

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE DO PROCESSO
EVOLUTIVO DAS EROSÕES NO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA**

ROBERTO MÁRCIO MACEDO DOS SANTOS

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM - 044A/97

BRASÍLIA / DF: julho/97

Autor: Roberto Márcio Macedo dos Santos

Título da Tese: Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia

Curso: Pós-Graduação em Geotecnia

Data da Defesa: 10/07/97

Orientador: José Camapum de Carvalho

Palavras Chave: 1 - Erosão; 2 - Caracterização; 3 - Estabilidade; 4 - Erosão Interna

Key words: 1 - Erosion; 2 - Characterization; 3 - Stability; 4 - Piping

Resumo: O Município de Goiânia experimentou um rápido processo de expansão urbana nas últimas décadas, que gerou como consequência uma disseminação de processos erosivos em sua área urbana. Esta dissertação apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos do meio físico que condicionam o desenvolvimento do processo erosivo. Para voçorocas representativas da região, são apresentados os resultados referentes a ensaios de caracterização e análise mineralógica dos perfis de intemperismo, ensaios de Pinhole, ensaios de Inderbitzen, ensaios de desagregação, ensaios de cisalhamento direto e análise de estabilidade de taludes. Os ensaios de caracterização realizados revelam uma homogeneização das propriedades físicas e mineralógicas dos horizontes superiores dos perfis de intemperismo estudados, devido aos processos pedogenéticos. Ensaio de Inderbitzen realizados nos horizontes superiores mostram que estes possuem susceptibilidades semelhantes à atuação dos processos erosivos por fluxo superficial. Já nos horizontes inferiores, menos intemperizados, a diferença é bastante acentuada. As observações de campo, junto aos dados de laboratório, permitem a identificação de dois tipos básicos de voçorocas existentes no Município. No primeiro grupo estão as voçorocas de aspecto linear, quando vistas em planta, formadas em regiões de média declividade, cujos principais mecanismos de atuação são o fluxo superficial e os movimentos de massa. No segundo grupo incluem-se as voçorocas de aspecto semi-circular, formadas em regiões de ruptura de declive, cujos mecanismos de evolução atuam de forma mais complexa, devido à interação entre processos de erosão pelo fluxo superficial, erosão interna devida ao elevado gradiente hidráulico e movimentos de massa.

Abstract: The city of Goiânia, capital of the state of Goiás, Brazil, has undergone a rapid urban growth in the last decades. This fact has created the spreading of gullies in its urban area. This dissertation presents a bibliographic review regarding the main environmental aspects that has influenced the development of the erosion process. As its main objective, this dissertation presents results of characterization tests and mineralogical analyses of the existing soil profiles for typical gullies in the region. Testing programmes comprising Pinhole tests, Inderbitzen tests, crumb tests and direct shear tests were also carried out. The laboratory results were utilized in the stability analysis of natural slopes. The soil characterization tests reveal that pedogenetics processes tend to homogenize the physical and mineralogical soil properties of the upper horizons of the weathering profiles. Inderbitzen tests performed in the upper horizons show that these portions present similar susceptibility to erosion processes by superficial water flow. In contrast, the lower horizons which is less weathered, present remarkable differences between the various existing litologic domains. Field observations together with the laboratory tests allow the recognition of two basic types of gullies existents in the region. The first group presents gullies with linear aspect. Such gullies occur in the mid-slope regions with a flat relief. In these regions the main mechanisms of erosion are superficial water flow and soil mass movements. The second group presents gullies formed in the regions of steep slopes that show semi-circular forms. The mechanisms of spreading of this gullies are more complex due to the interaction between erosion by superficial water flow, soil mass movements and internal erosion caused by piping.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

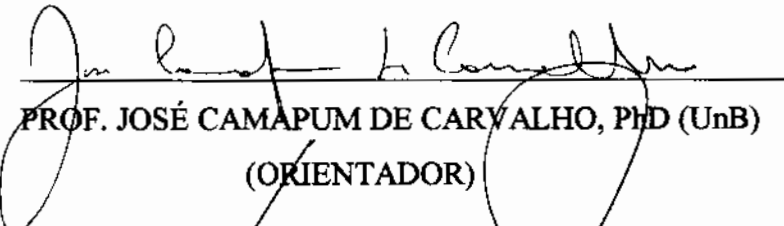
FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE DO PROCESSO
EVOLUTIVO DAS EROSÕES NO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA

ROBERTO MÁRCIO MACEDO DOS SANTOS

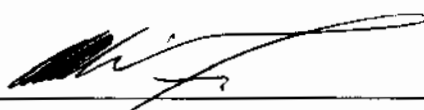
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
APROVADA POR:



PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)



PROF. PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



PROF. ORENCIO MONJE VILAR, PhD (EESC/USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 DE JULHO DE 1997

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, ROBERTO MÁRCIO MACEDO DOS

Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia, 1997.

xvii, 120 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 1997)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.

1. Erosão

2. Caracterização

3. Estabilidade

4. Piping

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, R.M.M. (1997). Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-044A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Roberto Márcio Macedo dos Santos

TÍTULO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia.

GRAU: Mestre em Ciências ANO: 1997

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Roberto Márcio Macedo dos Santos, Geólogo

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, CPRM
Superintendência Regional de Goiânia, SUREG/GO
Rua 148, nº 485, Setor Marista, Goiânia, GO.
CEP 74170-110, TEL: (062)281-1522, FAX: (062)281-1709

DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado ao meu pai Heltor, pelo apoio constante e incentivo prestados.
Dedico ainda à minha namorada Marta, por compreender os momentos de ausência sem nunca deixar de me apoiar.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Camapum de Carvalho pelo apoio, incentivo e transmissão de conhecimentos ao longo de toda esta pesquisa.

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, CPRM, pela dispensa das atividades normais de trabalho, que possibilitou a realização desta dissertação.

A Furnas Centrais Elétricas S.A. pelo grande auxílio prestado na coleta de amostras indeformadas e pela cessão de seus laboratórios para os ensaios de Pinhole, desagregação e ensaios de cisalhamento direto.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao bolsista de iniciação científica Renato Cabral Guimarães, pelo grande auxílio prestado durante os ensaios de caracterização.

Ao geólogo Éder Martins de Souza, da EMPRABA/Cerrados, pelo auxílio na análise e interpretação dos ensaios de difratometria de raios X e de determinação de teores de matéria orgânica.

A professora Maria Amélia Leite Soares do Nascimento, da UFG, e aos geógrafos Alec e Aristeu, do DERMU, pelo auxílio no processo de escolha das erosões.

Ao Major Adverse, da Defesa Civil do Distrito Federal, e ao Corpo de Bombeiros de Goiânia pelo fornecimento de técnicos e equipamentos de segurança para a descida nas erosões mais profundas.

Ao professor José Henrique Feitosa Pereira pelo auxílio nos trabalhos de análise de estabilidade dos taludes.

Aos demais professores do curso de Pós-graduação em Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos e pela solicitude.

Aos grandes amigos da turma de 95; Haroldo, Moisés, Diorgenes, Eduardo, Marizeth, Júnior, Ariston, Patrícia, Evaldo, Rômulo, Carlos Alberto, Severino, Fabrício e Maurício pela saudável convivência durante o período da realização desta dissertação.

RESUMO

O Município de Goiânia experimentou um rápido processo de expansão urbana nas últimas décadas, que gerou como consequência uma disseminação de processos erosivos em sua área urbana.

Esta dissertação apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos do meio físico que condicionam o desenvolvimento do processo erosivo.

Para voçorocas representativas da região, são apresentados os resultados referentes a ensaios de caracterização e análise mineralógica dos perfis de intemperismo, ensaios de Pinhole, ensaios de Inderbitzen, ensaios de desagregação, ensaios de cisalhamento direto e análise de estabilidade de taludes.

Os ensaios de caracterização realizados revelam uma homogeneização das propriedades físicas e mineralógicas dos horizontes superiores dos perfis de intemperismo estudados, devido aos processos pedogenéticos. Ensaios de Inderbitzen realizados nos horizontes superiores mostram que estes possuem susceptibilidades semelhantes à atuação dos processos erosivos por fluxo superficial. Já nos horizontes inferiores, menos intemperizados, a diferença é bastante acentuada.

As observações de campo, junto aos dados de laboratório, permitem a identificação de dois tipos básicos de voçorocas existentes no Município. No primeiro grupo estão as voçorocas de aspecto linear, quando vistas em planta, formadas em regiões de média declividade, cujos principais mecanismos de atuação são o fluxo superficial e os movimentos de massa. No segundo grupo incluem-se as voçorocas de aspecto semi-circular, formadas em regiões de ruptura de declive, cujos mecanismos de evolução atuam de forma mais complexa, devido à interação entre processos de erosão pelo fluxo superficial, erosão interna devida ao elevado gradiente hidráulico e movimentos de massa.

ABSTRACT

The city of Goiania, capital of the state of Goias, Brazil, has undergone a rapid urban growth in the last decades. This fact has created the spreading of gullies in its urban area.

This dissertation presents a bibliographic review regarding the main environmental aspects that has influenced the development of the erosion process.

As its main objective, this dissertation presents results of characterization tests and mineralogical analyses of the existing soil profiles for typical gullies in the region. Testing programmes comprising Pinhole tests, Inderbitzen tests, crumb tests and direct shear tests were also carried out. The laboratory results were utilized in the stability analysis of natural slopes.

The soil characterization tests reveal that pedogenetics processes tend to homogenize the physical and mineralogical soil properties of the upper horizons of the weathering profiles. Inderbitzen tests performed in the upper horizons show that these portions present similar susceptibility to erosion processes by superficial water flow. In contrast, the lower horizons which is less weathered, present remarkable differences between the various existing litologic domains.

Field observations together with the laboratory tests allow the recognition of two basic types of gullies existents in the region. The first group presents gullies with linear aspect. Such gullies occur in the mid-slope regions with a flat relief. In these regions the main mechanisms of erosion are superficial water flow and soil mass movements. The second group presents gullies formed in the regions of steep slopes that show semi-circular forms. The mechanisms of spreading of this gullies are more complex due to the interaction between erosion by superficial water flow, soil mass movements and internal erosion caused by piping.

Figura 5.9 - Resultados dos ensaios granulométricos sem o uso de defloculante	66
Figura 5.10 - Distribuição granulométrica das amostras analisadas	68
Figura 5.11 - Distribuição granulométrica das amostras analisadas (continuação)	69
Figura 5.12 - Distribuição granulométrica das amostras analisadas (continuação)	70
Figura 5.13 - Variação do índice de atividade (Ia) com a profundidade	71
Figura 5.14 - Correlações entre as principais propriedades físicas	72
Figura 6.1 - Modelo esquemático do ensaio de Pinhole (modificado - Sherard <i>et al.</i> , 1976b)	76
Figura 6.2 - Amostras submetidas ao ensaio de Pinhole.	77
Figura 6.3 - Resultados dos ensaios de Pinhole para voçoroca do Batalhão de Polícia	78
Figura 6.4 - Resultados dos ensaios de Pinhole para voçoroca do Conjunto Vera Cruz	79
Figura 6.5 - Resultados dos ensaios de Pinhole para voçoroca do Jardim Botânico	79
Figura 6.6 - Vista frontal do aparelho de Inderbitzen durante a realização do ensaio	82
Figura 6.7 - Resultado dos ensaios de Inderbitzen para a fração > 0,074 mm (medido)	84
Figura 6.8 - Resultado dos ensaios de Inderbitzen para a quantidade total de solo	84
Figura 6.9 - Influência da direção do fluxo sobre os resultados do ensaios de Inderbitzen	87
Figura 6.10 - Ensaio de desagregação por imersão total, após um período de 15 minutos	88
Figura 6.11 - Evolução do ensaio de desagregação por imersão progressiva	89
Figura 7.1 - Obtenção de parâmetros de resistência a partir da curva de deslocamento.	97
Figura 7.2 - Superfície de ruptura para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia	101
Figura 7.3 - Superfície de ruptura para a voçoroca do Conjunto Vera Cruz	101
Figura 7.4 - Superfície de ruptura para a voçoroca do Jardim Botânico	102
Figura 7.5 - Variação das componentes de resistência ao longo da superfície de ruptura para a voçoroca do Conjunto Vera Cruz	103
Figura 7.6 - Variação das componentes de resistência ao longo da superfície de ruptura para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia	104
Figura 7.7- Variação das componentes de resistência ao longo da superfície de ruptura para a voçoroca do Jardim Botânico	104
Figura 7.8 - Evolução dos fatores de segurança com o solapamento	107

ÍNDICE

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	2
1.2 ESCOPO DO TRABALHO	3
2. O FENÔMENO DA EROSÃO	4
2.1 CONCEITOS BÁSICOS	4
2.2 O PROCESSO EROSIVO	6
2.3 A ERODIBILIDADE DOS SOLOS	10
2.4 VOÇOROCAS E <i>PIPING</i>	12
3. ASPECTOS FÍSICOS DO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA	16
3.1 INTRODUÇÃO	16
3.2 GEOLOGIA	17
3.2.1 Estratigrafia	17
3.2.2 Geologia Estrutural	19
3.2.3 Geologia Econômica	20
3.3 GEOMORFOLOGIA	21
3.3.1 Unidades Geomorfológicas	21
3.3.2 Evolução Geomorfológica	23
3.4 SOLOS	25
3.5 CLIMA	27
3.6 EROSÕES CADASTRADAS NO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA	30
4. DESCRIÇÃO DOS PERFIS DE ALTERAÇÃO DAS EROSÕES	32
4.1 INTRODUÇÃO	32
4.2 METODOLOGIA PARA DESCRIÇÃO DOS PERFIS DE ALTERAÇÃO	32
4.2.1 Descrição dos Perfis de Alteração	32

4.2.2	Análise Mineralógica por Difractometria de Raios X	34
4.3	TRABALHOS DE CAMPO	36
4.4	DESCRIÇÃO, MINERALOGIA E CLASSIFICAÇÃO DOS PERFIS DE ALTERAÇÃO	37
4.4.1	Voçoroca do Conjunto Vera Cruz	37
4.4.2	Voçoroca do Batalhão da Polícia	42
4.4.3	Voçoroca da Vila Pedroso	46
4.4.4	Voçoroca do Jardim Botânico	49
5.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	52
5.1	INTRODUÇÃO	52
5.2	METODOLOGIA	52
5.3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
5.3.1	Umidade Natural e Umidade Higroscópica	56
5.3.2	Peso Específico	57
5.3.3	Limites de Atterberg	58
5.3.4	Índice de Vazios e Grau de Saturação	61
5.3.5	Granulometria	62
5.3.6	Índice de Atividade	70
5.3.7	Correlações Entre os Índices Físicos Obtidos	71
5.4	CONCLUSÕES	73
6.	ENSAIOS DE ERODIBILIDADE	75
6.1	INTRODUÇÃO	75
6.2	ENSAIOS DE PINHOLE	75
6.2.1	Metodologia	75
6.2.2	Resultados	77
6.2.3	Influência da Composição do Líquido Percolante	81
6.3	ENSAIOS DE INDERBITZEN	82
6.3.1	Metodologia	82
6.3.2	Resultados	84
6.3.3	Influência da Anisotropia	86
6.4	ENSAIOS DE DESAGREGAÇÃO	87
6.4.1	Metodologia	87

6.4.2 Resultados	88
6.5 CONCLUSÃO	90
7. ESTABILIDADE DE TALUDES	93
7.1 INTRODUÇÃO	93
7.2 METODOLOGIA	94
7.2.1 O Método de Bishop	94
7.2.2 Voçorocas Analisadas	95
7.2.3 Ensaios de Cisalhamento Direto e Parâmetros Utilizados	96
7.2.4 Análise de Estabilidade de Taludes	98
7.3 RESULTADOS	100
7.4 CONCLUSÕES	107
8. ANÁLISE DO PROCESSO EVOLUTIVO E CONSIDERAÇÕES RELATIVAS A TRABALHOS DE CONTROLE DOS PROCESSOS EROSIVOS	109
8.1 ASPECTOS CONCEITUAIS PARA OBRAS DE CONTROLE DAS VOÇOROCAS ESTUDADAS	110
8.2 TRABALHOS DE CONTROLE REALIZADOS NO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA	111
9. CONCLUSÕES	114
9.1 ASPECTOS FÍSICOS	114
9.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	114
9.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1.1 - Ocupação no Município de Goiânia (modificado - IPLAN, 1990b)	1
Figura 2.1 - Forças atuantes sobre um elemento de solo (Owopulti & Stolte, 1995)	9
Figura 3.1- Mapa geológico do Município de Goiânia (modificado - Moreton, 1994)	20
Figura 3.2 - Mapa geomorfológico do Município de Goiânia (modificado - Casseti, 1992)	22
Figura 3.3 - Mapa dos solos no Município de Goiânia (modificado - IPLAN, 1990a)	26
Figura 3.4 - Pluviosidade anual média na região de Goiânia (modificado - IBGE, 1994)	28
Figura 3.5 - Crescimento populacional e alterações meteorológicas no Município de Goiânia (modificado - Casseti, 1991)	29
Figura 3.6 - Atuação de disritmias pluviométricas no desenvolvimento de erosões	30
Figura 3.7 - Erosões existentes no Município de Goiânia (modificado - Nascimento, 1993)	31
Figura 4.1 - Modelo esquemático de um Difratógrafo de Raios X	35
Figura 4.2 - Vista da voçoroca do Conjunto Vera Cruz em direção à juzante	38
Figura 4.3 - Horizontes superiores (entre 0 e 2 metros) da voçoroca do Conj. Vera Cruz	39
Figura 4.4 - Horizonte intermediário (5 metros) da voçoroca do Conjunto Vera Cruz	39
Figura 4.5 - Horizonte inferior (9 metros) da voçoroca do Conjunto Vera Cruz	40
Figura 4.6 - Composição mineralógica para a voçoroca do Conjunto Vera Cruz	40
Figura 4.7 - Vista da cabeceira da voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia	42
Figura 4.8 - Cavidade formada pelo processo de erosão interna (<i>piping</i>)	43
Figura 4.9 - Composição mineralógica para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia	44
Figura 4.10 - Vista da cabeceira da voçoroca da Vila Pedroso	46
Figura 4.11 - Composição mineralógica para a voçoroca da Vila Pedroso	48
Figura 4.12 - Vista de trecho da voçoroca do Jardim Botânico.	50
Figura 4.13 - Composição mineralógica para a voçoroca do Jardim Botânico	51
Figura 5.1 - Variação dos teores de umidade natural (w_n) e umidade higroscópica (w_h)	56
Figura 5.2 - Variação do peso específico aparente seco (γ_d) e peso específico dos sólidos (γ_s)	57
Figura 5.3 - Variação dos limites de liquidez (w_l) e plasticidade (w_p) com a profundidade	60
Figura 5.4 - Variação do índice de plasticidade (I_p) com a profundidade	60
Figura 5.5 - Variação do índice de vazios (e) e do grau de saturação (S_r)	61
Figura 5.6 - Variação das frações pedregulho e areia com a profundidade	63
Figura 5.7 - Variação da fração silte e da fração argila com a profundidade	63
Figura 5.8 - Resultados dos ensaios granulométricos com o uso de defloculante	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 - Classificação da erosão pelos fatores ativos (Zachar, 1982)	4
Tabela 3.1 - Coluna estratigráfica da região de Goiânia (modificado - Moreton, 1994)	18
Tabela 3.2 - Chuvas Intensas em Goiânia (modificado - CNEN/CPRM, 1993)	28
Tabela 4.1 - Classificação do perfil de alteração para a voçoroca do Conj. Vera Cruz	41
Tabela 4.2 - Perfil de alteração para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia	45
Tabela 4.3 - Classificação do perfil de alteração para a voçoroca da Vila Pedroso	48
Tabela 5.1- Quadro-Resumo das principais propriedades físicas	54
Tabela 5.2 - Quadro-Resumo das principais propriedades físicas (continuação)	55
Tabela 5.3 - Massa Específica dos minerais identificados (modificado - Deer, 1981)	58
Tabela 5.4 - Limites de Atterberg para argilo-minerais (modificado - Mitchell, 1993)	59
Tabela 7.1 - Principais parâmetros adotados na análise de estabilidade de taludes	98
Tabela 7.2 - Valores de Fator de Segurança (FS) obtidos pelo programa SLOPE/W	102
Tabela 7.3 - Variação dos fatores de segurança com o solapamento	106

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

1:1	argilo-mineral com empilhamento do tipo um para um
a	área
A	horizonte pedológico A
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APIga	Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu - gnaisses aluminosos
APIgb	Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu - granulitos básicos
A _w	clima tropical com estação seca no inverno
B	horizonte pedológico B
BP	Batalhão Florestal da Polícia
c'	coesão efetiva
cm	centímetro
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Comp.	Complexo (nomenclatura de classificação estratigráfica)
cos	coseno
c _u	coeficiente de uniformidade
D	diâmetro
d	distância interplanar basal
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
DERMU	Departamento de Estradas de Rodagem Municipal
D _R	densidade relativa
e	índice de vazios
EEN-WWN	leste nordeste - oeste noroeste
E _L , E _R	forças de reação entre elementos adjacentes de solo
<i>et al.</i>	(<i>et alli</i> - e outros)
F _N	força normal
F _p	força paralela
FS	fator de segurança
F _s	força de percolação
F _{t-1} , F _t , F _{t+1}	fases de deformação metamórfica
g	aceleração da gravidade

g	grama
Gr.	Grupo (nomeclatura de classificação estratigráfica)
h	hora
i	gradiente hidráulico
Ia	índice de atividade
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
I_p	índice de plasticidade
IPLAN	Instituto de Planejamento Municipal
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JB	Jardim Botânico
k	coeficiente de permeabilidade
km ²	quilômetro quadrado
kN	quilonewton
kPa	quilopascal
Ltd.	(Limited - Companhia Limitada)
m	metro
m ³	metros cúbico
max	máximo
m.a.	milhões de anos
min	minuto
ml	mililitro
mm	milímetro
mm ²	milímetro quadrado
$m\alpha$	termo da equação de resistência ao cisalhamento mobilizada
N	norte
N_a	força normal atuante
n	porosidade
n ^o	número
N.A.	nível da superfície freática
NBR	Norma Brasileira Registrada
ND	não dispersivo
NE	nordeste
NE-SW	nordeste - sudoeste

NP	não plástico
N-S	norte - sul
NW	noroeste
NW-SE	noroeste - sudeste
pH	potencial de hidrogenização
PMa	Grupo Araxá - unidade D
Q	vazão
Qa	aluviões quaternários
R	número de Reynolds
R ²	coeficiente de correlação
r _u	coeficiente de poro-pressão
S	sul
s	segundo
SANEAGO	Empresa de Saneamento do Estado de Goiás
S.A.	Sociedade Anônima
sen	seno
S _{mob}	resistência ao cisalhamento mobilizada
S _r	grau de saturação
T	força cisalhante
Ta	alta capacidade de troca de cátions
Tb	baixa capacidade de troca de cátions
tg	tangente
u _a	pressão no ar
USLE	(Universal Soil Loss Equation - Equação Universal de Perda de Solos)
u _w	poro-pressão da água
VC	Vera Cruz
v _c	velocidade crítica de percolação
VP	Vila Pedroso
X _D	resultante da resistência lateral de um elemento de solo
W	oeste
W _E	peso efetivo de um elemento de solo
WEPP	(Water Erosion Predict Project - Projeto de Previsão de Erosão Hídrica)
w _h	teor de umidade higroscópica

w_l	limite de liquidez
w_n	teor de umidade natural
w_p	limite de plasticidade
α	ângulo
ϕ'	ângulo de atrito efetivo
ϕ^b	ângulo de atrito do solo em relação à sucção matricial
γ	peso específico aparente
γ_d	peso específico aparente seco
γ_s	peso específico dos sólidos
γ_w	peso específico da água;
λ	comprimento de onda dos raios X
μ	viscosidade da água
μm	micron (= 0,001 milímetros)
ρ	massa específica
σ	tensão normal
θ	ângulo de incidência dos raios X
$^{\circ}C$	graus Celsius
$^{\circ}$	grau
'	minuto
"	segundo
%	por cento

1. INTRODUÇÃO

O Município de Goiânia, criado em 1933, possui uma área de 801 km² sobre a qual vive uma população de 922.222 habitantes, de acordo com o censo de 1991.

