costa Sul da Califórnia usou análises de regressão múltiplas para obter equações relativas às características físicas dos solos em medidas de erosão obtidas no campo, através de 14 bacias hidrográficas. A relação de dispersão de Middleton, foi a expressão mais útil do comportamento erosivo do solo, quando comparada com a erosão medida nas próprias bacias.

Smerdon & Beasley (1959) conduziram ensaios de erosão em uma calha na tentativa de correlacionar a força de tração crítica com as propriedades físicas de 11 solos do Missouri, abrangendo de um silte argiloso a uma argila altamente coesiva. Eles acharam que a força trativa crítica correlacionou-se com o índice de plasticidade, a relação de dispersão, o tamanho médio das partículas, e a percentagem de argila.

Laflen & Beasley (1960) conduziram ensaios de erosão em uma calha para determinar o efeito do índice de vazios sobre a força trativa crítica, sobre solos compactados. Eles acharam uma relação linear entre o índice de vazios e a força trativa crítica para cada solo ensaiado.

Nascimento & Castro (1976) assinalam que os principais parâmetros que condicionam a resistência dos solos à erosão são a granulometria (solos arenosos) e, no caso de solos argilosos, a expansibilidade e a petrificação (possibilidade de permanência da coesão mesmo após a imersão do solo). Em um estudo anterior, os autores mostraram que a expansibilidade medida num ensaio desenvolvido no LNEC, permitiu identificar 16 dos 21 solos com mau comportamento frente à erosão. A petrificação é determinada num ensaio específico, a partir da absorção de água por pastilhas de solo. Determina-se assim o limite de absorção (w'_A), que é comparado com o teor de umidade (w_o) necessário para saturar a pastilha, sem variação de volume.

O fluxograma apresentado na Figura 3-8 do capítulo 3 resume os estudos para a escolha de solos resistentes à erosão, segundo a proposta do LNEC. Os parâmetros A e B, necessários para taludes de corte, dependem da expansão máxima admissível, que assegure a manutenção de um certo nível de ligações pétreas no solo.

Fonseca (1981), preconiza a utilização do ensaio de desagregação, que objetiva observar o comportamento relativo de amostras de solo sob influência da água. Para tanto concebe-se a colocação de amostras indeformadas dos diversos tipos de solos ocorrentes em um talude, sob submersão parcial, a partir de um mesmo instante, medindo-se o tempo de desagregação das mesmas e verificando-se o seu comportamento em todas as fases do processo e aferição do tempo de ocorrência de :

- Início da percolação ascendente de água na amostra e saturação completa da mesma
- Aparecimento das primeiras fissuras, anotando-se características por exemplo, foliação da amostra verificando-se possível interdependência.
- Desagregações parciais e totais

As amostras tem forma cúbica com 6 cm de lado, moldadas a partir de bloco com umidade natural, e são testadas com colocação em bandeja com altura de água de 1/3 de sua altura, isto é 2cm. Todas as amostras devem ser ensaiadas ao mesmo início de tempo.

A velocidade de desagregação, segundo foi observado com comparação dos solos ocorrentes nas áreas testes do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, foi diretamente proporcional à erodibilidade dos diversos horizontes componentes de um perfil de solo residual de gnaiss. Os tempos de desagregação foram de 5 a 40 minutos para o horizonte IC (saprolito), mais erodível, e de cerca de 12 horas para o horizonte IB (transição entre o residual maduro e o saprolito), que apresentou uma resistência regular à erosão no campo, e o horizonte IA (solo residual maduro) e o colúvio não se desagregaram (Ferreira, 1981).

Nogami & Villibor (1979) apresentaram um ensaio de erosão que consiste basicamente em submeter corpos de prova cilíndricos (diâmetro: 40mm; altura: 20mm) a testes de desagregação por imersão. Uma análise empregando 80 amostras de solos de taludes rodoviários no Estado de São Paulo conseguiu verificar que a maior parte dos solos com problemas de erosão apresentaram a relação $E = 52 S/P$ inferior a 1.

Vertamatti et al. (1990) empregaram a metodologia anterior e, através de corpos de prova compactados, confirmaram as conclusões de Nogami & Villibor (1979), para solos de taludes das rodovias D. Pedro e Trabalhadores, bem como para solos da região de Marília, que mostraram mau comportamento frente à erosão.

O IAC através de seu manual de métodos de análise de solo da Seção de Conservação do Solo, expõe um ensaio de agregação e estabilidade dos agregados em água, que consiste basicamente em submeter uma amostra de solo a um peneiramento em água. Obtêm-se a partir deste ensaio as percentagens de agregação (agregados maiores que 0,50 mm) e a percentagem de estabilidade dos agregados.

2.5. MODELOS PARA CÁLCULO DA EROSÃO

Uma das questões fundamentais na erosão consiste na necessidade de quantificá-la. Até meados da década de 70, o único instrumento prático para tal finalidade era a Equação Universal de Perdas de Solo. Esta equação, de base fortemente empírica, apresenta um série de limitações. A necessidade de se prever com mais detalhes e precisão a dinâmica do processo erosivo incentivou o aparecimento de modelos que se apóiam nas leis físicas que regem a erosão. Conceitos da hidrologia, do transporte de sedimentos, da hidráulica e da agronomia começaram a ser empregados com o intuito de melhorar a representação do fenômeno físico.

A vasta quantidade de dados produzidos desde a década de 30 nos Estados Unidos, possibilitou a formulação da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) para o cálculo das perdas médias anuais de solo, que pode ser expressa da seguinte forma:

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

Equação 2-12

onde:

A - perda média de solo	(ton/ha.ano)
R - fator de erosividade da chuva	(MJ.mm/ha.h.ano)
K - fator de erodibilidade do solo	(ton.ha.h/ha.MJ.mm)
L - fator de comprimento da encosta	
S - fator de inclinação da encosta	
C - fator de práticas de cultura	
P - fator de práticas contra a erosão	

O fator de erodibilidade é determinado utilizando parcelas padrão de solo, submetidas a chuvas artificiais. Tais parcelas apresentam 22,13 m de comprimento, declividade de 9 %, são aradas morro abaixo e desprovidas de vegetação. Os demais fatores tratam de corrigir as diferenças da parcela real de solo em relação à parcela padrão, no que se refere às diferenças de topografia, manifestadas pelas variações de comprimento e de declividade e no que se refere a presença de determinada cultura e de práticas de minoração dos efeitos erosivos da chuva.

O fator de erosividade da chuva segundo Wischmeier & Smith (1978) como já foi visto no item 2.3, compreende o produto de duas características; a intensidade e a energia cinética. O produto entre a energia cinética total e a precipitação máxima para um intervalo de 30 min, constitui o índice de erosão da chuva também conhecido como índice EI30. A soma dos índices ao longo de um ano, compreende o fator de erosividade da chuva (R).

O fator de erodibilidade (K) foi estudado por Wischmeier & Mannering (1969) apud Vilar (1987) que estabeleceram uma equação empírica com base em 24 variáveis (propriedades físicas e químicas). Destas, a que se mostrou mais correlacionável com a erodibilidade foi a relação de dispersão de Middleton, porém ela foi descartada da correlação múltipla porque era função de outras variáveis já consideradas na regressão.

Posteriormente Wischmeier et al (1971) desenvolveram um novo parâmetro que refletisse as relações entre os tamanhos das partículas. O parâmetro denominado de M, equivale à percentagem de areia multiplicada pela percentagem de silte e respondeu por oitenta e cinco por cento da variação observada no índice de erodibilidade (K) de cinquenta e cinco solos ensaiados. Na classificação das partículas, a porção silte incluiu a fração de areia fina (0,05 a 0,10mm), porque notou-se que a areia fina comportava-se muito mais como silte do que como areia grossa. A areia foi classificada como sendo partículas de tamanho variando entre 0,10 e 2mm.

Para se avaliar o fator de erodibilidade (K), faz-se o uso do nomograma apresentado na Figura 2-11. Os parâmetros de entrada são cinco: percentagem de silte mais areia ($d > 0,10\text{mm}$); conteúdo de matéria orgânica; percentagem de areia (0,10 - 2,0mm); estrutura e permeabilidade do solo. Todos os fatores, exceto a permeabilidade, são determinados para a porção mais superficial do solo (15 a 20cm).

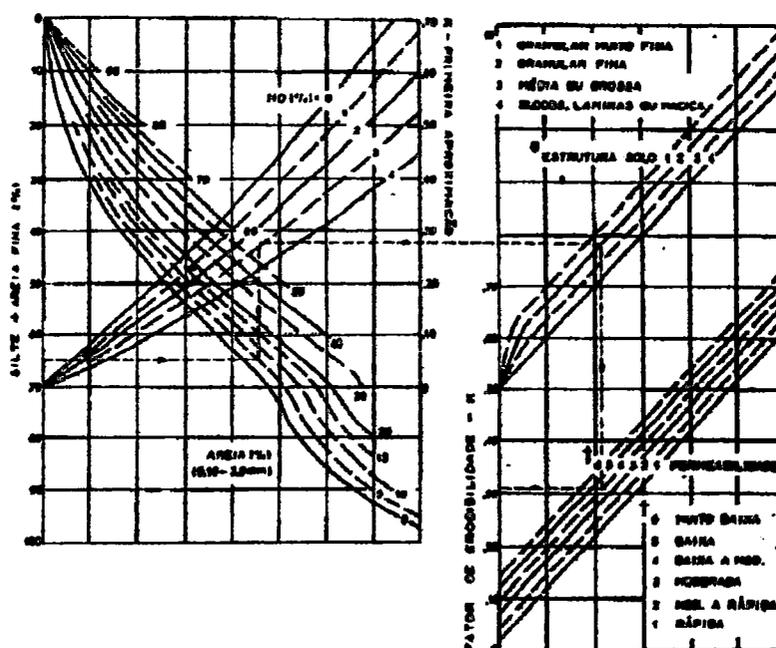


Figura 2-11 - Nomograma para obtenção do fator de erodibilidade do solo (K). Multiplicar os valores lidos por 0,13 para convertê-los para ton.h/MJ.mm.

Um projeto cooperativo entre diversos órgãos do Ministério da Agricultura dos Estados Unidos, dentre eles o Soil Conservation Service e o Agricultural Research Service, encontram-se em andamento com a finalidade de desenvolver um programa que possa substituir a Equação Universal de Perdas de Solo. O modelo denominado de WEPP (Water Erosion Prediction Project) considera os processos devidos ao clima, à irrigação, à evaporação, à percolação, à infiltração, ao escoamento superficial, ao crescimento e à decomposição dos resíduos de plantas, bem como os processos de geração de sedimento, seu transporte e deposição nas áreas intersulcos e nos sulcos.

2.6. USO DO MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR (1979)

Nas rodovias pavimentadas, a erosão hídrica atua sobretudo nas bordas dos pavimentos (acostamentos, área marginal), incluindo ou não valetas longitudinais e transversais, pelo fato da infiltração praticamente não ocorrer na parte pavimentada. Alto custo referente às providências convencionais de condução das águas pluviais, torna a erosão nas bordas do pavimento mais grave nas rodovias de baixo volume de tráfego e de baixo custo inicial.

A erosão de taludes de cortes tropicais apresenta peculiaridades em relação aos terrenos cultivados, sobretudo pela inclinação muito maior e a ausência dos efeitos benéficos do cultivo do solo. O clima quente e o acentuado desenvolvimento estrutural dos solos tropicais, faz com que a secagem tenha uma importância significativa.

Em um corte imaginário, a erosão será nula em duas condições extremas de inclinação.

- Horizontal (não haverá fluxo d'água, apenas acúmulo)
- Vertical (não haverá fluxo)

Pode-se observar que deve haver uma inclinação que ocasione erosão máxima, que dependerá do regime pluviométrico e da natureza do solo constituinte do corte. O fenômeno torna-se mais complexo quando o corte é constituído de mais de um tipo de material, de trechos com inclinações diferentes e camadas com diferentes comportamentos frente à erosão.

Na previsão da erodibilidade através do método de Nogami & Villibor (1979), há necessidade de se determinar pelo menos duas propriedades dos solos.

- INFILTRABILIDADE (deve medir a capacidade que a superfície do solo tem de absorver água);
- PERDA DE MASSA POR IMERSÃO (mede a resistência à ação da água).

2.6.1. ENSAIOS DO MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR (1979)

2.6.1.1. INFILTRABILIDADE

Uso de amostras indeformadas de 40mm de diâmetro e de 20mm de altura. originariamente determinava-se apenas o tempo de subida t em minutos. Desenvolveu-se então o critério em que se representava, em abscissas, $t^{1/2}$ e, em ordenadas, o volume de água absorvida por unidade de área do corpo de prova.

As amostras são submetidas previamente à secagem lenta ao ar, para reproduzir mais de perto o que ocorre nos cortes

2.6.1.2. PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

- Uso de corpos de prova previamente submetidos ao ensaio de infiltrabilidade, colocando-se, numa das extremidades, uma pedra porosa para evitar eventual desprendimento do solo;
- Determinação da perda de massa com o corpo de prova dentro do tubo de amostragem, de maneira que a extremidade exposta coincida com a extremidade do tubo de amostragem. A perda de massa deve ser expressa em função da massa seca total inicial do corpo de prova.

Uma das deficiências mais graves, é que o ensaio de perda de massa por imersão permite avaliar apenas os solos muito pouco resistentes, quando imersos em água. Contudo reproduz a desagregação do solo quando da secagem e molhagem, fenômeno este responsável pela erosão de muitos cortes de solos saprolíticos de folhelhos e basaltos, bem como de argilas rijas sedimentares

2.7. GENERALIDADES SOBRE OS SOLOS TROPICAIS

Por ocasião da International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils (1985), foi apresentado pelo Comitê de solos tropicais da ISSMFE um Progress Report, no qual foram relatadas as condições peculiares sob às quais ocorrem os solos saprolíticos e lateríticos tropicais e o seu comportamento resultante, permitindo assim algumas observações (Gidigas, 1976; Nogami & Villibor, 1979'1981):

2.7.1. DETERMINAÇÃO DO FATOR K PELO ÁBACO DE WISCHMEIER (1971):

A forte agregação dos solos lateríticos levam a variações consideráveis na distribuição dos tamanhos das partículas, especialmente da fração argila (diâmetro menor que 0,002 mm). Este problema tem sido investigado por pedologistas e engenheiros geotécnicos. El-Swaify, Dangler & Armstrong (1982), citam um exemplo dos solos do Hawai, onde a dispersão em água e usando NaOH conduziu a valores de K que tiveram diferenças da ordem de 5 vezes, enquanto que valores obtidos em áreas experimentais são aproximados daqueles obtidos para uma distribuição de partículas sem o uso de defloculantes. Um problema maior ainda é a peculiaridade da fração silte em solos saprolíticos caulínico-micáceos. Distintos dos siltes tradicionais achados nos solos de climas temperados e úmidos, que são basicamente ricos em quartzo, esses siltes podem mostrar uma alta taxa de expansão quando úmidos, assim contribuindo para um aumento na erosão causada pela água da chuva. Seria provavelmente aconselhável introduzir um fator corretivo que leve em conta tal fenômeno.

2.7.2. UTILIZAÇÃO DOS VALORES DE K OBTIDOS EM ÁREAS EXPERIMENTAIS:

Nas regiões tropicais existem uma grande quantidade de dados obtidos de experimentos. A utilização desses dados para áreas não agrícolas, impõe sérias dificuldades devido aos seguintes fatores. Nesses solos, a erosão causada pela chuva varia consideravelmente, dependendo do fato da superfície ser arada ou não. No caso dos solos lateríticos, a aragem destrói parte do confinamento natural do solo, fazendo este ser mais vulnerável à erosão pela limpeza do terreno, embora o escoamento superficial seja reduzido pelo incremento da superfície de infiltração. Nos solos saprolíticos, a aragem destrói a macroestrutura natural, que é frequentemente anisotrópica, como no caso dos solos produzidos pelos gnaisses, micaxistos e filitos. Nesses solos a erosão em áreas não aradas podem variar muito dependendo da atitude do maciço rochoso e/ou da xistosidade da rocha mãe. É bastante notado que áreas experimentais para a determinação do fator K são executadas sobre superfícies aradas. Uma grande dificuldade está no fato de que virtualmente não existe dados à respeito do fator K para solos saprolíticos, uma vez que esses não são de interesse do ponto de vista agrônomo. Do ponto de vista da engenharia civil, entretanto, é precisamente nas camadas saprolíticas que acontecem os maiores problemas com relação a erosão em regiões de clima tropical úmido. Desta maneira, o uso de ábacos para encher estas lacunas, está sujeito a sérias limitações, acima de tudo quando o propósito seja o de quantificar a erosão. Uma rápida checagem dos valores de K obtidos de ábacos para solos saprolíticos tipicamente erodíveis no Estado de São Paulo, entretanto, mostrou uma boa correspondência qualitativa.

2.7.3. VARIAÇÃO VERTICAL NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS AO LONGO DE PERFIS LATERÍTICOS:

A previsão do grau de erodibilidade nas áreas adjacentes aos trabalhos de engenharia nas regiões tropicais apresentam sérias diferenças por causa da extrema variação nas características e no comportamento dos solos ao longo do mesmo perfil. Em zonas tropicais úmidas, existe uma distinta característica de uma maior resistência à erosão em horizontes lateríticos. Subjacente a este horizonte laterítico existe frequentemente camadas saprolíticas espessas que são altamente suscetíveis à erosão. Sob tais condições a erosão laminar (intersulcos) e em sulcos fornecida pela USLE somente prevalece em estágios iniciais, após o que a erosão predominantemente se torna ravina, logo que ela alcança a camada saprolítica. Devido a melhor qualidade das camadas lateríticas para uso em revestimento primário, aterros, camadas de pavimento, etc., esta camada é frequentemente removida, conduzindo a uma perda de solo regional muito acima da previsão, utilizando-se a USLE. A Figura 2-12, ilustra os principais tipos de formas de erosão nas regiões tropicais (feições das estradas do Estado de São Paulo).

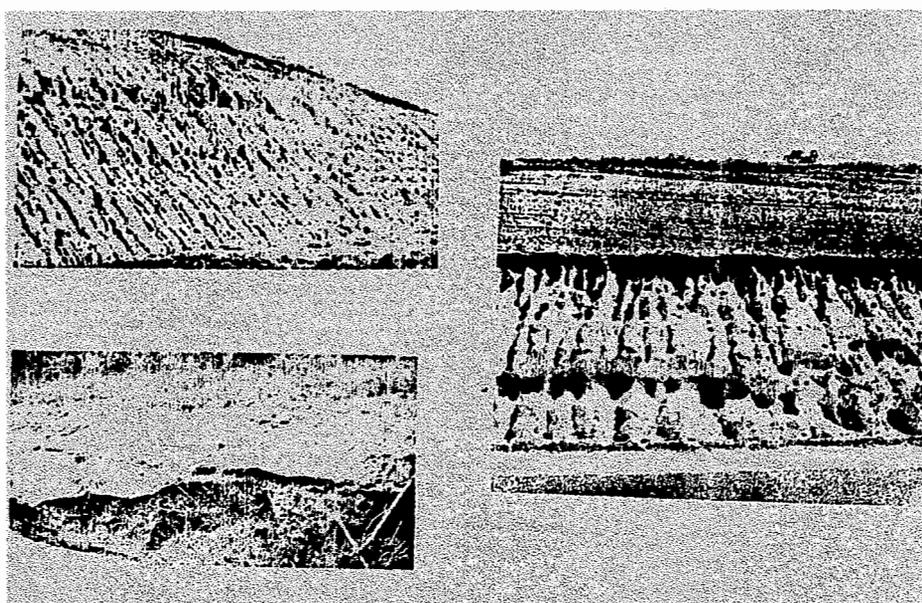


Figura 2-12 - Principais Tipos de erosão em solos tropicais.

As Figuras 2-13 e 2-14 respectivamente, mostram as áreas de ocorrência de solos lateríticos no mundo e no Brasil.

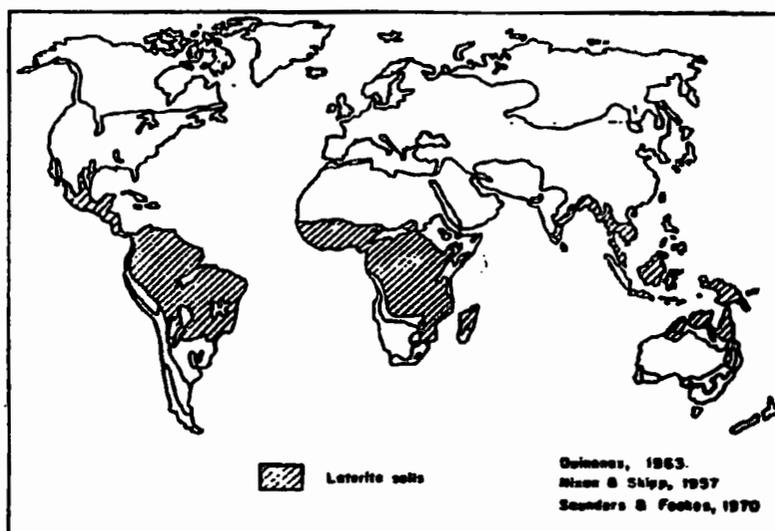


Figura 2-13 - Distribuição de solos tropicais sobre a terra (Gidigasu, 1976)



Figura 2-14 - Distribuição de solos lateríticos no Brasil

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da descrição dos métodos de ensaio empregados na avaliação e caracterização das amostras, perante seus comportamentos frente à erodibilidade. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, visando-se abranger uma variedade litológica apreciável. Durante a execução dos trabalhos de campo, as seguintes tarefas foram realizadas:

Retirada de amostras indeformadas em caixas rígidas de 25 x 25 x 25 cm, como se exemplifica na Figura. 3-1;

Coleta de amostras deformadas utilizadas nos ensaios de caracterização;

Posição do nível de amostragem (cota) em relação ao perfil do talude;

Análise qualitativa da ocorrência de feições erosivas. Essa análise pode ser vista através das fichas de cadastro em anexo. Elas descrevem as ocorrências de feições erosivas, bem como as fotos e todas as informações referentes aos pontos de amostragem;

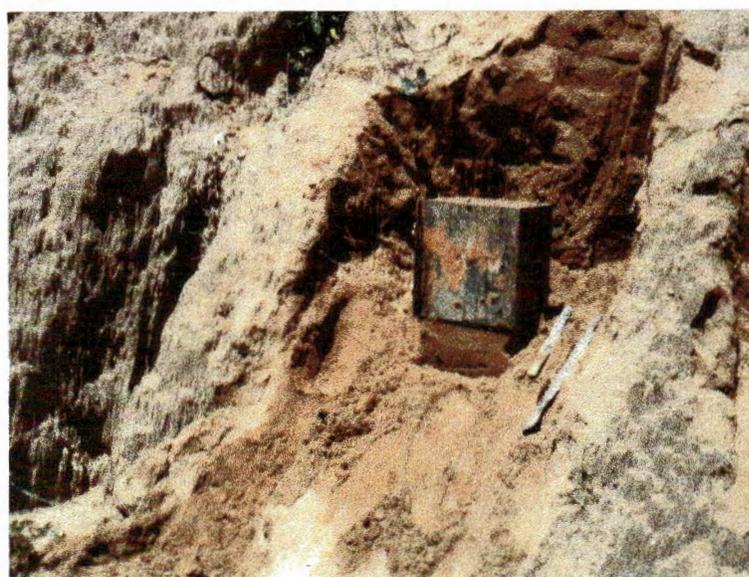


Figura 3-1 - Retirada de amostras indeformadas.

As amostras indeformadas eram acondicionadas em caixas rígidas e revestidas com parafina e todos os devidos cuidados, para preservar ao máximo a sua umidade natural bem como a estrutura original do material coletado. As amostras deformadas eram acondicionadas em sacos plásticos, para posterior manuseio do material, concernente aos ensaios desejados.

Numa faixa, que cobre aproximadamente um raio de 250 km de São Carlos, cadastraram-se cerca de catorze pontos, que apresentassem ou não feições erosivas. Esses pontos situavam-se em taludes de corte, com exceção das amostras 12 e 14, que foram retiradas de boçorocas. Três outras amostras foram coletadas na região metropolitana da cidade de Salvador (BA) e cedidas pelo Engº Paulo Cesar Burgos.

A necessidade de uma análise qualitativa acerca das feições erosivas impôs a adoção de dois níveis de erodibilidade. Essa classificação tornou-se imprescindível, haja vista que os resultados obtidos através dos métodos de análises empregados, foram confrontados com o comportamento dos solos em campo. A descrição das feições erosivas associadas a cada um destes níveis são as seguintes:

Baixa a Nenhuma - Aparência estável sem ocorrência de sulcos ou ravinamento em toda a face do talude (Figura 3-2 - parte superior da foto). Presença de sulcos lineares subparalelos de pequena profundidade (aproximadamente 10 cm). O efeito erosivo do escoamento d'água sobre a face do talude pode ser observado na sua base. (Figura 3-3).

Alta - Intensa remoção de solo, que gera cavidades de dimensões variadas e grandes sulcos. Presença de ravinas localizadas com forma similar aos sulcos, mas com profundidades que geralmente alcançam mais de 1 m. Possibilidade de ocorrência de deslizamento das camadas sobrejacentes (Figura 3-2 - parte inferior da foto).



Figura 3-2 - *Baixa a Nenhuma* erodibilidade (parte superior da foto) - *alta* erodibilidade (parte inferior da foto)



Figura 3-3 - *Baixa a Nenhuma* erodibilidade

A Tabela 3-1 resume as informações sobre os locais selecionados.

Tabela 3-1 - Informações sobre os pontos amostrados.

Nº	Amostra	Local	Litologia	Erodibilidade
01	01	Espírito Santo do Pinhal - Campinas (SP342, km 0, L.D.)	Granito	Baixa a Nenhuma
02	02A	Espírito Santo do Pinhal - Campinas (SP342, km 04, L.D.)	Migmatito	Baixa a Nenhuma
03	02B	Espírito Santo do Pinhal - Campinas (SP342, km 04, L.D.)	Migmatito	Baixa a Nenhuma
04	03	Espírito Santo do Pinhal - Campinas (SP342, km 11, L.E.)	Granito	Alta
05	04	Piracicaba - Charqueada (SP 308, km 13, L.E.)	Sedimentar	Baixa a Nenhuma
06	05	Matão - Barretos (SP326, km 77, L.E.)	•	Baixa a Nenhuma
07	06A	Porto Ferreira - São Carlos (SP215, km 62, L.E.)	Sedimentar	Alta
08	06B	Porto Ferreira - São Carlos (SP215, km 62, L.E.)	•	Baixa a Nenhuma
09	07	Charqueada - São Pedro (SP304, km 14 L.E.)	Sedimentar	Alta
10	08A	Ribeirão Preto - Porto Ferreira (SP 330, km 60, L.D.)	Sedimentar	Alta
11	08B	Ribeirão Preto - Porto Ferreira (SP 330, km 60, L.D.)	•	Baixa a Nenhuma
12	09	Marília (Erosão da UNESP)	Sedimentar	Alta
13	10	Marília - Assis (SP333, km 344 L.D.)	Sedimentar	Alta
14	11	Bauru - Marília (SP294, km 353 L.D.)	Sedimentar	Alta
15	12	Av. Paralela (ref. Abaete veículos) - Salvador (BA)	Granulito	Alta
16	13	Rodovia CIA / Aeroporto (ref. Auto Posto Ipiranga) - Salvador (BA)	Sedimentar	Alta
17	14	Clube Espanhol / Prefeitura Aeronáutica - Salvador (BA)	Granulito	Baixa a Nenhuma

onde L.D. - lado direito; L.E. - lado esquerdo; • - cobertura transportada.

3.2. MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COLETADOS

As amostras foram caracterizadas através de seus índices físicos e de características de compactação e através de análise mineralógica qualitativa com o emprego de análise térmica diferencial (ATD) e da técnica de Adsorção de Azul de Metileno.

A. Índices Físicos e Características de Compactação

Foram utilizados os seguintes ensaios na caracterização e na compactação dos solos estudados:

Amostras de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: norma NBR 6457/86 - ABNT

Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica: norma NBR 6508/84 - ABNT;

Análise Granulométrica Conjunta: norma NBR 6502/80 - ABNT;

Análise Granulométrica Conjunta, somente com a utilização de água;

Determinação do Limite de Liquidez: norma NBR 6459/84 - ABNT;

Determinação do Limite de Plasticidade: norma NBR 7180/84 - ABNT

Ensaio de Compactação: norma NBR 7182/86 - ABNT.

B. Mineralogia

Para caracterizar a mineralogia dos materiais, os seguintes métodos de análise foram utilizados:

- Análise Térmica Diferencial (ATD), utilizando-se equipamento da BP engenharia-Modelo RB3000 com módulo de informatização, como pode ser visto através da Figura 3-4.

As amostras utilizadas para a análise não foram tratadas para remoção de Fe livre, e as condições de realização do ensaio foram:

Limite de aquecimento: 1000°C

Velocidade de Aquecimento: 12.5°C/min.



Figura 3-4 - Equipamento para realização de Análise Térmica Diferencial.

- Técnica de Adsorção de Azul de Metileno (método de Fabbri, 1994).

Este ensaio consiste, basicamente, da determinação por titulação, do máximo de adsorção do corante pelo argilo mineral, através da adição sucessiva de pequenas quantidades de solução de azul de metileno em uma suspensão aquosa contendo a fração do solo a ser ensaiada, até que esse não mais adsorva corante e que haja excesso desse em suspensão. Esse excesso é indicado pelo aparecimento de uma “aura” em torno do núcleo de uma gota de suspensão (solo + água + azul) pingada em uma folha de papel de filtro (Fabbri & Sória, 1991).

É objetivo do presente ensaio determinar o coeficiente de atividade (CA), que mede a atividade da fração fina dos solos, através da fração de solo passada na peneira 200 (1g). A concentração da solução padrão de azul de metileno é de 1g/l.

No ensaio mede-se a quantidade de solução em ml necessária ao aparecimento da "aura" e determina-se o índice V_a , dado através da equação 3-1.

$$V_a = V (P_{200}/100) (1 + w/100) \quad \text{Equação 3-1}$$

onde;

V_a = quantidade de azul de metileno consumida por 1g de solo (10^{-3} g/g)

V = volume da solução de azul de metileno adicionada à suspensão (ml)

P_{200} = % do solo que

w = teor de umidade da fração de solo ensaiada (%)

O coeficiente de atividade (indicador da atividade do solo), utilizado na relação com a percentagem que passa pela peneira Nº 200, pode ser obtido através da equação 3-2.

$$CA = 100 V_a/P_F \quad \text{Equação 3-2}$$

onde;

CA = coeficiente de atividade

V_a = idem equação 3-1

P_F = % de solo abaixo de um determinado diâmetro arbitrado (neste estudo 5 μ)

A Figura 3-5 mostra os equipamentos utilizados no ensaio de Adsorção de Azul de Metileno.

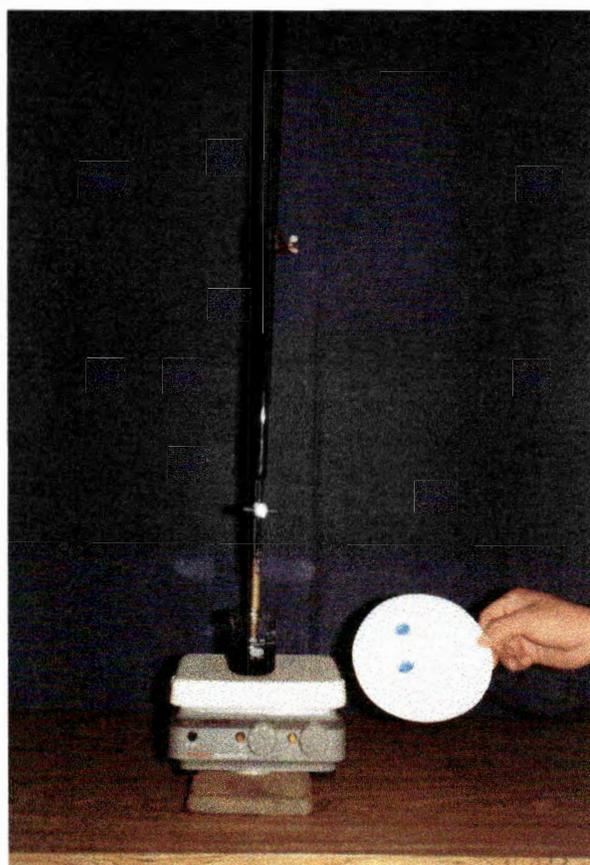


Figura 3-5 - Equipamentos para ensaio de Adsorção de Azul de Metileno.

3.3. ENSAIOS PARA ESTUDO DA ERODIBILIDADE

3.3.1. MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR, 1979

O método está baseado em dois ensaios simples (absorção de água e perda de massa por imersão) que utilizam amostras indeformadas, obtidas para o estudo em questão através da moldagem de um corpo de prova com dimensões de 40 mm de diâmetro e 20 mm de altura em um cilindro de PVC rígido com a ponta biselada. Todas as amostras foram submetidas a três repetições. Os valores do índice de absorção e perda de massa por imersão foram tomados através da média dos valores obtidos nas repetições. Este método apresenta uma série de vantagens, tais como:

- Utilização de amostras indeformadas;
- Consideração do efeito de secagem;
- Possibilidade de inferir propriedades de desagregabilidade e infiltração;
- Facilidade e rapidez de execução, bem como a não necessidade de utilização de equipamentos sofisticados.

3.3.1.1. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para a realização deste ensaio, necessita-se de um equipamento que consiste de um recipiente cilíndrico (base), com as mesmas dimensões do cilindro de amostragem, conectado a um tubo de vidro horizontal graduado. O conjunto é preenchido com água e na porção superior do recipiente (base), adapta-se uma pedra porosa, que deve ser mantida saturada. A amostra, ainda no cilindro de amostragem, deve ser pesada (confirmação da condição seca) e em seguida colocada sobre a pedra porosa saturada, dando-se início neste momento à contagem de tempo e fazendo-se leituras de volume de água absorvida por intervalo de tempo, até que a água atinja o topo da amostra. A Figura 3-6 mostra o equipamento de ensaio utilizado no ensaio de absorção d'água.

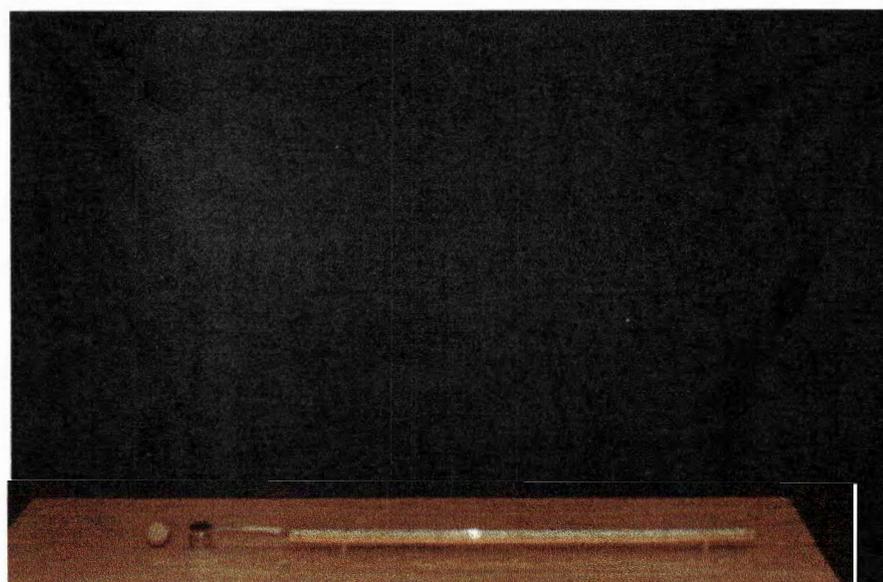


Figura 3-6 - Ensaio de absorção d'água (Nogami & Villibor, 1979).

Para a obtenção do índice de absorção (S) monta-se um gráfico do volume de água absorvido por unidade de área da base do corpo de prova (q) em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}), sendo o índice de absorção (S) o coeficiente angular do trecho inicial retilíneo.

3.3.1.2. ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

Encerrado o ensaio de absorção de água coloca-se uma pedra porosa presa à base do cilindro contendo a amostra e imerge-se o conjunto em um recipiente com água, até que o topo da amostra fique na horizontal e, aproximadamente a 2,00 mm do nível d'água. Mantêm-se o conjunto nesta posição até que não existam mais modificações de umidade perceptíveis na superfície livre do topo da amostra. Na sequência emerge-se este conjunto e gira-se até que a superfície livre da amostra fique na vertical, imergindo-o novamente em um recipiente com água (na nova posição).

A parte inferior da superfície livre da amostra, deve ficar a cerca de 30 mm do fundo do recipiente com água e dentro de um recipiente que permita a coleta do material desprendido desta superfície livre. Pelo período de 24 horas, mantêm-se esta condição de imersão, e após, determina-se a perda de massa (P) em percentagem da massa seca inicial da amostra. A Figura 3-7 ilustra o ensaio de perda de massa por imersão.

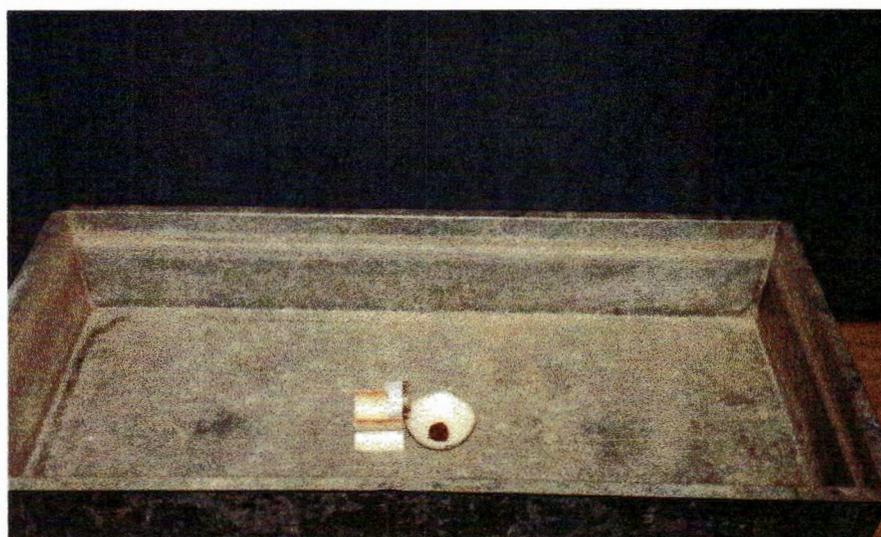


Figura 3-7 - Ensaio de perda de massa por imersão.

3.3.1.3. ÍNDICE DE ERODIBILIDADE (E)

O índice de erodibilidade proposto por Nogami & Villibor (1979) é calculado com a seguinte expressão: $E = 52 S/P$, onde S e P são os valores determinados. Se o valor de E é menor do que 1, considera-se que o material possui alta erodibilidade.

3.3.2. MÉTODO LNEC (NASCIMENTO & CASTRO, 1976)

Nascimento & Castro (1976) assinalam que os principais parâmetros que condicionam a resistência dos solos à erosão são a granulometria (solos arenosos) e, no caso de solos argilosos, a expansibilidade e a petrificação (possibilidade de permanência da coesão mesmo após a imersão do solo). Estes autores notaram que a expansibilidade medida num ensaio desenvolvido no LNEC, permitiu identificar 16 dos 21 solos com mau comportamento frente à erosão. Com base nisso eles propuseram a técnica de ensaio para a determinação dos limites de absorção dos solos, onde a expansibilidade determina o comportamento dos solos com alguma petrificação perante os processos erosivos. Esta técnica foi desenvolvida para avaliar a aptidão de certos solos à petrificação por secagem, como também a petrificação de solos *in situ*, com interesse sobretudo para o estudo da resistência à erosão em taludes de corte.

Para quantificar esta aptidão pela petrificação, um procedimento de ensaio foi desenvolvido para determinar a umidade absorvida por capilaridade. Esta umidade foi denominada de "limite de absorção (w'_A)". A petrificação é determinada num ensaio específico, a partir da absorção de água por pastilhas de solo. Determina-se assim o limite de absorção (w'_A), que é comparado com o teor de umidade (w_o) necessário para saturar a pastilha, sem variação de volume. Uma amostra de solo é considerada petrificada uma vez que a mesma absorva somente no máximo uma quantidade de água igual ao seu próprio volume de vazios. Apenas as amostras que apresentam alguma petrificação são submetidas a esse teste. A petrificação é determinada através da realização de um teste

expedito denominado *Slaking Test*. Este teste consiste basicamente na imersão de um torrão de solo seco ao ar num recipiente com água, observando se o mesmo desfaz-se completamente. Caso ele não se desfaça considera-se que a amostra apresenta alguma petrificação. Nesta condição determina-se o limite de absorção w'_A .

As amostras de solo são obtidas através da talhagem em um bloco de amostra indeformada de um corpo de prova com pelo menos uma face plana, e com aproximadamente 1 cm de espessura e 3 a 4 cm de diâmetro.

Coloca-se uma pedra porosa sobre uma bandeja de vidro com fundo plano e despeja-se água destilada até que o nível d'água atinja a superfície superior da pedra porosa.

A amostra de solo deve ser colocada sobre a pedra porosa, pressionando-a suavemente contra a mesma tal que uma melhor aderência possa ser assegurada.

A bandeja deve ser protegida com um plástico para que a evaporação d'água seja evitada. A amostra é deixada absorver água por capilaridade durante 24 horas, tomando-se os devidos cuidados para que o nível d'água dentro da bandeja esteja sempre coincidindo com a superfície superior da pedra porosa.

Após as 24 horas, a amostra junto com a pedra porosa deve ser removida e colocada sobre um papel filtro. Desta maneira a água livre existente sobre a pedra será absorvida. A amostra de solo deve ser removida do conjunto e colocada numa cápsula tarada de massa m , e a massa m_1 da amostra mais cápsula deve ser anotada. Deixa-se secar em estufa numa temperatura entre 105 e 110°C, até que obtenha-se massa constante. Após a secagem o conjunto deve ser pesado e anotado como m_2 .

O limite de absorção w'_A , dado em percentagem, é obtido através da seguinte expressão:

$$\left\{ (m_1 - m_2) / (m_2 - m) \right\} \times 100$$

Equação 3-3

onde;

m massa da cápsula (g);

m_1 massa da cápsula mais amostra após absorção (g);

m_2 massa da cápsula mais amostra seca (g).

As demais amostras que não apresentam coesão pétreia, também são analisadas por este método. Porém para essas amostras características de granulometria, expansão e consistência definem seus comportamentos perante os processos erosivos.

O fluxograma apresentado na Figura 3-8 resume os estudos para a escolha de solos resistentes à erosão, segundo a proposta de Nascimento e Casto (1976). Os parâmetros A e B, necessários para taludes de corte, dependem da expansão máxima admissível, que assegure a manutenção de um certo nível de ligações pétreas no solo.

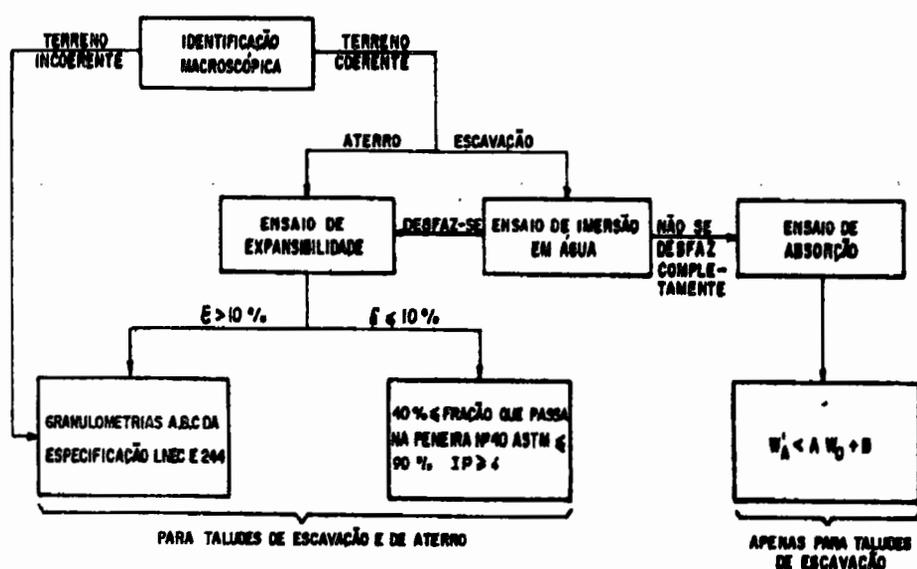


Figura 3-8 - Fluxograma para escolha de solos resistentes à erosão.

De acordo com o que pode ser observado no fluxograma da Figura 3-8, as amostras submetidas ao ensaio de limite de absorção devem respeitar a condição de $w'_A < A w_0 + B$. Nesta relação os parâmetros A e B são obtidos através da relação entre absorção e expansão. As expressões que ilustram essas relações podem ser vistas na equação 3-4.

$$\varepsilon = (\Delta e / 1 + e_0) 100 = G (w'_A - w_0) / 100 / ((1 + G W_0 / 100)) 100$$

$$w'_A = (1 + \varepsilon / 100) W_0 + \varepsilon / G \quad \text{Equação 3-4}$$

onde: $A = (1 + \varepsilon / 100)$ e $B = \varepsilon / G$;

ε : expansão livre;

e_0 : índice de vazios inicial;

Δe : variação de índice de vazios;

G : γ_s / γ_w (densidade dos sólidos - grandeza adimensional).

3.3.3. ESTABILIDADE DE AGREGADOS

As partículas de areia, silte e argila, encontram-se, em condições naturais aglomeradas em partículas compostas referidas com frequência como agregados ou torrões. Estes têm formato e tamanho variados, estando separados uns dos outros por pequenos fendilhamentos e determinam a estrutura do solo (Oliveira, 1987). A Figura 3-9 mostra os agregados das amostras ensaiadas.

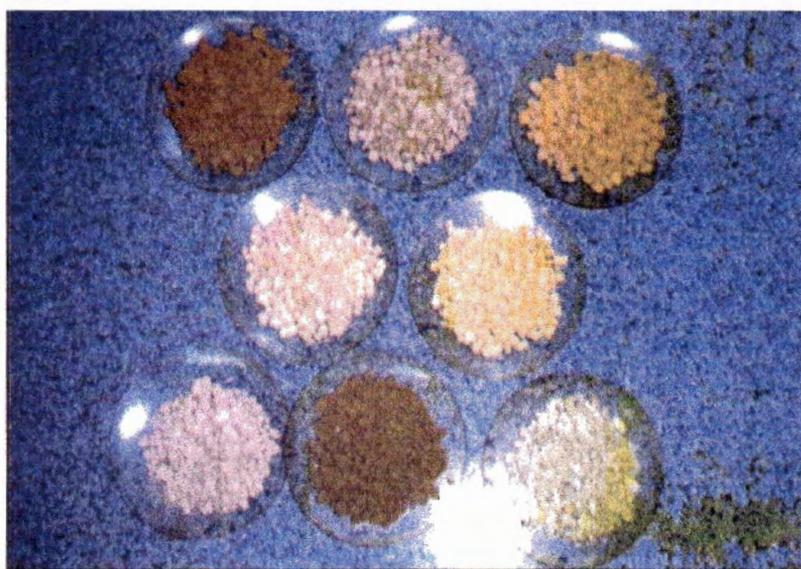


Figura 3-9 - Agregados preparados para análise.

A estabilidade do agregado é a medida de resistência de um agregado a quebra, usualmente medida pelo peneiramento em água. É uma importante propriedade do solo porque ela pode inferir a taxa de erosão do solo ou suas características hidráulicas, tais como sua taxa de infiltração.

O peneiramento é feito em um agitador mecânico com a utilização do material retido entre as peneiras 9.52 mm e 4.00 mm, pelo tempo de 10 minutos, obedecendo-se a série de peneiras utilizadas pelo IAC (Instituto Agrônomo de Campinas).

Após o preparo da amostra, enche-se com água o recipiente no qual o peneiramento por via úmida irá se processar, de tal maneira que o nível d'água coincida-se com a malha da peneira superior do conjunto, estando este na posição mais elevada. O peneiramento é feito através da sequência de 6 peneiras, montadas, de cima para baixo, em ordem decrescente: 7.93 mm, 6.35 mm, 4.00 mm, 2.00 mm, 1.00 mm e 0.50 mm. O material retido em cada peneira é pesado, obtendo-se assim para cada intervalo de peneiras as massas secas correspondentes, possibilitando desta maneira a obtenção dos índices de correlação necessários ao estudo em questão.

Como forma de analisar os resultados obtidos, Kemper e Chepil (1965) propuseram a adoção de dois índices:

- Diâmetro Médio Ponderado, originalmente proposto por Van Bavel (1949):

$$DMP = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i$$

Equação 3-5

onde;

\bar{x}_i é o diâmetro médio de cada fração;

w_i é a razão da massa da fração correspondente em relação à massa total da amostra.

Esta substituição da integral original (Van Bavel, 1949) por um somatório é justificada pelo fato de que o primeiro implica em um longo processo de determinação gráfica. Além disso Kemper & Chepil (1965), afirmam que existe

uma boa correlação entre DMP calculado por integração e por somatória ainda quando somente cinco frações são utilizadas.

- Diâmetro Médio Geométrico

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{Equação 3-6}$$

onde;

w_i é a massa dos agregados de cada classe de tamanho;

x_i é o diâmetro médio de cada classe de tamanho;

$\sum w_i$ é a massa total da amostra

3.3.4. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE

Ensaio especialmente desenvolvido para este trabalho e baseado na utilização do equipamento de ensaio normalizado pela BS 1377:1975 (Head, 1980 - Figura 3-10) porém com algumas alterações.

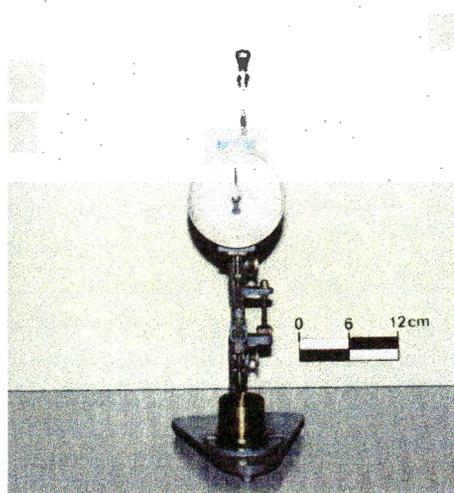


Figura 3-10 - Equipamento original do ensaio de cone.

Houve necessidade de se ajustar novos parâmetros para a execução do ensaio, pois pela proposta original que preconiza uma massa do conjunto de penetração de 80g e sem altura de queda, as medidas de penetração para os solos na condição em que seriam estudados não se tornariam viáveis.

Vários testes foram realizados variando-se a altura de queda e a massa do conjunto de penetração, empregando-se amostras de solo compactadas, com o grau de compactação variando na faixa de 80 a 85% do Proctor Normal. Com isso buscava-se um procedimento que fosse reprodutível e que pudesse medir a resistência à penetração tanto das amostras na sua condição de umidade natural quanto após saturadas. Chegou-se a uma configuração que resume-se basicamente em uma nova massa para o conjunto de penetração de 300 g e da imposição de uma altura de queda de 10 mm. Assim, o ensaio de penetração de cone utilizado nesta pesquisa estuda o comportamento de amostras indeformadas, perante a penetração de um cone com inclinação de 30° e altura de 35 mm com massa constante, pela transformação de energia potencial em energia cinética. Em síntese o equipamento de ensaio tem as características apresentadas na Figura 3-11.

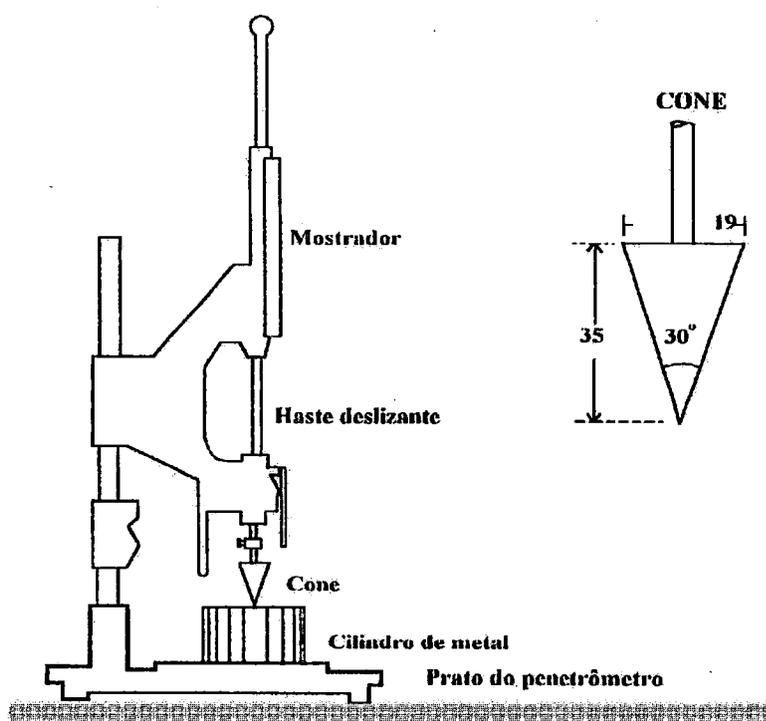


Figura 3-11 - Esquema do equipamento para ensaio de penetração de cone.

Mede-se em cada teste a altura de penetração alcançada pela sua ponta em 09 (nove) pontos diferentes na superfície de cada amostra, tanto na umidade natural (umidade de campo), quanto na umidade de saturação. Esta última obtida com a colocação da amostra sobre uma pedra porosa saturada, umedecendo-se a amostra por capilaridade pelo período de 1 hora. Os valores de penetração natural e saturada são obtidos através da média dos valores alcançados em três repetições, excluindo-se aqueles que apresentem valores de dispersão em relação à média acima de 5%. A Figura 3-12 mostra o equipamento do ensaio de penetração de cone utilizado neste estudo.

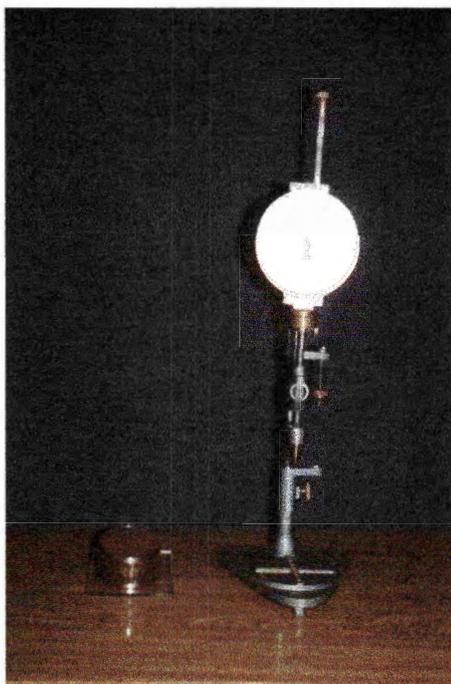


Figura 3-12 - Equipamento do ensaio de penetração de cone.

Em síntese os dados do equipamento e das amostras resumem-se em:

massa do conjunto de penetração = 300g

altura de queda = 10 mm

curso máximo da haste = 40 mm

diâmetro do anel de amostragem = 73 mm

altura do anel de amostragem = 40 mm

A partir dos valores de penetração nas condições natural (P_{nat}) e saturada (P_{sat}), pode-se definir DP (variação de penetração) conforme a equação 3-7 a seguir.

$$(P_{sat} - P_{nat}) / (P_{nat}) = DP \text{ (variação de penetração)} \quad \text{Equação 3-7}$$

3.3.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados sobre amostras na umidade natural e amostras na umidade de saturação. A saturação foi obtida por capilaridade, por meio da colocação do corpo de prova sobre pedra porosa saturada para um período de 3 horas, como mostra a Figura 3-13. O cisalhamento do corpo de prova foi realizado de acordo com o que preconiza a ABNT - NBR 12770 (Determinação da resistência à compressão não confinada).