O rápido processo de crescimento urbano experimentado pelo Município vem causando uma ocupação desordenada do meio físico o qual gera como conseqüências situação de risco geológico. A população, que na década de 40 mantinha-se estável em torno de 60 mil pessoas, sofreu um incremento acelerado a partir da década de 50, atingindo um número próximo de 160 mil habitantes em 1960, 360 mil em 1970 e 720 mil em 1980. Esta tendência de crescimento vem se mantendo até os dias atuais e gera como conseqüência um aumento da área urbanizada. A Figura 1.1 mostra o avanço das áreas urbanizadas sobre o território do Município de Goiânia.

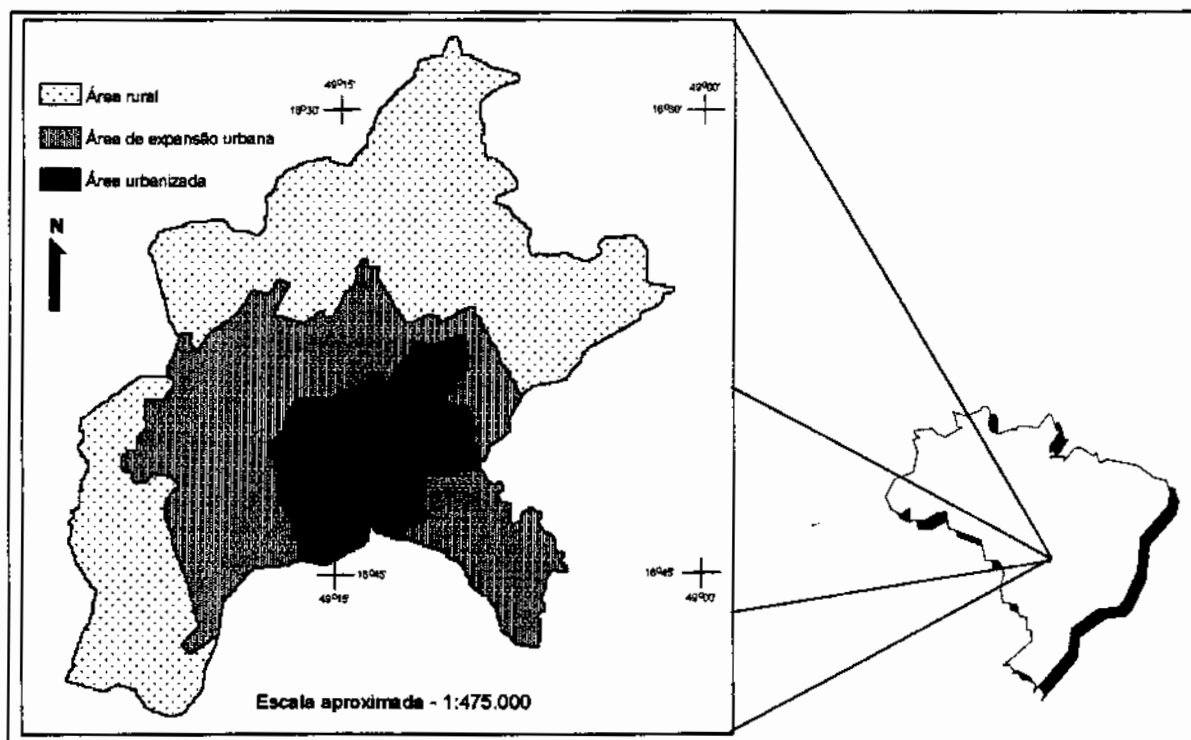


Figura 1.1 - Ocupação no Município de Goiânia (modificado - IPLAN, 1990b)

Já os trabalhos de oferta de infra-estrutura urbana não conseguiram acompanhar a demanda criada pelo crescimento populacional, gerando como conseqüência uma ocupação desordenada do Município. Uma conseqüência marcante desta ocupação desordenada são os processos erosivos, que ocorrem indistintamente sobre os diversos domínios morfo-litológicos presentes no Município.

As erosões geram sérias conseqüências sócio-econômicas como a perda de áreas agricultáveis ou habitáveis, interrupção de vias, assoreamento do leito dos cursos d'água e destruição do patrimônio privado e público, fatos constantemente veiculados nos meios de comunicação.

As práticas de ocupação urbana utilizadas são as responsáveis diretas pela intensificação dos processo erosivos. A remoção da vegetação nativa e a impermeabilização da área urbana sem a devida implementação de sistemas de drenagem de águas pluviais modificaram o regime hidrológico atuante, gerando então as feições erosivas observadas no Município. O trabalho de cadastramento realizado por Nascimento (1994) revelou a presença de 45 voçorocas, formas erosivas de grande intensidade destrutiva, somente nos limites do Município de Goiânia, cujo volume de terra removido alcança a casa de 3 milhões de toneladas.

1.1 OBJETIVO

Objetiva-se com este trabalho alcançar um entendimento das formas de evolução e dos principais condicionantes dos processos erosivos atuantes no Município de Goiânia os quais, junto aos dados geológicos e geotécnicos apresentados, possam subsidiar de maneira adequada o desenvolvimento de projetos efetivos de controle e prevenção dos processos erosivos.

Em síntese, este trabalho tem por objetivo apresentar as seguintes contribuições:

- revisão bibliográfica atualizada dos processo físicos atuantes e das teorias relativas aos processos erosivos e sua evolução;
- compilação dos trabalhos relativos aos aspectos de meio físico e suas implicações no processo erosivo;
- caracterização das principais propriedades físicas e mineralógicas dos solos presentes no Município e sua relação com o substrato rochoso de modo a avaliar sua influência na evolução dos processos erosivos;
- caracterização da susceptibilidade à erosão superficial e erosão interna dos solos estudados através de ensaios específicos;
- caracterização de parâmetros de resistência e análise da estabilidade dos taludes das erosões estudadas, simulando as variações das condições naturais que ocorrem no campo e analisando sua influência na evolução do processo erosivo;

- proposição de um modelo evolutivo para as erosões em Goiânia e sua relação com os domínios morfo-litológicos existentes;
- avaliação e sugestões relativas às técnicas de controle do processo erosivo utilizadas no Município.

A realização deste trabalho utilizou como objeto de estudo quatro voçorocas representativas das principais feições erosivas existentes no Município.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho de dissertação é dividido nos seguintes capítulos:

- No Capítulo 1 é feita a apresentação do trabalho e seus objetivos;
- No Capítulo 2 é feita uma conceituação do fenômeno erosivo e dos fatores que o afetam, além da descrição de modelos que descrevem o processo erosivo;
- No Capítulo 3 são apresentadas as características do meio físico e sua influência no processo erosivo;
- No Capítulo 4 é feita uma descrição das voçorocas estudadas, além de uma descrição mineralógica detalhada dos perfis de alteração existentes;
- No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica das amostras relativas às erosões estudadas;
- No Capítulo 6 são apresentados e analisados os dados relativos aos ensaios de erodibilidade realizados;
- No Capítulo 7 são apresentados os parâmetros de resistência dos solos e é feita uma análise da estabilidade dos taludes existentes nas voçorocas;
- No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões gerais da dissertação, sendo proposto um modelo evolutivo para as voçorocas existentes na região. São colocadas também sugestões para o direcionamento de trabalhos de controle do processo erosivo e para a realização de pesquisas futuras.

2. O FENÔMENO DA EROSÃO

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

O termo erosão provém do latim (*erodere*) e significa corroer. Nos estudos ligados às Ciências da Terra o termo é aplicado aos processos de desgaste da superfície terrestre (solo ou rocha) pela ação da água, do vento, do gelo e de organismos vivos (plantas e animais), além do homem.

Zachar (1982) propõe uma terminologia para a classificação dos principais tipos de erosão (Tabela 2.1) enfatizando o caráter combinado entre os agentes erosivos e a ação da gravidade.

Tabela 2.1 - Classificação da erosão pelos fatores ativos (Zachar, 1982)

Fator	Termo
1- água	erosão hídrica
1.1- chuva	erosão pluvial
1.2- rio	erosão fluvial
1.3- lago, reservatório	erosão lacustrina ou límica
1.4- mar	erosão marinha
2- geleira	erosão glacial
3- neve	erosão nival
4- vento	erosão eólica
5- terra, detritos	erosão soligênica
6- organismos	erosão organogênica
6.1- plantas	erosão fitogênica
6.2- animais	erosão zoogênica
6.3- homem	erosão antropogênica

Os processos erosivos constituem-se numa forma natural de modelagem do relevo e atuam de forma conjugada aos processos pedogenéticos. De maneira geral, sob condições naturais, estes dois processos atuam equilibradamente, havendo uma certa equivalência entre a quantidade de solo erodida e a quantidade produzida. Denomina-se comumente este fenômeno

de erosão natural ou erosão geológica. Quando se dá um rompimento deste equilíbrio devido a interferência do homem de modo a não permitir ao solo uma recuperação natural, dá-se o nome de erosão acelerada ou erosão antrópica.

Na erosão causada pela chuva, foco deste trabalho, o processo ocorre de forma combinada entre a ação do impacto da gota de chuva e o escoamento superficial que atuam destacando e transportando partículas do solo. De acordo com a forma como se dá o escoamento superficial ao longo da vertente pode-se reconhecer dois tipos de erosão: a erosão laminar e a erosão linear.

O processo de erosão laminar ou erosão por escoamento laminar, caracteriza-se por uma remoção uniforme do solo ao longo da vertente causada por um fluxo uniformemente distribuído. Segundo Zachar (1982) a uniformidade do fluxo depende diretamente da inclinação da vertente. Quanto maior a declividade, menores serão as áreas com possibilidade de acumulação de água e conseqüentemente mais uniforme será o fluxo. Devido a forma como ocorrem, as evidências de erosão laminar são de difícil percepção.

Já o processo de erosão linear caracteriza-se por uma concentração do fluxo superficial no qual o maior poder erosivo então gerado leva a formação de feições lineares tais como sulcos, ravinas ou voçorocas, na medida que se aprofunda a erosão no terreno.

Ressalta-se aqui que a ocorrência do escoamento por fluxo superficial está diretamente relacionada com as condições de infiltração da água no solo. Segundo Te Chow (1988), a infiltração decresce com a continuidade da chuva. Interferem também na infiltração, a intensidade do evento chuvoso, a proximidade da superfície freática, o grau de compactação e a porosidade do solo, além da vegetação e da topografia.

As voçorocas constituem a expressão mais marcante e mais complexa do processo erosivo. Na voçoroca atuam, além do escoamento superficial, processos de erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos (DAEE/IPT, 1990). Desta forma, as voçorocas constituem-se de feições onde processos formadores de natureza diversa se alternam durante a sua evolução, atuando de forma associada ou não, gerando feições de grandes dimensões e velocidades de avanço elevadas. Destaca-se no caso das voçorocas a influência da água subterrânea, cuja força de percolação pode dar origem ao processo de erosão interna ou *piping*, responsável pela formação de vazios no solo, que contribui para a instabilização das feições erosivas.

Hargerty (1991a), em revisão minuciosa dos fenômenos de erosão interna, atribui o uso do termo *piping* a Mears (1968), que o definiu como sendo um fenômeno de erosão

subterrânea no qual a percolação de água causa a remoção de partículas do interior do solo formando cavidades de forma tubular que avançam para o interior do solo. Também neste trabalho de revisão é colocado o termo *sapping* atribuído a Sterret (1980) e Higgins (1984) para casos onde o fenômeno ocorre disseminado numa área mais extensa.

2.2 O PROCESSO EROSIVO

O entendimento do processo erosivo se faz de maneira mais eficiente quando se analisam separadamente cada um dos diversos fatores envolvidos. Destacando as particularidades relativas as diferentes formas de ocorrência do escoamento superficial, Vilar & Prandi (1993) citam os termos "erosão em sulcos" e "erosão intersulcos" para as regiões onde predominam o fluxo concentrado e o fluxo laminar, respectivamente.

Mortari (1994) reconhece três fases, nem sempre muito distintas, no processo erosivo: desagregação, transporte e sedimentação. Na fase de desagregação ocorre o desprendimento de partículas do solo, seja pelo impacto das gotas de chuva, seja pelo escoamento superficial. O transporte vai depender essencialmente do tamanho das partículas, da energia do agente transportador, da topografia e da presença ou não de obstáculos como vegetação e rochas. A última fase do processo é a deposição e ocorre quando o agente transportador perde a sua força.

Os primeiros estudos relativos a quantificação dos processo erosivos possuíam base extremamente empíricas. Consistiam de ensaios de campo e laboratório nos quais os dados produzidos eram usados a partir de uma análise estatística para a formulação de modelos de estimativa de perdas de solos. Dentre estes, o mais conhecido é a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) definida por Wischmeier & Smith, 1978) como:

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (2.1)$$

onde:

- A = perda de solo (ton/ha.ano)
- R = fator de erosividade da chuva
- K = fator de erodibilidade do solo
- L = fator de comprimento da encosta
- S = fator de inclinação da encosta
- C = fator de práticas de cultura
- P = fator de práticas de controle de erosão

Apesar de bastante difundida, a Equação Universal de Perdas de Solo apresenta uma série de limitações devido ao seu caráter empírico e a não consideração das leis físicas envolvidas no processo erosivo (Vilar & Prandi, 1993). Diversos autores ressaltam também a sua inadequabilidade na previsão de perdas de solo em voçorocas ou durante eventos de chuva intensa. Dentro desta linha de pesquisa, destaca-se para a região Centro-Oeste o trabalho executado por Baptista (1997) no qual é realizado um diagnóstico da perda laminar de solos no Distrito Federal, através do uso de geoprocessamento. Este trabalho mostra que, apesar de limitações no aspecto quantitativo, a aplicação da USLE permite identificar as perdas de solo oriundas da atual ocupação, assim como pode simular o comportamento do solo frente a interferências futuras.

A crescente disponibilidade de recursos computacionais aliada ao melhor entendimento dos processos físicos envolvidos possibilitou o aparecimento de modelos que melhor descrevem o processo erosivo. Destaca-se dentro desta proposta o modelo desenvolvido por alguns órgãos do Ministério da Agricultura dos Estados Unidos denominado WEPP (*Water Erosion Prediction Project*).

O modelo WEPP baseia-se fundamentalmente na infiltração, escoamento superficial, cobertura vegetal, resíduos decompostos, práticas de cultura e manejo, consolidação do solo e mecanismos de erosão (Nearing *et al.*, 1989). Segundo estes autores, a principal vantagem do modelo está na capacidade de previsão espacial e temporal de perda de solo. Desta maneira pode-se simular em separado a erosão em sulcos ou erosão intersulcos. Pode-se também realizar extrapolações para condições anti-econômicas ou pouco práticas de serem reproduzidas em laboratório. Os processos físicos descritos matematicamente no modelo WEPP são o destacamento e o transporte produzidos pela gota de chuva e pelo escoamento superficial. A deposição do sedimento é calculada quando a carga de sedimento excede a capacidade de transporte destes.

Com relação a aplicação do modelo WEPP na previsão da erosão em sulcos e em voçorocas, Chaves (1994) revela sua inadequabilidade, assim como de outros modelos, em distinguir os processos de erosão de fundo de canal e os movimentos de massa ocorrentes nos taludes, o que gera uma redução da capacidade previsiva destes modelos. Como forma de aperfeiçoamento destes modelos, o autor propõe a utilização de um método estocástico onde, além dos processos hidráulicos de degradação do canal, são considerados os fatores que levam à instabilização dos taludes, utilizando-se para isto um modelo probabilístico para a ocorrência deste fenômeno.

Num trabalho amplo de revisão dos processos físicos que regem a erosão dos solos, Owoputi & Stolte (1995) citam o mecanismo de destacamento (*detachment*) como um dos mais importantes componentes do processo de erosão dos solos, sendo necessária então uma previsão acurada de seu comportamento para uma modelagem satisfatória do processo erosivo.

Segundo estes autores, o destacamento é definido como a remoção da partícula de solo de um local em particular na superfície do terreno, causada pela força aplicada pelos agentes erosivos (gotas de chuva ou fluxo superficial). O processo termina quando as partículas destacadas são incorporadas ao fluxo.

Conforme citado anteriormente por Vilar & Prandi (1993), na região dos sulcos, o fluxo superficial é o principal agente erosivo responsável pelo destacamento e transporte das partículas. Já na região intersulcos, Owoputi & Stolte (1995), ao procederem uma investigação mais detalhada, colocam as gotas de chuva como principais causadoras do destacamento ao passo que o transporte é executado pelo fluxo superficial. Referenciando Gregory (1984), os autores acima relacionam a capacidade de destacamento pela gota de chuva ao inverso da espessura da lâmina d'água que constitui o fluxo superficial. Quanto menor a profundidade da lâmina d'água, maior o impacto da gota de chuva sobre a superfície. O poder erosivo da gota de chuva depende também da intensidade do evento, do diâmetro da gota e da velocidade do impacto.

Já o destacamento pelo fluxo superficial, que também ocorre na região intersulco, está limitado pela quantidade de sedimento carregado por ele. Um aumento na quantidade de sedimento transportada gera uma diminuição do destacamento causado pelo fluxo, sendo que o destacamento cessa quando o transporte de partículas atinge um valor máximo. Este valor limite é denominado capacidade de transporte de sedimentos.

Após estabelecerem uma análise conceitual do destacamento de partículas e de sua importância dentro do processo erosivo, Owoputi & Stolte (1995) realizaram uma análise crítica das formulações usadas para a sua representação.

Buscando eliminar o caráter empírico contido nas formulações analisadas é proposto um modelo matemático para representação das forças atuantes no destacamento do solo. O modelo proposto é baseado no equilíbrio de forças de um agregado de solo ou de partículas individuais, sendo a sua abordagem similar a aquela utilizada na análise de estabilidade de taludes. Imaginando-se então um elemento de partículas submersas, representando a massa de solo e a água intersticial, tem-se as seguintes interações e forças (Figura 2.1).