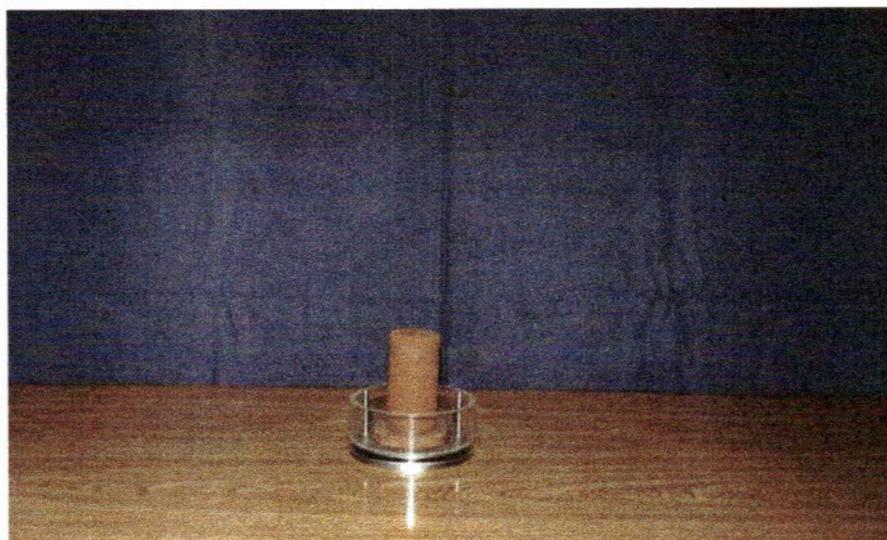


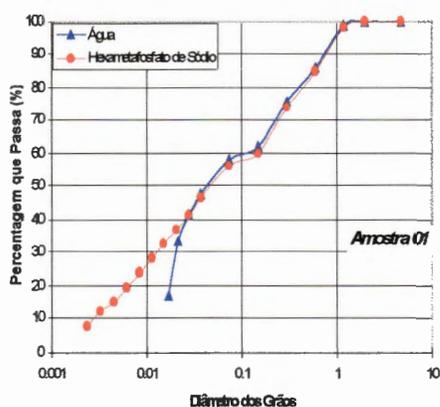
Figura 3-13 - Esquema de saturação do corpo de prova para ensaio de compressão simples.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

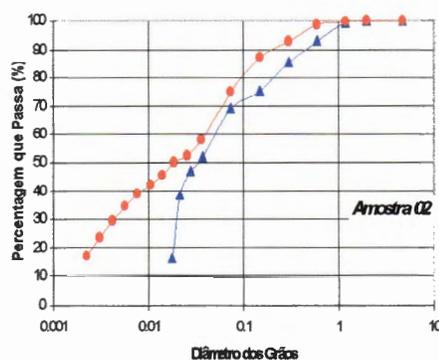
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

Para caracterizar os solos utilizados neste estudo foram realizados ensaios de análise granulométrica conjunta, limites de consistência, massa específica dos sólidos, além de determinações de massas específicas e das umidades naturais. Efetuaram-se ainda ensaios de compactação na energia Proctor Normal, com exceção das amostras 10, 11, 12, 13 e 14.

A título de ilustração a Figura 4-1 apresenta as curvas granulométricas, obtidas com auxílio de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e sem defloculante, à exceção das amostras 15, 16 e 17. Estas curvas refletem de uma forma geral o ocorrido com todas as amostras, ou seja, a ausência da classe granulométrica das argilas nos ensaios em que não se empregam defloculante. Isto indica que os solos estudados, em geral, não tendem a se dispersar apenas em presença de água, o que poderia ser um indicador de maior erodibilidade.

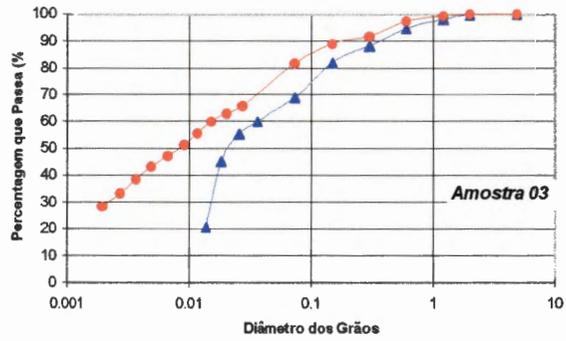


(a)

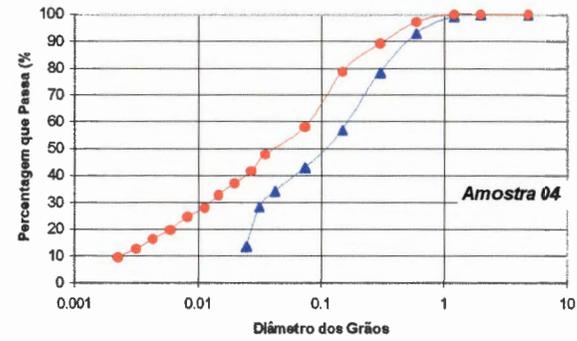


(b)

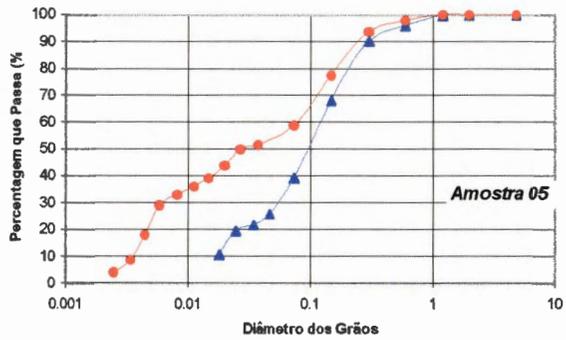
Figura 4-1 - Comparação de curva granulométrica (com e sem defloculante)



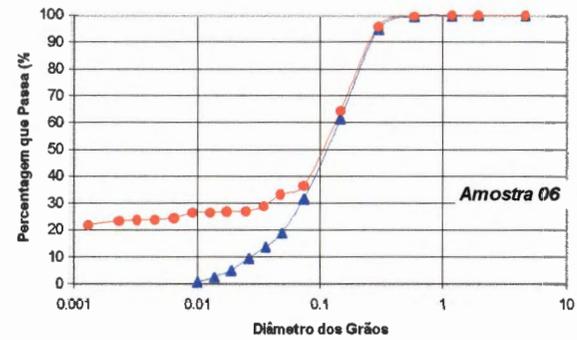
(c)



(d)

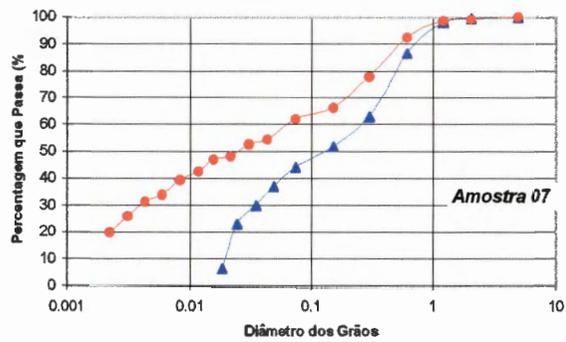


(e)

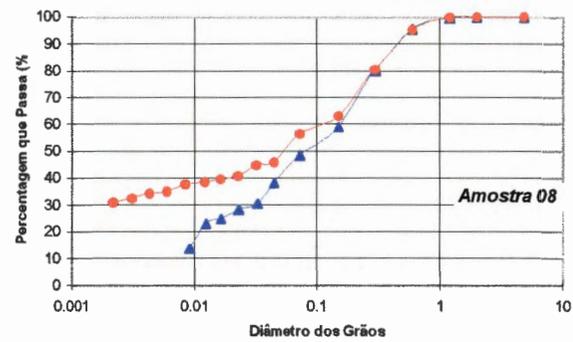


(f)

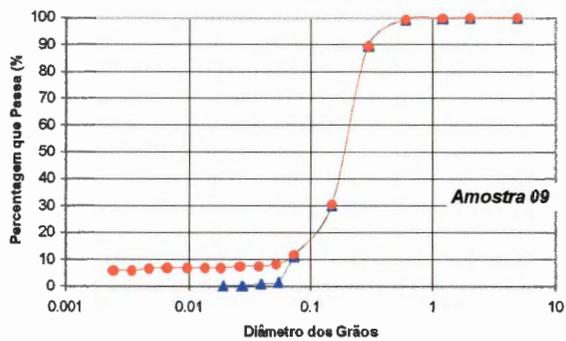
Figura 4-1 - Comparação de curva granulométrica (com e sem defloculante)



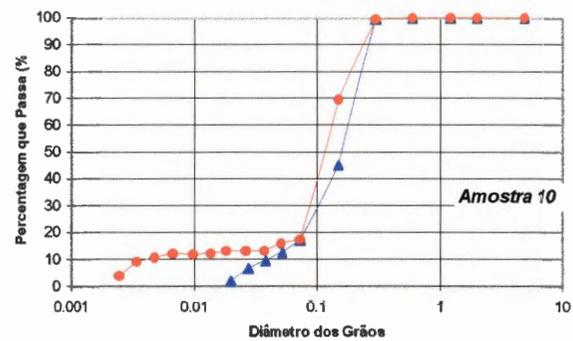
(g)



(h)

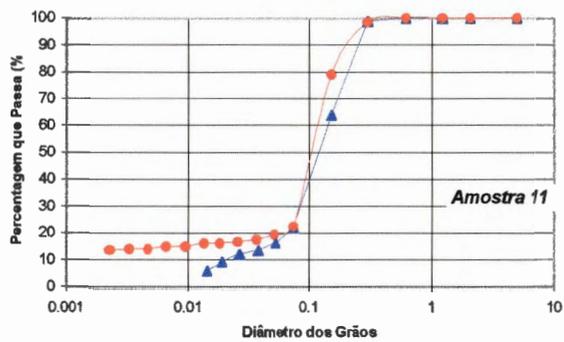


(i)

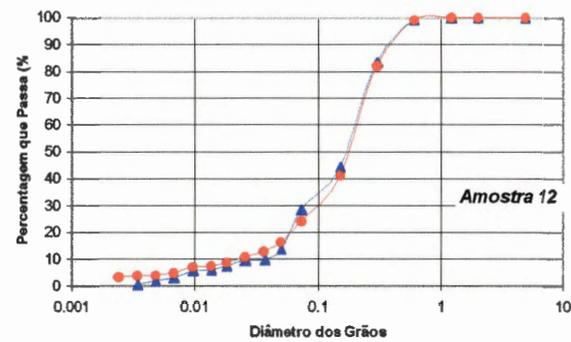


(j)

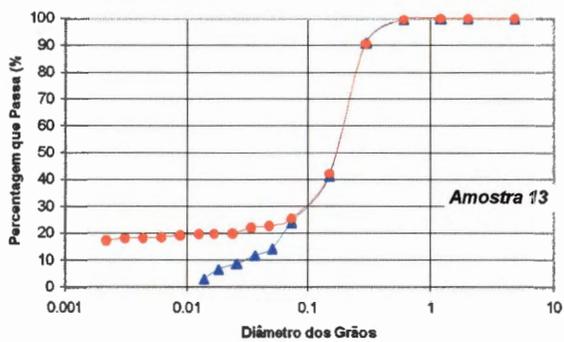
Figura 4-1 - Comparação de curva granulométrica (com e sem defloculante)



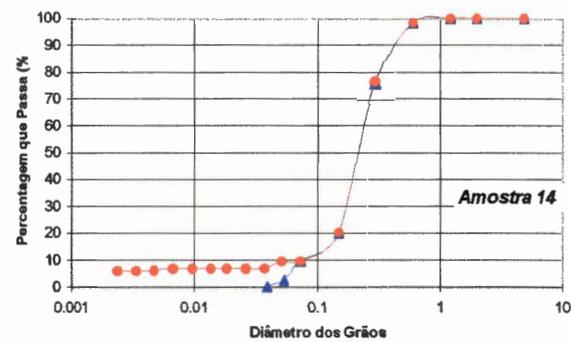
(k)



(l)



(m)



(n)

Figura 4-1 - Comparação de curva granulométrica (água x hexametáfosfato de sódio)

A Tabela 4-1 apresenta os resultados obtidos através da caracterização física dos solos estudados. Para os resultados da análise granulométrica conjunta, os valores obtidos com a utilização de hexametáfosfato de sódio estão apresentados à esquerda na coluna, enquanto que os valores obtidos somente com a utilização de água estão apresentados à direita na coluna. Nesta tabela, γ_s - peso específico das partículas, LL, LP, IP - limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade respectivamente, w_{nat} - umidade natural, γ - peso específico natural, γ_d - peso específico seco, Sr_{nat} - grau de saturação natural.

Tabela 4-1 - Resultados da caracterização dos materiais amostrados.

Nº	gs (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classe granulométrica (ABNT)			W _{nat} (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	Sr _{nat} (%)
					Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)				
01	27,49	55	40	15	44 - 42	50 - 58	6 - 0	25,11	15,56	12,44	57,05
02	26,53	35	23	12	25 - 31	59 - 69	16 - 0	28,00	17,15	13,40	75,80
03	27,64	58	37	21	18 - 16	53 - 84	29 - 0	30,00	14,73	11,33	57,58
04	27,75	48	38	10	42 - 57	49 - 43	9 - 0	21,35	15,66	12,91	51,52
05	26,14	40	25	15	41 - 61	57 - 39	2 - 0	13,17	18,72	16,54	59,36
06	26,30	27	17	10	61 - 68	13 - 32	23 - 0	15,80	18,68	16,13	65,96
07	27,37	54	31	23	40 - 58	41 - 42	19 - 0	15,57	17,67	15,29	53,94
08	27,07	40	26	14	55 - 52	25 - 48	30 - 0	21,00	14,89	12,30	47,37
09	26,50	NP	NP	NP	88 - 89	6 - 11	6 - 0	4,53	16,34	15,63	17,27
10	25,92	NP	NP	NP	82 - 83	16 - 17	2 - 0	7,32	18,84	17,56	39,53
11	25,95	35	22	13	78 - 78	8 - 22	14 - 0	8,32	17,58	16,23	36,00
12	26,48	NP	NP	NP	76 - 71	22 - 29	2 - 0	10,30	16,72	15,16	36,40
13	26,56	NP	NP	NP	74 - 76	8 - 24	18 - 0	12,63	15,59	13,84	36,50
14	26,30	NP	NP	NP	90 - 90	4 - 10	6 - 0	4,43	15,48	14,82	15,00
15	27,20	47	36	11	31 - 34	53 - 66	16 - 0	35,23	16,09	11,90	73,71
16	26,50	NP	NP	NP	78 - 78	6 - 22	16 - 0	9,29	17,29	15,82	30,87
17	26,90	68	50	18	34 - 28	48 - 72	18 - 0	27,78	15,70	12,29	62,86

A Figura 4-2 mostra duas das curvas de compactação Proctor Normal, correspondentes às amostras 07 e 08.

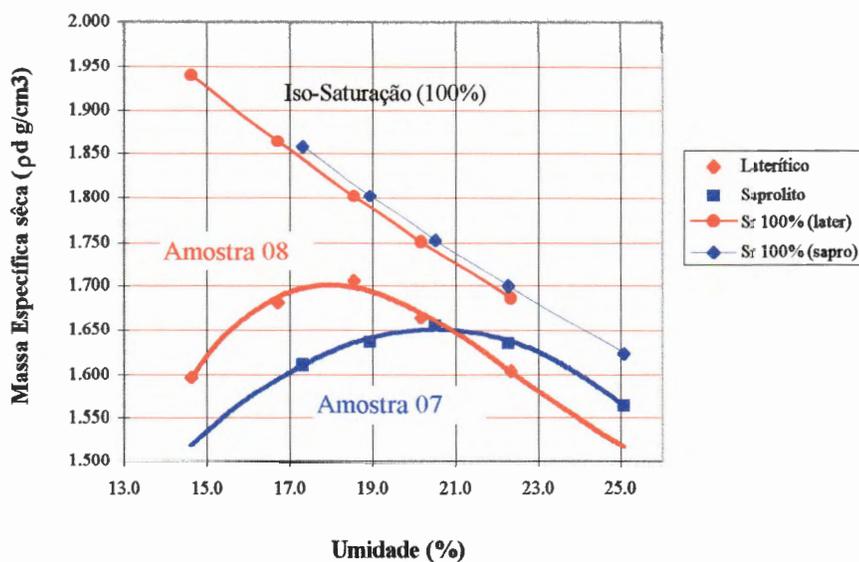


Figura 4-2 - Curva de compactação Proctor Normal (amostras 07 e 08)

Das curvas de compactação na energia Proctor Normal, resume-se na Tabela 4-2 os seguintes parâmetros de compactação para as amostras ensaiadas.

Tabela 4-2 - Parâmetros de compactação.

Amostra	$\gamma_{d\text{máx}}$ (g/cm ³)	W _{ótima} (%)
01	1.590	22,00
02	1.585	21,00
03	1.475	27,50
04	1.525	24,00
05	1.710	17,80
06	1.700	17,90
07	1.652	20,50
08	1.700	18,00
09	1.860	8,00
15	1.475	25,70
16	1.790	13,60
17	1.450	27,20

Para a análise mineralógica, foi utilizada a técnica de Análise Térmica Diferencial. As Figuras 4-3 e 4-4 mostram um exemplo de resultados de ATD. Nelas encontram-se dois solos com características diferenciadas quanto à evolução pedogenética. A Figura 4-3 mostra o resultado obtido para um solo pouco evoluído (saprolito), enquanto que a Figura 4-4 apresenta o resultado obtido para um solo bastante evoluído pedologicamente (laterítico).

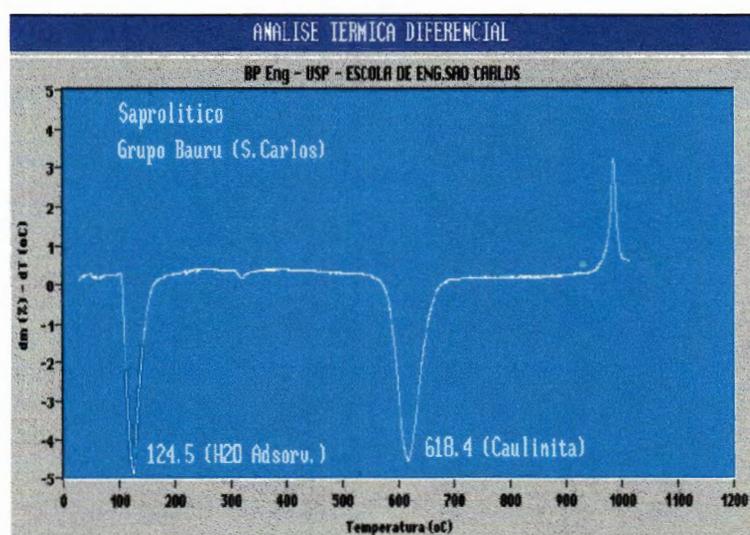


Figura 4-3 - ATD da amostra 07.

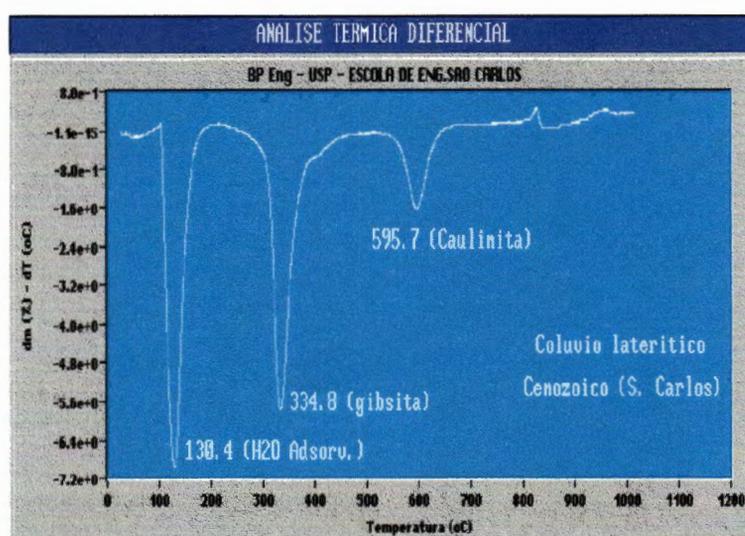


Figura 4-4 - ATD da amostra 08.

As figuras relativas às demais amostras podem são encontradas em anexo, à exceção de algumas amostras.

Observa-se na Figura 4-3 (solo saprolítico) a presença somente do mineral do grupo Caulinita na fração argila. Os picos observados são bastante característicos desse grupo mineralógico. A maior amplitude e o deslocamento de temperatura do pico em questão, quando comparado ao da Figura 4-4 (solo laterítico), talvez deva-se ao maior grau de cristalinidade do mineral argila.

Na Figura 4-4 observa-se a presença de Gibsita (hidróxido de Alumínio) e mineral do grupo Caulinita na fração argila. A maior amplitude de pico da Gibsita indica grande quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A constatação desta mineralogia pela interpretação dos picos presentes na figura condiz com a expectativa de um solo laterítico bastante evoluído.

A Tabela 4-3 mostra os resultados das análises por ATD, de maneira resumida e através da descrição dos minerais encontrados.

Tabela 4-3 - Resultados da caracterização mineralógica por ATD.

Amostra	Mineralogia
01	óxidos e hidróxidos Fe e Al, caulinita
02	caulinita
03	óxidos e hidróxidos Fe e Al, caulinita
04	feldspato, muscovita
05	caulinita
06	óxidos e hidróxidos Fe e Al, caulinita e mica
07	caulinita
08	óxidos e hidróxidos Fe e Al, caulinita
09	caulinita
10	caulinita
11	óxidos e hidróxidos Fe e Al, caulinita
12	caulinita
13	caulinita
14	caulinita

A Figura 4-5 mostra a classificação das amostras de acordo com a técnica de adsorção de azul de metileno (Fabbri, 1994). As amostras 8 e 11 que no gráfico encaixam-se dentro da área de solos pouco ativos, confirmam o comportamento laterítico de ambas. Trata-se de solos bastante evoluídos e em campo pode ser notado o intenso processo de laterização. Os valores obtidos através da técnica de adsorção de azul de metileno mostram que apenas duas amostras são classificadas como solo de pouca atividade, enquanto que as demais amostras (alta e baixa a nenhuma erodibilidade) apresentaram comportamento de solo ativo.

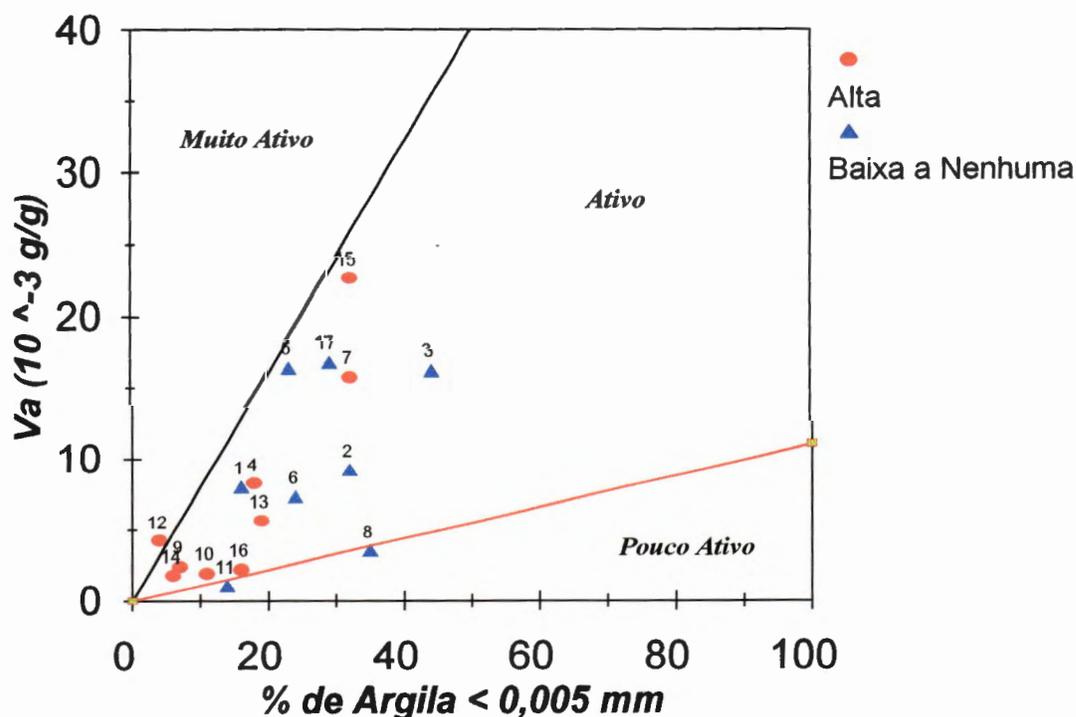
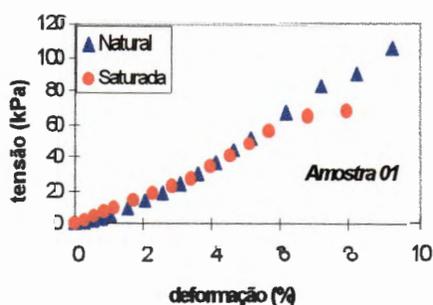


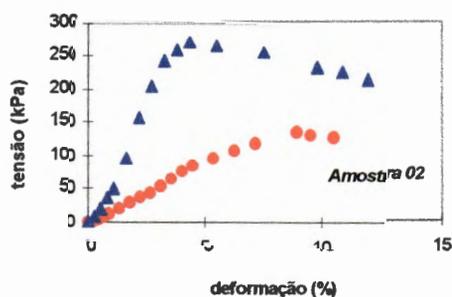
Figura 4-5 - Classificação do solo através da técnica de adsorção de azul de metileno (Fabbri, 1994).

4.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

As Figuras de 4-6 (a) a (k), mostram os resultados obtidos através da realização de ensaios de resistência a compressão simples. Para cada amostra ensaiada foram obtidos dois valores de resistência. Um teste é feito na condição natural e o outro teste na condição saturada. A saturação foi obtida por capilaridade, com a amostra apoiada sobre pedra porosa pelo período de 3 horas. Estas curvas mostram de uma maneira geral que os valores de resistência alcançados quando da saturação do corpo de prova são menores do que aqueles obtidos para o ensaio na condição natural. As maiores perdas de resistência, quando da saturação do corpo de prova, foram realmente verificadas para as amostras classificadas como de alta erodibilidade. Apenas a amostra 11, classificada como de baixa a nenhuma erodibilidade apresentou perda de resistência elevada, da mesma ordem de grandeza das amostras com alta erodibilidade.