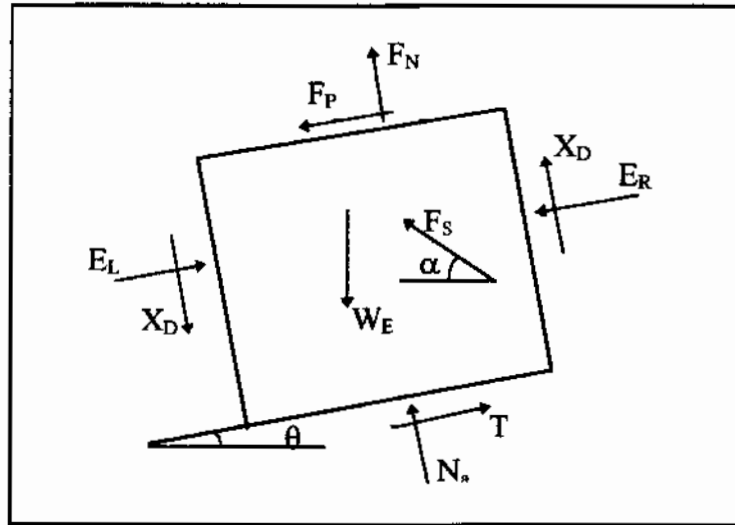


Figura 2.1 - Forças atuantes sobre um elemento de solo (Owopulti & Stolte, 1995)

onde:

- F_N e F_P são as componentes normal e paralela a superfície do terreno relativas às forças erosivas externas, que incluem o arrasto e soerguimento devido ao fluxo superficial e as forças laterais devidas ao impacto das gotas de chuva;
- X_D é a resultante da resistência desenvolvida ao longo das laterais do elemento
- E_L e E_R são as reações dos elementos adjacentes
- F_S é a força de percolação atuando numa direção α em relação a horizontal
- W_E é o peso efetivo do elemento de solo
- T é a força cisalhante
- θ é a inclinação na base da partícula
- N_a é a força efetiva normal atuante no solo.

A força efetiva normal é definida como $N = (P - u_w B)$, onde P é a força total normal; u_w é a poro-pressão da água e B é a área da seção do elemento.

Deste modo a força líquida que causa o destacamento é a resultante de todas as forças atuantes no elemento, incluindo-se aí o arrasto e o soerguimento devido ao fluxo e a gota, a percolação, o peso próprio, a coesão e a umidade. Quando a resultante de todas estas forças for positiva no sentido externo a superfície do solo o destacamento ocorrerá. A partir deste postulado é possível então derivar-se matematicamente uma equação fisicamente fundamentada para a previsão da erosão, seja ela no sulco ou intersulco.

A partir do modelo acima postulado pode-se deduzir então que o potencial erosivo dos solos não é uma propriedade constante. Ele vai depender de fatores como a variação temporal na resistência do solo, aprisionamento de ar e umidade.

2.3 A ERODIBILIDADE DOS SOLOS

Vilar & Prandi (1993) definem a erodibilidade de um solo como a sua aptidão para resistir aos esforços provenientes dos processos erosivos. Esta resistência à erosão depende não só de características intrínsecas do solo mas também de fatores subsidiários como ciclos de secagem e umedecimento e da composição química da água presente. Desta maneira a forma mais comum de se retratar a erodibilidade dos solos tem sido através de suas características físicas e químicas, além de alguns condicionantes externos.

A granulometria é a propriedade mais estudada sobre este ponto de vista. Citando diversos autores, Vilar & Prandi (1993) afirmam serem os solos mais erodíveis aqueles que apresentam um comportamento granular, com partículas da ordem de areia fina ou silte e pouca quantidade de argila.

Mortari (1994), baseando-se no trabalho de Vargas (1987), descreve as propriedades físicas de maior interesse para uma abordagem do ponto de vista geotécnico. Estas propriedades são: textura do solo, expressa pela sua distribuição granulométrica; plasticidade, expressa pelos Limites de Atterberg e estrutura, expressa pela porosidade, arranjo dos grãos e estrutura reliquiar.

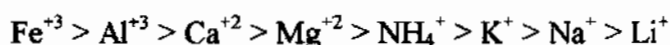
Apesar dos índices físicos serem em geral suficientes para a identificação dos solos, a caracterização de seu comportamento geomecânico só é possível quando se considera em conjunto o seu estado natural.

Visando a obtenção de uma correlação entre a erodibilidade e as características físico-químicas e mineralógicas dos solos do Distrito Federal, Fácio (1991) realizou uma análise dos seguintes parâmetros:

- Plasticidade - de um modo geral pode-se dizer que um aumento no índice de plasticidade é acompanhado de um aumento na resistência a erosão.
- Granulometria - além da maior tendência a erodibilidade apresentada pelos solos granulares, já citada anteriormente, é destacado por Fácio (1991) o trabalho de Hémensal (1987) que relaciona a erodibilidade com a curva de distribuição granulométrica, considerando o coeficiente de não uniformidade dos solos, definido como $c_u = D_{(60)}/D_{(10)}$. Os valores $D_{(60)}$ e $D_{(10)}$ referem-se aos diâmetros onde respectivamente 60% e 10%, em peso, das quantidades

de partículas são menores que estes diâmetros. Solos mal distribuídos ($c_u < 5$) são solos erodíveis ao passo que solos com $c_u > 15$ são solos pouco erodíveis.

- Relação sílica / sesquióxidos de ferro e alumínio - a relação entre os teores de sílica e os teores de sesquióxidos de ferro e alumínio expressa o grau de laterização a que o solo está submetido. Quanto menor o valor desta relação, maior o grau de laterização e consequentemente maior será a resistência à erosão.
- Teor de matéria orgânica - o trabalho de Fácio não mostra resultados conclusivos com relação a este item. Porém Vilar & Prandi (1993) defendem que a presença de matéria orgânica, assim como a presença de argila, contribuem para a formação de grumos mais estáveis aumentando então a resistência à erosão.
- Presença de cátions trocáveis - os cátions existentes no solo influenciam na floculação e na plasticidade. Segundo Arulanandan *et al.* (1975), citado por Fácio (1991), o poder de floculação dos cátions decresce da seguinte maneira:



Sherard *et al.* (1976a) descrevem que as argilas dispersivas, ricas em sódio, são erodidas quando as partículas entram em suspensão ao contato com a água. O tipo de cátion presente atua de forma diferenciada na plasticidade do minerais. Grim (1962) mostra que a presença dos cátions Na^+ e Li^+ em montmorillonitas aumenta consideravelmente os valores de plasticidade. Já as illitas mostram uma diminuição da plasticidade quando enriquecidas nos cátions Na^+ e Li^+ ou amônia (NH_4^+). Esta diminuição também é observada para caulinitas ricas em sódio.

- Mineralogia - Citando Arumugan (1974), Fácio (1991) descreve a influência dos argilo-minerais na susceptibilidade à erosão. Solos com argilas do tipo montmorillonita possuem resistência a erosão maior que a illita, que por sua vez, possui uma resistência maior do que a caulinita.

A conclusão obtida por Fácio é de que o uso de correlações entre a erodibilidade dos solos e as características físico-químicas e geotécnicas de um solo é comprometido pelo elevado número de parâmetros que interferem neste processo sendo então necessária uma análise sob condições específicas de cada parâmetro para a formulação de um modelo global.

2.4 VOÇOROCAS E PIPING

Conforme já definido anteriormente, a voçoroca é palco de diversos processos (escoamento superficial, *piping*, solapamentos, escorregamentos e desabamentos) cuja ação conjugada aumenta bastante a intensidade do processo erosivo.

A atuação da água subterrânea constitui um dos elementos de distinção entre as voçorocas e os outros tipos de processos erosivos (sulcos e ravinas). A proximidade do lençol freático gera a intensificação do processo erosivo por favorecer a atuação de mecanismos como a erosão interna e os movimentos de massa. Porém podem ocorrer voçorocas onde não sejam detectadas surgências d'água. A surgência ou não de água pode estar ligada ao fator sazonalidade envolvido no processo, ou à própria profundidade do lençol freático.

Com relação a origem do processo de voçorocamento, o trabalho do DAEE/IPT (1990) estabelece dois grandes grupos principais de acordo com a forma de deflagração do fenômeno:

- Voçorocas originadas por concentração de águas superficiais - Incluem-se nesta categoria as voçorocas urbanas originadas pelo lançamento concentrado de águas servidas e águas pluviais e as voçorocas rurais induzidas pelas drenagens de rodovias e ferrovias e pelo manejo agrícola inadequado.
- Voçorocas causadas por alterações hidrológicas na bacia de drenagem - Neste grupo a principal causa de erosão é o desequilíbrio hidrológico gerado pelo desmatamento que, aliado à condições favoráveis ao ravinamento, provoca alterações nas taxas de infiltração e no regime de vazões. A consequência é o aparecimento do fenômeno de *piping* e erosão remontante como forma de rejuvenescimento do sistema de drenagem.

Com relação ao desenvolvimento do processo de voçorocamento, Carvalho (1992), num estudo das voçorocas dos terrenos cristalinos de Minas Gerais propõe o seguinte processo de evolução:

- sulcagem do terreno promovida pelo fluxo superficial concentrado;
- aprofundamento do sulco até atingir o lençol freático, com conseqüente elevação do gradiente hidráulico de saída e promoção de erosão interna;
- remoção eficaz dos escombros e do produto da erosão interna pelo escoamento torrencial;
- manutenção temporária de paredes subverticais, com fissuração das paredes durante o período seco;

- formação de cavidades abobadadas ao pé das cabeceiras pela ação combinada dos seguintes fenômenos: jateamento pela enxurrada, erosão interna e desarticulação estrutural do solo;
- colapso das porções destacadas pela fissuração das paredes;
- aquietação gradual do fenômeno pela diminuição progressiva do gradiente hidráulico de saída e pela redução da contribuição externa.

Na fase madura a voçoroca atinge um perfil em "U", apresentando quase sempre grandes dimensões. O desenvolvimento de diversos braços gera um aspecto arborescente, quando observadas em planta. Este modelo é bem representativo para voçorocas desenvolvidas sobre solos espessos e em regiões onde o clima registra duas estações distintas.

Mortari (1994) propõe o Modelo Encaixado para descrever o processo de evolução das erosões do Distrito Federal como sendo fruto dos condicionantes geológicos e estruturais presentes. O início do processo erosivo pelo Modelo Encaixado é semelhante ao mostrado em outras regiões com o aprofundamento de sulcos com perfil em "V" sobre o solo pouco coerente. O processo evolui até atingir o substrato rochoso, que na região do Distrito Federal é constituído em grande parte de ardósias e metarritmitos, onde os processos tectônicos impuseram aos estratos mergulhos bastante inclinados (da ordem de 40-60°, geralmente). Ao atingir estes estratos o fluxo se "encaixa" segundo a direção das camadas passando a fluir segundo sua orientação. A medida que se aprofunda este encaixe, o material rochoso se torna mais resistente levando a quantidade de material erodido a valores mínimos.

Atingida a estabilização do fundo da voçoroca, as paredes laterais evoluem até um perfil de equilíbrio com posterior desenvolvimento de vegetação.

Obtém-se no final um perfil de equilíbrio em forma de "V" cuja profundidade é limitada pela ocorrência do substrato rochoso e onde a largura é pequena quando comparada com aquelas apresentadas pelas voçorocas da região sul e sudeste do Brasil.

O processo de erosão interna (*piping*) ocorre na maioria das voçorocas. O seu mecanismo de atuação é muitas vezes complexo e o seu reconhecimento no campo nem sempre é fácil. Os fenômenos de desabamentos, descalçamentos e solapamentos que ocorrem nas voçorocas estão intimamente ligados ao processo de *piping* (DAEE/IPT, 1990).

A presença de terrenos estratificados é um condicionante geológico favorável a ocorrência de *piping* pois concentra o fluxo em um nível determinado. Condições semelhantes são criadas em solos onde os processos de iluviação levam a criação de horizontes pedológicos com permeabilidades distintas (Hargerty, 1991a). A diferenciação textural, aliada ao relevo

ondulado é atribuída por Conciani *et al.* (1995) como fator determinante do caráter erodível de alguns solos podzólicos.

Hargerty (1991a) descreve fisicamente o início do processo de *piping* como sendo o momento em que as forças geradas pelo gradiente hidráulico superam as forças resistivas tais como: imbricamento e atrito entre as partículas, que interferem no movimento; coesão entre os grãos, provenientes de atrações físico-químicas; cimentação e aglutinação por raízes.

A remoção do material, necessária para a progressão do fenômeno, ocorre de forma mais intensa quando o fluxo é turbulento. Este fluxo pode ser temporariamente bloqueado devido a queda de blocos, situação na qual pode ocorrer a transferência do fenômeno para uma região adjacente. Porém para que haja continuidade do processo é necessária a remoção do material por outros mecanismos. Ressalta-se ainda que a remoção de partículas gera um aumento no gradiente hidráulico de saída o que revela uma tendência natural de aumento da intensidade do processo.

Devido ao seu caráter intermitente, o processo de *piping/sapping* é de difícil observação no campo. Além disso, muitas vezes encontra-se mascarado por feições de processos superficiais.

Hargerty (1991b), num trabalho de avaliação do fenômeno de *piping/sapping*, classifica as formas de identificação do fenômeno da seguinte maneira:

- **evidências diretas.** A mais forte evidência é a surgência de águas turvas indicando a remoção do material. Porém a sua ocorrência, e conseqüentemente sua visualização, não é muito comum.
- **evidências indiretas.** São reconhecidos três subtipos:
 - evidências indiretas primárias. São causadas unicamente ou predominantemente pelo mecanismo de *piping*. Neste grupo estão as cavidades formadas nas zonas de surgência d'água e os depósitos de sedimentos localizados logo abaixo destas. Incluem-se nesta categoria as "ravinas cegas", que são aquelas onde se observa o fluxo subterrâneo como causador do processo.
 - evidências indiretas secundárias. São feições associadas ao fenômeno que podem ou não indicar a sua ocorrência. Descolorações ou manchas, formadas na presença de água, observadas na face do talude incluem-se nesta categoria. Porém estas feições não são indicativas de um gradiente hidráulico suficiente para gerar o fenômeno de *piping*. Além disso, estas feições podem estar associadas a um regime de fluxo não mais atuante no momento.

- evidências indiretas terciárias. São feições associadas a processos subordinados ao *piping*. Estas feições podem ser causadas por vários mecanismos, um dos quais pode ser o *piping*. Exemplos deste grupo são os blocos abatidos ou escarpas irregulares.

3. ASPECTOS FÍSICOS DO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA

3.1 INTRODUÇÃO

Apesar de situarem-se sobre uma área urbana, onde a intervenção antrópica propicia o surgimento de processos erosivos indistintamente sobre os vários domínios morfo-litológicos presentes na região, o conhecimento dos aspectos físicos envolvidos nestes processos é de suma importância para o entendimento de sua evolução. Uma vez iniciados os processos erosivos, os fatores relativos à geologia, geomorfologia e solos, além dos fatores climáticos, irão condicionar o desenvolvimento destes processos. Justifica-se desta forma a necessidade de um conhecimento detalhado com relação a estes fatores.

Durante a escolha das erosões a serem estudadas, procurou-se amostrar a maior diversidade possível dos domínios morfo-litológicos presentes no Município. Desta forma, foram estudadas voçorocas presentes nos três grupos litológicos de ocorrência mais frequente no Município, a saber: micaxistos do Grupo Araxá, rochas ácidas e rochas básicas do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu. Foi escolhida também uma erosão sobre o domínio dos aluviões quaternários. Buscou-se com isto verificar a influência de cada substrato rochoso na evolução dos processos erosivos.

Com relação aos domínios geomorfológicos, procurou-se amostrar erosões desenvolvidas em regiões de meia vertente, assim como em locais de quebra de declividade do terreno. Desta forma, foram amostrados locais onde os agentes erosivos, tanto a água superficial quanto a água subterrânea, atuam de forma diferenciada.

Procurou-se também escolher erosões em estágios mais avançados de desenvolvimento visando melhor observar o perfil de intemperismo apresentado. Deu-se preferência também a erosões que não tivessem sofrido obras significativas de reabilitação.

O trabalho de cadastramento realizado por Nascimento (1993) foi de fundamental importância na seleção das voçorocas estudadas pois otimizou o processo de escolha destas. De posse deste trabalho, foi feita uma seleção preliminar das voçorocas a serem estudadas usando-se para isto os critérios citados acima.

Os trabalhos preliminares de reconhecimento no campo foram realizados com auxílio da própria autora do cadastramento e de técnicos do Departamento de Estradas de Rodagem Municipal (DERMU). A partir deste trabalho foram definidas quatro erosões representativas para os objetivos do trabalho.

3.2 GEOLOGIA

3.2.1 Estratigrafia

A região de Goiânia enquadra-se no domínio de terrenos metamórficos com evolução policíclica, situada entre os crátons *Amazônico* e *São Francisco*, denominada por Almeida (1976) de *Maciço Mediano de Goiás*.

Constituem-se de terrenos onde os elementos estratigráficos, texturais, estruturais e mineralógicos foram bastante transformados pelos diversos eventos tectono-metamórficos ocorrentes na área, incluindo-se aí evolução progressiva dos dobramentos associados com cisalhamento tangencial de alto e baixo ângulo, além de metamorfismo, diaforese e eventos intrusivos.

Uma síntese estratigráfica, obtida através de dados de campo e informações contidas em trabalhos anteriores, é apresentada na Tabela 3.1. Destaca-se para o Município de Goiânia a ocorrência das unidades do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu na porção norte e Grupo Araxá na sua unidade C, mais pelítica, na porção centro-sul do Município, além de depósitos aluvionares ao longo dos rios Meia Ponte e João Leite.

A sequência metavulcano-sedimentar de *Silvânia*, do proterozóico, e os corpos intrusivos do Jurássico, não foram descritos na região do Município de Goiânia.

Com relação aos principais trabalhos já publicados, Moreton (1994), num minucioso trabalho de revisão, destaca os seguintes:

- Leonardos (1938) conduziu os primeiros estudos sobre os terrenos granulíticos de Goiás. Barbosa (1966) atribuiu a estas rochas o termo *Complexo Basal*.
- Marini *et al.* (1984) definem o termo *Complexo granulítico Anápolis-Itauçu* para as rochas granulíticas da região central de Goiás pertencentes ao *Maciço Mediano de Goiás*.

Num trabalho de detalhamento na região de Goiânia, Moreton (1994) propõe a divisão do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu em duas unidades distintas, denominadas de acordo com sua origem e litoambiência em *unidade ortoderivada* e *unidade paraderivada*.

Com relação ao Grupo Araxá, existem vários trabalhos que o descrevem ao longo de toda a sua extensão aflorante, que abrange os Estados de Minas Gerais e Goiás, onde são propostas diferentes nomenclaturas cartográficas para cada uma de suas subunidades. Visando uma simplificação e homogeneização dos dados obtidos Moreton (1994) propõe então o título

provisório de Grupo Araxá - Sul de Goiás para designar o conjunto de rochas metassedimentares do Proterozóico Médio que ocorrem nesta região.

Tabela 3.1 - Coluna estratigráfica da região de Goiânia (modificado - Moreton, 1994)

GEOCRONOLOGIA		CICLO TECTÔNICO m.a.	UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	ROCHAS	METAMORFISMO	
ERA	PERÍODO m.a.					
CENozóica	QUATERNÁRIO	—	Depósitos Aluvionares	Sedimentos recentes, arenosos e areno-argilosos, areias com níveis de cascalho	—	
MESozóica	JURÁSSICO	—	Intrusões Básicas	Diques de diabásio de cor cinza escura e granulação fina	—	
PROTEROZóica	SUPERIOR	570 BRASILIANO	Granitóide	Muscovita-biotita-metagrânito, homblenda-biotita-metatonalito e pegmatito	Fácies xisto-verde	
		700 900				
	MÉDIO	URUQUANO	GR. ARAXÁ SUL DE GOIÁS	Unidade D	Quartzitos micáceos com intercalações subordinadas de quartzo-muscovita-xistos, sericita-xistos, grafita-xistos, filitos e quartzitos ferruginosos	Fácies xisto-verde alto
				Unidade C	Granada-clorita-muscovita-biotita-quartzo-xisto feldspáticos e calcíferos com intercalações subordinadas de gnaisses paraderivados e muscovita-quartzitos.	Fácies xisto-verde alto (zona da granada)
	INFERIOR	TRANSA-MAZÔNICO	SEQUÊNCIA METAALCANO-SEDIMENTAR DE SILVÂNIA	1.300	Metatufos básicos (epidoto-albita anfibolito, granulitos básicos), metatrabásicas (talco-xistos, clorita-xistos), metatufos ácidos (granada-muscovita-biotita-gnaisses, igníbritos), associação vulcano-química (rochas calcissilicáticas, quartzitos ferruginosos e metacherts), rochas metassedimentares (muscovita-biotita-quartzo-xistos granadíferos e sericita-xistos).	Fácies anfibolito granulito baixo
				1.900		
				2.000		
INFERIOR	JEQUIÉ	COMP. GRANULÍTICO ANÁPOLIS-ITAIUÇU	Granitóide	Sillimanita-granada-biotita metagrânito e granada-biotita metagrânito com estrutura gnáissica e enclaves de rochas máfico-ultramáficas do Complexo Granulítico.	Fácies anfibolito/granulito baixo	
			GRANULITOS PARADERIVADOS	Gnaisses aluminosos a hiperaluminosos, granulitos bandados com intercalações de quartzitos aluminosos, quartzitos ferruginosos, gonditos, rochas calcissilicáticas e subordinadamente granulitos ortoderivados associados.	Fácies anfibolito alto a granulito	
ARQUEANA	SUPERIOR	2.500	GRANULITOS ORTODERIVADOS	Chamockitos e/ou enderbitos, metagabros e metanortositos, metapiroxenitos, estes últimos com derivados transformados. Talco-xisto e/ou serpentinito. Subordinadamente granulitos paraderivados associados.		