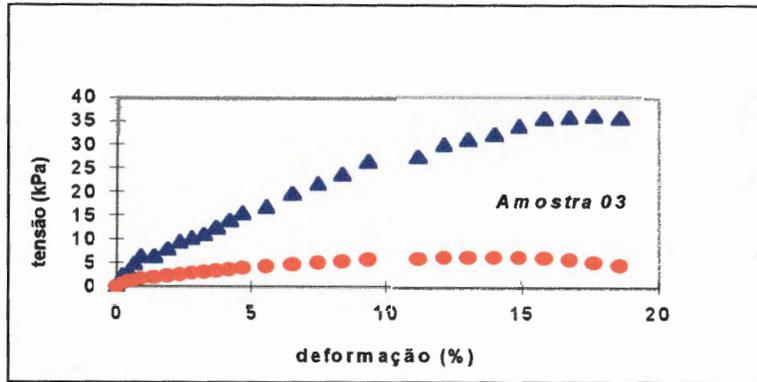


(a)

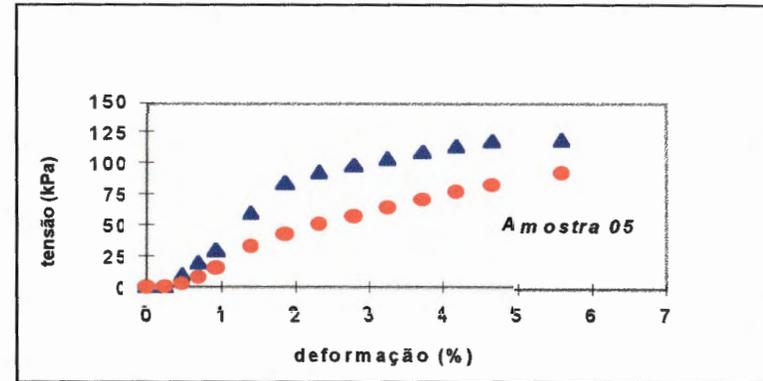


(b)

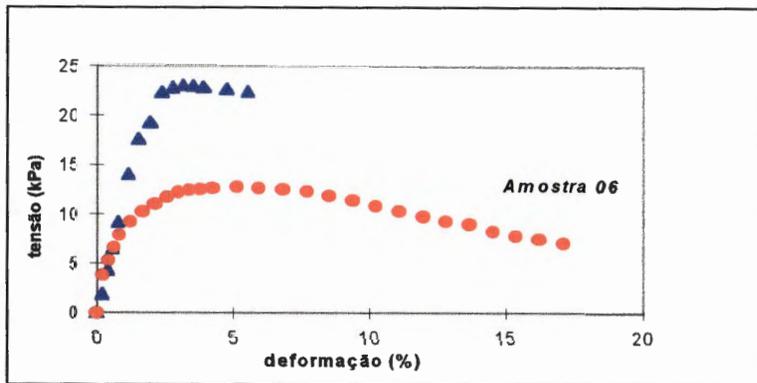
Figura 4-6 - Curvas tensão deformação para as amostras na umidade natural e saturada



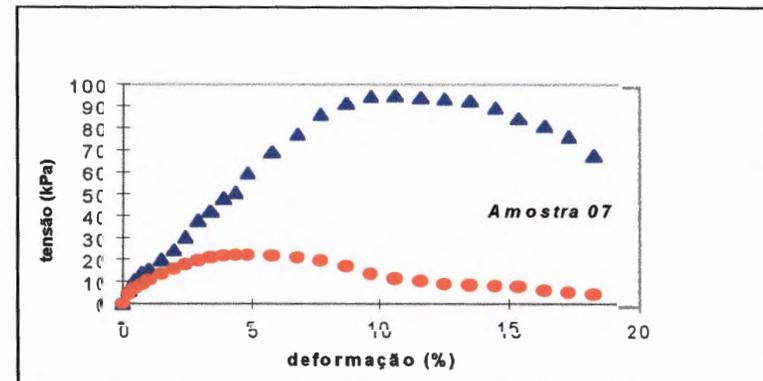
(c)



(d)

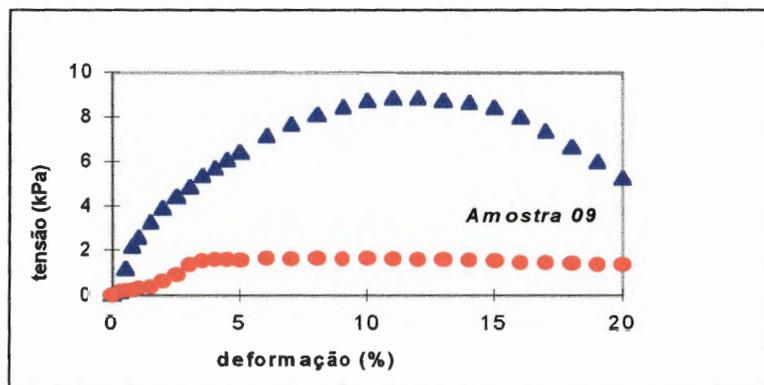


(e)

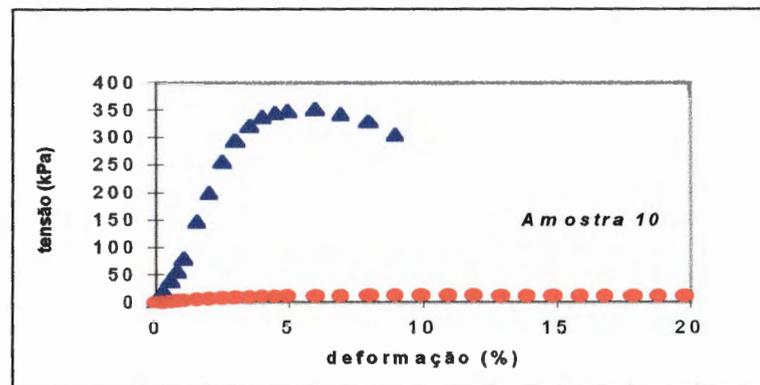


(f)

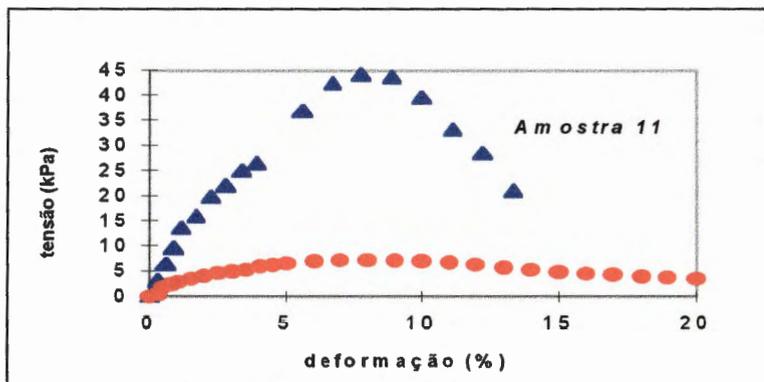
Figura 4-6 - Curvas tensão deformação para as amostras na umidade natural e saturada



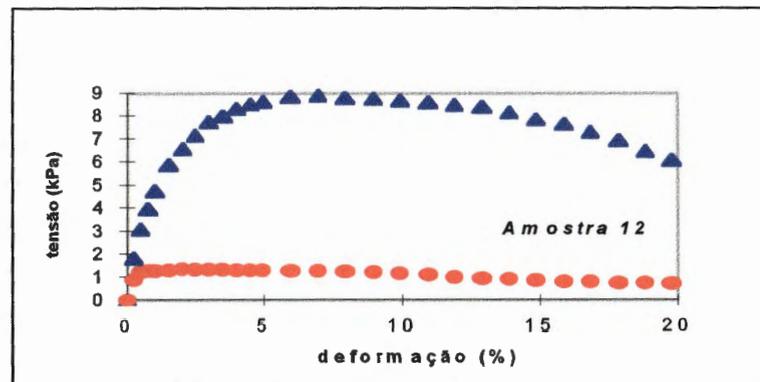
(g)



(h)

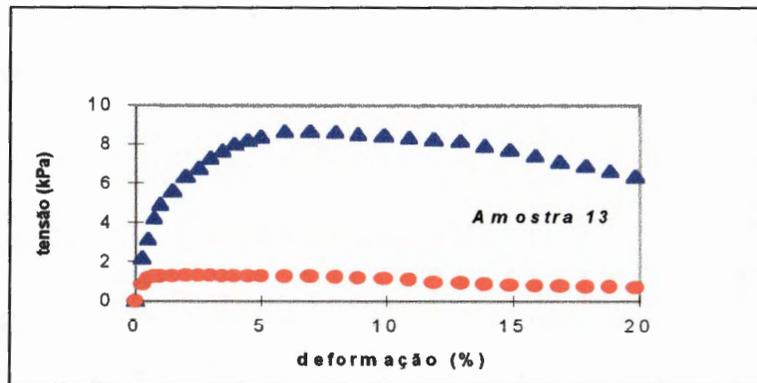


(i)

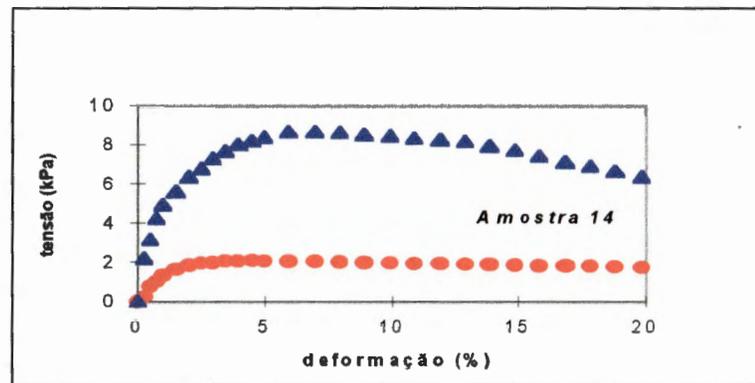


(j)

Figura 4-6 - Curvas tensão deformação para as amostras na umidade natural e saturada



(k)



(l)

Figura 4-6 - Curvas tensão deformação para as amostras na umidade natural e saturada

A Tabela 4-4 mostra um resumo dos valores obtidos para o ensaio de compressão simples.

Tabela 4-4 - Resultados dos ensaios de compressão simples

Amostra	valores de Rc em kPa	
	Natural	Saturada
01	105.00	67.00
02	215.00	135.00
04	28.00	6.00
05	118.00	91.00
06	22.00	13.00
07	95.00	22.00
09	9.00	1.60
10	350.00	12.00
11	45.00	7.00
12	12.00	0.00
13	9.00	1.30
14	9.00	2.00

A Figura 4-7 exibe os valores de variação de resistência do ensaio de compressão simples (DR) dado pela equação 4-1 a seguir e o valor de resistência à compressão simples saturada.

$$\{(R_{cnat} - R_{csat}) / (R_{cnat})\} 100$$

Equação 4-1

Nota-se que as amostras mais erodíveis tendem a se agrupar (exibem as maiores variações de resistência). Apenas a amostra 11 que em campo apresenta baixa a nenhuma erodibilidade, mistura-se com amostras de alta erodibilidade. Um fato interessante é que no ensaio de penetração de cone essa mesma amostra também apresentou comportamento semelhante ao das amostras com alta erodibilidade.

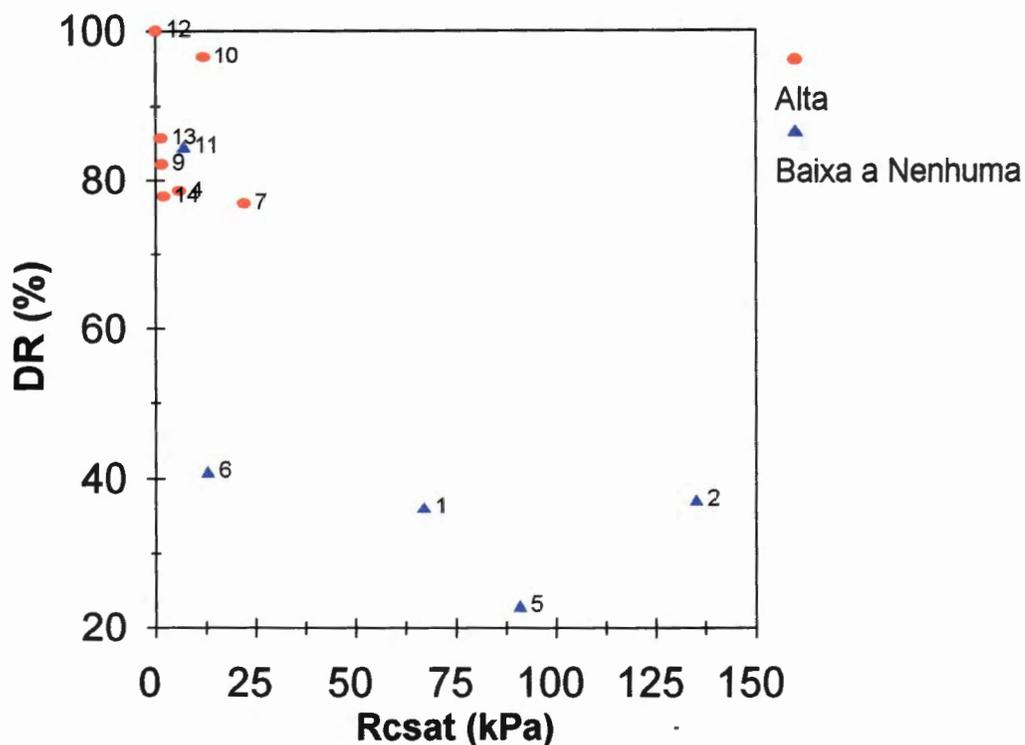


Figura 4-7 - Resistência à compressão simples x variação de resistência.

4.3. ENSAIOS PARA ESTUDO DA ERODIBILIDADE

4.3.1. ESTABILIDADE DE AGREGADOS

A estabilidade de agregados neste trabalho foi representada através de seu Diâmetro Médio Ponderado (DMP). A Tabela 4-5 apresenta os resultados obtidos para a análise de Estabilidade de Agregados.

Tabela 4-5 - Ensaio de Estabilidade de Agregados.

Amostras	DMP (mm) (diâmetro médio ponderado)
01	2.74
02	2.76
03	2.16
04	1.43
05	2.22
06	0.35
07	1.09
08	3.06
10	0.48

A Figura 4-8 mostra a comparação do DMP entre as amostras. Cabe lembrar que nem todas as amostras possibilitam a formação de agregados. As amostras de 01 a 08 puderam ser ensaiadas através deste método. Dentre as amostras que possibilitam a formação de agregados, nota-se pela figura 4-8 que apenas a amostra 06, classificada como de baixa a nenhuma erodibilidade, apresentou valor de DMP inferior a 1,5. Este limite de DMP em primeira aproximação separa as amostras com comportamentos distintos.

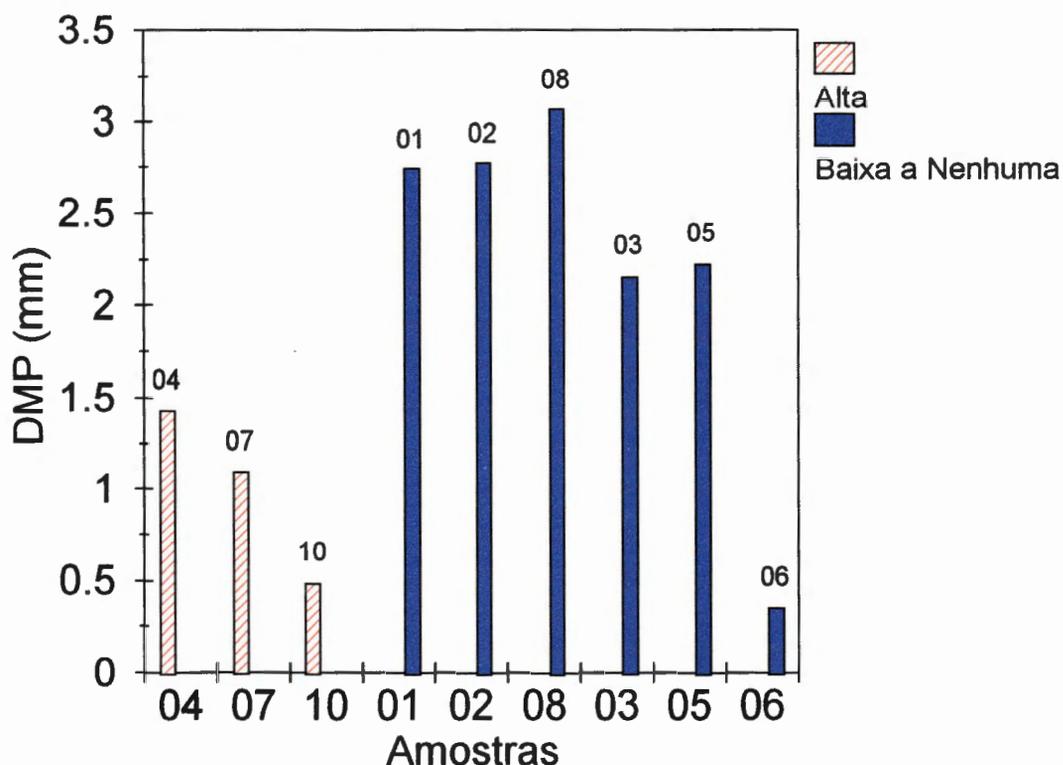


Figura 4-8 - Diâmetro Médio Ponderado, após ensaio de Estabilidade de Agregados.

A Figura 4-9 relaciona a quantidade de silte e areia fina em termos percentuais com o diâmetro médio ponderado. Apenas as amostras que puderam ser ensaiadas através de ambos métodos, aparecem nesta relação. Para as amostras que não foram submetidas ao ensaio de estabilidade de agregados, o valor de diâmetro médio ponderado foi obtido através da utilização dos resultados de análise granulométrica sem o uso de defloculante. Um diâmetro médio ponderado de 1,50 mm, a princípio, parece ser o limitante entre os diferentes comportamentos. Apenas a amostra 06 que em campo é classificada como de baixa a nenhuma erodibilidade apresenta comportamento semelhante ao das amostras com alta erodibilidade.

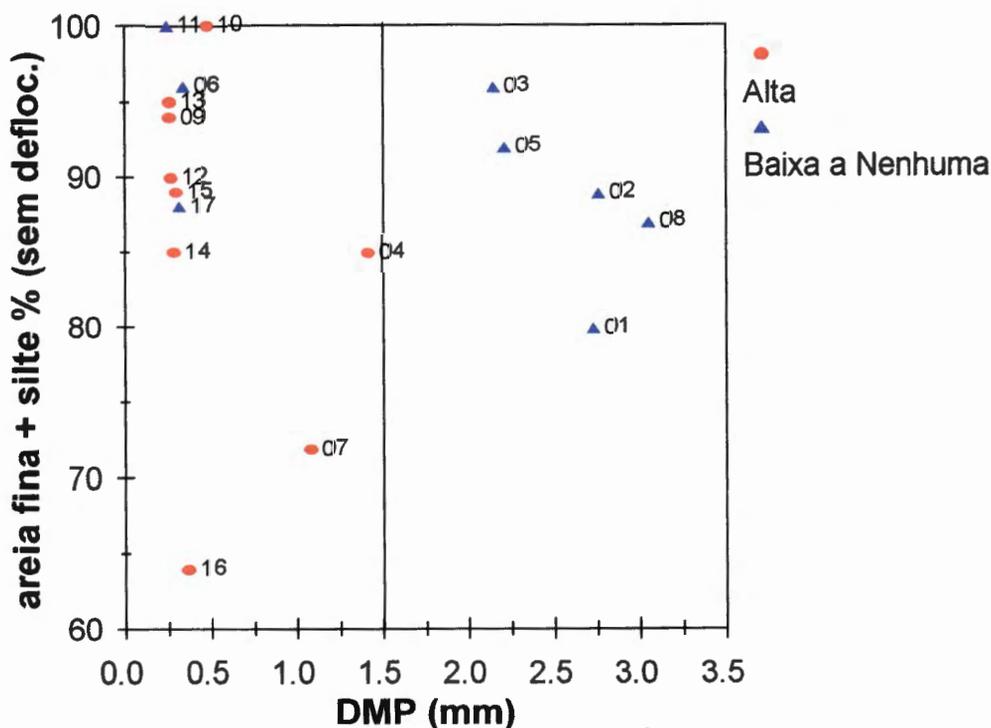


Figura 4-9- Areia fina + silte x diâmetro médio ponderado.

4.3.2. INFILTRABILIDADE E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO (MÉTODO DE NOGAMI & VILLIBOR, 1979)

Ensaio realizado para a obtenção do índice de absorção S por efeito de capilaridade e perda de massa por imersão P . O método de Nogami & Villibor, 1979 foi aplicado a todas as amostras. Na interpretação dos resultados empregou-se também a modificação proposta por Pejon (1992).

O índice de absorção, S , é o coeficiente angular do trecho retílineo inicial da relação entre $q \times \sqrt{t}$. Na Figura 4-10 utilizada para ilustrar os resultados obtidos, o teste foi levado até o período de 1 hora, possibilitando a visualização do comportamento da infiltrabilidade ao longo do tempo. O ensaio foi repetido três vezes para cada amostra, e observando-se a figura, nota-se uma boa repetibilidade entre os testes efetuados para uma mesma amostra, o que é uma característica para todas as amostras.

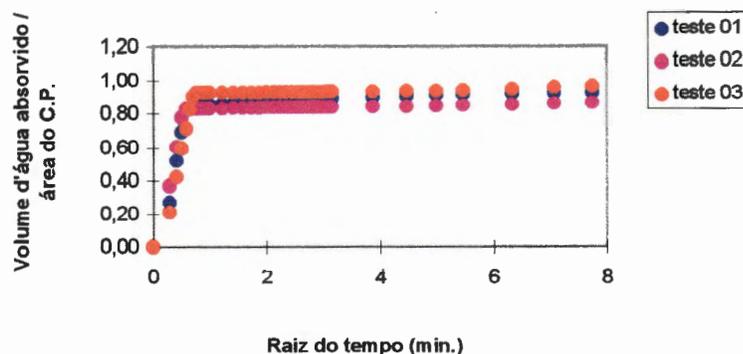


Figura 4-10 - Gráfico para obtenção do índice de absorção S - Amostra 11 (método de Nogami & Villibor, 1979)

Os gráficos para obtenção do índice de absorção S das demais amostras encontram-se em anexo.

A Tabela 4-6 mostra os resultados obtidos, através da aplicação do método de ensaio de Nogami & Villibor (1979) para as amostras com as dimensões normais do método.

Tabela 4-6 - Resultados do método de Nogami & Villibor, 1979.

Amostras	<i>Método de Nogami & Villibor, 1979</i>	
	S (cm x t ^{-1/2})	P (%)
01	0.45	3.00
02	0.19	0.12
03	0.45	5.92
04	0.28	76.32
05	0.14	0.23
06	0.30	1.59
07	0.35	20.73
08	1.34	3.77
09	0.35	76.37
10	0.31	63.40
11	1.22	13.58
12	1.06	71.00
13	1.16	68.52
14	0.98	62.00
15	0.22	1.20
16	0.31	30.14
17	0.24	1.03

A Figura 4-11 mostra os resultados obtidos na aplicação do método de Nogami & Villibor, 1979. Nesta relação a perda de massa por imersão é colocada em função do índice de absorção (S). Através deste método pode ser observado que quase todas as amostras puderam ser separadas quanto ao comportamento frente à erosão. A amostra 15 apesar de ser classificada como de alta erodibilidade situa-se no gráfico com comportamento de material com baixa a nenhuma erodibilidade. Valores do índice de erodibilidade $E = 52 S/P$ (Nogami & Villibor, 1979) ou $E = 40 S/P$ (Pejon, 1992) menores que a unidade, indicam solos com alta erodibilidade. Na tentativa de se avaliar o comportamento de amostras com dimensões diferentes da proposta original do método, buscou-se realizar os testes de infiltrabilidade e perda de massa por imersão, utilizando-se amostras com as mesmas dimensões daquelas utilizadas no ensaio de penetração de cone. Nesta tentativa apenas algumas amostras foram utilizadas. A Figura 4-12 mostra os resultados obtidos com a utilização das amostras modificadas. Pode ser observado através da figura, que para as amostras ensaiadas houve uma coerência de resultados, quando comparados àqueles obtidos para as amostras com as dimensões normais do método.

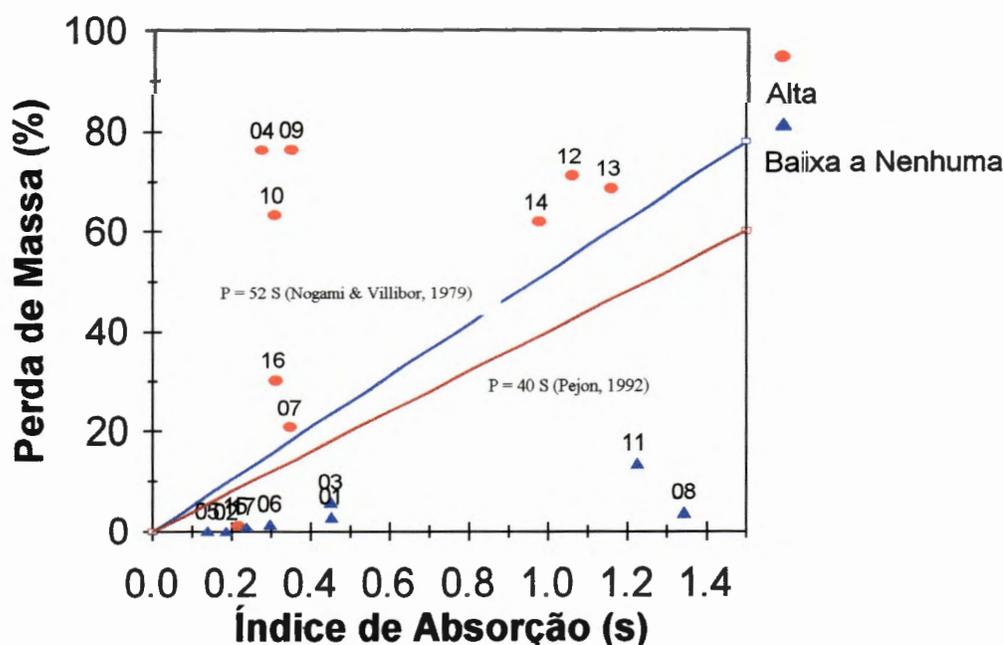


Figura 4-11 - Resultados do método de Nogami & Villibor, 1979 (amostras com dimensões normais).

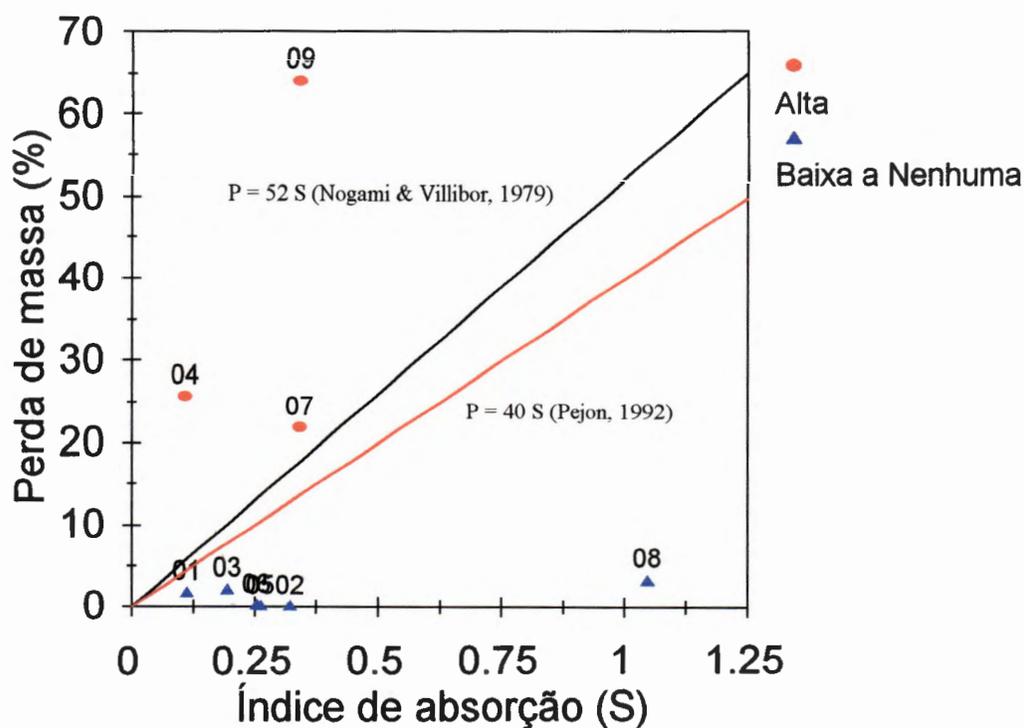


Figura 4-12 - Resultados do método de Nogami & Villibor, 1979 (amostras com dimensões modificadas)

A Figura 4-13 mostra a relação do índice de erodibilidade de Nogami & Villibor, 1979 com a massa específica seca. Todas as amostras com alta erodibilidade puderam ser separadas, com exceção da amostra 15 que apresentou valor de $E = 52 S/P$ bastante elevado. Essa amostra representa um material do embasamento cristalino da região metropolitana da cidade de Salvador (BA). Por limitação de escala, algumas amostras de baixa a nenhuma erodibilidade não aparecem no gráfico, pois apresentam valores de E muito elevados.

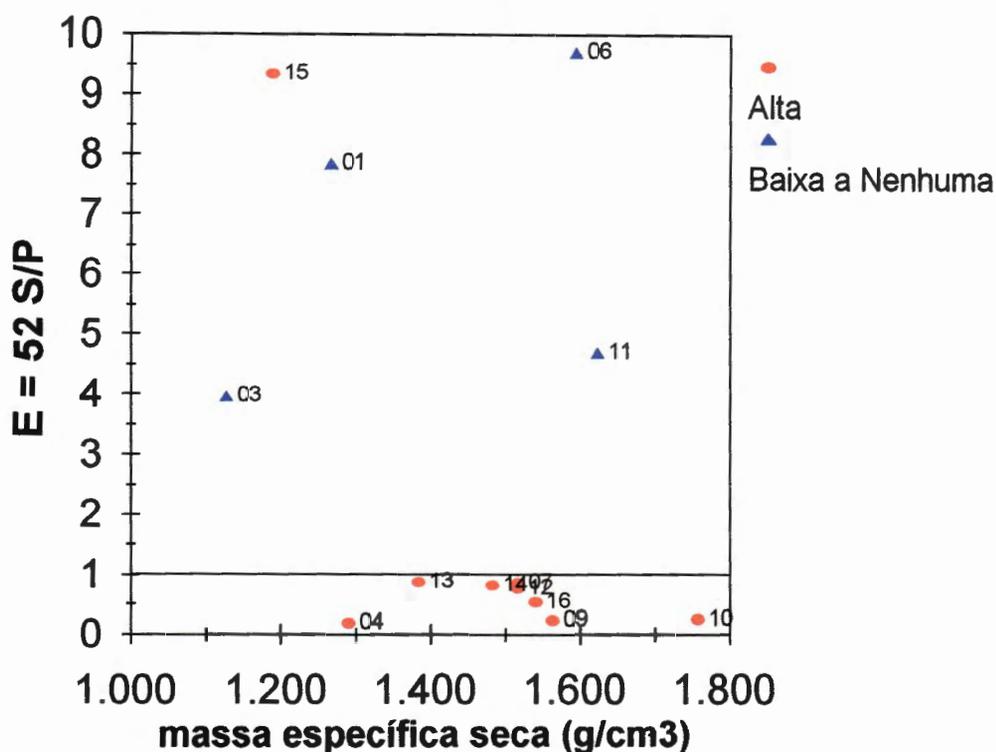


Figura 4-13 - ρ_d x índice de erodibilidade de Nogami & Villibor, 1979.

4.3.3. MÉTODO LNEC (NASCIMENTO E CASTRO, 1976)

O teste para o ensaio de limite de absorção é efetuado sobre amostras que possuem alguma petrificação (possibilidade de permanência de coesão mesmo após a imersão do solo). Através do ensaio de desagregação em água "slaking test", mergulha-se um torrão de solo seco ao ar dentro de um recipiente com água e observa-se se o material se desfaz completamente ou não. Caso a última opção seja verificada é porque o material possui alguma coesão pétreia. Aplica-se neste caso o ensaio de limite de absorção proposto pelo método. Amostras que não apresentam petrificação também são analisadas, porém através de características granulométricas, de consistência e de expansibilidade.

A Tabela 4-7 mostra os resultados de w'_A e de w_o para as amostras que puderam ser ensaiadas de acordo com esse procedimento. Por sua vez, a tabela 4-8 mostra os valores da percentagem de partículas de solo que passam na peneira N°40.

Tabela 4-7 - Valores de Limites de Absorção (Nascimento e Castro, 1976)

Amostra	Limites de Absorção	
	W'_A	W_o
01	52.75	44.05
02	39.50	37.14
03	48.55	51.10
05	24.52	25.51
08	40.14	49.08

Tabela 4-8 - Valores de % que passa na peneira # 40.

Método Nascimento e Castro, 1976	
Amostras	% passa Peneira 40
06	87
07	86
11	78
15	97
17	85

A Figura 4-14 mostra os resultados obtidos, através da comparação entre os limites de absorção w'_A e w_o . A condição de limite de absorção (w'_A) menor que a umidade calculada correspondente à saturação do corpo de prova sem variação de volume (w_o), indica um comportamento satisfatório frente à erosão.

Com relação às amostras analisadas segundo características de granulometria, expansão e plasticidade, pode ser verificado que:

- As amostras 06, 07, 11, e 17 apresentam coesão, expansão menor que 10%, a fração que passa na peneira nº 40 (tabela 4-8) encaixa-se entre 40 e 90% e índice de plasticidade superior a 4%. Todas essas condições são requisitos à um material com comportamento satisfatório perante a erosão. Dentre essas, apenas as amostra 07 que apresenta em campo alta erodibilidade contraria os resultados obtidos.

- A amostra 15 atende às especificações de expansão e índice de plasticidade, porém a fração que passa na peneira N°40, que é de 97% supera o limite máximo. Deste modo esta amostra também pôde ser identificada, pois em campo apresenta alta erodibilidade.
- As amostras 09, 10, 12, 13,14 e 16 não apresentam coesão. Apresentando expansão superior a 10%, a amostra 04 segundo o método de Nascimento e Castro (1976) também apresenta comportamento semelhante ao de um material sem coesão. Para solos não plásticos (sem coesão) o método em questão especifica que o material deve atender as faixas A, B e C da especificação AASHO M147/65. Nenhuma dessas amostras atendem a especificação da AASHO, identificando assim seu comportamento de alta erodibilidade segundo o método.

Em suma, apenas a amostra 7 não pôde ser identificada. Ela atende todas as especificações de solo não erodível, mas em campo apresenta alta erodibilidade.

A Tabela 4- 9 mostra as faixas A, B e C da especificação AASHO M147-55 para agregados de solo.

Tabela 4-9 - Faixas A, B e C da Especificação AASHO M 147-55

Peneira	Percentagem que passa (%)		
	A	B	C
2"	100	100	
1"		75 - 95	100
3/8"	30 - 65	40 - 75	50 - 85
Nº 4	25 - 55	30 - 60	35 - 65
Nº 10	15 - 40	20 - 45	25 - 50
Nº 40	8 - 20	15 - 30	15 - 30
Nº 200	2 - 8	5 - 20	5 - 15

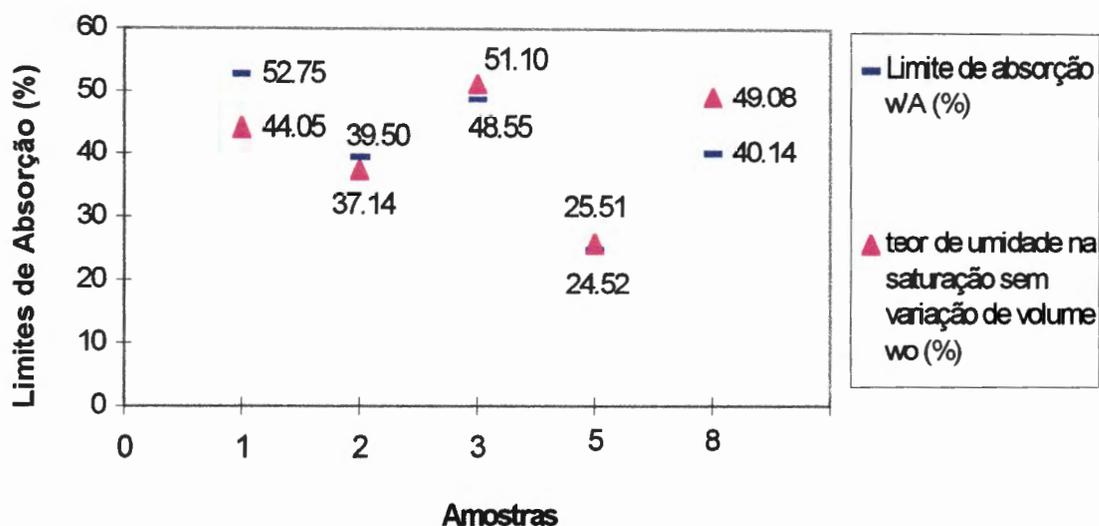


Figura 4-14 - Resultados do ensaio de limite de absorção - comparação entre w'_A e w_o .

4.3.4. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE

Através de uma série de testes variando-se altura de queda e massa do conjunto de penetração, observou-se que para uma altura de queda de 10 mm e massa do conjunto de penetração de 300g, as penetrações atingiam valores capazes de englobar tanto as amostras na umidade natural, quanto as amostras na umidade de saturação. Como consta do capítulo 3, as penetrações foram realizadas em nove pontos diferentes na superfície da mesma amostra tanto na condição natural quanto saturada. Este método foi aplicado a todas as amostras com exceção da amostra 02. Problemas técnicos de acondicionamento desta amostra em câmara úmida, impossibilitaram o seu uso. A Tabela 4-10 mostra os valores de penetração tanto na umidade natural, quanto saturada, além das características das amostras, quanto à umidade de saturação e grau de saturação final.

Tabela 4-10 - Resultados do ensaio de penetração de cone.

Amostras	<i>Ensaio de penetração de cone</i>				
	Psat. (mm)	Pnat. (mm)	DP (%)	Wsat. (%)	Srfinal (%)
01	6.95	5.96	16.61	36.62	86.02
03	7.27	6.46	12.54	44.25	84.16
04	9.92	6.25	58.86	39.22	94.54
05	4.86	4.20	15.71	20.81	86.30
06	6.71	6.12	9.64	18.83	76.12
07	8.17	4.51	81.41	25.44	86.54
08	8.93	7.82	14.20	37.15	89.32
09	17.96	11.54	55.59	21.40	81.59
10	13.66	4.59	197.60	15.02	81.82
11	10.24	6.07	68.70	20.95	90.73
12	20.39	10.7	90.56	24.72	87.71
13	22.81	11.72	94.62	26.35	76.11
14	20.93	12	74.42	20.58	69.91
15	8.43	5.5	53.27	41.78	88.20
16	11.13	6.14	81.27	20.00	73.61
17	7.24	4.7	54.04	48.41	85.65

A Figura 4-15 mostra os resultados expressos em termos de DP (incremento de penetração em termos percentuais da penetração saturada em relação à penetração natural), colocados em função da penetração natural. Nesta figura observa-se uma tentativa de criar um índice de erodibilidade. Numa primeira aproximação valores do índice de erodibilidade $E = 4,50 \text{ Pnat} / \text{DP}$ menores que a unidade identificam amostras com alta erodibilidade.

A Figura 4-16 apresenta uma comparação entre as amostras, através da variação de penetração (DP). Pode ser observado também em primeira aproximação que o limite de DP igual a 20%, tende a separar as amostras em relação aos seus níveis de erodibilidade, com exceção da amostra 11 que apresentou comportamento semelhante ao das amostras com alta erodibilidade.

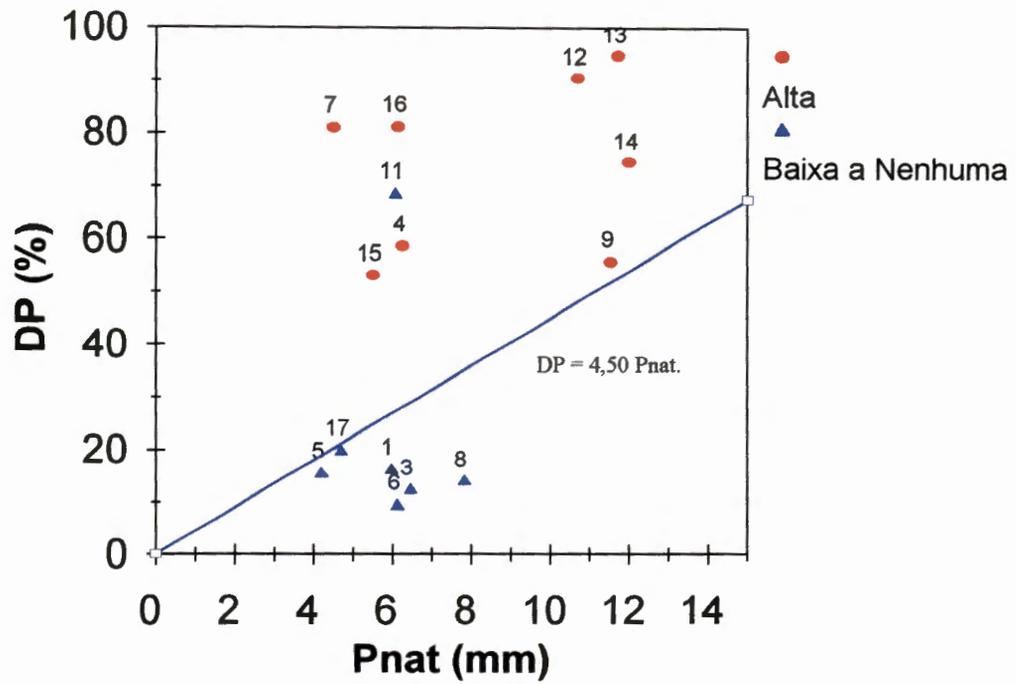


Figura 4-15 - Relação entre DP e penetração natural.

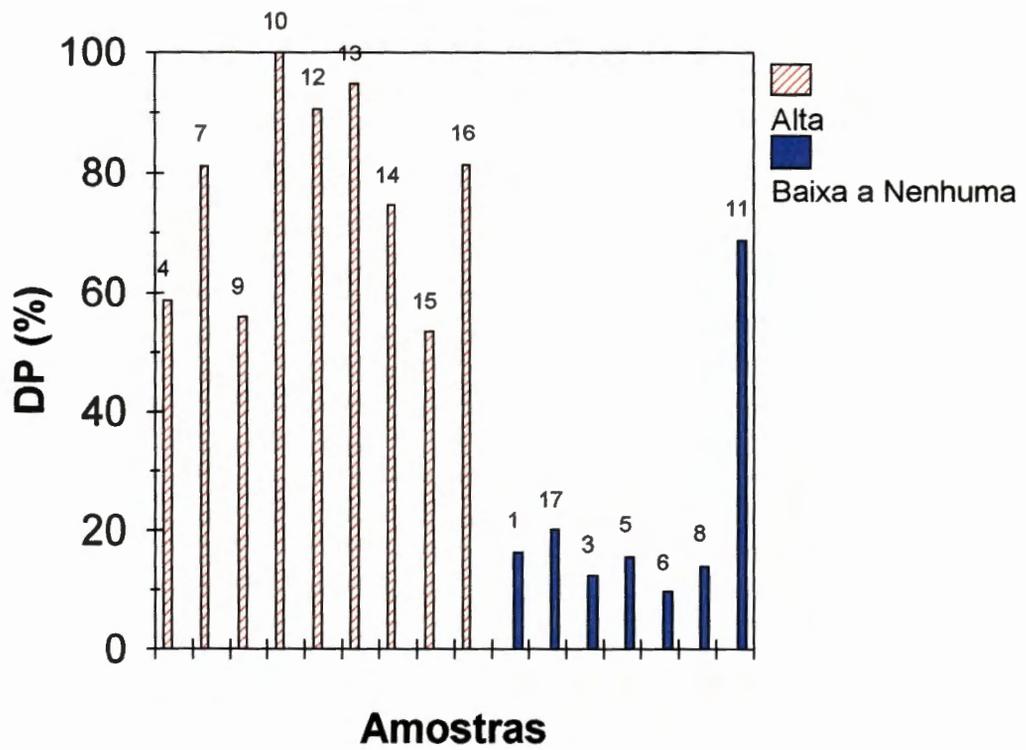


Figura 4-16 - Variação de penetração (%) - comparação entre as amostras

4.3.5. RELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS

Os resultados de ensaios de penetração de cone continuarão a ser analisados adiante, principalmente em conjunção com os resultados de ensaios de compressão simples, método de Nogami & Villibor (1979) e características físicas e granulométricas.

A Figura 4-17 apresenta os valores de penetração de cone na umidade natural e resistência à compressão simples na umidade natural. Pode ser observado que não há relação entre valores absolutos de penetração de cone e resistência à compressão simples, além disso amostras com diferentes níveis de erodibilidade apresentam-se de forma dispersa dentro da área gráfica.

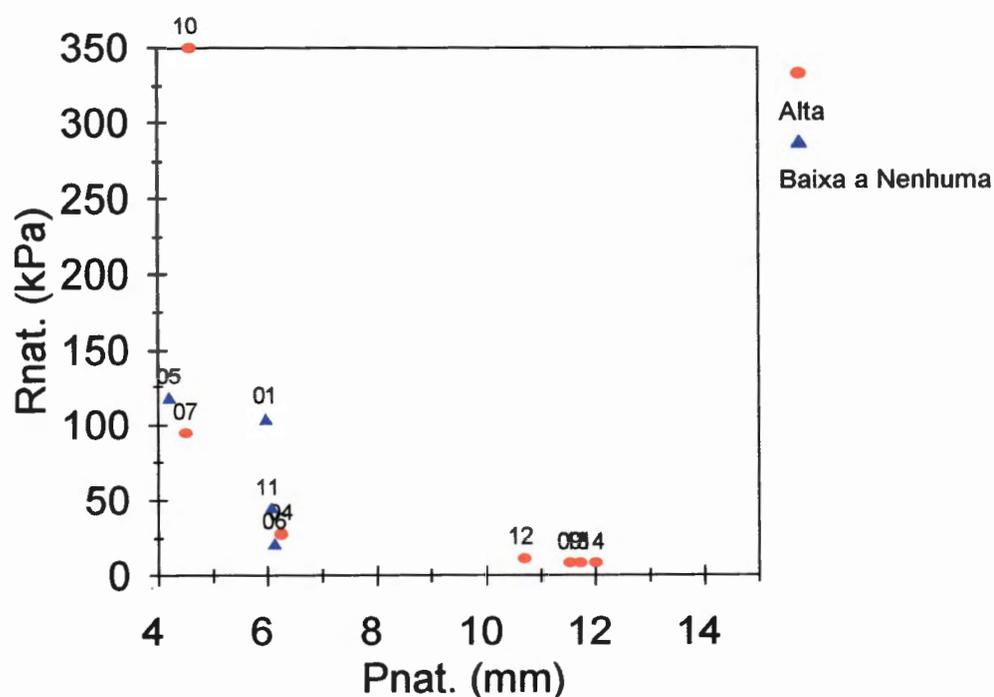


Figura 4-17 - Penetração de cone natural x resist. Compressão simples natural.

A Figura 4-18 mostra os valores de penetração de cone e resistência a compressão simples, ambos na umidade de saturação. Embora não seja possível correlacionar os dois valores, o que já houvera acontecido com os valores obtidos

na umidade natural, parece haver uma tendência, não claramente caracterizada, de os solos mais erodíveis agruparem-se em determinada região do gráfico.

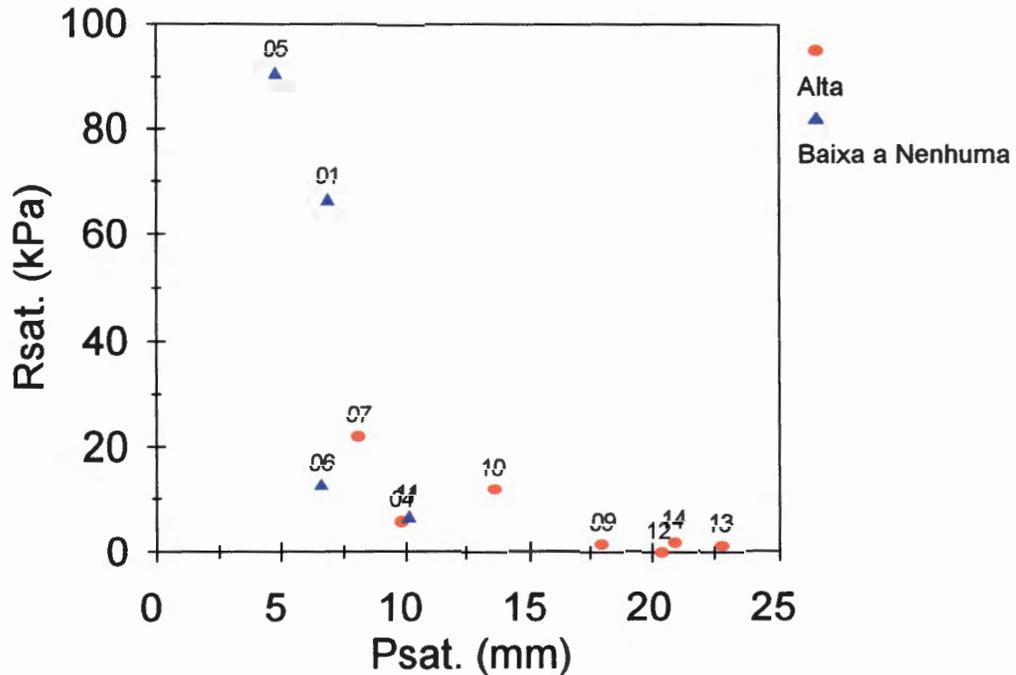


Figura 4-18 - Penetração de cone saturada x resist. compressão simples saturada.

A Figura 4-19 apresenta a relação entre variação de penetração de cone (DP) e variação de resistência à compressão simples (DR). Para o ensaio de penetração de cone, a variação de penetração representa em termos percentuais quanto de incremento de penetração ocorreu na condição saturada, em relação à condição natural. Para o ensaio de compressão simples a variação de resistência representa em termos percentuais, quanto de perda de resistência ocorreu na condição saturada em relação à condição natural.

Os resultados assim colocados revelam-se mais interessantes, pois há uma tendência de as amostras com mesmo comportamento situarem-se em regiões específicas do gráfico. Apenas a amostra 11 que em campo apresenta baixa a nenhuma erodibilidade, mistura-se com amostras de alta erodibilidade.

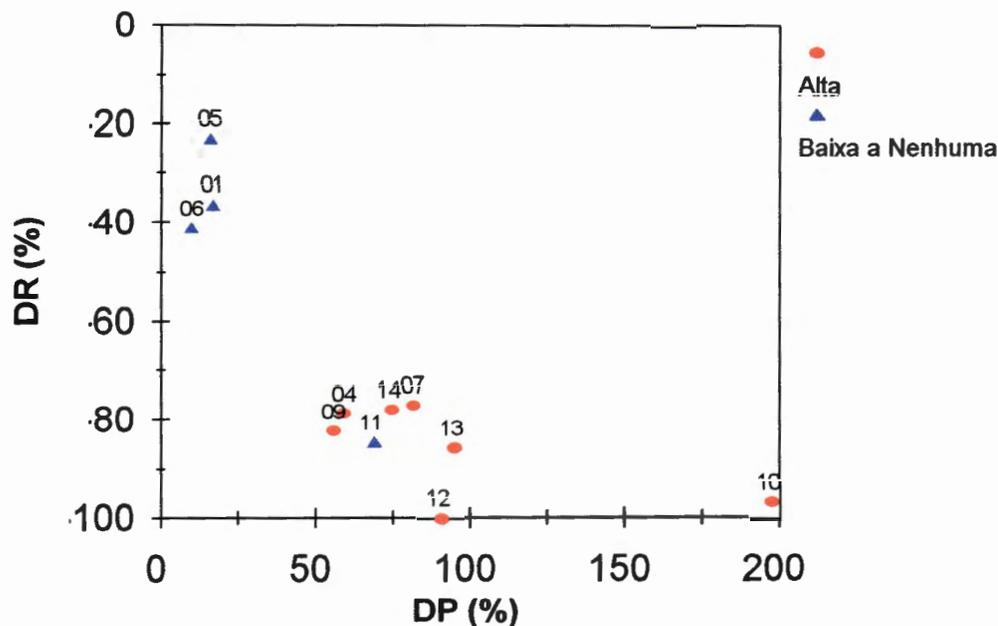


Figura 4-19 - Variação de penetração x variação de resist. compressão simples.

A Figura 4-20 reúne os valores de DP obtidos para ensaio de cone e a absorção através do método de Nogami & Villibor (1979). Nota-se uma tendência bastante clara de separação dos solos de baixa a nenhuma erodibilidade dos solos com alta erodibilidade. Numa primeira tentativa, a equação $DP = 46,4 S$ separa todas as amostras.

A mesma relação é apresentada na Figura 4-21, apenas com uma pequena diferença. A variação de penetração do cone é referida à penetração saturada e é denominada por DPA, conforme mostra a expressão a seguir.

$$DPA = \left\{ \frac{(P_{sat} - P_{nat})}{P_{sat}} \right\} 100 \quad \text{Equação 4-2}$$

Esta relação apresenta em ordenada a diferença absoluta, em mm, entre penetração de cone na umidade de saturação e penetração de cone na umidade natural dividida pela penetração de cone na umidade de saturação, em função do índice de absorção obtido pelo método de Nogami & Villibor, 1979. A relação apresentada na ordenada, trabalha com a condição de saturação. Numa tentativa de separar as amostras de diferentes comportamentos, foi introduzida a equação $DPA = 21,4 S$, conseguindo-se uma separação total das amostras com diferentes comportamentos.

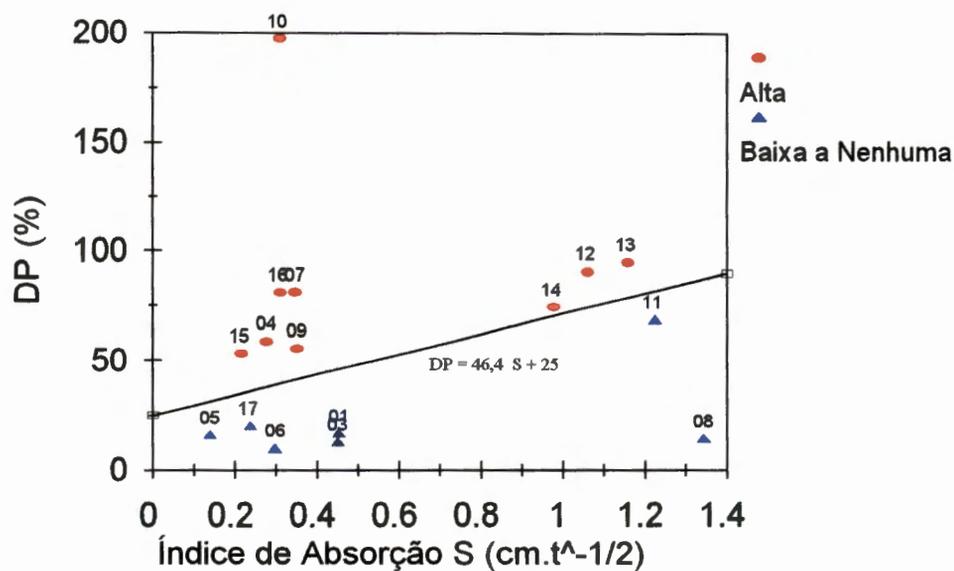


Figura 4-20 - Variação de penetração do ensaio de cone x índice de absorção de Nogami & Villibor, 1979.