3.2.2 Geologia Estrutural

Os registros existentes indicam que a região de Goiânia foi afetada principalmente por movimentos de cisalhamento dúctil tangencial, os quais atuaram de maneira progressiva ao longo do tempo geológico. Moreton (1994) interpreta as seguintes fases de deformação descritas a seguir em ordem cronológica de acontecimento:

- Fase F_{1-1} : Está melhor representada no conjunto de rochas granulíticas sendo caracterizada por um bandamento metamórfico regular de expressão regional. Este bandamento encontra-se transposto por uma foliação desenvolvida na fase seguinte, conforme descrito a seguir.
- Fase F_1 : Constitui uma fase de caráter regional estando registrada tanto no Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu como nas rochas do Grupo Araxá-Sul de Goiás. Está representada por uma foliação de transposição plano-axial, definida como F_1 , de direção preferencial NW. Esta foliação é associada ao cisalhamento dúctil de baixo ângulo e encontra-se seccionada por transcorrências de alto ângulo e escala regional. Segundo Moreton (1994), estas transcorrências representam junto com a foliação um padrão conjugado de deformação e são as responsáveis pelo arranjo espacial dos diversos conjuntos litológicos mapeados na região. Deste modo explica-se a relação de contato entre as litologias da cobertura metassedimentar (Grupo Araxá) e as rochas do conjunto granulítico ao longo de um contato tectônico de direções preferenciais EEN-WWN que passa ao longo da cidade de Goiânia.
- Fases F_{1+1} e F_{1+2} : São melhor evidenciadas nas unidades psamo-pelíticas da cobertura metassedimentar e estão representadas por dobras apertadas de escala métrica a decimétrica, não possuindo correspondentes na megaestrutura da área. Dentro da sequência de eventos progressivos ocorre ainda uma fase denominada F_{1+3} que produziu dobramentos suaves, de eixos subhorizontalizados com caimento para NE, de escala regional, evidenciados principalmente nos domínios psamíticos da unidade metassedimentar.

Por fim existem ainda as estruturas atribuídas ao regime de deformação rúptil caracterizadas por falhas e fraturas de direção NE-SW, NW-SE e N-S que estão distribuídas ao longo de toda a região. Estas feições são bem evidenciadas em imagens de satélite e de radar e em fotografias aéreas pelo alinhamento de drenagens. Fraturas de alívio, de atitudes horizontalizadas, são também observadas na região, seja no domínio das rochas granulíticas seja na cobertura metassedimentar. O mapa geológico simplificado da região com a indicação das erosões estudadas é mostrado na Figura 3.1.

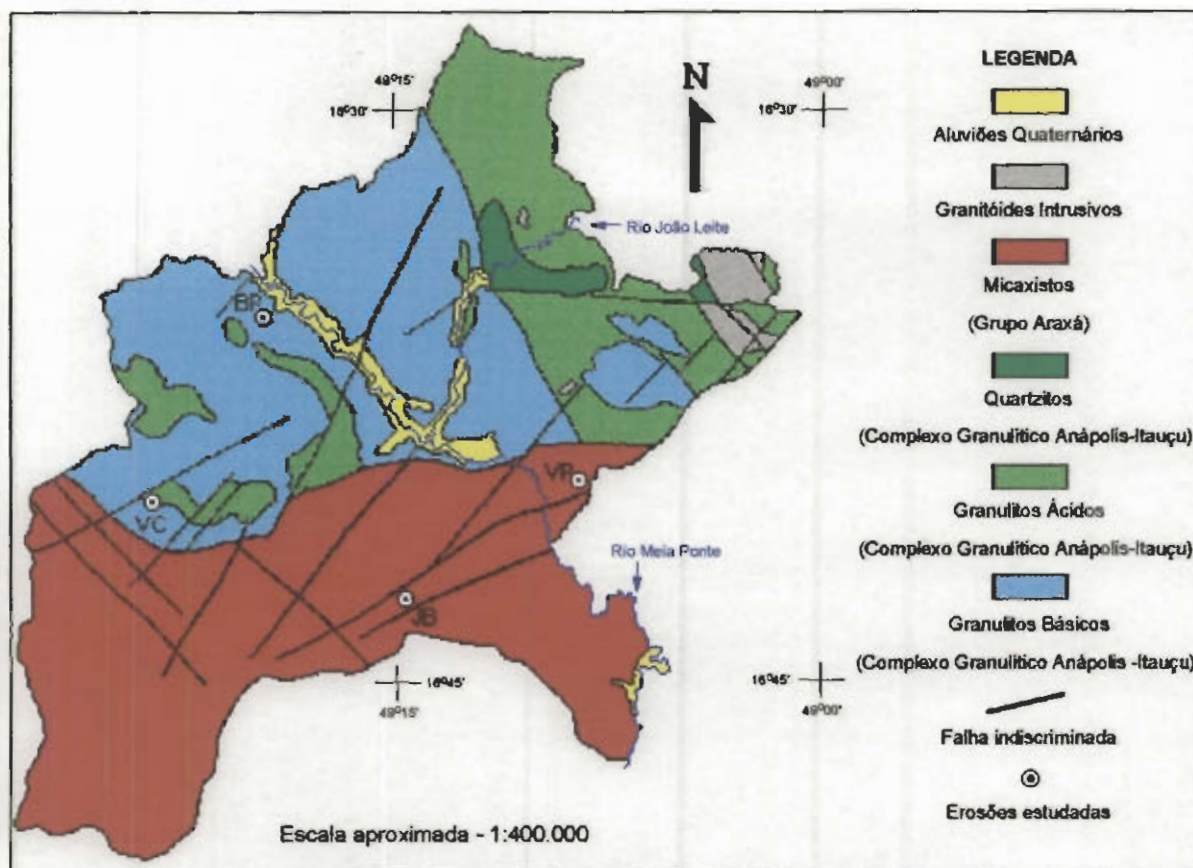


Figura 3.1- Mapa geológico do Município de Goiânia (modificado - Moreton, 1994)

3.2.3 Geologia Econômica

Até o presente momento não se registra a ocorrência de jazidas minerais de natureza metalogênica no Município de Goiânia. As atividades mineradoras ocorrem apenas em alguns locais restritos mas são importantes de serem citadas pelo fato de conduzirem a processos característicos de intervenção antrópica. Destacam-se então as ocorrências de turfa, brita e areia, além de cascalheiras aluvionares.

Segundo Moreton (1994), as ocorrências de turfa distribuem-se ao longo de quase todas as drenagens da região sob a forma de pequenos depósitos de forma irregular e de espessura decimétrica a métrica. Destacam-se as ocorrências ao longo dos vales dos Córregos Fundo, Palmito, Cascavel, Granada e Veredão. Estes depósitos não são explorados em escala industrial, sendo utilizados localmente como adubo para hortas e jardins.

As ocorrências de pedreiras para exploração de brita são bastante numerosas no Município. Destacam-se aquelas na parte sul do Município, onde a exploração de rochas xistosas é mais rentável do que a exploração dos granulitos existentes na parte norte, cujo

material é mais duro e apresenta maiores custos de produção. Estas pedreiras são responsáveis pelo abastecimento do mercado consumidor de Goiânia e arredores.

A extração de areia dentro do Município de Goiânia ocorre de forma clandestina em pequenas explorações nos córregos da região. Porém grande parte do material que abastece a região é proveniente de regiões vizinhas destacando-se a jazida de Serra da Areia, no Município de Aparecida de Goiânia, como grande fornecedora de material.

3.3 GEOMORFOLOGIA

3.3.1 Unidades Geomorfológicas

Casseti (1992), dentro de uma perspectiva geomórfico-ambiental, propõe uma divisão geomorfológica do Município de Goiânia baseada fundamentalmente no grau de dissecação do relevo, onde são reconhecidas as seguintes unidades, mostrada junto com as erosões estudadas na Figura 3.2:

- Planalto Dissecado de Goiânia
- Chapadões de Goiânia
- Planalto Embutido de Goiânia
- Terraços e Planícies da Bacia do Rio Meia Ponte
- Fundos de Vales.

1 - Planalto Dissecado de Goiânia (altitude média: 920-950 metros): Corresponde à seção norte e nordeste do Município e está vinculado ao domínio das rochas granulíticas sustentado por intercalações quartzíticas. O condicionante tectônico se reflete no aspecto angular do sistema hidrográfico e na forte incisão dos talwegues. Dentro deste domínio são reconhecidas duas subunidades:

- a) Superfícies de Formas Aguçadas, com declives superiores a 30 %, representadas por cristas monoclinais quartzíticas com elevado grau de dissecação (vales encaixados). Predominam os solos litólicos e latossolos vermelho-escuro e o escoamento concentrado se faz presente.
- b) Superfícies de Formas Convexas, com declives inferiores a 20 %. Predominam os latossolos vermelho-escuros que, quando desprovidos de vegetação, respondem pelo domínio de fluxo laminar.

2 - Chapadões de Goiânia (860-900 metros): Correspondem à porção sudoeste do Município, sendo também reconhecidas duas subunidades:

a) Superfícies Aplainadas, correspondentes a restos de pediplanos plioleustocênicos, sustentados por quartzitos e xistos, apresentando níveis de concrecionamento. Predominam os latossolos e os fluxos difuso e laminar se fazem presentes. Observa-se ainda a existência de *dales* e vales relativamente abertos. *Dales* são depressões circulares produzidas por dissolução ou pelo efeito de erosão interna (*piping*) e caracterizam cabeceiras de cursos d'água em áreas aplainadas, popularmente conhecidas como Veredas. O condicionante tectônico pode ser bem sentido através das confluências ortogonais e dos vales dissimétricos.

b) Superfícies Rampeadas, que ocorrem perifericamente às superfícies aplainadas. caracterizam-se por vertentes retilíneas ou pouco côncavas, vinculadas aos efeitos denudacionais subsequentes, onde observam-se níveis de pedimentação coluvionados. Neste domínio o fluxo dominante é do tipo laminar. Quando ocorre o fluxo concentrado costumam-se observar fenômenos de voçorocamento, muitas vezes associados ao fenômeno de erosão interna (*piping*).

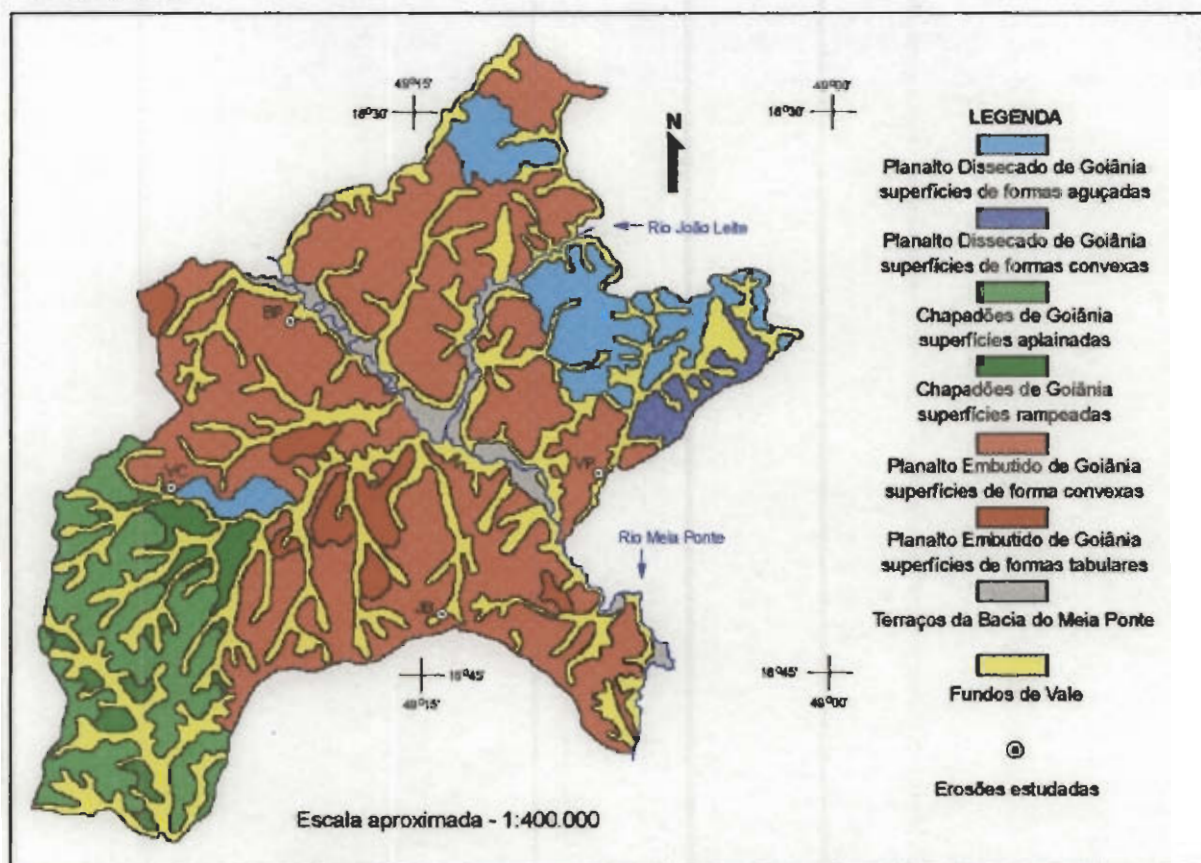


Figura 3.2 - Mapa geomorfológico do Município de Goiânia (modificado - Casseti, 1992)

3 - Planalto Embutido de Goiânia (750-800 metros): Localiza-se entre o Planalto Dissecado e os Chapadões de Goiânia, sendo também dividido em duas subunidades:

a) Superfície de Formas Convexas, onde o gradiente das vertentes é função do grau de dissecação (suavemente convexizadas, com declive de até 10 % ou moderadamente convexizadas, com declives de até 20 %). Corresponde a área de maior ocupação urbana do Município, na qual o processo de impermeabilização altera as características dos processos morfogenéticos. Pode-se dizer porém que o fluxo laminar se faz presente. O condicionante tectônico também se faz sentir neste domínio através da orientação dos rios e da dissimetria dos vales. Os latossolos são predominantes neste domínio.

b) Superfície de Formas Tabulares, correspondentes a remanescentes de pediplano embutido. Observa-se a presença de *dales* (caso do Hipódromo da Lagoinha) e a ocorrência de lateritas como níveis de base.

4 - Terraços e Planícies da Bacia do Rio Meia Ponte (700-720 metros): Distribuem-se ao longo das principais drenagens da região sendo assim divididos:

a) Terraços Fluviais Suspensos, vinculados às oscilações climáticas pleistocênicas, estando algumas vezes sustentados por resistência litológica. Observa-se a existência de cascalheiras sotopostas por seqüências alúvio-coluvionares, onde o fluxo laminar se faz presente.

b) Planícies Fluviais de Inundação, observadas principalmente ao longo do Rio Meia Ponte e João Leite. Constituem-se de sedimentos arenosos de idade holocênica, intercalados com seqüências silto-argilosas. Os solos hidromórficos são freqüentes.

5 - Fundos de Vales: Casseti (1992), dentro da visão ambiental de seu trabalho, também os considera como uma unidade morfológica distinta. Caracterizam-se por ser uma faixa de transição entre os processos lineares e areolares, ou seja, representam uma região intermediária entre o flúvio e o interflúvio, na qual os declives chegam a ultrapassar os 40 %. Predominam os solos podzólicos ou câmbicos e os processos de erosão acelerada são bastante intensos.

3.3.2 Evolução Geomorfológica

Baseando-se num estudo da estrutura superficial e de seus depósitos correlativos evidenciados, Casseti (1992) propõe um modelo de evolução geomorfológica para o Município de Goiânia.

Inicialmente uma fase climática úmida, pós-oligocênica, determinou o entalhamento dos talvegues. Geraram-se aí as diferenças altimétricas existentes entre os testemunhos dos níveis

elevados do Planalto Dissecado de Goiânia (920-950 metros) a nordeste e o pediplano intermontano a sudoeste (860-900 metros), correspondentes aos Chapadões de Goiânia. Estes níveis encontram-se preservados pela resistência litológica subjacente ou por concreções ferruginosas.

Seguiu-se então uma fase climática seca, no plio-pleistoceno, responsável pelo recuo paralelo das vertentes a partir dos níveis de base deixados pelas condições úmidas anteriores. O prolongado período sob clima seco permitiu o seccionamento e desintegração mecânica de materiais de diferentes resistências. A decapitação dos horizontes eluviais possibilitou a exposição dos horizontes lateríticos, gerados na fase climática úmida antecedente, os quais foram então desagregados mecanicamente pela amplitude térmica. Segue-se então uma fase de pedimentação (800-860 metros) caracterizada por detritos angulosos e restos de concreções ferruginosas. A diferença altimétrica entre os níveis anteriormente descritos e esta fase de pedimentação deve-se provavelmente a ocorrência de um fenômeno epirogenético positivo. Uma fase climática úmida posterior responde por um processo de coluvionamento que cobriu este pedimento.

Uma nova fase de pedimentação (750-800 metros) retrabalhou os níveis anteriormente descritos. Esta fase caracteriza-se principalmente pela presença de detritos subangulosos de quartzo leitoso (proveniente de veios) resultantes do retrabalhamento da rocha alterada *in situ*. Estes pedimentos também se encontram recobertos por colúvios.

A evolução geomorfológica da região prossegue até o Holoceno através de novas alternâncias entre climas secos e úmidos (fases glaciais e interglaciais, respectivamente). Neste período prosseguem os processos de incisão do sistema de drenagem e desagregação mecânica. As fases de clima úmido são também responsáveis pela formação dos terraços aluviais observados na área, ao passo que as cascalheiras existentes são atribuídas a fases climáticas secas.

Em síntese, as evidências morfo-estratigráficas observadas mostram que a compartimentação do relevo na região de Goiânia está vinculada principalmente às alternâncias climáticas ocorridas após o oligoceno e que o condicionante estrutural também se faz presente de forma marcante.

Já os processos morfodinâmicos atuais são comandados principalmente pelas atividades pluviais que, na região de Goiânia, assumem um caráter sazonal. Desta forma, os principais problemas de ordem natural verificados na região (erosões e inundações) se manifestam de forma mais acentuada durante as chuvas intensas que ocorrem no verão.

3.4 SOLOS

As principais classes de solos reconhecidas no Município de Goiânia, de acordo com a classificação pedológica (Figura 3.3), são os latossolos vermelho-escuros, os latossolos roxos e os latossolos vermelho-amarelos (IPLAN, 1990). Subordinadamente ocorrem solos podzólicos, cambissolos, gleissolos, litossolos e solos aluviais.

Os latossolos da região ocupam áreas de topografia plana a suavemente ondulada. Possuem horizonte A pouco espesso e com teores médios em matéria orgânica (horizonte A moderado). Possuem horizonte B distrófico, ou seja, tanto a saturação por bases (Ca, Mg, K e Na) como a saturação por alumínio é menor que 50 %. A capacidade de troca de cátions na fração argila é baixa (Tb). A textura é argilosa (quantidade relativa de argilas entre 35 e 60 %), ocorrendo localmente a textura muito argilosa (quantidade de argila maior que 60 %).

Destaca-se também a presença de petroplintita, mais conhecida no meio geotécnico como laterita, caracterizada por concreções ferruginosas originárias de ciclos repetitivos de umedecimento e secagem.

Os latossolos são por definição solos bem intemperizados, bastante porosos e com perfis profundos (Conciani *et al.* 1995). Neles predominam as argilas do tipo 1:1 (caulinita) em mistura com óxidos de ferro e alumínio. A transição entre os horizontes é gradual.

Os latossolos são também divididos em função dos teores de ferro que apresentam, os quais possuem certa correlação com a cor do solo. No Município de Goiânia são reconhecidas as seguintes subunidades: latossolo roxo, cujos teores de óxidos de ferro variam entre 18 e 36 % (Lepsch & Oliveira, 1987), latossolo vermelho-escuro, com teores de Fe_2O_3 entre 8 e 18 %, e latossolo vermelho-amarelo onde os teores de óxido de ferro são menores que 8%.

Os solos podzólicos ocorrem nas áreas de relevo ondulado ou fortemente ondulado. Possuem diferenciação marcante entre os horizontes A e B, sendo o horizonte B enriquecido em argila iluviada do horizonte A. São menos intemperizados que os latossolos e apresentam estrutura prismática ou em blocos.

No Município de Goiânia os solos podzólicos são do tipo vermelho-escuro distróficos Tb, ou seja, possuem teores médios (entre 8 e 18%) de óxidos de ferro, baixa saturação por bases e por alumínio e baixa capacidade de troca de cátions na fração argila. Possuem horizonte A moderado (espessura e teores de matéria orgânica médios) e textura argilosa ou média/argilosa. Encontram-se associados a cambissolos.

Os cambissolos também ocorrem nas áreas de relevo ondulado ou forte ondulado e caracterizam-se por se apresentarem numa fase inicial do desenvolvimento pedológico.