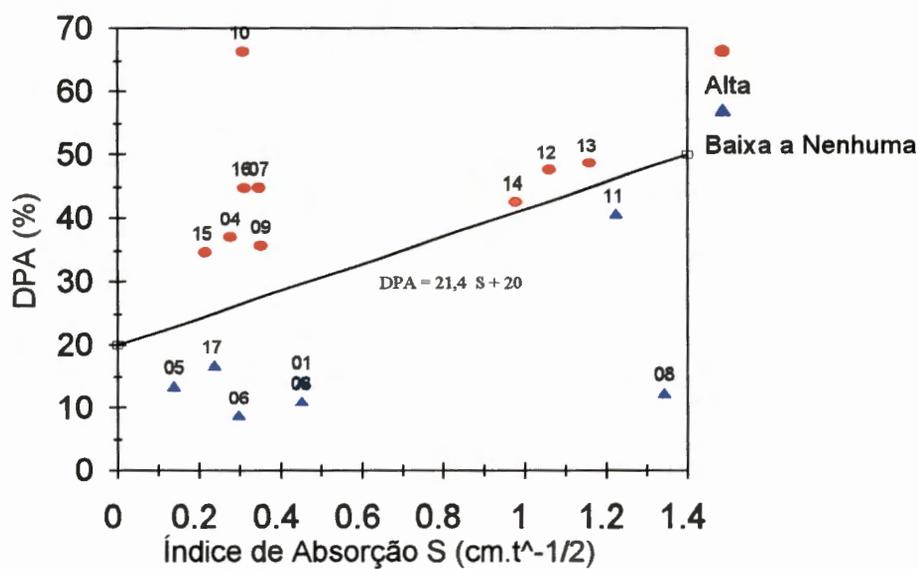


Figura 4-21 - Variação de penetração do ensaio de cone x índice de absorção de Nogami & Villibor, 1979.

A Figura 4-22 apresenta os valores de variação de penetração do ensaio de cone com o índice de erodibilidade (E) de Nogami & Villibor, 1979. Em primeira aproximação, o valor de DP igual a 20% separa amostras com comportamentos diferentes frente à erodibilidade. Por meio da utilização do índice de erodibilidade (E), verifica-se que os valores menores que a unidade, identificam amostras erodíveis. Assim, as amostras de baixa a nenhuma erodibilidade, numa primeira tentativa deveriam situar-se dentro do campo limitado pela linha cheia, enquanto que amostras com alta erodibilidade deveriam situar-se dentro do campo limitado pela linha tracejada. Pode ser verificado que a amostra 11 não pôde ser identificada, haja vista que, por meio do ensaio de cone essa amostra apresentou um valor de DP superior a 20%, comportando-se como solo de alta erodibilidade. Por meio do método de Nogami & Villibor (1979), apenas a amostra 15 que em campo apresenta alta erodibilidade exibiu valor de E maior que a unidade, comportando-se assim como solo não erodível.

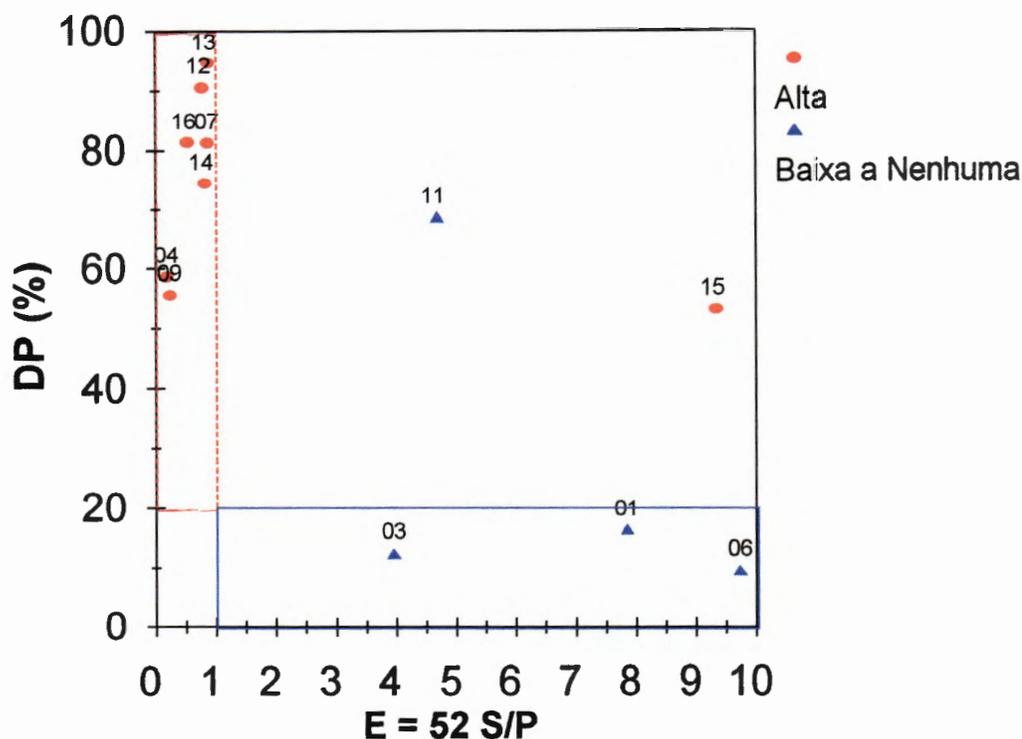


Figura 4-22 - Variação de penetração de cone x índice de erodibilidade E de Nogami & Villibor, 1979.

A Figura 4-23 mostra os valores de DP *versus* massa específica seca. Pode ser notado que não há correlação entre os valores de massa específica seca e DP, haja vista que amostras de comportamentos diferentes apresentam mesmos valores de massa específica seca. Nesta relação foi a variação de penetração do ensaio de cone quem separou as amostras com diferentes comportamentos. A Figura 4-24 relaciona a variação de penetração do ensaio de cone com a umidade de saturação. Mais uma vez, nesta figura a variação de penetração do cone é quem separou as amostras.

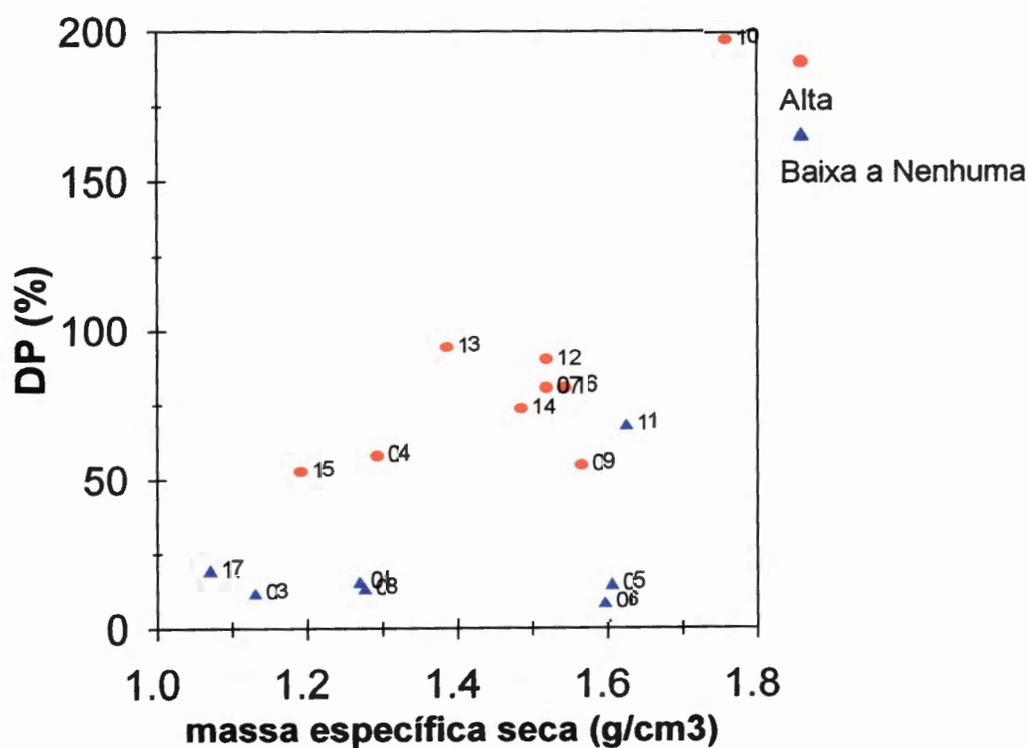


Figura 4-23 - ρ_d (g/cm³) x variação de penetração de cone (%).

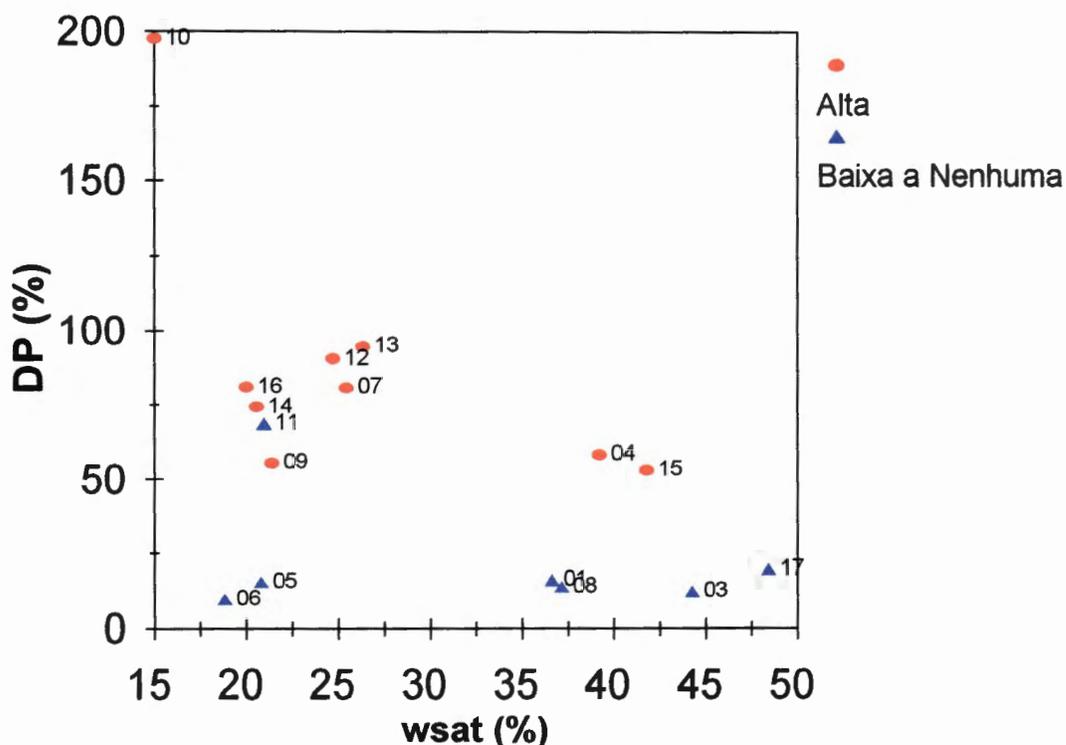


Figura 4-24 - Umidade na saturação x variação de penetração de cone.

Na Figura 4-25, estão plotados a percentagem de agregados menores que 0,50 mm e a variação de penetração do ensaio de cone. Amostras com alta erodibilidade deveriam situar-se dentro de um campo gráfico (linha tracejada) que compreende conjuntamente em primeira aproximação, valores de percentagem de agregados < 0,50 mm superiores a 55 % e variação de penetração do ensaio de penetração de cone superiores a 20%, enquanto que amostras com nenhuma erodibilidade encaixam-se dentro de valores de percentagem de agregados inferiores a 55% e variação de penetração do ensaio de penetração de cone inferiores a 20% (linha cheia). Apenas a amostra 06 não apresentou um comportamento satisfatório perante a estabilidade de agregados. Apesar dessa amostra apresentar nenhuma erodibilidade em campo, nesta relação pode ser observado que a mesma apresenta valor de percentagem de agregados < 0,50 mm bastante elevado.

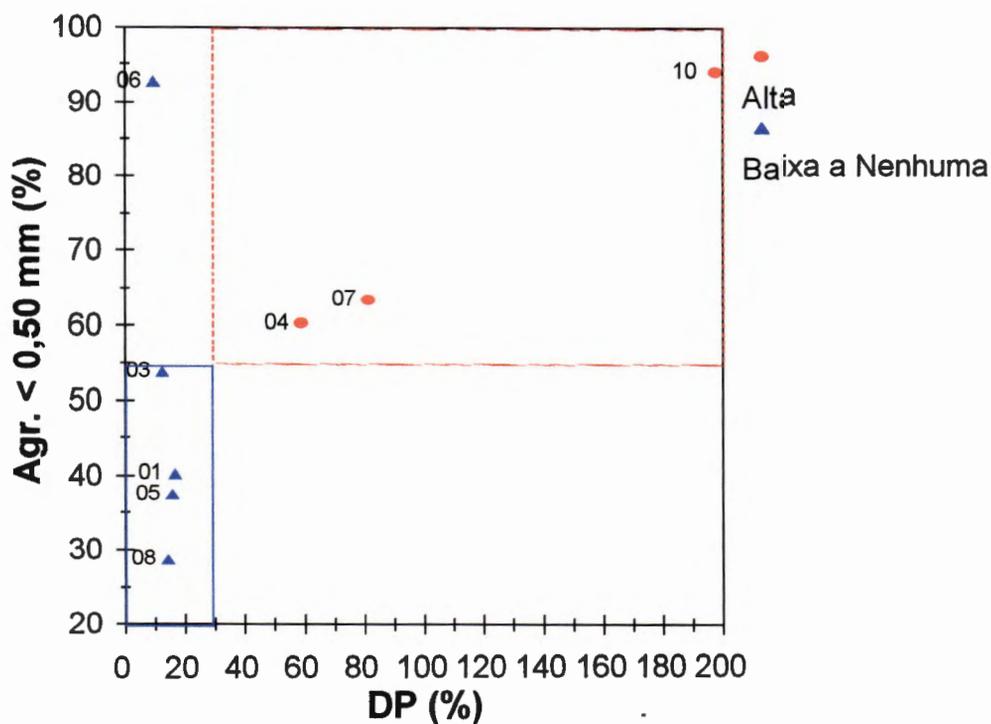


Figura 4-25 - Agregados < 0,50 mm x variação de penetração.

As Figuras 4-26 e 4-27 mostram os valores de um adimensional (AD) criado a partir da interação entre os ensaios de compressão simples, penetração de cone e características de compactação, *versus* características texturais e diâmetro médio ponderado. Este adimensional foi definido a partir da relação abaixo.

$$AD = (DR \times DP) / G.C.$$

Equação 4-3

onde;

DR Variação de resistência do ensaio de compressão simples;

DP Variação de penetração do ensaio de penetração de cone;

G.C. "Grau de compactação, natural".

As amostras que aparecem nesta relação são somente aquelas que puderam ser analisadas através de todos os métodos inseridos na relação. Apesar de um número reduzido de amostras, nota-se com bastante clareza a separação das amostras com comportamentos diferentes. Na verdade, valores altos do adimensional parecem representar os solos erodíveis.

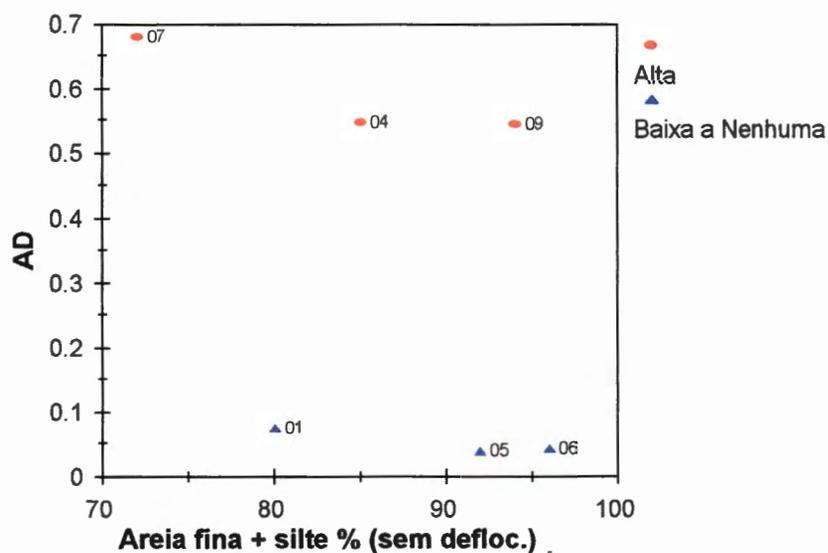


Figura 4-26 - Areia fina + silte x adimensional.

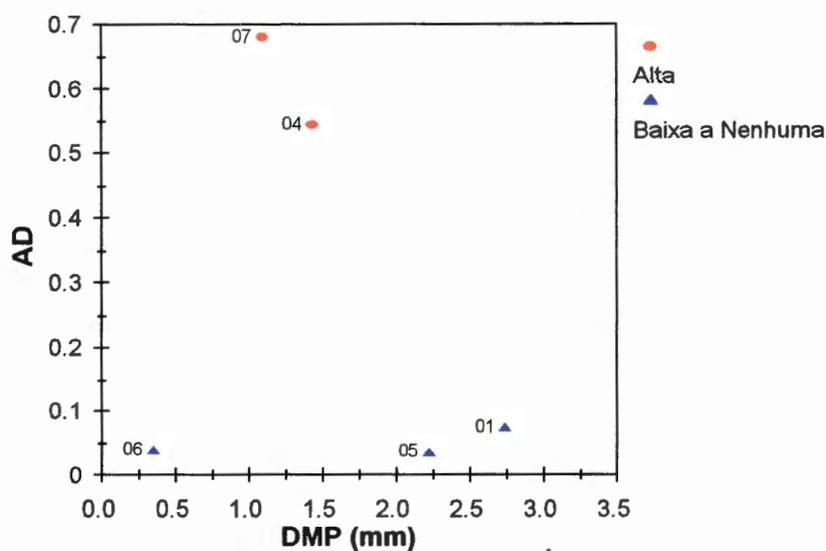


Figura 4-27 - Diâmetro médio ponderado x adimensional.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve por objetivo abordar aspectos referentes à erodibilidade dos solos. Para isso 17 amostras de solo indeformadas, oriundas de diferentes litologias foram coletadas. Limitações devida à quantidade relativamente pequena de amostras não forneceram dados estatísticos, mas em primeira aproximação os resultados se mostraram bastante animadores.

A despeito das amostras com média erodibilidade, nas análises efetuadas houve uma tendência de aglutinação dessas amostras com materiais de nenhuma erodibilidade, à exceção do método de Nascimento e Castro (1976). Esse comportamento inseriu a necessidade de se analisar as amostras em relação a seus níveis de erodibilidade em apenas dois grupos distintos (alta e nenhuma erodibilidade).

A introdução do teste de penetração de cone, através da modificação realizada especialmente para esse estudo, corroborou as expectativas iniciais, pois esperava-se que ele pudesse refletir as características resistentes dos solos e que estas estivessem associadas à erodibilidade.

O ensaio de cone destaca-se pela simplicidade e reprodutibilidade na execução dos testes. O incremento de penetração do cone, advindo da saturação da amostra, estaria refletindo de uma certa maneira a perda de resistência que o material exibe quando em contato com água. Os resultados obtidos foram animadores, haja vista, que conseguiram separar os solos erodíveis dos não erodíveis.

Utilizando-se isoladamente as medidas obtidas no ensaio de penetração de cone, foi possível separar as amostras erodíveis das não erodíveis através da relação $DP = 4,50 P_{nat}$. numa primeira aproximação.

O ensaio de cone através dos valores de DP combinado com o índice de absorção, separou todas as amostras através da equação $DP = 46,4 S + 25$. Para uma análise semelhante utilizando-se valores do índice de absorção e valores de DPA (%), todas as amostras também puderam ser separadas através da equação $DPA = 21,4 S + 20$.

A aplicação do método de Nogami & Villibor (1979) revelou-se eficiente para identificar os solos erodíveis, visto que apenas uma das amostras apresentou discrepância de classificação.

O método de Nascimento e Castro (1976), que apresenta um critério de seleção de solos, mostrou-se bastante eficaz na identificação dos solos, quando cotejado com o comportamento dessas amostras em campo. Por este método apenas uma das amostras não pôde ser identificada. Apesar de ser tratada pelo método como sendo um solo sem petrificação (através do "slaking test"), essa amostra encaixou-se dentro de todas as especificações de um solo com comportamento satisfatório frente a erosão, mas em campo a face de seu talude mostrava-se bastante erodível.

A utilização do ensaio de compressão simples, em condições natural e saturada, mostrou que amostras de alta erodibilidade apresentaram as maiores perdas de resistência. De maneira isolada apenas a amostra 11 que em campo apresenta nenhum grau de erodibilidade, mostrou uma perda de resistência elevada, alcançando os mesmos níveis das amostras com alta erodibilidade.

O método de análise da Estabilidade de Agregados mostrou que o valor de $DMP = 1,50$ mm numa primeira aproximação separou as amostras com comportamentos distintos frente a erosão. Apenas uma amostra não pôde ser separada.

Na avaliação acerca da mineralogia dos materiais apesar das poucas análises efetuadas para os resultados obtidos através da utilização da técnica de Análise Térmica Diferencial, pode ser notado que os resultados obtidos corroboraram o caráter evolutivo de alguns solos (amostras 6, 8 e 11), visto que

apresentaram em sua composição mineralógica o mineral argila recoberto por óxidos e/ou hidróxidos de Fe e Al, condizendo com as observações de campo, onde pode ser notado nítido processo de laterização.

Através dos valores obtidos pela técnica de adsorção de azul de metileno observou-se que não há relação com erodibilidade, visto que, solos com comportamentos diferentes apresentaram-se como ativos à exceção de duas amostras.

De acordo com os resultados obtidos para as amostras ensaiadas, pode ser notado que não há relação entre as características físicas e a erodibilidade, quer avaliada em campo ou medida em laboratório, visto que, solos de comportamentos diferentes em campo, apresentam características físicas semelhantes.

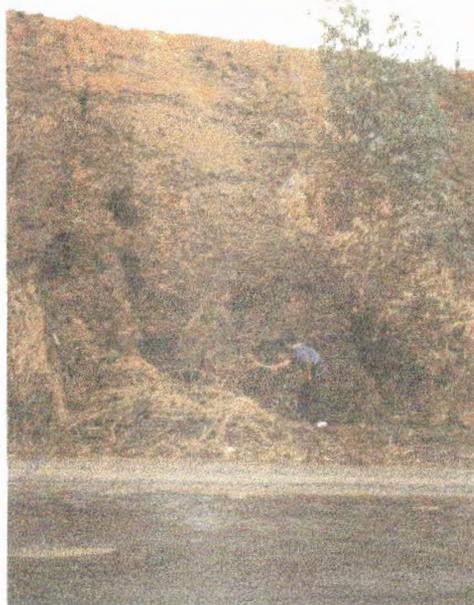
6. ANEXO

Neste capítulo são apresentadas as fotos e fichas de cadastro de todos os pontos amostrados. Nas fichas de cadastro encontram-se as informações referentes à descrição dos perfis dos taludes e as seguintes letras representam: T - Transportado, R - Residual, RM - Residual maduro, RJ - Residual jovem, S - Saprolito.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSIÃO			
Ponto: 01	Nº 01	S: 22°10.732'	W: 46° 45.152'
Prof.	Perfil	Descrição	
0.0	R. M.	Local: Espírito santo do Pinhal - Campinas (SP 342. km 0. L.D.)	
0.5			
1.0			
1.5	R. J.	Ocorrência de sulcos a partir do contato entre o solo residual maduro e o solo residual jovem.	
2.0			
2.5	S	Solo residual de granito. Amostra retirada a aproximadamente 8.0 m de profundidade.	
3.0			
3.5			
4.0			
4.5			
5.0			
5.5			
6.0			
6.5			
7.0			
7.5			
8.0			
8.5			
9.0			
9.5			
10	Nível de Erodibilidade: Baixa a Nenhuma		

Figura 6-1 - Amostra 01.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 02	Nº 02 e 03	S: 22°11.973'	W: 46° 46.675'
Prof.	Perfil	Descrição	
00			
0.5	R. M.	Local: Espírito Santo do Pinhal - Campinas	
1.0		(SP 342. km 04. L.D.)	
1.5			
2.0	R. J.		
2.5		sulcos e Ravinas bem localizadas.	
3.0		Presença de matações.	
3.5			
4.0			
4.5		Solo residual de migmatito.	
5.0			
5.5			
6.0			
6.5	Horizonte	Amostras retiradas em duas	
7.0		posições.	
7.5	C	Amostra 02 - 8.0 m de prof.	
8.0		Amostra 03 - 1.0 m de prof.	
8.5	(Saoprolítico)		
9.0			
9.5			
10			
10.5			
11			
12			
13		Nível de erodibilidade: Am. 02 - Baixa a Nenhuma	
14		Am. 03 - Baixa a Nenhuma	

Figura 6-2 - Amostras 02 e 03.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 03	Nº 04	S: 2°14.862'	W: 46° 48.691'
Prof.	Perfil	Descrição	
00	R. M.	Local: Espírito Santo do Pinhal - Campinas (SP 342, km 11, L.E.)	
0,5			
1,0	R. J.	Presença de sulcos retilíneos e paralelos entre si a partir do contato entre o residual maduro e jovem.	
1,5			
2,0			
2,5	Horizonte C (Saprolítico)	Solo residual de Granito. Rocha porfírica (Migmatito). pórfiros do feldspato (K) imersos em matriz fina de biotita Amostra retirada a 7,0 m de profundidade. Nível de erodibilidade: Alta	
3,0			
3,5			
4,0			
4,5			
5,0			
5,5			
6,0			
6,5			
7,0			
7,5			
8,0			
8,5			
9,0			

Figura 6-3 - Amostra 04.



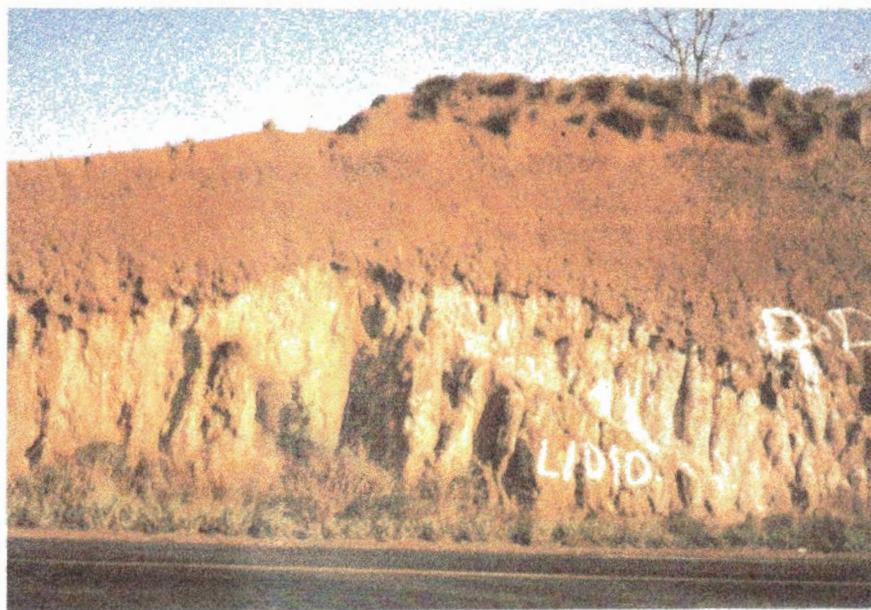
EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 04	Nº 05	S: 22°37.7'	W: 47° 00.3'
Prof.	Perfil	Descrição	
00	R. M.	Local: Piracicaba - Charqueada (SP 308,	
0,5		km 13, L.E.)	
1,0			
1,5	R J.		
2,0		Aparência estável sem	
2,5		ocorrência de	
3,0		feições erosivas	
3,5			
4,0		Solo residual de	
4,5		arenitos da formação Pirambóia.	
5,0			
5,5		Amostra retirada a 5,0 m de profundidade.	
6,0			
Nível de erodibilidade: Baixa a Nenhuma			

Figura 6-4 - Amostra 05.