Possuem horizonte A moderado seguido de horizonte B incipiente no qual ainda se observam os minerais facilmente intemperizáveis. São solos distróficos, com baixa capacidade de troca de cátions (Tb) e textura média (teor de silte + argila maior que 15 % e teor de argila inferior a 35 %), com presença de pedregulho. Ocorrem associados a solos litólicos, fato comum nos cambissolos, ou a latossolos vermelho-amarelo.

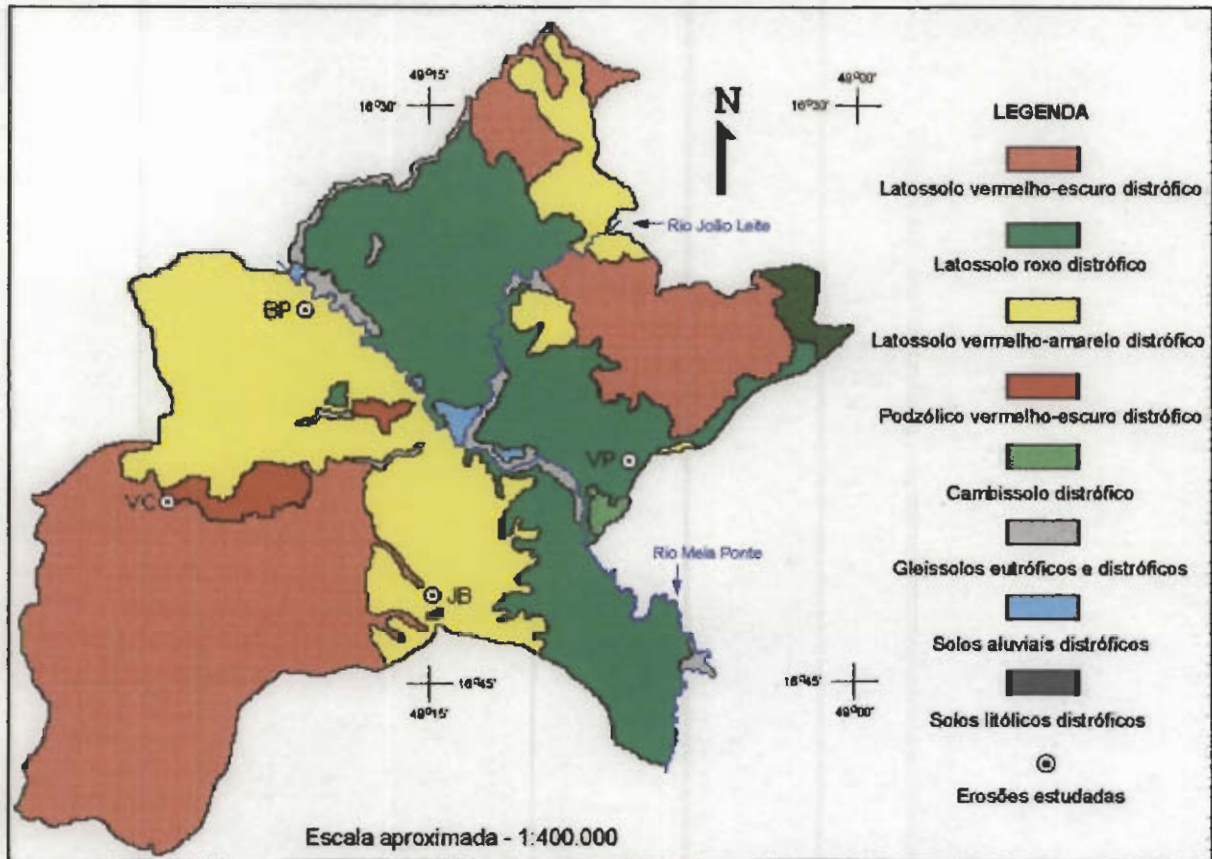


Figura 3.3 - Mapa dos solos no Município de Goiânia (modificado - IPLAN, 1990a)

Os gleissolos ocorrem nas regiões de várzea associados a solos aluviais e caracterizam-se por apresentarem um horizonte B de cor cinzenta, onde as condições freqüentes de saturação ocasionaram a redução do estado de oxidação do ferro. Ocorrem o horizonte A moderado e A chernozênico, este caracterizado pela cor escura, elevada espessura, alta saturação por bases e elevados teores em matéria orgânica. São eutróficos (saturação por bases igual ou superior a 50 %) ou distróficos e apresentam tanto alta (Ta) como baixa capacidade de troca de cátions (Tb).

Os solos aluviais ocorrem em áreas restritas ao longo das principais drenagens. Os solos litólicos são solos rasos, muito cascalhentos e apresentam horizonte A assentado diretamente sobre a rocha.

3.5 CLIMA

A síntese dos dados climáticos da região, mostrada a seguir, foi obtida a partir do trabalho publicado pelo IBGE (1994).

O clima da região de Goiânia, segundo Classificação de Köeppen, é do tipo Aw, tropical úmido, caracterizado por duas estações bem definidas: um inverno seco e um verão com chuvas torrenciais.

A região encontra-se sob o domínio de um anticiclone tropical, no qual a direção centrífuga dos ventos assegura uma certa estabilidade climática. Ocorrem porém linhas de instabilidade tropicais que geram ao longo do ano alterações no regime pluviométrico e nas variações térmicas.

O regime térmico da região registra temperaturas de amenas a elevadas sem variações significativas durante o ano. As médias térmicas anuais oscilam entre 21°C e 22°C, com as temperaturas maiores ocorrendo na porção ocidental. Médias acima de 26°C são registradas durante a primavera.

O regime pluviométrico caracteriza-se por chuvas máximas mensais em torno de 260 mm nos meses de verão e mínimas inferiores a 8 mm nos meses de inverno. A Figura 3.4 mostra que a pluviosidade média para a Município de Goiânia oscila entre 1500 e 1600 mm anuais. Observa-se aí que o regime pluviométrico não é vinculado exclusivamente aos sistemas de circulação atmosférica mas sofre também influência do relevo. A porção norte da região, com suas cotas altimétricas mais elevadas, possui índices pluviométricos maiores ao passo que a região de Hidrolândia, situada a sul constitui-se numa célula microclimática com baixos índices de pluviosidade e temperaturas médias anuais elevadas.

Com relação às chuvas intensas, a Tabela 3.2 (CNEN/CPRM, 1993), construída a partir de dados fornecidos pelas estações climatológicas existentes no Município, mostra a intensidade das precipitações máximas assim como seus respectivos tempos de recorrência. Ressalta-se aqui que estas chuvas intensas desempenham papel fundamental no desencadeamento dos processos erosivos observados no Município de Goiânia, visto que a estrutura urbana existente não suporta as vazões geradas durante estes eventos, problema que se agrava devido as altas taxas de impermeabilização do solo, levando à ocorrência de processos erosivos nas áreas desprovidas de pavimentação ou cobertura vegetal apropriada.

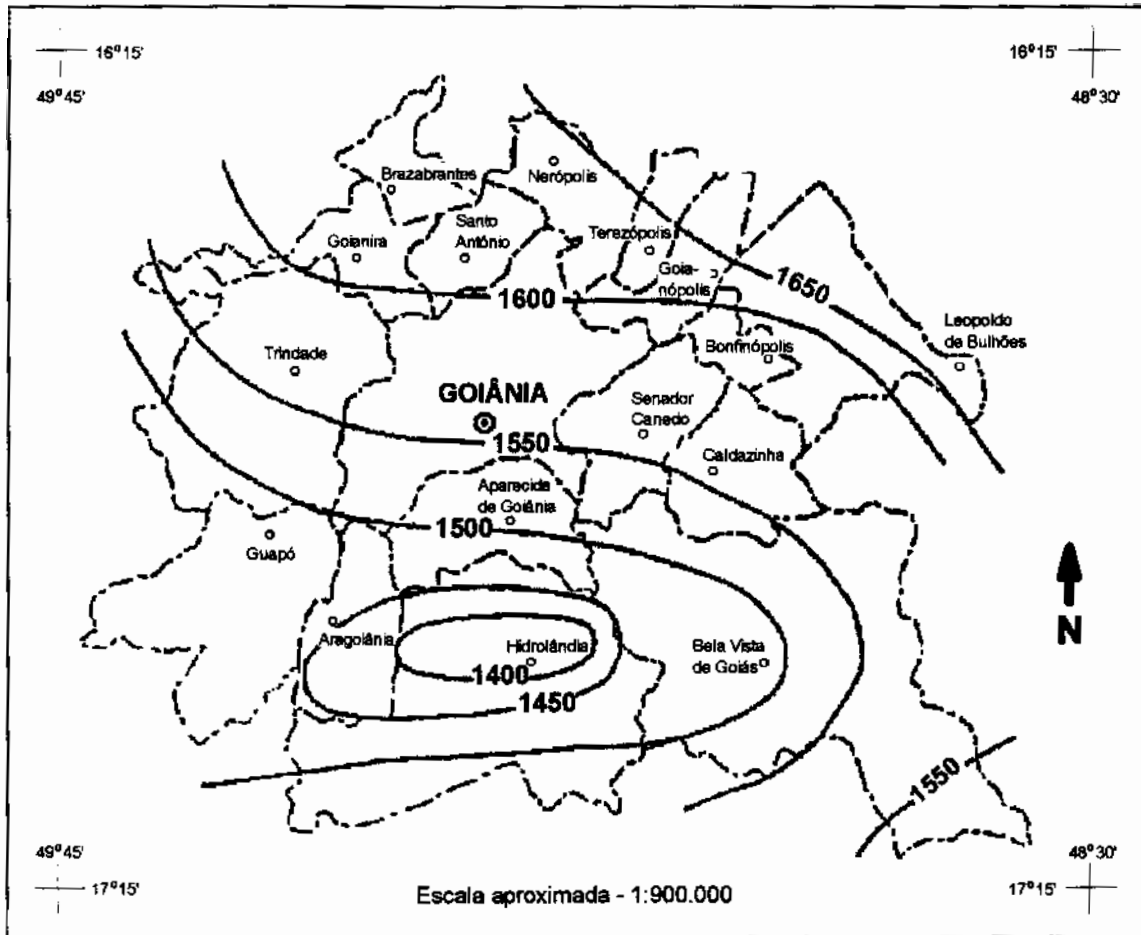


Figura 3.4 - Pluviosidade anual média na região de Goiânia (modificado - IBGE, 1994)

Tabela 3.2 - Chuvas Intensas em Goiânia (modificado - CNEN/CPRM, 1993)

PRECIPITAÇÕES (mm)				
Duração	Tempo de Recorrência			
	1 ano	2 anos	5 anos	10 anos
5 min	10	12	15	17
15 min	24	28	31	36
30 min	36	38	44	56
1 h	44	54	66	70
2 h	51	64	87	94
4 h	62	74	98	105
9 h	65	80	105	110
24 h	75	90	120	145

Cassetti (1991) ressalta que além das alterações no comportamento hidrodinâmico das vertentes decorrentes do processo de impermeabilização de superfícies, o processo de crescimento urbano leva à formação de disritmias pluviométricas. Estas disritmias podem favorecer a ocorrência de processos erosivos conforme é descrito a seguir.

Pela análise dos gráficos mostrados na Figura 3.5 pode-se observar que os registros de temperaturas médias máximas, temperaturas médias mínimas e temperaturas médias compensadas assumiam freqüentemente, até o final da década de 50, valores abaixo da média da série analisada. Já a partir da década de 60, os valores se encontram constantemente acima da média evidenciando a ocorrência de um crescimento térmico. A umidade relativa do ar, por sua vez, que até a década de 50 encontrava-se acima da média da série, mostra a partir de 1966 valores sempre abaixo da média, fato atribuído ao próprio efeito térmico. Os valores de precipitação, anteriormente caracterizados por oscilações, passam a assumir constantemente valores acima da média.

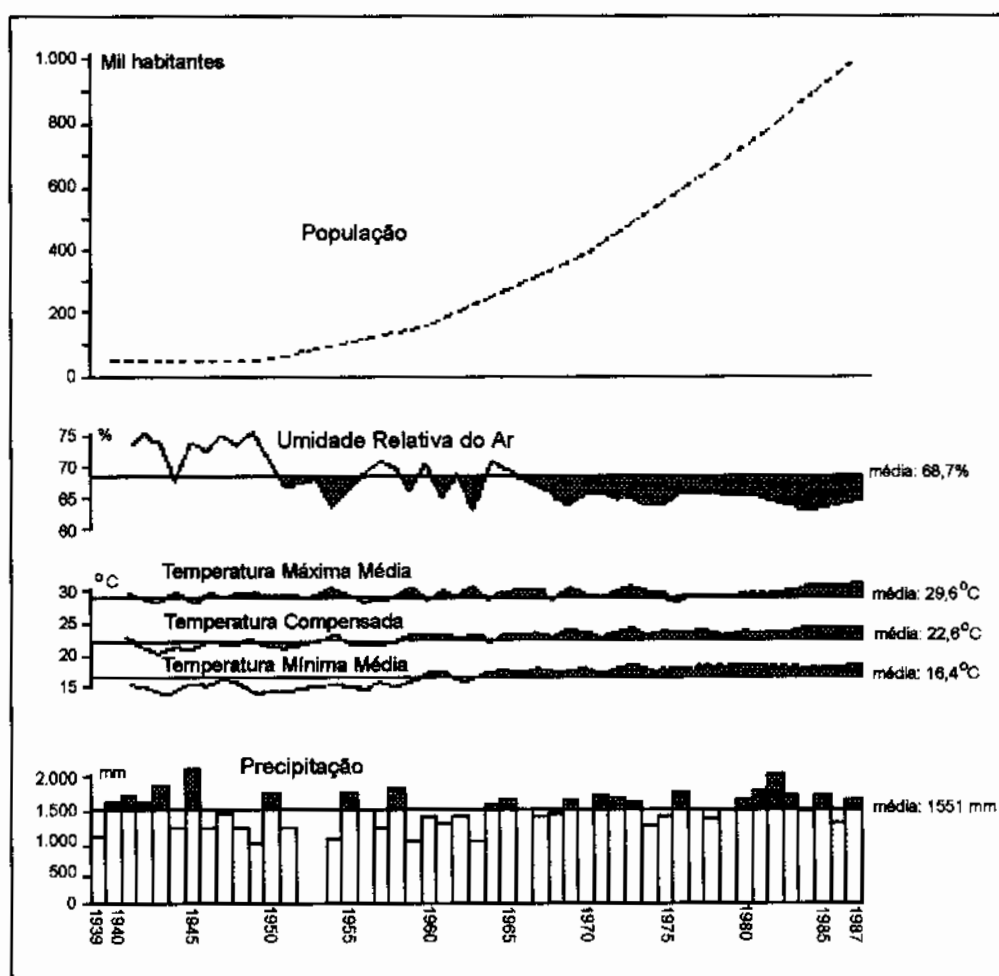


Figura 3.5 - Crescimento populacional e alterações meteorológicas no Município de Goiânia (modificado - Cassetti, 1991)

Simultaneamente a estas alterações meteorológicas observa-se um aumento expressivo da população a partir da década de 60. Fica claro então que este crescimento gerou como consequência a formação de uma ilha de calor.

O acréscimo de temperatura na área urbanizada cria um sistema de ventos convergentes que tendem a entrar em convecção ao atingirem a ilha de calor. A umidade contida nestes ventos tem a sua condensação facilitada pela existência de material particulado, típico de concentrações urbanas, que atua como núcleos de condensação. Ocorrem então pancadas de chuva de forte intensidade em curto espaço de tempo, caracterizando as disritmias pluviométricas. A consequência destes eventos é o aparecimento de erosões nas áreas desprovidas de sistemas de drenagem pluviais adequados, que não suportam as altas vazões geradas durante estes eventos (Figura 3.6).

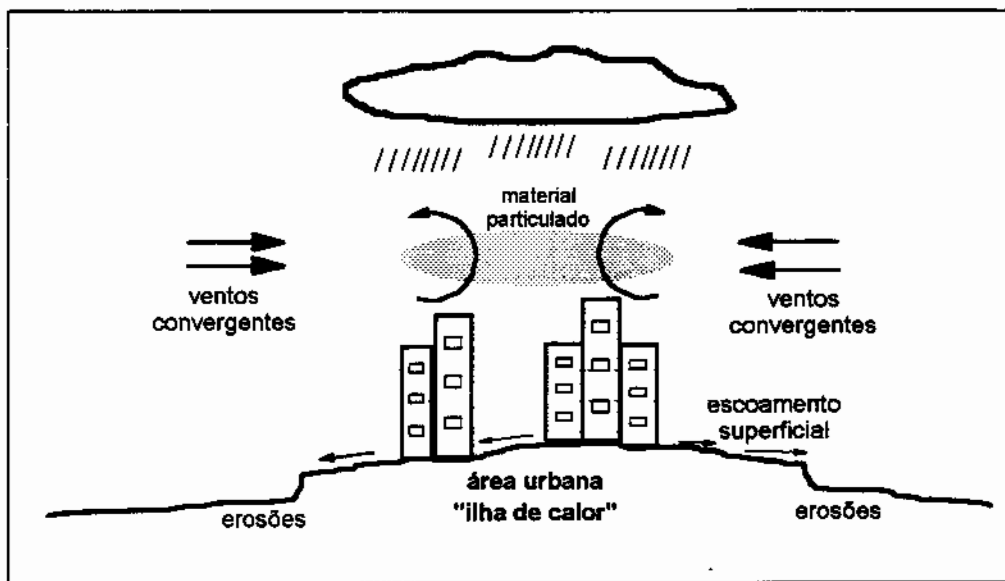


Figura 3.6 - Atuação de disritmias pluviométricas no desenvolvimento de erosões

Finalizando, Caseti (1991) mostra que o número de ocorrência destas chuvas de maior intensidade vem aumentando nos últimos anos. Citando Sternberg (1949), Caseti (1991) conclui: "Se a altura da chuva caída de modo algum se submeteria a vontade do homem, o mesmo não se pode dizer do volume total da água escoada à superfície, nem da velocidade destruidora com que é evacuada, nem tampouco da devastação das vertentes que se esbarrodam".

Fica evidente então que os condicionantes do meio físico (geologia, geomorfologia, solos e clima) são extremamente susceptíveis a ação do homem, embora muitas vezes possam não parecer a uma primeira vista, e que muitos dos "acidentes naturais" observados (por

exemplo, as erosões foco deste trabalho) são fruto de uma apropriação indevida dos recursos naturais.

3.6 EROSÕES CADASTRADAS NO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA

A Figura 3.7 mostra os resultados obtidos pelo trabalho de cadastramento realizado por Nascimento (1993). Verifica-se aí uma forte coincidência entre a concentração de erosões e a área de expansão urbana do Município.

Mais uma vez, fica evidente que o modelo de desenvolvimento urbano é o principal responsável pela deflagração dos processos erosivos por voçorocamento existentes na região, devido à adoção de um sistema inadequado de drenagem urbana das águas pluviais. Porém, uma vez iniciado o processo erosivo, os condicionantes do meio físico é que vão ditar a forma e a intensidade de sua evolução. Desta forma, justifica-se um conhecimento detalhado destes condicionantes para um perfeito entendimento da evolução destes processos.

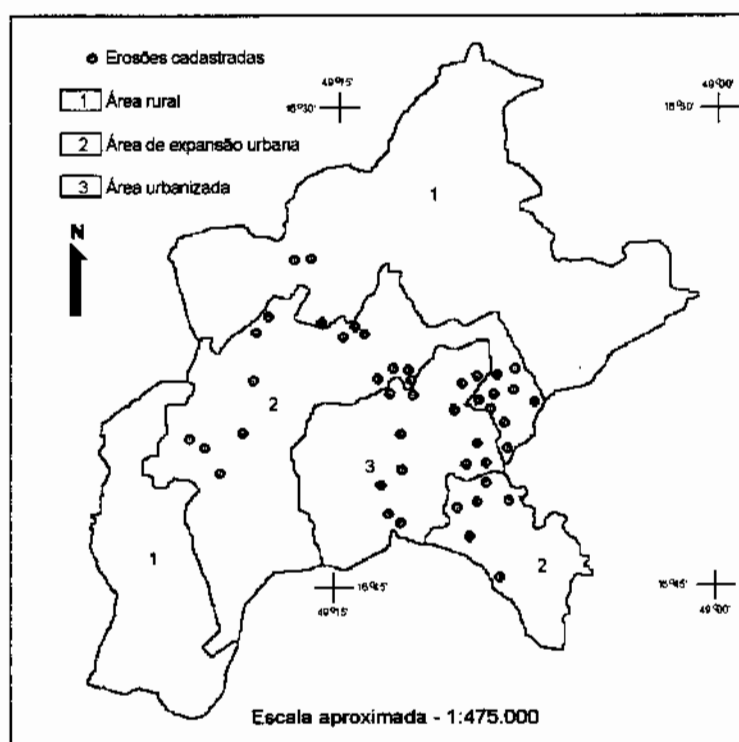


Figura 3.7 - Erosões existentes no Município de Goiânia (modificado - Nascimento, 1993)

4. DESCRIÇÃO DOS PERFIS DE ALTERAÇÃO DAS EROSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

As características físicas e mineralógicas do solo estão intimamente relacionadas com o substrato rochoso existente. A atuação dos processos de intemperismo sobre os diferentes domínios litológicos presentes na região de Goiânia produz perfis de alteração sensivelmente distintos que, como consequência, apresentam comportamentos diferentes quando submetidos a esforços erosivos. Justifica-se desta forma um estudo detalhado destes perfis de alteração.

Neste capítulo, é apresentada uma descrição relativa aos principais aspectos físicos e mineralógicos referentes às erosões estudadas. Antes porém, é apresentada a metodologia utilizada na classificação destes perfis, assim como a metodologia utilizada na determinação de sua mineralogia. As descrições das voçorocas estudadas e a metodologia utilizada nos trabalhos de campo são apresentadas também neste capítulo.

4.2 METODOLOGIA PARA DESCRIÇÃO DOS PERFIS DE ALTERAÇÃO

4.2.1 Descrição dos Perfis de Alteração

A descrição e classificação dos perfis de alteração das voçorocas estudadas foram feitas usando-se como referências básicas os trabalhos de Herbillon & Nahon (1988) e de Thomas (1974), onde os horizontes do perfil laterítico são descritos com base em sua composição químico-mineralógica, independentemente de interpretações genéticas. Estes perfis foram correlacionados também com a classificação descrita por Pastore (1995), onde são usados termos mais familiares ao meio geotécnico.

Herbillon & Nahon (1988), tomando como exemplo um perfil de alteração sobre rochas ultrabásicas, propõem a seguinte seqüência, da base para o topo:

- I - horizonte inferior constituído de rocha sã, onde são mantidas a mineralogia e estruturas originais.

- II - horizonte argiloso acinzentado, onde ainda observa-se a estrutura original da rocha. Apresenta mineralogia de alteração devida ao intemperismo podendo-se identificar a presença de esmectitas e/ou caulinitas.

Thomas (1974) cita que estes dois horizontes podem ser melhor entendidos quando descritos em termos de grau de alteração e denomina esta região de zona transicional.

- III - chamado de "zona mosqueada", constitui-se no horizonte mais espesso apresentado no perfil. Apresenta na sua base um material de cor cinza composto basicamente por caulinita e ocasionalmente por nódulos de hematita e goethita. Em direção ao topo desta camada os nódulos de hematita, de cor roxo-avermelhada, tornam-se mais frequentes e mais endurecidos contrastando com os nódulos de cor amarelada compostos por goethita e caulinita. As estruturas originais observadas na rocha são desaparecem progressivamente em direção ao topo desta camada.

Thomas (1974), enfatizando o caráter variável dos perfis sobre solos lateríticos, divide o horizonte III de Herbillon & Nahon em duas porções, denominando de "zona pálida" a região branqueada inferior rica em quartzo e caulinita e de zona mosqueada apenas o estrato superior de coloração mais escura. Segundo o autor, a distinção entre zona pálida e a zona transicional situada abaixo torna-se bastante difícil quando os processos de alteração não atuaram em toda sua intensidade.

- IV - constitui-se na crosta "macia", composto-se de nódulos ferruginosos de cor roxo-avermelhada e nódulos amarelados. A caulinita torna-se subsidiária neste domínio.
- V - chamado de crosta endurecida ou "duricrosta", formado basicamente por nódulos roxo-avermelhados de hematita. Tanto acima como abaixo da duricrosta são descritos horizontes com fragmentos ferruginosos cuja origem é atribuída a fragmentação da própria duricrosta. Atribui-se esta fragmentação a mecanismos de origem bioquímica.

Thomas (1974) agrupa os horizontes IV e V de Herbillon & Nahon em um único nível, denominado de crosta. Além disto, cita a existência de um horizonte superficial, não descrito por Herbillon & Nahon, caracterizado pela presença de matéria orgânica e fragmentos ferruginosos cuja origem pode estar ou não relacionada aos horizontes inferiores.

Pastore (1995) propõe uma padronização para a descrição de perfis de alteração. Segundo este autor, podem ser reconhecidos sete horizontes distintos (descritos aqui da base para o topo):

- rocha sã - constituído pela rocha em sua estrutura e mineralogia originais;

- rocha alterada - quando a rocha ainda apresenta a resistência do estado são, mas mostra uma descoloração e alteração da resistência ao longo das fraturas;
- rocha muito alterada - possuindo resistência reduzida em relação à rocha sã. Os minerais encontram-se bastante alterados e a rocha apresenta um brilho reduzido;
- saprólito - constituindo-se na transição entre a rocha muito alterada e o solo saprolítico, situado logo acima. O solo se desenvolve ao longo das descontinuidades da massa rochosa, regiões de mais fácil percolação. A quantidade de blocos pode variar de 10 a 95 % da massa total, conferindo a este horizonte um comportamento bastante variável;
- solo saprolítico - que, apesar de bastante alterado, ainda preserva a estrutura original da rocha. Sua espessura e granulometria variam em função da rocha original e as cores mais freqüentemente observadas são branco, creme, roxo e amarelo. Os minerais mais observados são quartzo, caulinita e mica;
- solo laterítico - podendo ser formado por material residual ou transportado já não apresentando nenhum vestígio da estrutura original da rocha. Sua espessura também é bastante variável em função de sua posição no relevo. Os minerais principais são a caulinita, minerais hidratados de ferro e óxidos de alumínio. As cores variam entre tons avermelhados e amarelados. Corresponde ao horizonte pedológico B;
- solo orgânico - geralmente de pequena espessura, caracterizando-se pela elevada quantidade de matéria orgânica, estando presente na maioria dos perfis. Corresponde ao horizonte pedológico A.

4.2.2 Análise Mineralógica por Difratomia de Raios X

Gidigassu (1976) descreve o processo de análise mineralógica por difratometria de raios X pelo Método do Pó. O método consiste em submeter uma amostra pulverizada a um feixe de raios X que se difrata ao atingir a superfície plana da amostra, sendo então captada por um detector que se move a uma velocidade constante num arco de círculo centrado ao redor da amostra (Figura 4.1).

A difração dos raios X ocorre quando a radiação gerada sofre uma interferência construtiva, ou seja, quando as amplitudes de onda se somam, produzindo então um pico no difratograma. Esta difração será máxima quando o raio refletido pelo plano inferior do mineral estiver defasado de um múltiplo inteiro do comprimento de onda em relação ao raio refletido pelo plano superior.

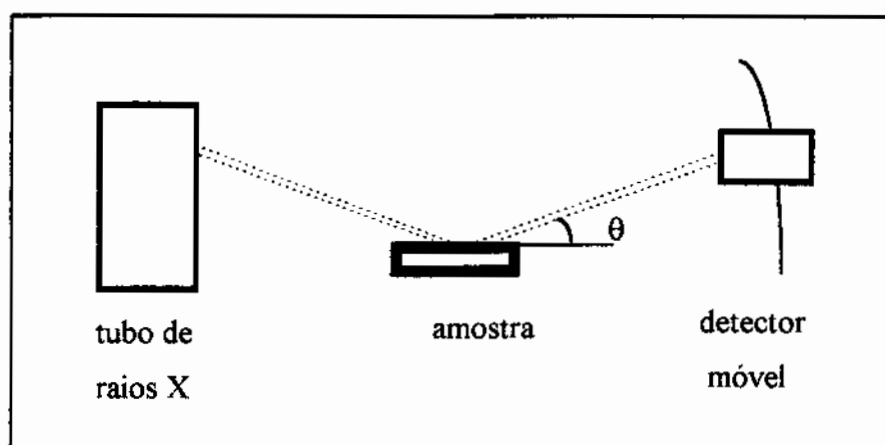


Figura 4.1 - Modelo esquemático de um Difratômetro de Raios X

Esta condição de interferência é conhecida como Lei de Bragg (Gomes, 1984), expressa pela fórmula: $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta$, onde:

- n = número inteiro qualquer;
- λ = comprimento de onda dos raios X;
- d = distância entre os planos de incidência;
- θ = ângulo de incidência.

Como λ e θ são conhecidos é possível determinar-se a distância d . Esta distância d é uma característica intrínseca de cada mineral sendo conhecida como distância interplanar basal. Com este método é possível então identificar os minerais de granulação fina presentes, sejam eles de composição argilosa ou não.

Conhecidas as distâncias interplanares basais de cada pico do difratograma é possível se determinar com o auxílio de tabelas a mineralogia existente. No caso de dois ou mais minerais possuírem picos coincidentes, os ensaios de raios X devem ser precedidos de alguns tratamentos especiais para uma melhor definição da mineralogia.

Mitchell (1993) cita que a análise quantitativa dos minerais com base na altura dos picos do difratograma é incerta devido a diferenças no coeficiente de absorção, orientação das partículas, textura da superfície da amostra, cristalinidade dos minerais e hidratação, entre outros fatores. Conclui então que a análise mineralógica realizada unicamente por difração de raios X fornece dados de caráter semi-quantitativo.

Porém, para o caso em questão, a difratometria de raios X fornece dados importantes com relação à gênese do perfil de alteração e sua variação em função da profundidade e das características morfológicas.

As análises mineralógicas por difratometria de raios X foram realizadas nos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Utilizaram-se para isto amostras pulverizadas numa granulometria abaixo de 100 mesh (0,150 mm). Nas erosões que apresentavam horizontes concrecionários foram analisados separadamente as concreções e o material da matriz.

4.3 TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo constaram de visitas aos locais das erosões para a observação e descrição de suas feições morfológicas e do perfil de alteração.

As descrições dos perfis de alteração observados nas paredes das voçorocas foram feitas com base nas seguintes características morfológicas:

- profundidade;
- transição entre os horizontes;
- cor;
- textura;
- estrutura;
- porosidade;
- cerosidade;
- consistência;
- presença de atividade biológica.

Os perfis representativos adotados foram aqueles onde as paredes possuíam maior altura, nos quais é possível identificar a maior diversidade de horizontes, resultantes do processo de intemperismo. Em cada um dos horizontes identificados foram coletadas amostras para os ensaios de caracterização física e para a determinação da mineralogia pelo método da difratometria de raios X.

Para cada horizonte descrito nas paredes da erosão eram coletadas amostras deformadas para os ensaios de caracterização geotécnica e mineralógica. As amostras foram coletadas na própria face dos taludes, na profundidade média de cada horizonte identificado, tomando-se o cuidado de raspar a parte superficial e coletar o material na parte interna.

4.4 DESCRIÇÃO, MINERALOGIA E CLASSIFICAÇÃO DOS PERFIS DE ALTERAÇÃO

4.4.1 Voçoroca do Conjunto Vera Cruz

Situa-se na saída para o Município de Trindade, a jusante do referido conjunto, numa área situada à meia vertente, ainda pouco urbanizada, onde predominam pastos e chácaras. Localiza-se em latossolos, sobre o domínio de rochas ácidas do Complexo Anápolis-Itaçu (Ponto VC, Figura 3.1), sobre a latitude 16° 40' 16" S e longitude 49° 23' 01" W.

Sua origem remonta da implantação do bairro quando a impermeabilização de superfícies proporcionou a ocorrência de fluxo concentrado com conseqüente ativação do processo erosivo.

Apresenta um aspecto retilíneo, com extensão aproximada de 200 metros. A profundidade varia pouco ao longo da extensão da voçoroca, atingindo um máximo de 10 metros em alguns pontos. Suas paredes laterais possuem contorno sinuoso onde a largura da erosão atinge até 30 metros. As paredes da erosão possuem inclinação variando entre 55° e 70° com porções sub-horizontalizadas nos horizontes superiores (Figura 4.2). Muitas destas paredes mostram evidências de movimentações recentes. Além disso ocorrem muitos fraturamentos na superfície, o que indica uma tendência à progressão lateral desta voçoroca por processos de escorregamentos de massa.

Quanto à progressão em direção à cabeceira, a recente construção de um sistema de galerias de drenagem a montante diminuiu bastante o volume das águas pluviais escoadas para o interior da voçoroca fazendo-se supor que a progressão da erosão em direção a cabeceira ocorra de forma bastante lenta.

A parte final da voçoroca foi aterrada para a construção de uma rua gerando o represamento da água a montante. A origem desta água é devida a pequenas fontes na parte final da voçoroca não tendo sido observadas fontes d'água próximas à cabeceira.

Parte da cabeceira da voçoroca foi aterrada com lixo e entulho. Este material está sendo carregado para jusante pelo fluxo superficial, conforme observado no fundo da voçoroca (Figura 4.2).

O perfil de alteração, descrito do topo para a base, observado nas paredes da voçoroca é mostrado a seguir:



Figura 4.2 - Vista da voçoroca do Conjunto Vera Cruz em direção à jusante

- 0 a 0.8 metros (Amostra - VC-1) - horizonte de cor marrom, textura areno-argilosa, poroso, sem cerosidade, consistência muito firme. Observam-se grãos de quartzo e presença de raízes. A transição para o horizonte inferior é difusa e descontínua.
- 0.8 a 2 metros (Amostra VC-2) - cor ocre, textura areno-argilosa, estrutura homogênea, consistência firme. Apresenta na porção superior regiões ricas em concreções e fragmentos de quartzo de até 3 cm de diâmetro. A presença de grãos de quartzo diminui em direção à base. A transição para o horizonte inferior é gradual (Figura 4.3).
- 2 a 3 metros (Amostra VC-3) - horizonte de cor amarelada com porções de cor rosada, estrutura maciça, consistência firme. Apresenta grãos de quartzo milimétricos. A transição para o horizonte inferior é irregular e clara.
- 3 a 6 metros (Amostra VC-4) - horizonte de cor ocre, textura arenosa, estrutura maciça, consistência friável. Apresenta nódulos de cor ocre dispersos numa matriz composta de quartzo, mica e minerais de argila (essencialmente caulinita), com relictos da estrutura foliada original (Figura 4.4). Estes nódulos vão diminuindo de frequência em direção à base do estrato. A transição para o horizonte inferior é plana e clara.
- 6 a 9 metros (Amostra VC-5) - horizonte bandado, textura arenosa, com níveis vermelhos e brancos de dimensão centimétrica relictos da estrutura original da rocha matriz. Os níveis de cor vermelha apresentam quartzo estirado, micas de cor branca (muscovita), minerais máficos alterados e material argiloso endurecido. Os níveis brancos apresentam quartzo granular ou estirado e caulinita. A consistência é bastante friável (Figura 4.5).



Figura 4.3 - Horizontes superiores (entre 0 e 2 metros) da voçoroca do Conjunto Vera Cruz



Figura 4.4 - Horizonte intermediário (5 metros) da voçoroca do Conjunto Vera Cruz



Figura 4.5 - Horizonte inferior (9 metros) da voçoroca do Conjunto Vera Cruz

Os resultados da análise mineralógica por difratometria de raios X (Figura 4.6) e a classificação dos horizontes identificados nos perfis de alteração (Tabela 4.1) são mostrados a seguir.

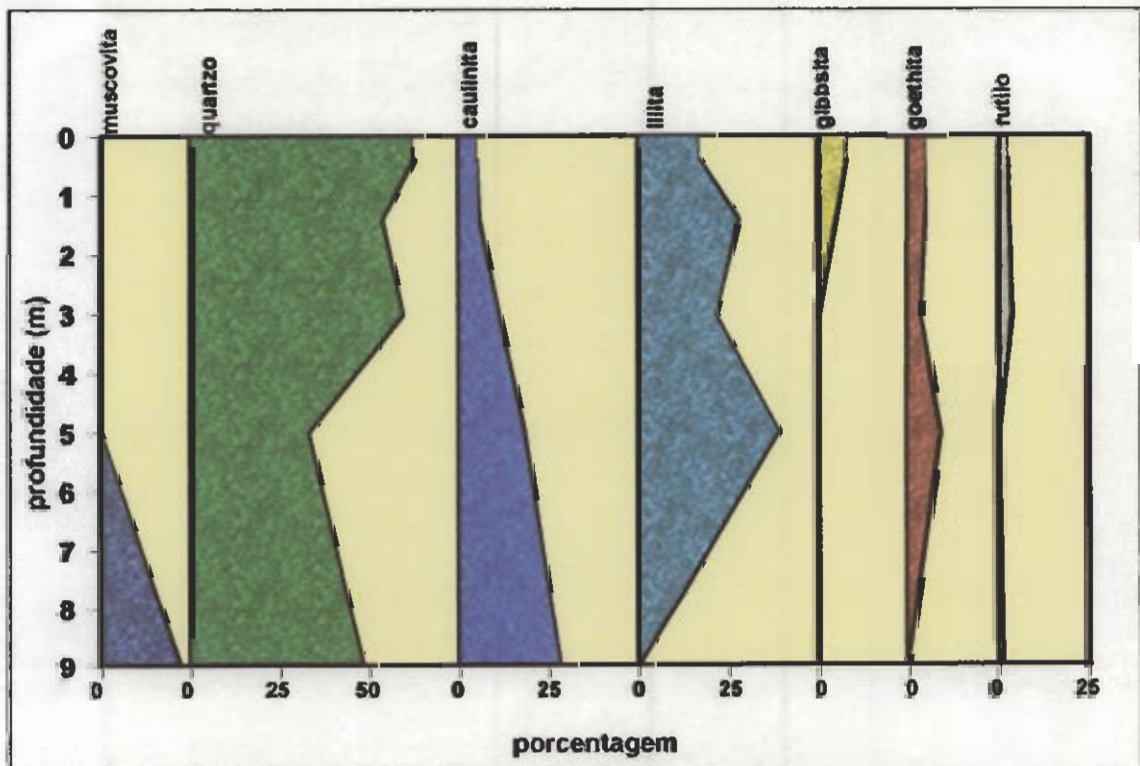


Figura 4.6 - Composição mineralógica para a voçoroca do Conjunto Vera Cruz

Tabela 4.1 - Classificação do perfil de alteração para a voçoroca do Conjunto Vera Cruz

Horizonte/ Profundidade	Herbillon & Nahon (1988)	Thomas (1974)	Pastore (1995)
1 / 0 a 0,8 m	—	solo superficial	solo orgânico
2 / 0,8 a 2 m	crosta macia	crosta	solo laterítico
3 / 2 a 3 m	zona mosqueada superior	zona mosqueada	solo saprolítico
4 / 3 a 6 m	zona mosqueada inferior	zona mosqueada/pálida	saprólito
5 / 6 a 9 m	zona argilosa	zona pálida/transicional	rocha muito alterada

A análise da tabela 4.1 permite concluir que as classificações propostas por Herbillon & Nahon (1988) e por Thomas (1974) se aplicam bem para as descrições dos perfis de alteração apresentados pois contém uma descrição mineralógica detalhada de cada horizonte do perfil de alteração, além de definir mais detalhadamente os horizontes lateríticos. Já a classificação geotécnica de Pastore (1995) define bem a resistência e estrutura dos horizontes, permitindo boas correlações com o comportamento geotécnico dos diferentes horizontes do perfil.

No caso da voçoroca do Conjunto Vera Cruz, a zona pálida definida por Thomas não é bem caracterizada, pois as concentrações de caulinita são restritas a algumas bandas. Estas bandas são relictos da estrutura original da rocha e, no caso das partes esbranquiçadas ricas em caulinita, correspondem a produtos de alteração sobre níveis quartzo-feldspáticos. No caso das bandas avermelhadas, representantes de processos de alteração sobre os níveis máficos, as concreções aparecem em profundidades maiores. Desta forma, quando classificadas pelos critérios de Thomas (1974), optou-se por duas designações para os horizontes inferiores desta voçoroca.

A análise da Figura 4.6 permite a colocação dos seguintes comentários:

- Os processos de lixiviação que ocorrem nos horizontes superficiais ficam bem caracterizados ao se observar o comportamento de alguns minerais. A dessilicização da caulinita e da illita gera um aumento relativo na quantidade de quartzo e gibbsita. A gibbsita, característica de estágios mais avançados de lixiviação, é presente apenas nos horizontes superiores e diminui de teor em profundidade até tornar-se ausente.
- A quantidade de muscovita observada em profundidade diminui em direção à superfície pois esta se altera para illita com o intemperismo.
- As variações verificadas nos teores de quartzo e illita na profundidade de 5 metros podem ser devidas a existência de um horizonte mais argiloso.

4.4.2 Voçoroca do Batalhão da Polícia

Situa-se na parte noroeste do Município (latitude 16° 35' 24" S; longitude 49° 19' 40" W), no bairro Jardim Curitiba III, tomando-se a saída para o Município de Inhumas (Ponto BP, Figura 3.1). A voçoroca estudada encontra-se dentro da mata da SANEAGO, vizinha ao Batalhão Florestal da Polícia Militar, existindo também algumas ravinas nas áreas de pastagens próximas a mata.

Esta voçoroca formou-se numa cabeceira de drenagem, situada numa área de ruptura de declive, próxima ao Rio Meia Ponte, sobre o domínio de rochas básicas do Complexo Granulítico Anápolis-Itaçu. Apresenta taludes com forte declividade (Figura 4.7) e presença de muitas nascentes naturais.



Figura 4.7 - Vista da cabeceira da voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia

A erosão possui largura aproximada de 40 metros e uma profundidade de 17 metros. A sua extensão longitudinal é da ordem de poucas dezenas de metros e seus limites a jusante se confundem com a área de incisão natural da drenagem. Possui um aspecto semicircular, diferente do aspecto linear muito comum nas erosões onde predomina o escoamento superficial

concentrado. Porém, o reentalhe desta cabeceira de drenagem foi gerado provavelmente devido a mecanismos de fluxo superficial.