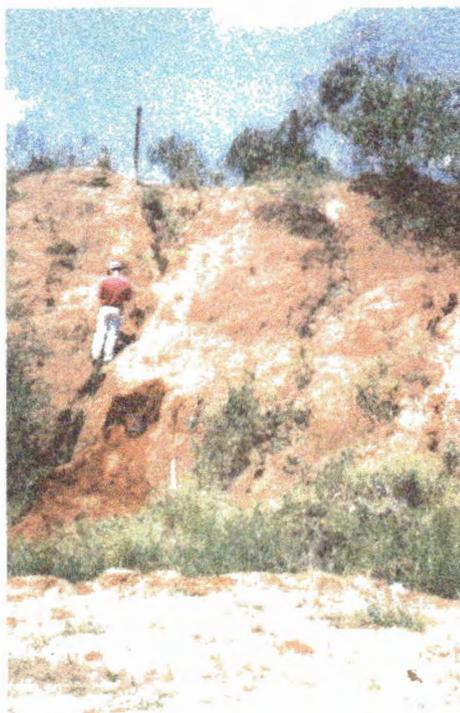
EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 05	Nº 06	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição	
00	T	Local: Matão - Barretos (SP 326, km 77, L. E.)	
0,5			
1,0		Cobertura transportada.	
1,5		Aparência estável, sem ocorrência de feições erosivas.	
2,0	R J.		
2,5			
3,0			
3,5			
4,0	Horizonte C (Saprolítico)	Solo residual de arenitos da formação adamantina, apresentando planos paralelos, provavelmente de origem fluvial com aparência estável.	
4,5			
5,0			
5,5			
6,0			
6,5			
7,0		Ocorrência de feições erosivas do tipo sulcos de média profundidade (aproximadamente 20 cm).	
7,5			
8,0			
8,5	Impossibilidade de retirada de amostra a partir do nível R.A.		
9,0			
9,5	Material bastante consolidado.		
10	R.A.		
10,5		Amostra retirada a 1,0 m de profundidade.	
11			
12		Nível de erodibilidade: Baixa a Nenhuma	

Figura 6-5 - Amostra 06.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 06	Nº 07 e 08	S:	W:
Prof	Perfil	Descrição	
00	T	Local: Porto Ferreira - São Carlos (SP 215, km 62. L.E.)	
0,5			
1,0		Perfil característico	
1,5		da região de São Carlos	
2,0		apresentando nitidamente	
2,5		uma linha de seixos, linha	
3,0		esta divisória entre a	
3,5		cobertura transportada	
4,0		laterizada (cenozóico) e o	
4,5		residual saprolítico bem	
5,0	Horizonte C (Saprolítico)	estruturado.	
5,5			
6,0		Solo residual do Grupo Bauru.	
6,5		Grande potencial erosivo,	
7,0		com a presença de	
7,5		sulcos e ravinas, a partir	
8,0		do contato.	
8,5			
9,0		Amostra 07 - 8,0 m de prof.	
9,5		Amostra 08 - 1,5 m de prof.	
10			
		Nível de erodibilidade: Amostra 07 - Alta	
		Amostra 08 - Baixa a Nenhuma	

Figura 6-6 - Amostras 07 e 08.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSIÃO			
Ponto: 07	Nº 09	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição	
00	Extrato		
0,5		Local: Charqueada - São Pedro (SP 304, km 14, L.E.)	
1,0			
1,5			
2,0		Perfil bastante homogêneo.	
2,5		Grandes problemas de erosão em todo perfil.	
3,0		Presença de ravinas e buracos localizados.	
3,5			
4,0		Solo residual de Arenitos da Formação Pirambóia	
4,5		(Areia quartzosa).	
5,0	Arenoso		
5,5			
6,0		Amostra retirada a 7,0 m de profundidade.	
6,5			
7,0			
7,5			
8,0			
8,5			
9,0			
9,5			
10	Nível de Erodibilidade: Alta		

Figura 6-7 - Amostra 09.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 08	Nº 10 e 11	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição:	
00	T	Local: Ribeirão Preto - Porto Ferreira	
0,5		(SP 330, km 60, L.D.)	
1,0			
1,5		Cobertura transportada laterítica.	
2,0		areia argilosa.	
2,5	S	sem ocorrência de	
3,0		sulcos e/ou ravinas.	
3,5		presença da linha de seixos.	
4,0			
4,5		Solo residual de arenitos da	
5,0		Formação Botucatu.	
5,5		Arenitos finos a silticos,	
6,0		sem a ocorrência de	
		estruturas sedimentares.	
		Bastante susceptíveis à	
	erosão a partir do contato.		
	Amostra 10 - 5,0 m de prof.		
	Amostra 11 - 1,5 m de prof.		
	Nível de erodibilidade		
	am. 10 - Alta		
	am. 11 - Baixa a Nenhuma		

Figura 6-8 - Amostras 10 e 11.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 09	Nº 12	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição:	
00	<p>Extrato</p> <p>Arenoso</p>	Local: Erosão Unesp (Campus UNESP - Marília - SP)	
0,5			
1,0		Solo residual de arenitos da Formação Marília.	
1,5		Amostra retirada a 3,5 m de profundidade.	
2,0		Feições erosivas do tipo sulcos, com profundidades	
2,5		aproximadas de 50 cm. Presença de buracos	
3,0		localizados. Descalçamento de base com posterior	
3,5		escorregamento de solo.	
4,0		Nível de Erodibilidade: Alta	

Figura 6-9 - Amostra 12.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 10	Nº 13	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição:	
00	Extrato		
0,5		Local: Marília - Assis (PS 333, km 344, L.D.)	
1,0	Arenoso	Ocorrência de feições erosivas	
1,5		do tipo ravinas. Descalçamento da base com	
2,0		escorregamento de solo.	
2,5			
3,0		Perfil apresentando textura homogênea.	
3,5		Solo residual de arenitos	
4,0		da Formação Adamantina.	
		Amostra retirada a 3,5 m de prof.	
	Nível de erodibilidade: Alta		

Figura 6-10 - Amostra 13.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA				
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS				
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO				
Ponto: 11	Nº 14	S:	W:	
Prof.	Perfil	Descrição:		
00	Extrato			
0,5		Local: Bauru - Marília (SP 294, km 353, L.D.)		
1,0				
1,5		Amostra retirada na margem sul da Boçoroca.		
2,0		Perfil do talude da lateral sul		
2,5		apresentando textura de		
3,0		aparência homogênea.		
3,5		Arenoso		
4,0			Solo residual de arenitos	
4,5			da Formação Marília.	
5,0				
5,5	Profundidade de amostragem - 5,0 m			
6,0				
Nível de erodibilidade: Alta				

Figura 6-11 - Amostra 14.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 12	Nº 15	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição:	
00	RJ		
0,5		Local: Avenida Paralela (em frente a Abaeté	
1,0		veículos)	
1,5	Horizonte C (Saprolítico)		
2,0			
2,5		Horizonte C - Saprolítico	
3,0			
3,5			
4,0			
4,5			
5,0		Solo residual de Granulito	
5,5			
6,0		Amostra retirada a 7,0 m de profundidade	
6,5			
7,0		Presença de sulcos e buracos em todo o	
7,5		perfil. Ravinamento localizado, provavelmente	
8,0		pela concentração de escoamento superficial.	
8,5			
9,0			
9,5			
10,0	Nível de erodibilidade: Alta		

Figura 6-12 - Amostra 15.



EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS			
FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 13	Nº 16	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição:	
00	<p style="text-align: center;">Extrato</p> <p style="text-align: center;">Arenoso</p>	Local: Rodovia CIA/Aeroporto, km 5,5 - Salvador (BA).	
0,5		Solo residual de arenitos da Formação Barreiras.	
1,0			
1,5			
2,0		Presença de sulcos lineares e paralelos entre si em toda a face do talude.	
2,5			
3,0			
3,5		Amostra retirada a 2,5 m de profundidade.	
4,0			
4,5			
5,0		Nível de erodibilidade: Alta	
5,5			
6,0			

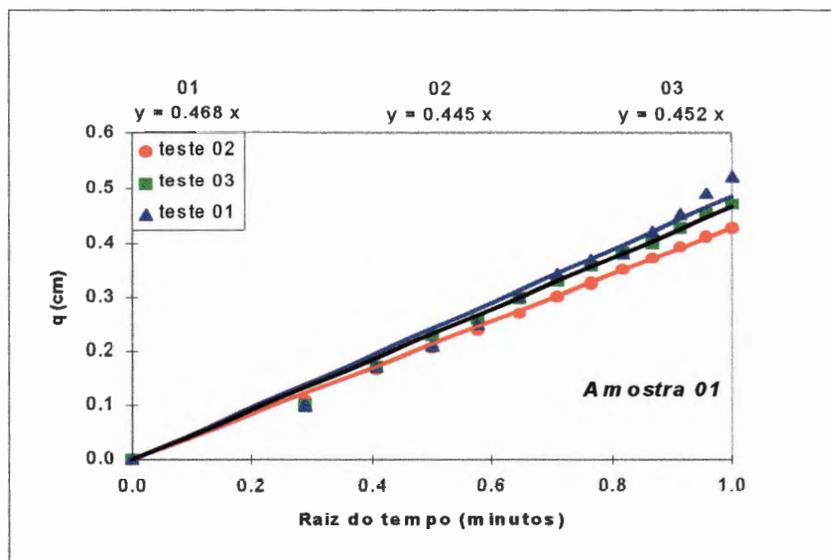
Figura 6-13 - Amostra 16.



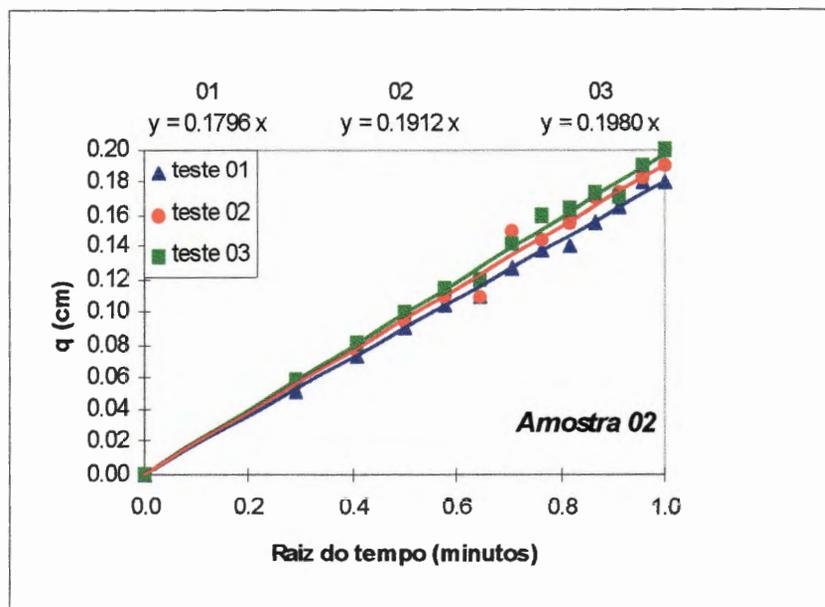
EESC/USP - DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA LEVANTAMENTO E CADASTRAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS FICHA DESCRITIVA DOS PERFIS COM OCORRÊNCIA DE EROSÃO			
Ponto: 14	Nº 17	S:	W:
Prof.	Perfil	Descrição:	
00	R.J.		
0,5		Local: Clube Centro Espanhol / Prefeitura Aeronáutica	
1,0		Salvador (BA).	
1,5	Horizonte C (Saprolítico)		
2,0		Solo residual de Granulito.	
2,5			
3,0			
3,5		Perfil com aparência estável sem presença	
4,0		de feições erosivas.	
4,5			
5,0			
5,5			
6,0		Amostra retirada a 8,0 m de profundidade.	
6,5			
7,0			
7,5			
8,0			
8,5			
9,0			
9,5			
10,0			
10,5			
11,0			
11,5			
12,0	Nível de erodibilidade: Baixa a Nenhuma		

Figura 6-14 - Amostra 17.

A Figura 6-15 (A - Q) apresenta os resultados obtidos para o ensaio de infiltrabilidade (obtenção do índice de absorção S) através da aplicação do método de Nogami & Villibor.

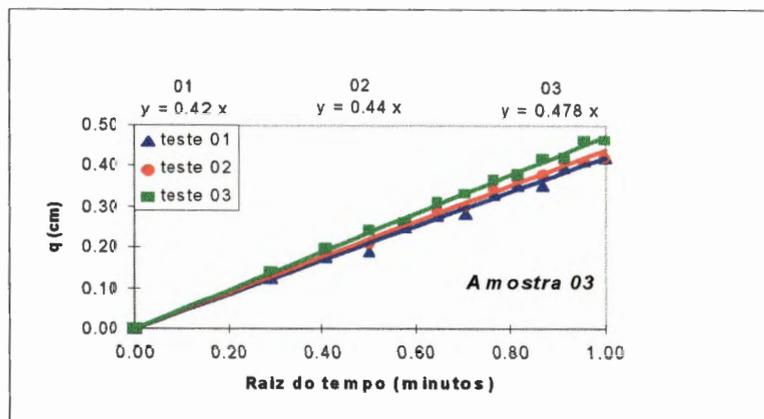


(A)

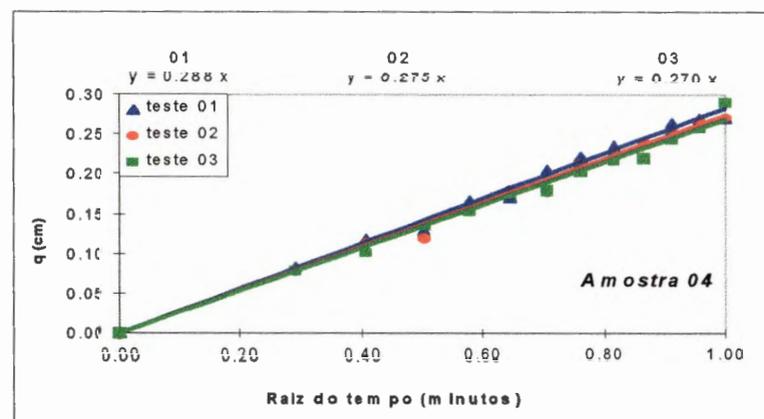


(B)

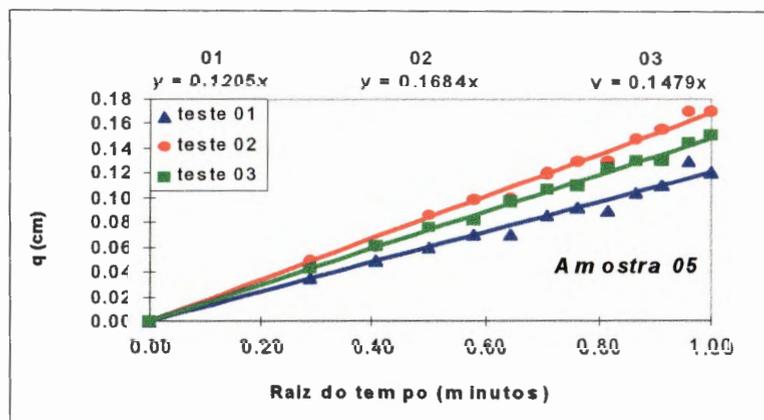
Figura 6-15 - Gráfico para obtenção do índice de absorção S



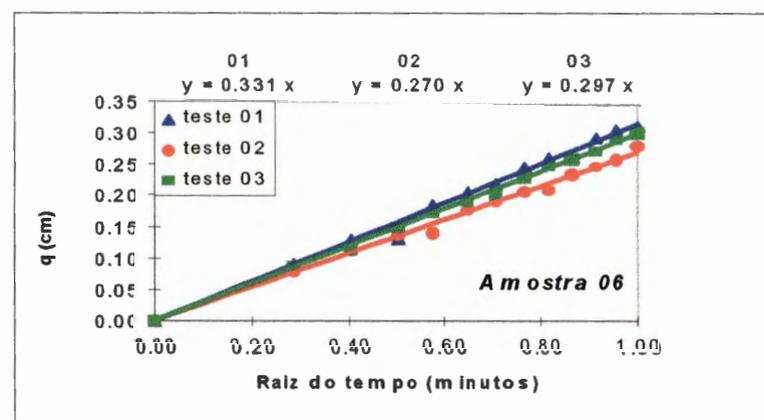
(C)



(D)

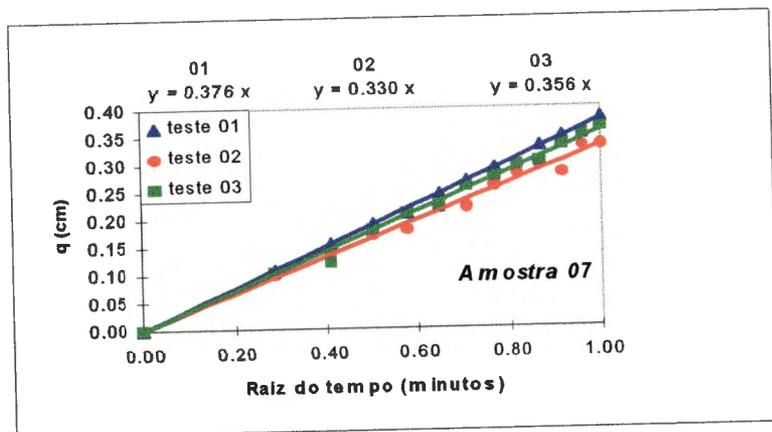


(E)

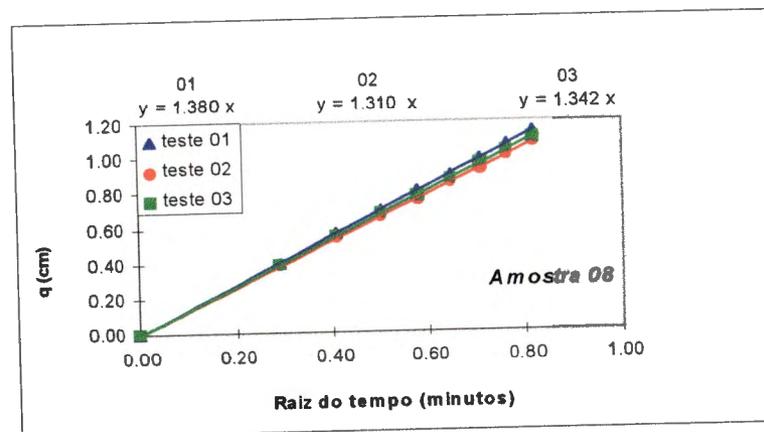


(F)

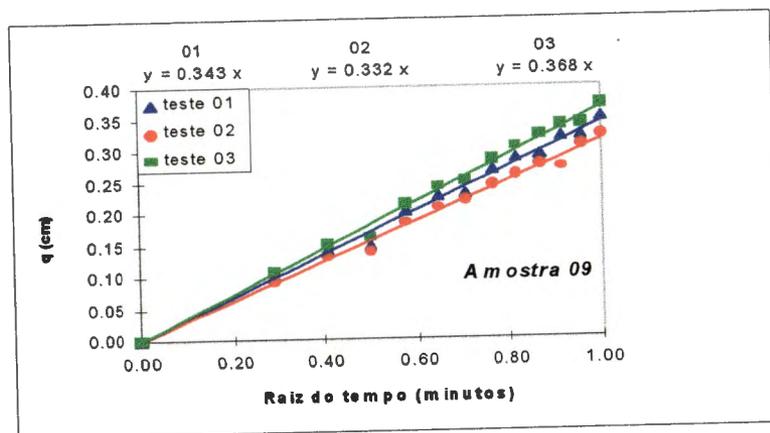
Figura 6-15 - Gráfico para obtenção do índice de absorção S



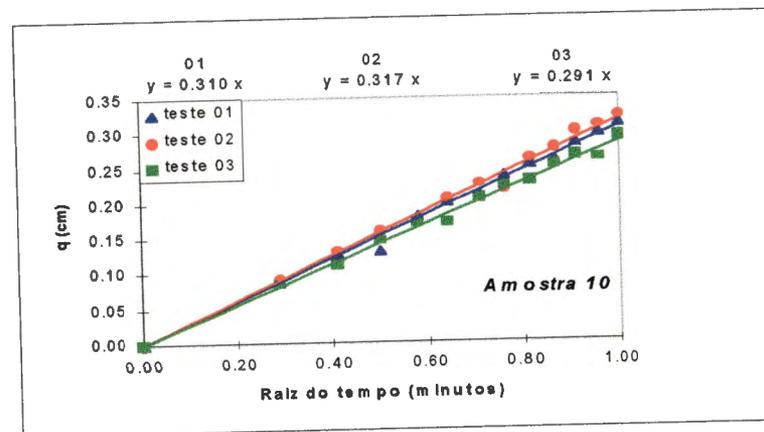
(G)



(H)

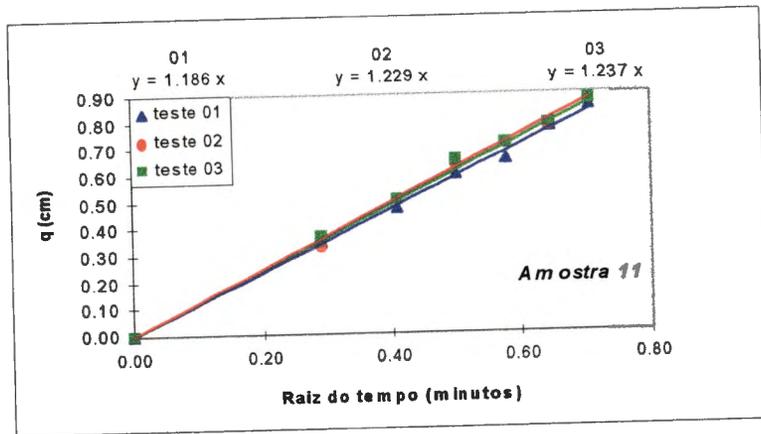


(I)

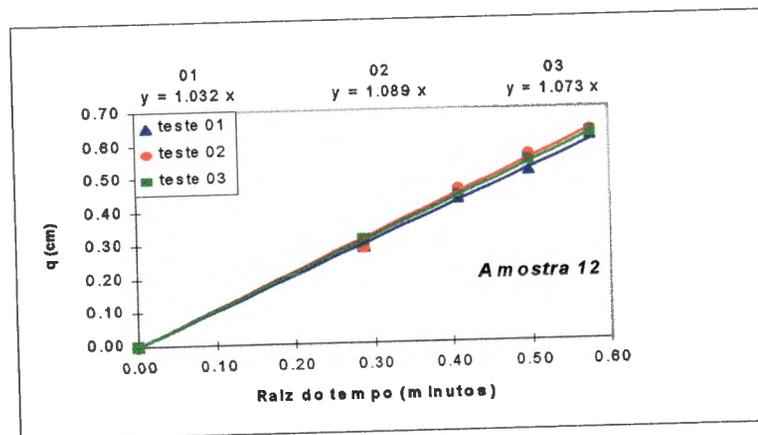


(J)

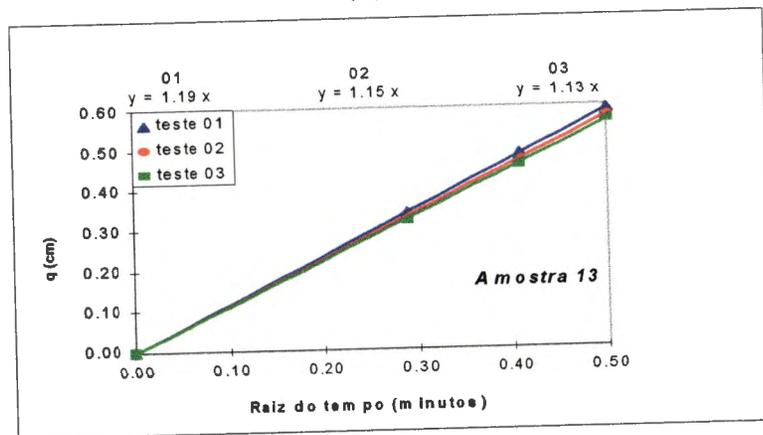
Figura 6-15 - Gráfico para obtenção do índice de absorção S



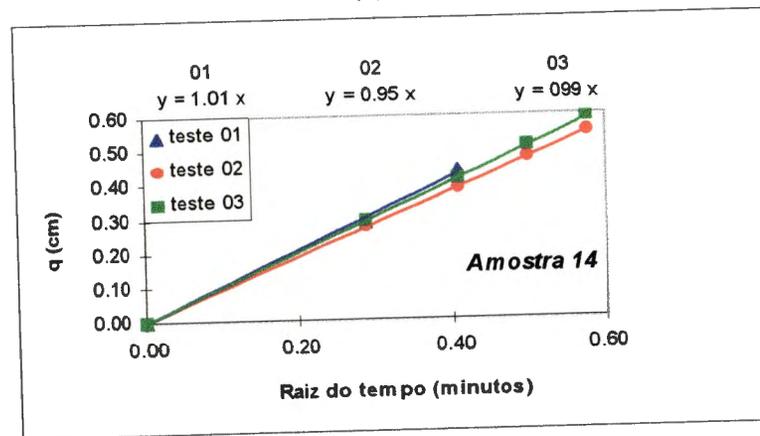
(K)



(L)

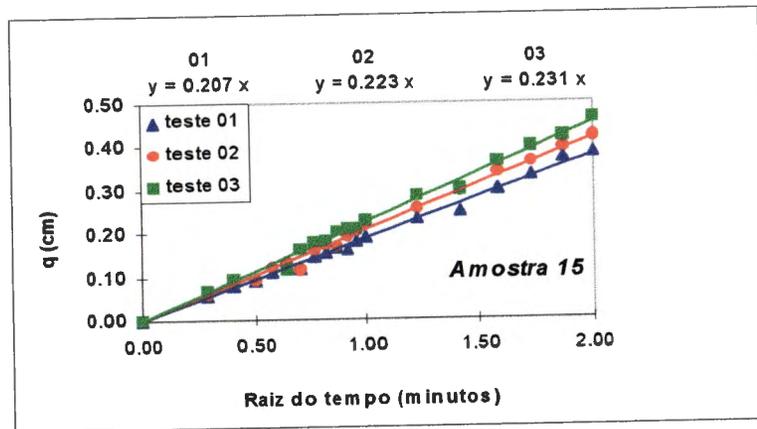


(M)

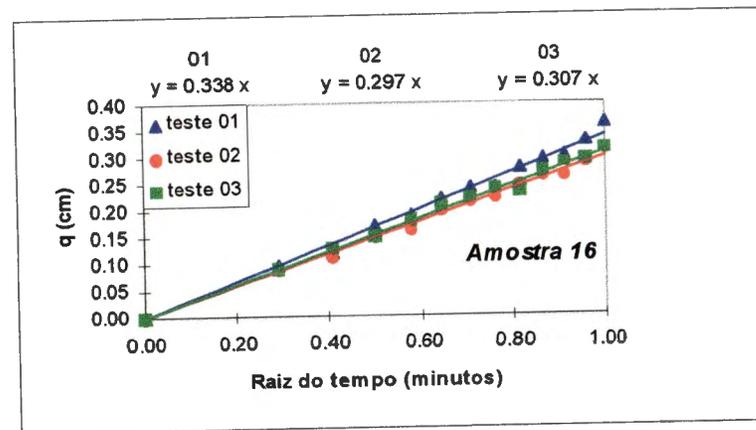


(N)

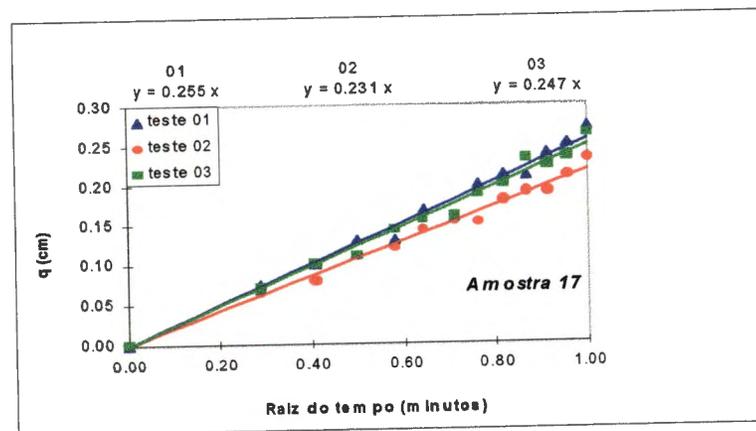
Figura 6-15 - Gráfica para obtenção do índice de absorção S



(O)



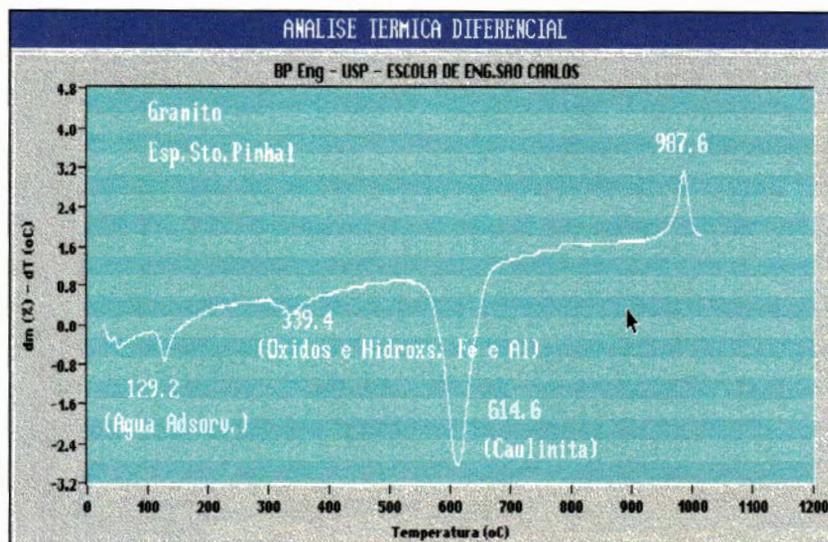
(P)



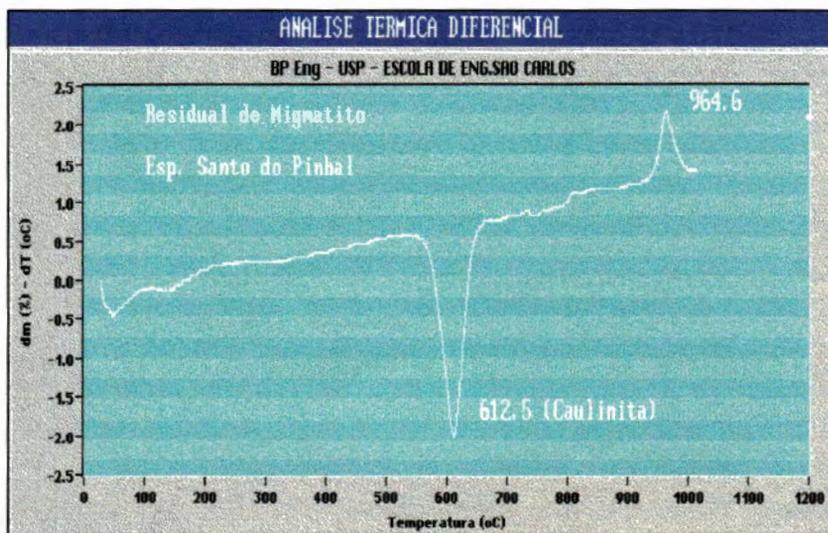
(Q)

Figura 6-15 - Gráfico para obtenção do índice de absorção

A Figura 6-16 mostra os resultados obtidos para algumas amostras através da utilização da técnica de Análise Térmica Diferencial.