O desenvolvimento desta erosão deve estar também ligado a processos de instabilização gerados pela água subterrânea. O processo de reentalhe da cabeceira de drenagem também modifica substancialmente o gradiente hidráulico de saída da água. O gradiente hidráulico deve atingir altos valores durante a percolação da água nas fraturas verticais, que ocorrem com bastante frequência na parte inferior do talude, propiciando o surgimento do fenômeno de erosão interna (*piping*), observadas nos horizontes mais profundos (Figura 4.8). A formação de canais pelo processo de *piping* leva ao surgimento de instabilizações localizadas, evidenciadas pela formação de um perfil côncavo na base dos taludes. **Estas instabilizações provocam o solapamento da base do talude fazendo com que o processo erosivo avance em direção à cabeceira da voçoroca.**



Figura 4.8 - Cavidade formada pelo processo de erosão interna (*piping*)

Os processos de erosão por fluxo superficial ocorrem apenas em locais restritos e de forma pouco expressiva pois são em grande parte contidos pela presença de vegetação. O perfil de alteração ,do topo para a base, observado nas paredes da voçoroca é descrito a seguir:

- 0 a 2 metros (Amostra retirada - BP-1) - horizonte de cor marrom-avermelhada, poroso, textura areno-argilosa, **estrutura maciça, com grãos de quartzo e concreções de cores roxo-avermelhadas de até 3 cm de diâmetro. A transição para o horizonte inferior é gradual.**

- 2 a 3.5 metros (Amostra BP-2) - horizonte concrecionário, cor marrom-avermelhada, textura areno-argilosa, consistência firme, apresentando cerosidade e muitas raízes. As concreções são de cor marrom-escuro. Ocasionalmente, ocorrem nódulos brancos de até 0.5 cm compostos de material argiloso. A transição para o horizonte inferior é gradual.
- 3.5 a 4 metros (Amostra BP-3) - horizonte bandado, cor marrom, com níveis centimétricos ricos em quartzo leitoso e nódulos macios de cor ocre de até 5 cm.
- 4 a 11 metros (Amostra BP-4) - horizonte bandado de cor vermelha com mosqueamento, consistência firme. Apresenta níveis, de 20 cm até 1 metro, quartzosos ou níveis argilosos mosqueados com cerosidade. Aos 9 metros começam a aparecer manchas brancas de material rico em caulinita. A transição para o horizonte inferior é gradual.
- 11 a 17 metros (Amostras BP-5 e BP-6) - rocha alterada de cor marrom (amostra BP-5), estrutura xistosa, granulação fina, com bolsões de material argiloso de cor branca (essencialmente caulinita) de até 4 metros de diâmetro (amostra BP-6). Apresenta-se bastante fraturado com a ocorrência de várias nascentes de água ao longo destas fraturas.

A Figura 4.9 mostra os resultados da análise mineralógica por difratometria de raios X. A mineralogia das concreções analisadas está representada por círculos.

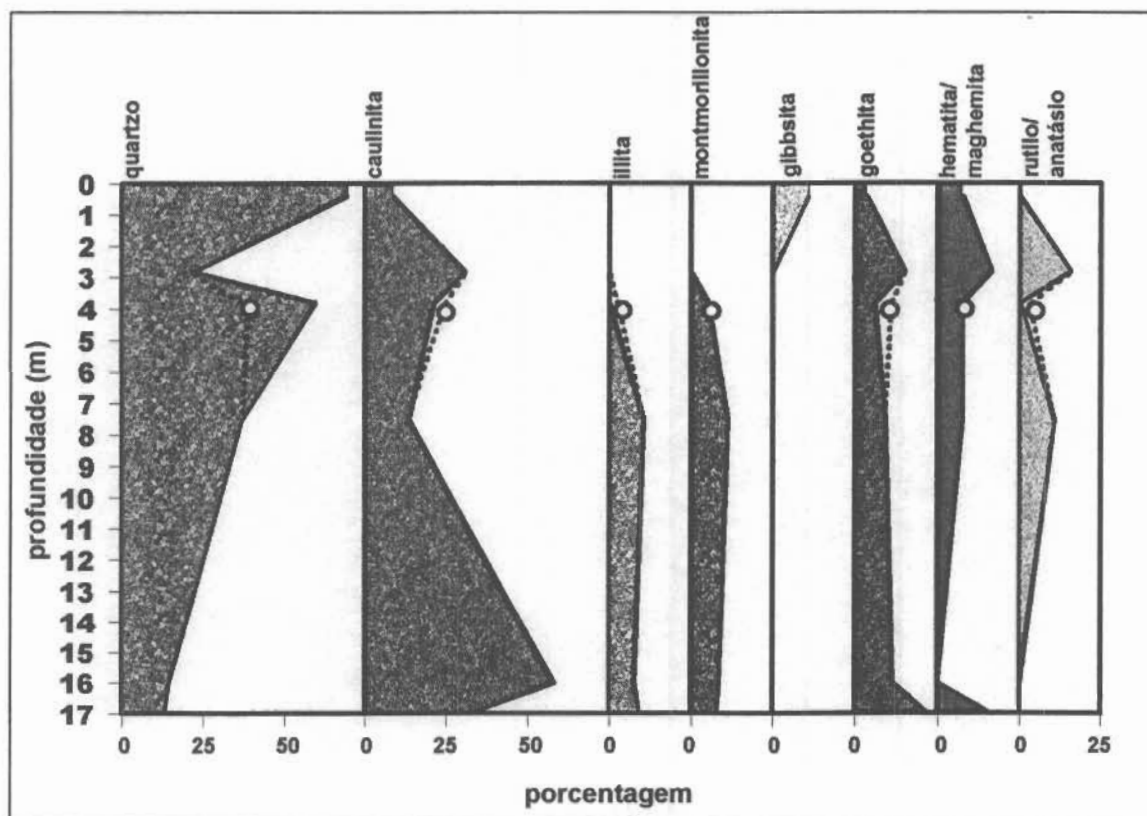


Figura 4.9 - Composição mineralógica para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia

A Tabela 4.2 mostra a classificação do perfil de alteração observado.

Tabela 4.2 - Perfil de alteração para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia

Horizonte/ Profundidade	Herbillon & Nahon (1988)	Thomas (1974)	Pastore (1995)
1 / 0 a 2 m	—	solo superficial	solo orgânico
2 / 2 a 3,5 m	crosta macia	crosta	solo laterítico
3 / 3,5 a 4 m	crosta macia	crosta	solo saprolítico
4 / 4 a 11 m	zona mosqueada superior	zona mosqueada	saprólito
5 / 11 a 17 m	zona mosqueada inferior	zona pálida	rocha muito alterada

Para a voçoroca do Batalhão de Polícia, tanto a descrição de Herbillon & Nahon quanto a descrição de Thomas se aplicam muito bem. Porém não se observa a crosta endurecida, conforme a descrição de Herbillon & Nahon, mas apenas concreções macias. O aparecimento do horizonte de solo saprolítico, conforme os critérios de Pastore (1995), é marcado pela presença de níveis quartzosos, interpretados como relictos do bandamento original da rocha. Da análise da Figura 4.9 pôde-se observar o seguinte:

- Apesar de terem sido analisadas apenas as concreções dos horizontes inferiores (amostras BP-3A), o processo máximo de laterização se encontra no horizonte classificado como solo laterítico (amostra BP-2). Neste horizonte as quantidades de goethita e de hematita/maghemita são as maiores e a quantidade de quartzo é baixa. Os horizontes inferiores também mostram pouca quantidade de quartzo, conforme mostrado pelas linhas pontilhadas.
- A grosso modo, observa-se um incremento do quartzo em direção à superfície. Para o caso dos horizontes intermediários, o incremento deve-se a níveis mais quartzosos presentes na rocha original. Já para o horizonte superficial, o aumento relativo do quartzo é devido a sua maior resistência aos processos de lixiviação.
- Também no horizonte superficial ocorre um quantidade significativa de gibbsita que, assim como o quartzo, constitui-se num dos produtos finais do processo de intemperismo.
- A zona pálida está bem representada pela elevação na concentração de caulinita.
- As quantidades de illita e montmorillonita se mantêm constantes em profundidade. Próximo à superfície, ocorre a alteração destes minerais para a caulinita o que pode ser observado pelo aumento deste mineral no horizonte de solo laterítico.

- A composição original da rocha, rica em ferro, favorece a formação de goethita e hematita/maghemita, fato observado pelo aumento em profundidade destes minerais.
- O titânio, elemento bastante resistente ao intemperismo, está representado pelos minerais rutilo e anatásio e também sofre um incremento no horizonte laterítico.

4.4.3 Voçoroca da Vila Pedroso

Situa-se na parte leste do Município (latitude 16° 39' 05" S; longitude 49° 10' 53" W), no bairro de mesmo nome (Ponto VP, Figura 3.1). O acesso é feito a partir da saída para Bonfinópolis.

Localiza-se numa área de pastagem, de forte declividade, próxima aos limites da região urbanizada, sobre o domínio dos micaxistos do Grupo Araxá.

A deflagração do processo erosivo tem sua origem ligada à impermeabilização da superfície do solo a montante, realizada sem a devida construção de galerias de drenagem de águas pluviais.

A voçoroca possui aproximadamente 70 metros de comprimento. Sua cabeceira possui um aspecto semicircular quando observado em planta e apresenta um ramo lateral gerado por outra fonte de escoamento superficial que desaguava no local. A profundidade máxima de 12 metros é registrada na cabeceira da voçoroca e decresce rapidamente em direção à jusante (Figura 4.10).



Figura 4.10 - Vista da cabeceira da voçoroca da Vila Pedroso

A construção de um sistema de galerias de águas pluviais a montante eliminou estas fontes de escoamento superficial fazendo com que a voçoroca atingisse um estado de equilíbrio. O interior desta erosão encontra-se preenchido por vegetação, inclusive árvores de médio porte, indicando que não ocorreram processos recentes de instabilizações ou de remoção de material por fluxo superficial. A presença de fontes de água no fundo da voçoroca não parece ser suficiente para criar mecanismos de instabilização dos taludes. Porém, ocorrem fendas de tração nas laterais da voçoroca, possivelmente originadas na fase de maior atividade do fenômeno erosivo.

Para este local pode-se dizer que não deve ocorrer um avanço significativo das cabeceiras da erosão, ou se tal fato ocorrer, o fará de forma muito lenta, possivelmente a partir da instabilização de seus taludes. É evidente porém que a descaracterização do ambiente original do local colocou-o numa situação de improdutividade e risco tornando-se necessário então a reabilitação do local para que este volte a integrar o sistema sócio-econômico produtivo.

O perfil de alteração observado nas paredes da voçoroca é descrito a seguir (do topo para a base):

- 0 a 0.7 metros (Amostra VP-1) - horizonte de cor marrom avermelhada, textura areno-argilosa, consistência firme, com presença de grãos de quartzo de até 0.5 cm. Presença de raízes. A transição para o horizonte inferior é clara e ondulada.
- 0.7 a 1.2 metros (Amostra VP-2) - horizonte concrecionário, com cores variando entre o amarelo, o vermelho e o roxo. As concreções são endurecidas, de cor marrom-escuro ou amareladas e atingem até 4 cm de diâmetro. A transição para o horizonte inferior é gradual e ondulada.
- 1.2 a 5 metros (Amostra VP-3) - horizonte de cores mosqueadas variando entre o branco, o marrom e o amarelo. A consistência é firme e aumenta em profundidade. Presença de cerosidade. Os nódulos com até 0.5 cm de diâmetro são presentes apenas na parte superior do horizonte.
- 5 a 9 metros (Amostra VP-4) - horizonte de cor avermelhada, consistência muito firme, com relictos da estrutura xistosa original da rocha. A transição para o horizonte inferior é gradual.
- 9 a 12 metros (Amostra VP-5) - rocha bastante alterada, de cor roxa, xistosa, com presença de minerais micáceos de tamanho milimétrico e níveis centimétricos de cor esbranquiçada.

Os resultados da análise mineralógica por difratometria de raios X, incluindo-se as concreções mostradas sob a forma de círculos, e a classificação dos horizontes identificados nos perfis de alteração são mostrados na Figura 4.11 e na Tabela 4.3, respectivamente.

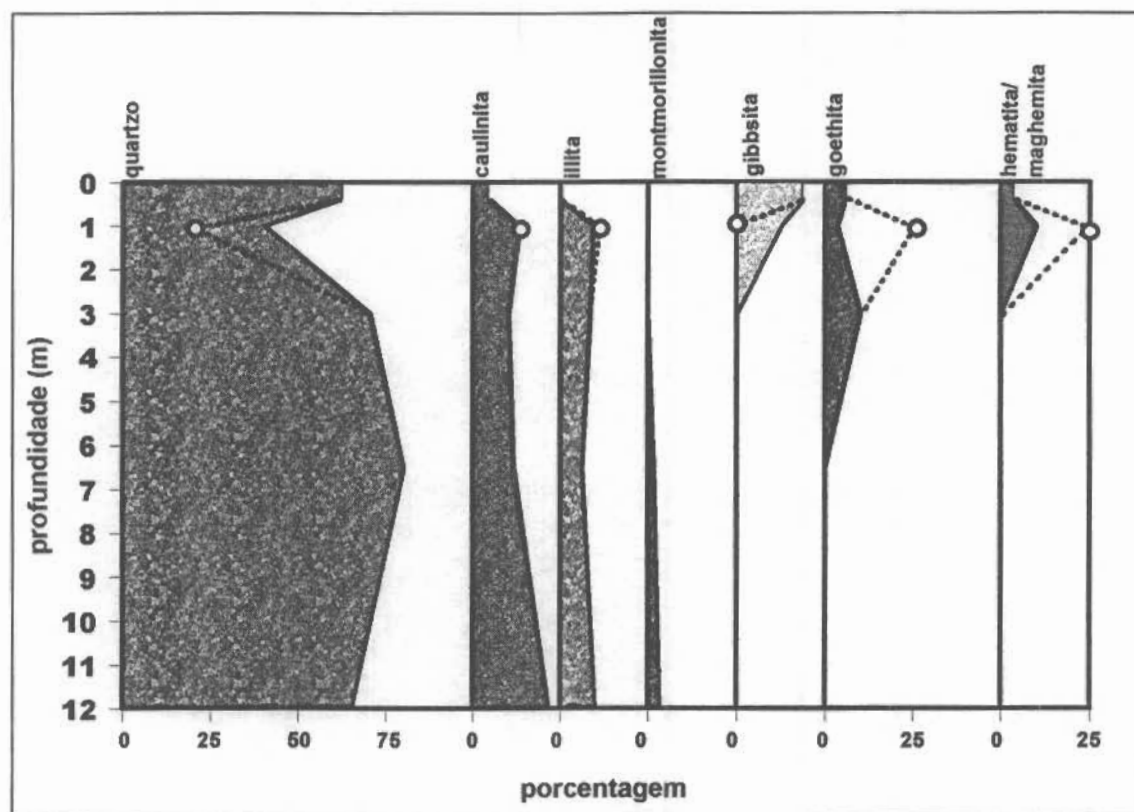


Figura 4.11 - Composição mineralógica para a voçoroca da Vila Pedrosa

Tabela 4.3 - Classificação do perfil de alteração para a voçoroca da Vila Pedrosa

Horizonte/ Profundidade	Herbillon & Nahon (1988)	Thomas (1974)	Pastore (1995)
1 / 0 a 0,7 m	—	solo superficial	solo orgânico
2 / 0,7 a 1,2 m	duricrosta	crosta	solo laterítico
3 / 1,2 a 6 m	zona mosqueada superior	zona mosqueada	solo saprolítico
4 / 6 a 9 m	zona mosqueada inferior	zona mosqueada	saprólito
5 / 9 a 12 m	zona argilosa	zona transicional	rocha muito alterada

No caso da voçoroca da Vila Pedrosa, não se observa a zona pálida descrita por Thomas. Da mesma forma não se observa o horizonte de crosta macia descrito por Herbillon & Nahon. Mesmo assim, o perfil pode ser bem definido seguindo-se a metodologia proposta

por estes autores. As conclusões obtidas a partir da análise mineralógica por difratometria de raios X (Figura 4.11) são:

- O horizonte laterítico é muito bem caracterizado. O quartzo torna-se escasso e o teor de ferro aumenta. A análise das concreções (amostra VP-2A, representada na figura pelas linhas pontilhadas) revela apenas a existência de minerais ferrosos (goethita e hematita/maghemita). A gibbsita é ausente.
- O quartzo diminui em profundidade devido a existência de um nível mais pelítico, no qual há um aumento na quantidade de minerais argilosos.
- Conforme observado nas outras erosões, a gibbsita só ocorre nos horizontes superiores, fruto de estágios mais avançados de alteração.
- Os minerais micáceos observados a olho nu constituem-se de illitas, formadas possivelmente da pseudomorfose de muscovitas presentes na rocha original.

4.4.4 Voçoroca do Jardim Botânico

Situa-se na região sul de Goiânia (latitude 16° 43' 37" S; longitude 49° 15' 21" W), dentro do terreno do Jardim Botânico (Ponto JB, Figura 3.1), área pública do Município, em local coberto por mata nativa. Encontra-se sobre os sedimentos aluvionares recentes da bacia hidrográfica do Córrego Botafogo, afluente do Rio Meia Ponte.

Possui aspecto linear, alcançando cerca de 200 metros de extensão. Sua largura é pouco expressiva, atingindo cerca de 10 metros em porções localizadas, e a profundidade varia pouco ao longo da extensão longitudinal, atingindo um máximo de 4 metros (Figura 4.12). Encontra-se limitada a jusante por uma represa e a montante por uma avenida (Av. do Contorno).

O processo de urbanização da área a montante, que não considerou a construção de galerias de drenagem de águas pluviais, ocasionou o surgimento desta erosão, devido ao grande fluxo concentrado que converge para a área. O processo erosivo continua em plena evolução, já que as soluções corretivas ainda não foram realizadas.

A presença de vegetação diminui a velocidade do avanço da erosão. Porém muitas das árvores ao perderem sua sustentação caem dentro da erosão. O solo carregado do local está sendo transportado para o interior da represa a jusante, causando o seu assoreamento.



Figura 4.12 - Vista de trecho da voçoroca do Jardim Botânico.

O perfil observado nas paredes da voçoroca é descrito a seguir (do topo para a base):

- 0 a 0.4 metros (Amostra retirada JB-1) - horizonte de cor marrom-acinzentada, com cobertura superficial de folhas secas, textura argilosa, estrutura maciça com fraturamentos verticais, consistência muito friável e com presença de raízes. A transição para o horizonte inferior é gradual.
- 0.4 a 1.8 metros (Amostra JB-2) - horizonte de cor cinza-clara com mosqueamento, textura argilosa, estrutura maciça, consistência firme. A transição para o horizonte inferior é gradual.
- 1.8 a 2.1 metros (Amostra JB-3) - horizonte de cor marrom-acinzentada, estrutura maciça consistência firme. Os fraturamentos existentes nos horizontes superiores persistem até este horizonte. A transição para o horizonte inferior é gradual.
- 2.1 a 3.5 metros (Amostra JB-4) - horizonte de cor cinza-escura com porções de cor marrom, textura argilosa, estrutura maciça, consistência firme.

Os resultados da análise mineralógica por difratometria de raios X são mostrados na Figura 4.13.

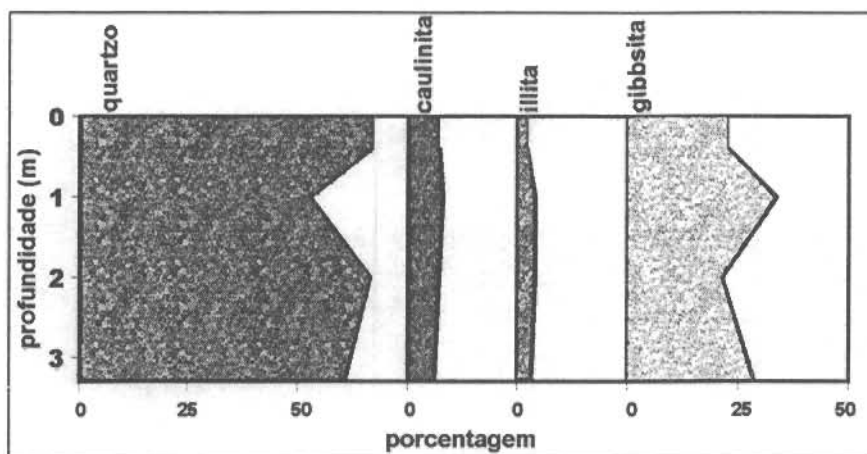


Figura 4.13 - Composição mineralógica para a voçoroca do Jardim Botânico

Com relação à esta voçoroca, não é possível se fazer uma descrição do perfil de alteração de maneira semelhante a aquela feita para as outras erosões. Por se tratarem de solos aluviais depositados em períodos mais recentes da história geológica, não ocorreu um desenvolvimento pedogenético do perfil de alteração suficiente para gerar diferenças significativas entre os horizontes. As variações mineralógicas observadas na Figura 4.12 são devidas a alternâncias no tipo de deposição dos sedimentos aluvionares, ora argilosos mostrando um aumento da gibbsita e diminuição do quartzo, ora mais arenosos mostrando então um aumento do quartzo e diminuição da gibbsita. Análises posteriores sobre amostras JB-4 revelam que a gibbsita, normalmente presente na fração mais fina do solo, ocorre também junto com a caulinita sob a forma de agregados de granulometria maior.