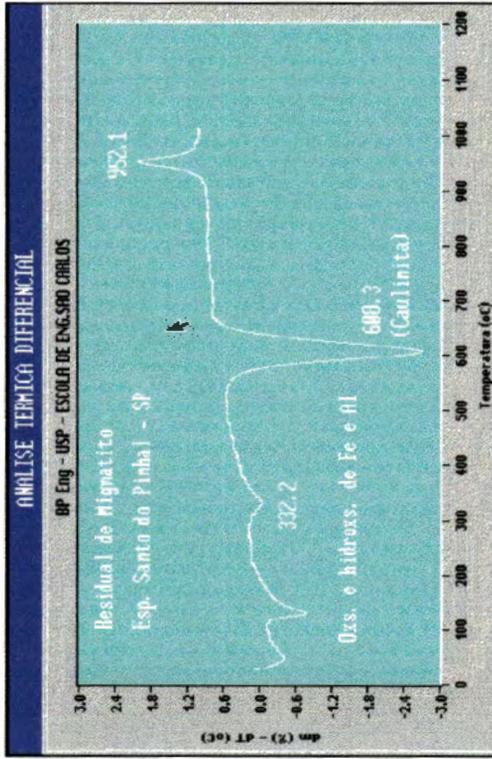


Amostra 01

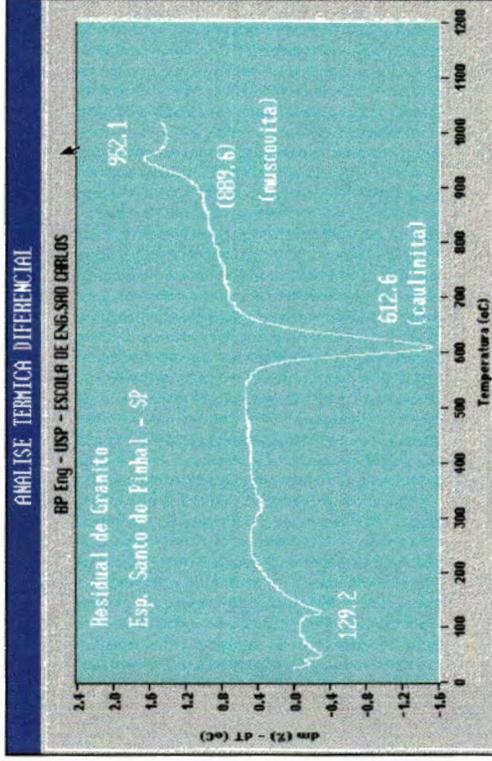


Amostra 02

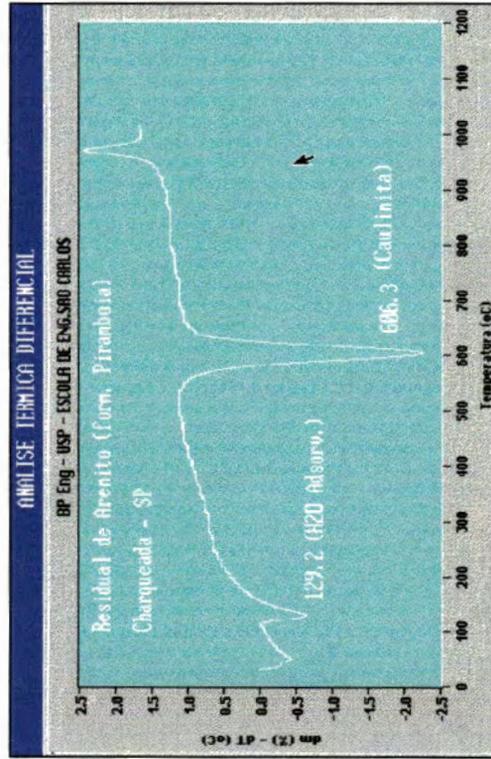
Figura 6-16 - Análise Térmica Diferencial



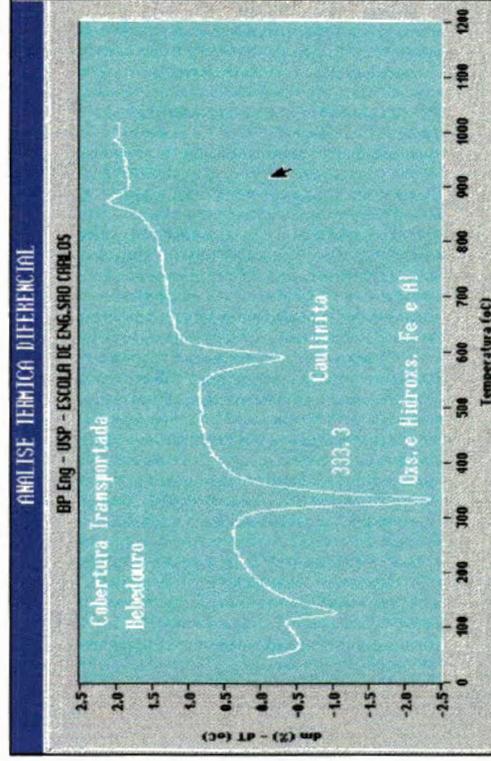
Amostra 03



Amostra 04

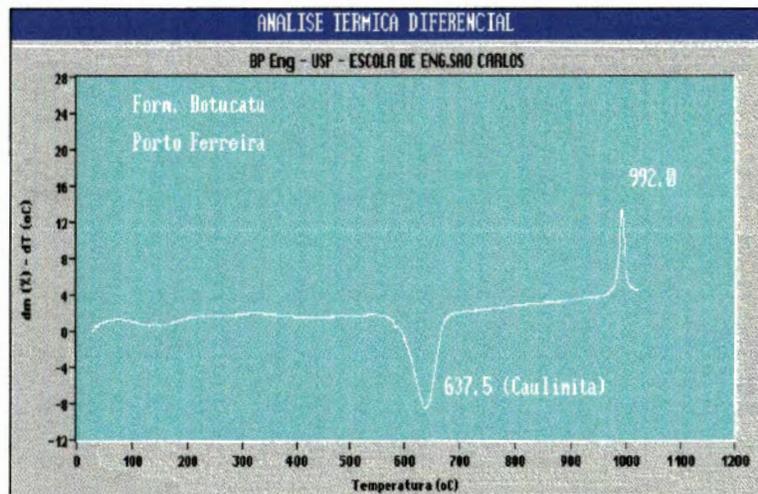


Amostra 05

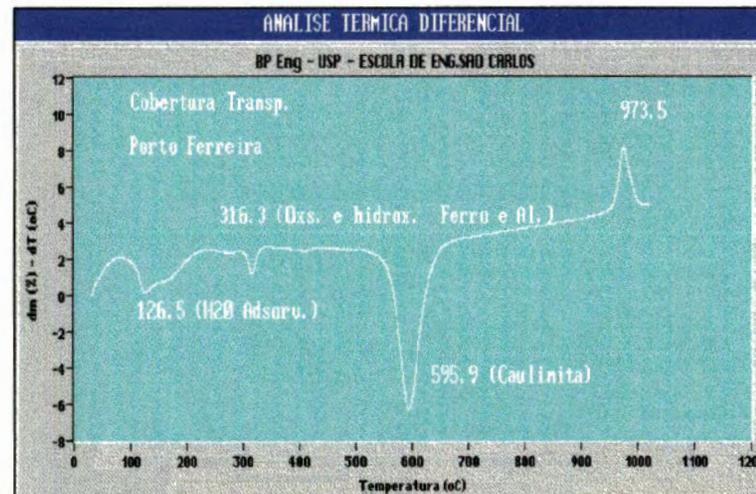


Amostra 06

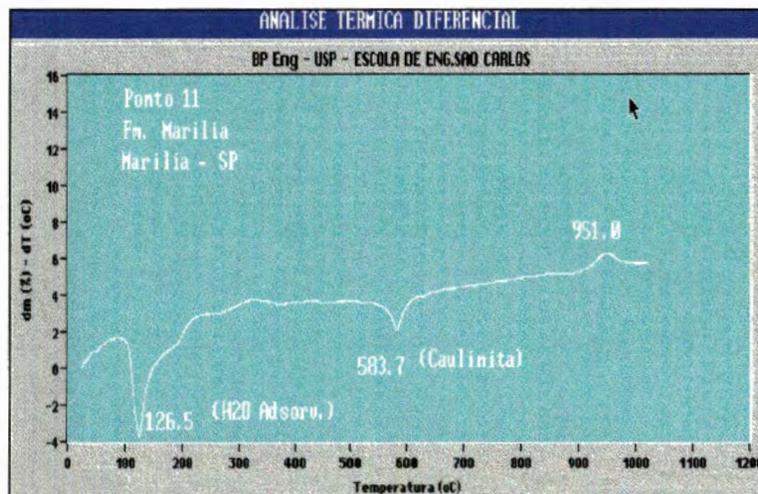
Figura 6-16 - Análise Térmica Diferencial



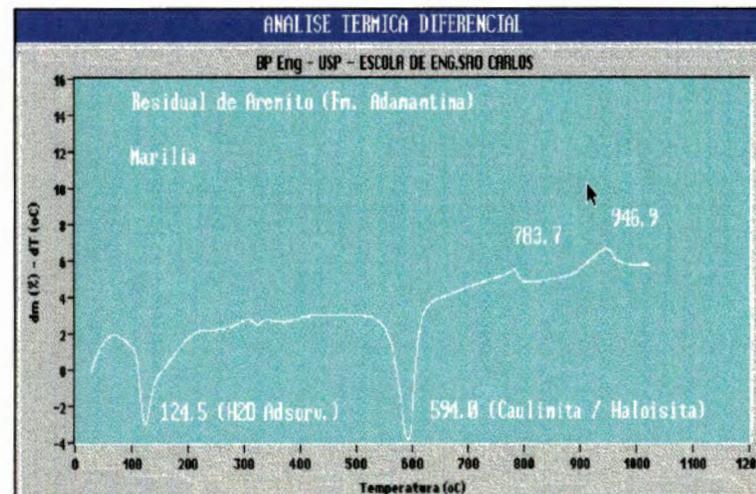
Amostra 10



Amostra 11



Amostra 12



Amostra 13

Figura 6-16 - Figuras da Análise Térmica Diferencial

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - NBR 12770 (Determinação da resistência à compressão não confinada).
- ABNT - NBR 6457/86 (Amostras de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização).
- ABNT - NBR 6459/84 (Determinação do Limite de Liquidez).
- ABNT - NBR 6502/80 (Análise Granulométrica Conjunta).
- ABNT - NBR 6502/80 (Análise Granulométrica Conjunta, somente com a utilização de água).
- ABNT - NBR 6508/84 (Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica).
- ABNT - NBR 7180/84 (Determinação do Limite de Plasticidade).
- ABNT - NBR 7182/86 (Ensaio de Compactação).
- AL-DURRAH, M. M.; BRADFORD, J. M.; (1982b) - The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, v.46, p. 1086-1090.
- ANDERSON, H. W. (1950) - Physical characteristics of soils related to erosion. *Journal, Soil and water Conservation*, v.6, n.3, jul. 1951, p. 129-133.
- ARULANANDAN, K.; SARGUNAN, A.; LOGANATHAN, P. and KRONE, R. B. (1973) - Application of chemical and electrical parameters to prediction of erodibility. *Conf. on Soil Erosion, HRB Special Report*, 135.
- ARUMUGAN, K. (1974) - Fundamental aspects of surface erosion of cohesive soils. *Ph. D. Thesis - Univ. of Califórnia, Davis*.
- BAPTISTA, P. R. D.; CUNHA, L. O. B. P.; DAVISON DIAS, R. (1994) - Estudo da erosão em zonas de expansão urbana. *Anais da ABMS, X COBRAMSEF*, vol. 3, p.849-855.
- BARNETT, A. P.; ROGERS, J. S.; HOLLADAY, J. H.; DOOLEY, A. E. (1965) - Soil erodibility factors for selected soils in Georgia and South Carolina. *Transaction of the ASAE*, v.48, p.393-395.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (1985) - Conservação do solo. Piracicaba, Livroceres, p. 368.

- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (1990) - Conservação do solo, Ícone Editora, São Paulo.
- BERTONI, J. (1959) - O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. *Bragantia*, 18: 113-140, Campinas.
- BISCAIA, R. C. M.; RUFINO, R. L. & HENKLAIN, J. C. (1981) - Cálculo da erodibilidade (fator K) de dois solos do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.5, p.183-186.
- BRYAN, R. B. (1968) - The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2, 5-26.
- BRYAN, R. B. (1976) - Considerations on Soil Erodibility Indices and Sheetwash, *Catena*, vol. 3, 99-111, Giessen.
- CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. (1975) - Hillslope form and process. Oxford, Cambridge University Press, p. 475.
- CARVALHO, J. C.; FÁCIO, J. A. (1994) - Estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal. *Anais da ABMS, X COBRAMSEF*, vol. 4, p.1245-1252.
- CARVALHO, M. P.; CATANEO, A.; LOMBARDI NETO, F. (1993) - Índices de erosividade da chuva e enxurrada correlacionados com as perdas de solo e determinação da erodibilidade de um latossolo roxo distrófico de Campinas (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.17, n.3, p. 445-450.
- CARVALHO, M. P.; LOMBARDI NETO, F.; VA SQUES FILHO, J.; CATANEO, A. (1989) - Índices de erosividade da chuva correlacionados com as perdas de um podzólico vermelho-amarelo eutrófico textura argilosa/muito argilosa de Mococa (SP): primeira aproximação do fator de erodibilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.13, p.237-242.
- CASTRO, E. (1974) - Determination of Absorption Limits of Soils. *Anais 2º Congresso Intern. Geol. Engenharia*, vol. 1, IV-14, São Paulo.
- COPELAND, O. L. (1965) - Land use and ecological factors in relation to sediment yields. *Proc. Feder. Intern. Agency Sedimentation Conference*. ARS Public. n°. 970. United States Dep. of Agric. pp. 72-84 (apud Evans, 1980).
- DULEY, F. L. (1939) - Surface factors affecting the rate of intake of water by soil. *Proc. Soil sci. Soc. Am. J.*, Madison, 4:60-64.
- ELLISON, W. D. (1944) - Studies of raindrop erosion. In; LARONNE, J. B.; MOSLEY, M. P. (Eds). *Erosion and sediment yield*. Hutchinson Ross Publishing Company, 1982.

- ELLISON, W. D. (1947) - Soil erosion studies. *Agric. Engn.*, 28-145-146, 197-201, 245-248, 297-300, 349-351, 402-405, 442-450.
- EL-SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W.; ARMSTRONG, C. L. (1982) - Soil erosion by water in the tropics. *Hitahr - College of Tropical Agriculture and Human resources, University of Hawai*, 173p.
- ELTZ, F. L. F. (1977) - Perdas por erosão sob precipitação natural em diferentes manejos de solo e coberturas vegetais. I. Solo da unidade de mapeamento São Jerônimo - primeira etapa experimental. Porto Alegre, UFRGS, p.97, Tese de Mestrado.
- ELWELL and STOCKING (1976) - Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia, *Geoderma*, 15, 61-70.
- EMMETT, W. W. (1970) - The hydraulics of overland flow on hillslopes. *U.S. Geol. Survey - Prof. Paper*, 662-A, 68 pp.
- EVANS, (1980) - Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: An empirical view point in soil erosion, ed. Kirkby, M. J. and Morgan, R. P. C., John Wiley & Sons.
- FABBRI e SÓRIA (1991) - Aplicação do ensaio de azul de metileno à classificação de solos - Uma primeira aproximação. 25º Reunião Anual de Pavimentação, ABPV - SP.
- FABBRI, G. T. (1994) - Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno. Tese de Doutorado. EESC/USP p.101.
- FERREIRA, C. S. de M. (1981) - Erosão - Investigação de campo e laboratório desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias - II Simpósio sobre o controle de erosão. ABGE, São Paulo, Tema III, vol.1, pp. 203-215.
- FONSECA, A. M. M. C. C. (1981) - Técnicas para previsão, prevenção e contenção de erosão em taludes e encostas, *Anais II Simpósio Sobre o Controle de Erosão*, vol. 1, p. 217-233.
- FOSTER, G. R. and MEYER, L. D. (1972) - A closed-form soil erosion equation for upland areas. In *Sedimentation: Symp. to Honour Prof. H. A. Einstein*, Ed. H. W. Shen, Fort Collins, Colorado.
- FOSTER, G. R. and MEYER, L. D. (1975) - An erosion equation derived from basic erosion principles. *Trans. ASAE*, 20, 678-682.

- FOSTER, G. R.; LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. (1982) - Evaluation of rainfall-runoff erosivity factor for individual storms. Trans. of the ASAE, St. Joseph, 25(1):124-129.
- FOSTER, G. R.; McCOOL, D. K.; MOLDENHAUER, W. C. (1981) - Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric Units. J. Soil Wat. Conserv., Ankeny, 36(6):355-359.
- FOSTER, G. R.; OSTERKAMP, W. R.; LANE, L. J. (1982) - Effect of discharge rate on rill erosion. ASAE Paper No. 82-2575. St. Joseph, MI: ASAE.
- FOURNIER, F. (1960) - The effect of factor on soil erosion: estimates of solids transported in suspension in runoff. Association Hydrologic Int. Public., p.6, v38.
- GIDIGASU, M. D. (1976) - Laterite soil engineering. Amsterdam, Elsevier.
- HEAD, K. H. (1992) - Manual of soil laboratory testing. v. 1; soil classification and compaction tests. 2. ed. London, Pentech, 1992.
- HENKLAIN, J. C.; FREIRE, O. (1983) - Avaliação do método nomográfico para determinação da erodibilidade de latossolos do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 7, N. 2, p.191-195.
- HUDSON, N. W. (1957) - Erosion Control Research, Progress Report on Experiments at Henderson Research Station, 1953-1956. Rhodesian Agric. Journal, 54(4), 297-323.
- HUDSON, N. W. (1973) - Soil Conservation, 2.ed. Cornell University Press, Ithaca, New York, pp. 320.
- INDERBITZEN, A. L. (1961) - Erosion tests for soils. Material Research & Standards, 1 (7), p.553-554.
- JOHNSON, C.B.; MANNERING, J. V.; MOLDENHAUER, W. C. (1979) - Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water loss. Proc. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 43:772-777.
- KEMPER, W. D. & CHEPIL, W. S. (1965) - Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A., ed. Methods of Soil Analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. Part I, p.499-509. (Agronomy, 9)
- KINSELL, P. I. A. (1991) - The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. Transactions of the ASAE 34(1): 161-168.

- KIRKBY, M. J. (1980) - Modelling water erosion processes in soil. Erosion edited by Kirkby M. J. and Morgan, R. P. C. John Wiley & Sons.
- LAFLEN, J. M.; BEASLEY, R. P. (1960) - Effects of compaction of critical tractive forces in cohesive soils. Research Bulletin n. 749, sep. 1960, Agricultural Experiment Station, University of Missouri, Columbia, Mo.
- LAL, R. (1976) - Soil erosion on Alfisols in western Nigeria. III. Effects on rainfall characteristics. *Geoderme*, Amsterdam, 16:389-401
- LAL, R. (1990) - Soil erosion in the tropics - principles and management. McGraw-Hill, New York, p. 580.
- LEMOS, P.; LUTZ, J. F. (1957) - Soil crusting and some factors affecting it. *Proc. Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 21:485-491.
- LIMA, J. M.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. (1990) - Dispersão do material de solo em H₂O para a avaliação indireta da erodibilidade de latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 14, N.1, p.85-90.
- LOBARDI NETO, F. (1979) - Universal soil loss equation (USLE) runoff erosivity, factor slope length, expoente and slope steepness for individual storms. Tese (Doctor of Philosophy). Purdue University. West Lafayette.
- LOMBARDI NETO, F. & BERTONI, J. (1975) - Erodibilidade de solos paulistas. Instituto Agronômico, Campinas, 12 p. (Boletim Técnico 27).
- LOMBARDI NETO, F. (1977) - Rainfall erosivity - Its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brasil. West Lafayette Purdue University, p. 53. (tese de mestrado)
- MEYER, L. D. and MONKE, E. J. (1965) - Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. *Trans ASAE*, 8, 4, 572-577, 580.
- MEYER, L. D., FOSTER, G. R. and ROMKENS, M. J. M. (1975) - Source of soil eroded by water from upland slopes. *Proceedings of the Sediment - Yield Workshop*, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research, ARS-S-40.
- MIDDLETON, H. E. (1930) - Properties of soils wich influence soil erosion, V. S. dept. Agric. Tech. Bull. 178, pp. 16.
- MOORE, W. L. and MASCH, F. D. (1962) - Experiments on the Scour resistance of cohesive sediments. *J. Geophys. Res.*, vol. 67.

- MORAIS, L. F. B.; MUTTI, L.S.M.; ELTZ, F. L. F.(1988) - Índices de erosividade correlacionados com perdas de solo no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.12, p.281-284.
- NASCIMENTO, U. e CASTRO, E. (1976) - Erosão. Critérios de seleção de solos. *Geotecnia*, 20, 17-33.
- NEARING, M. A. and BRADFORD, J. M. (1985) - Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:547-552.
- NISHIYAMA, L. (1995) - Erosão do solo: Uma visão integrada dos fatores e processos que condicionam o seu desenvolvimento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p.95.
- NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. (1979) - Soil characterization of mapping unites for highway purposes in a tropical area. *Bull. IAEG*, 19, 196-199.
- NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. (1981) - Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. *Simp. Bras. Solos Tropicais em Engenharia*, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, pp. 30-41.
- OLIVEIRA, F. (1987) - Estabilidade de agregados. Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, 17p.
- PEJON, O . J. (1992) - Mapeamento geotécnico da folha de piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos, Tese (Doutorado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PHILIPPONATT, G. (1973) - Etude Experimental de l'erosion des sols et du drainage superficial a Madagascar. *Rev. Gen. Routs er Aerodrom*; Paris, v. 419, 59-64.
- RUFINO, L. R.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. (1993) - Determinação do potencial erosivo da chuva do Estado do Paraná, através de pluviometria. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas, v.17, p. 439-444.
- SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, K. P. and DECKER, R. S. (1976) - Identification and nature of sispersive soils, *J. Geotech., ASCE*, vol. 102, GT4, 287-301.
- SMERDON, E. F.; BEASLEY, R. P. (1959) - The tractive force theory aplyed to stability of open channels in cohesive soils. *Research Bulletin n. 715*, oct. 1959, Agricultural Experiment Station, University of Missouri, Columbia, Mo.

- SWANSON, N. P.; DEDRICK, A. R. and WEAKLY, H. E. (1969) - Soil particles and aggregates transported in runoff from simulated rainfall. *Trans. ASAE*, 8, 3, 437-440.
- VAN BAVEL, C. H. M. (1949) - Mean weight - diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 14:20-3.
- VERÇOSA, J. J. R. (1978) - Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaiss - tese Mestrado, COPPE, Rio de Janeiro.
- VERTAMATTI, E., ARAÚJO, F. A. R. e PAPPALARDO, F. R. (1990) - Um estudo da erodibilidade de solos tropicais. *Anais 6º. CBGE / IX COBRAMSEF*, v. 1., p. 363-369, Bahia.
- VILAR, O. M. (1987) - Formulação de um modelo matemático para a erosão dos solos pela chuva. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p.196.
- WISCHMEIER, W. H. (1959) - A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, 23:246-299.
- WISCHMEIER, W. H. (1973) - Conservation tillage to control water erosion. In; *National Conservation Tillage Conference*, Ankeny, 1973, proceedings. Ankeny, Soil Conservation Society of America, p.133-141.
- WISCHMEIER, W. H. and MANNERING, J. W. (1969) - Relation of soil properties to is erodibility. *proc. soil. Soc. Am.*, 33, 131-137.
- WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. (1958) - Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions of the American Geophysical Union*, v.39, n.2, p. 285-291, apr.
- WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. (1978) - Predicting rainfall erosion Losses. *Agricultural Research Service Handbook*, nº. 282, United States Department of Agriculture, Washington, D. C.
- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. (1971) - A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Wat. Cons.*, Ankeny, 26(5):189-193.
- YOUNG, R. A. (1980) - Characteristics of eroded sediment. *Trans. ASAE*, 23 (5), 1139-1142, 1146.
- YOUNG, R. A. (1984) - A method of measuring aggregate stability under waterdrop impact. *Transactions of the ASAE* 27(5):1351-1354.

- YOUNG, R. A. and MUTCHLER, C. K. (1969a) - effects of slopes shape on erosion and runoff. Trans. ASAE, 12 (2), 231-233, 239.
- YOUNG, R. A. and MUTCHLER, C. K. (1969b) - Soil movement on irregular slopes. Water Res. res., 5 (5), 1084-1089.
- YOUNG, R. A. and ONSTAD, C. A. (1978) - Characterization of rill and interrill eroded soil, Trans. ASAE, 21 (6), 1126-1130.
- ZINGG, A. W. (1940) - Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. Agric. Engng. 21, 59-64.