Devido a cor escura apresentada pelo horizonte inferior desta voçoroca foi realizada a determinação do teor de matéria orgânica presente na amostra retirada (amostra JB-4). Para isto foi realizada a determinação do teor de carbono através da calcinação da amostra a 2500°C, utilizando-se para isto o forno LECO CR-12 disponível nos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

Para a análise destes resultados, recorreu-se a consideração de Costa (1985), que admite que a matéria orgânica presente no solo possui uma quantidade média de carbono de 58%. Multiplicando-se então o valor do teor de carbono por 1,724, obtêm-se o teor de matéria orgânica existente num determinado solo.

As análises realizadas na amostra JB-4 revelaram um teor de carbono médio de 4,83 % (média de 5 análises), o que fornece um teor de matéria orgânica de 8,33 %. Muitos destes solos, devido a sua cor escura, são descritos na literatura como turfas. Porém Costa (1985) denomina de turfas apenas os solos com teor de matéria orgânica acima de 30 %.

5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Segundo Vargas (1977), as propriedades físicas de maior interesse do ponto de vista geotécnico no estudo de um solo são: textura do solo, plasticidade e estrutura, sendo possível através destas propriedades físicas realizar-se uma identificação satisfatória dos solos. Salienta porém que estas propriedades são suficientes apenas para a identificação dos solos, já que a previsão do comportamento geomecânico depende também das condições naturais em que o solo se encontra.

Desta forma optou-se pela realização de ensaios de caracterização visando um melhor conhecimento das propriedades físicas dos solos estudados. Os ensaios de caracterização foram realizados nos laboratórios de Geotecnia da Universidade de Brasília e buscaram uma identificação básica das características acima.

5.2 METODOLOGIA

Os ensaios e determinações realizados e as respectivas metodologias adotadas são descritos a seguir:

- umidade natural e umidade higroscópica do solo (w_n e w_h , %): realizados de acordo com a norma da ABNT, NBR 6457/1986, calculando-se a média de três determinações por ponto;
- peso específico aparente (γ , kN/m^3): tendo sido utilizado o método da imersão da amostra indeformada envolta em parafina, de acordo com a norma NBR 2887/1988;
- peso específico aparente seco (γ_d , kN/m^3): calculado pela equação: $\gamma_d = \gamma_n / 1 + w_n$;
- peso específico dos sólidos (γ_s , kN/m^3): determinado a partir da média de três ensaios de massa específica dos grãos realizados de acordo com a norma NBR 6508/1984;
- limite de liquidez pelo Método de Casagrande (w_l , %): determinado graficamente, de acordo com a norma de ensaio NBR 6459/1984;
- limite de plasticidade (w_p , %): determinado de acordo com a norma de ensaio NBR 7180/1984;
- índice de plasticidade (I_p , %): obtido pela diferença entre w_l e w_p ;
- índice de vazios (e): determinado a partir da equação: $e = (\gamma_s / \gamma_d) - 1$;

- porosidade (n , %): determinada a partir da fórmula: $n = e / (1 + e)$;
- grau de saturação (S_r , %): determinado a partir da fórmula: $S_r = \gamma_s \cdot w_n / (e \cdot \gamma_w)$, onde γ_w é o peso específico da água;
- granulometria: obtida a partir da metodologia de ensaio proposta por Camapum de Carvalho *et al.* (1996);
- índice de atividade (I_a): determinado segundo a proposta de Skempton, onde $I_a = I_p /$ partículas com diâmetro menores que $2 \mu\text{m}$, onde:
 - $I_a < 0,75 \Rightarrow$ solos inativos (I);
 - $0,75 < I_a < 1,25 \Rightarrow$ solos de atividade normal (N);
 - $I_a > 1,25 \Rightarrow$ solos cuja fração argilosa é ativa (A).

5.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam uma síntese dos resultados dos ensaios e determinações realizados sobre os perfis de alteração estudados. As amostras analisadas estão numeradas em ordem crescente de profundidade estando precedidas de suas respectivas siglas, a saber:

- **VC** - voçoroca do Conjunto Vera Cruz
- **VP** - voçoroca da Vila Pedroso
- **BP** - voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia
- **JB** - voçoroca do Jardim Botânico

Tabela 5.1- Quadro-Resumo das principais propriedades físicas

Amostra	VC-1	VC-2	VC-3	VC-4	VC-5	VP-1	VP-2	VP-3	VP-4	VP-5
Profundidade (m)	0,4	1,4	3,0	5,0	9,0	0,4	1,0	3,0	6,5	12,0
Umidade natural (w_n ,%)	11,97	11,45	8,79	12,72	28,22	14,53	11,60	13,72	11,68	33,63
Data	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96
Umidade higroscópica (w_h ,%)	2,30	1,78	1,51	1,54	1,57	2,83	3,55	3,69	1,82	1,08
Peso específico aparente (γ , kN/m ³)	17,33	18,60	18,59	18,34	18,65	16,08	21,87	17,82	19,17	19,22
Peso específico aparente seco (γ_d , kN/m ³)	15,48	16,69	17,08	16,27	14,55	14,04	19,60	15,67	17,16	14,38
Peso específico dos sólidos (γ_s , kN/m ³)	20,97	26,69	26,67	27,96	27,53	26,04	29,66	28,25	26,91	27,68
Limite de liquidez (w_L ,%)	36	37	38	41	44	36	40	52	35	47
Limite de plasticidade (w_p ,%)	21	23	23	33	36	28	32	37	22	NP
Índice de plasticidade (I_p ,%)	15	14	16	8	8	7	8	15	13	NP
Índice de vazios (e)	0,35	0,60	0,56	0,72	0,89	0,85	0,51	0,80	0,57	0,92
Porosidade (n ,%)	26,2	37,5	36,0	41,8	47,1	46,1	33,9	44,5	36,2	48,0
Grau de saturação (S_r ,%)	70,8	51,0	41,8	49,5	87,1	44,3	67,0	48,3	55,3	100,6
Fração pedregulho (%)	2,6	2,3	0,2	19,0	1,3	5,7	52,0	1,6	0,3	3,2
Fração areia (%)	38,4	54,9	54,8	56,1	55,8	49,3	31,4	45,4	60,2	61,1
Fração silte, amostra defloculada (%)	16,0	9,8	11,8	19,9	35,8	9,7	5,8	16,0	8,5	27,2
Fração argila, amostra defloculada (%)	43,0	33,0	34,3	5,0	7,0	35,3	10,8	37,0	31,0	8,5
Índice de atividade (I_a)	0,35	0,42	0,47	1,60	1,14	0,20	0,74	0,41	0,42	####
Unidade Geológica	APIga	APIga	APIga	APIga	APIga	PMa	PMa	PMa	PMa	PMa

• APIga- Complexo Granulítico Anápolis Itauçu - gnaisses aluminosos; PMa - Grupo Araxá - unidade D

Tabela 5.2 - Quadro-Resumo das principais propriedades físicas (continuação)

Amostra	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4	BP-5	BP-6	JB-1	JB-2	JB-3	JB-4
Profundidade (m)	0,4	2,8	3,8	7,5	17,0	16,0	0,2	1,0	2,0	3,3
Umidade natural (w_n ,%)	18,57	17,02	20,87	24,43	34,61	35,14	25,48	27,52	33,01	39,92
Data	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96	5/96	8/96	8/96	8/96	8/96
Umidade higroscópica (w_h ,%)	4,27	3,45	4,14	3,74	2,24	2,00	5,99	3,27	6,50	7,87
Peso específico aparente (γ , kN/m ³)	13,19	18,84	18,71	17,58	19,26	17,99	13,50	15,60	16,13	15,28
Peso específico aparente seco (γ_d , kN/m ³)	11,12	16,10	15,48	14,13	14,31	13,25	10,76	12,24	12,13	10,92
Peso específico dos sólidos (γ_s , kN/m ³)	27,20	27,23	27,31	26,66	28,32	25,50	24,22	24,65	24,65	24,17
Limite de liquidez (w_L ,%)	45	42	52	45	59	63	45	52	44	46
Limite de plasticidade (w_p ,%)	32	30	36	29	37	34	33	35	31	36
Índice de plasticidade (I_p ,%)	13	12	16	26	21	29	12	17	13	10
Índice de vazios (e)	1,45	0,69	0,76	0,89	0,98	0,92	1,25	1,01	1,03	1,21
Porosidade (n ,%)	59,1	40,9	43,3	47,0	49,5	48,0	55,6	50,3	50,8	54,8
Grau de saturação (S_r ,%)	34,9	67,0	74,6	73,4	100,1	96,9	49,3	66,9	78,8	79,5
Fração pedregulho (%)	1,8	1,2	5,9	6,4	—	0,3	—	—	—	—
Fração areia (%)	58,6	65,5	52,7	56,9	7,5	6,7	38,5	30,0	32,6	31,8
Fração silte, amostra defloculada (%)	7,7	10,4	11,0	8,7	53,5	41,5	10,5	9,0	20,9	32,2
Fração argila, amostra defloculada (%)	32,0	23,0	30,5	28,0	39,0	51,5	51,0	61,0	46,5	36,0
Índice de atividade (I_a)	0,41	0,52	0,52	0,93	0,54	0,56	0,24	0,28	0,28	0,28
Unidade Geológica	APIgb	APIgb	APIgb	APIgb	APIgb	APIgb	Qa	Qa	Qa	Qa

• APIgb - Complexo Granulítico Anápolis Itaipu - granulitos básicos; Qa - Depósitos aluvionares

5.3.1 Umidade Natural e Umidade Higroscópica

A umidade higroscópica, ou seja, o teor de umidade do solo após secagem por simples exposição ao ar depende da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar. O laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília apresenta pouca variação de temperatura, tanto para o período diário quanto para o período anual. Já a umidade relativa do ar sofre maiores variações devido ao próprio clima do local.

Os ensaios para a obtenção dos teores de umidade higroscópica foram feitos simultaneamente para todas as amostras, visando a sua determinação sob as mesmas condições. As amostras foram secas ao ar durante uma semana até a estabilização do teor de umidade. As determinações foram feitas no mês de março, sob uma temperatura ambiente de 25 °C, para uma umidade relativa do ar de 75 %. A evolução dos teores de umidade com a profundidade para cada erosão estudada é mostrada na Figura 5.1.

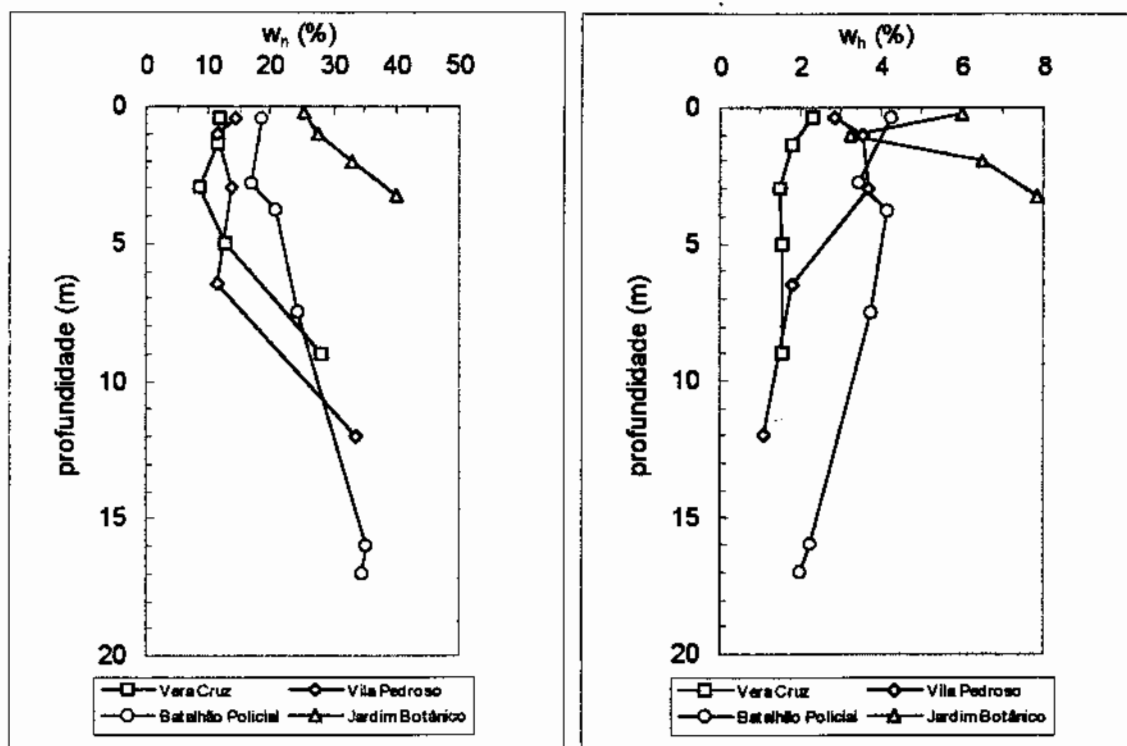


Figura 5.1 - Variação dos teores de umidade natural (w_n) e umidade higroscópica (w_h)

A análise da Figura 5.1 mostra, de um modo geral, um decréscimo da umidade natural nos horizontes concrecionários em relação aos horizontes superficiais. Já nos horizontes inferiores, na medida que se aprofunda no perfil, ocorre um aumento substancial nos valores de umidade natural devido a maior proximidade com o lençol freático. Destaca-se ainda que para

os perfis estudados, tanto w_n como w_h apresentam uma mudança de comportamento a partir da profundidade aproximada de 3 metros. Tal mudança coincide, a grosso modo, com a passagem dos horizontes lateríticos bastante intemperizados para os horizontes inferiores menos alterados.

5.3.2 Peso Específico

A Figura 5.2 apresenta as variações do peso específico aparente seco e do peso específico dos sólidos com a profundidade.

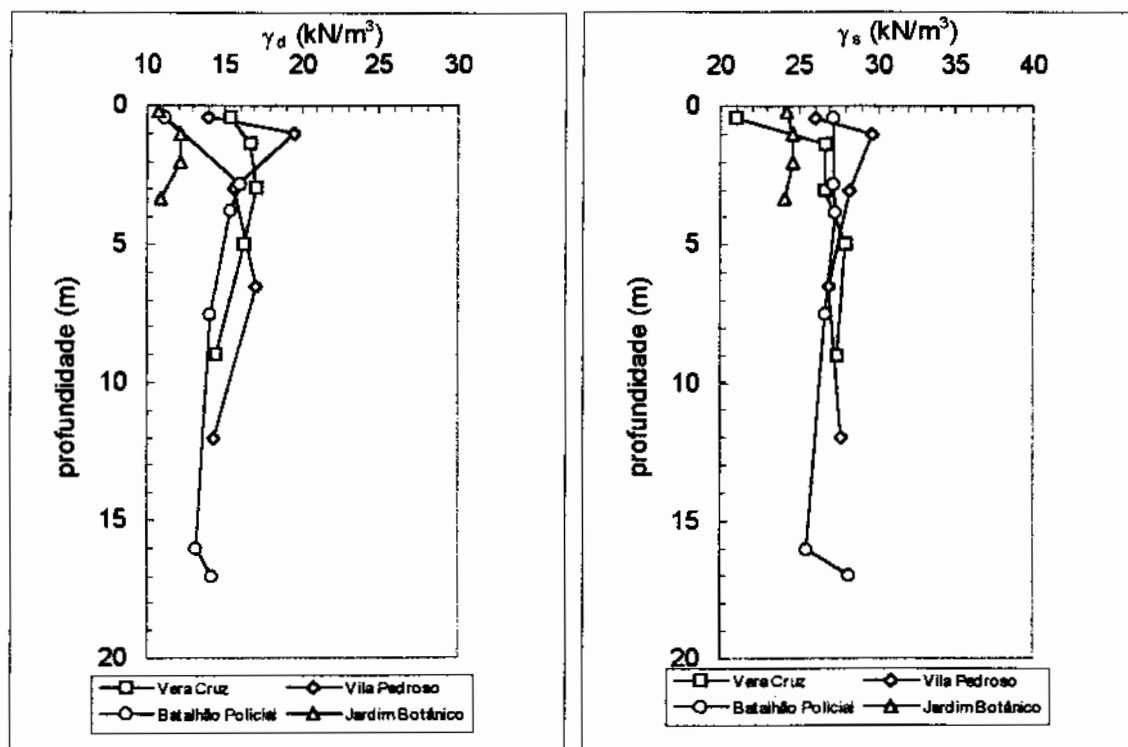


Figura 5.2 - Variação do peso específico aparente seco (γ_d) e peso específico dos sólidos (γ_s)

Observa-se para os solos lateríticos da Vila Pedrosa, um aumento do peso específico aparente seco nos níveis concrecionários. Isto ocorre devido ao enriquecimento em hematita verificado neste nível, conforme observado na Figura 4.11. No caso da voçoroca do Batalhão da Polícia, além do aumento da quantidade de hematita e goethita nos horizontes concrecionários, que poderia levar a um aumento do peso específico aparente seco, ocorre também um aumento na quantidade de caulinita, mineral onde a baixa massa específica conduz a valores medianos de peso específico.

Já o peso específico dos sólidos representa a média da massa específica dos constituintes que compõem a fase sólida do solo, incluindo minerais, compostos orgânicos, sais

precipitados e materiais não cristalinos. A massa específica dos minerais identificados nas erosões estudadas é mostrada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Massa Específica dos minerais identificados (modificado - Deer, 1981)

Mineral	ρ (Kg/m ³)	Mineral	ρ (Kg/m ³)
quartzo	2,65	gibbsita	2,4
muscovita	2,7 - 3,1	goethita	4,3
caulinita	2,61 - 2,68	hematita	5,27
illita	2,60 - 2,86	maghemita	5,2
montmorillonita	2,75 - 2,78	rutilo	4,23 - 5,5
		anatásio	3,82 - 3,97

Observa-se para a erosão do Jardim Botânico baixos valores de peso específico dos sólidos devido à elevada quantidade de matéria orgânica presente nestes solos. Observação semelhante pode ser feita para os horizontes superficiais das erosões do Conjunto Vera Cruz e da Vila Pedroso. Na erosão da Vila Pedroso, o horizonte concrecionário existente fica evidenciado por maiores valores de γ_s devido à maior presença de goethita e hematita.

Para a erosão do Batalhão Policial observa-se nos horizontes inferiores um aumento do peso específico na passagem da porção caulinitica (16 metros) para o horizonte inferior, rico em goethita e hematita, aumento este devido a diferença no peso específico destes minerais.

5.3.3 Limites de Atterberg

A metodologia empregada consistiu na realização em primeiro lugar dos ensaios de limite de liquidez pelo Método de Casagrande. Em seguida a mesma amostra era secada na placa de vidro para a realização dos ensaios de limite de plasticidade.

Os Limites de Atterberg são características importantes, pois relacionam-se diretamente com as características de compressibilidade, permeabilidade e resistência dos solos coesivos.

Gidigasu (1976) cita os seguintes fatores como influentes na plasticidade dos solos:

- natureza dos minerais: os minerais que apresentam maior plasticidade são aqueles de formato lamelar ou em placas ao passo que minerais como o quartzo e o feldspato, mesmo quando em tamanho muito pequeno, não apresentam plasticidade;

- porcentagem da fração argila: quanto maior a quantidade de argila, maior a plasticidade do solo;
- natureza dos cátions trocáveis: minerais que apresentam alta plasticidade (ex: montmorillonita) sofrem mais influência do tipo de cátion adsorvido do que minerais com baixa plasticidade (ex: caulinita);
- conteúdo de matéria orgânica: a presença de matéria orgânica altera os limites de plasticidade, porém sem alterar o índice de plasticidade.

Mitchell (1993) cita os valores de plasticidade mais comuns para os diferentes argilo-minerais (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Limites de Atterberg para argilo-minerais (modificado - Mitchell, 1993)

Mineral	w_l (%)	w_p (%)
montmorillonita	100-900	50-100
illita	60-120	35-60
caulinita	30-110	25-40

Analisando a tabela, o autor cita os seguintes fatos:

- para cada argilo-mineral a variação nos limites de liquidez é maior do que a variação nos limites de plasticidade;
- a variação no limites de liquidez entre diferentes argilo-minerais é muito maior do que a variação nos limites de plasticidade.

Os gráficos com as variações dos valores dos limites de Atterberg e dos índices de plasticidade com a profundidade são mostrados nas Figuras 5.3 e 5.4. As maiores variações ocorrem nos valores do limite de liquidez, confirmando as observações de Mitchell (1993). Os maiores valores de índice de plasticidade coincidem com as amostras onde é verificada a presença de montmorillonita, mineral que confere um comportamento plástico ao material.

Também aqui, fica evidente a mudança de comportamento verificada próximo aos 3 metros de profundidade devido à passagem de um horizonte mais intemperizado para outro menos alterado.

Apesar de mostrar um valor relativamente alto para o índice de plasticidade, a amostra VP-5 não apresenta plasticidade. Cozzolino & Nogami (1993) citam que a presença de micas na granulometria areia tem efeito significativo na diminuição do I_p . Tal fato pode explicar a não plasticidade da amostra em questão, já que a análise visual desta amostra revela uma certa

quantidade de minerais micáceos (illita), principalmente abaixo de 0,850 mm, conforme observado na análise granulométrica.

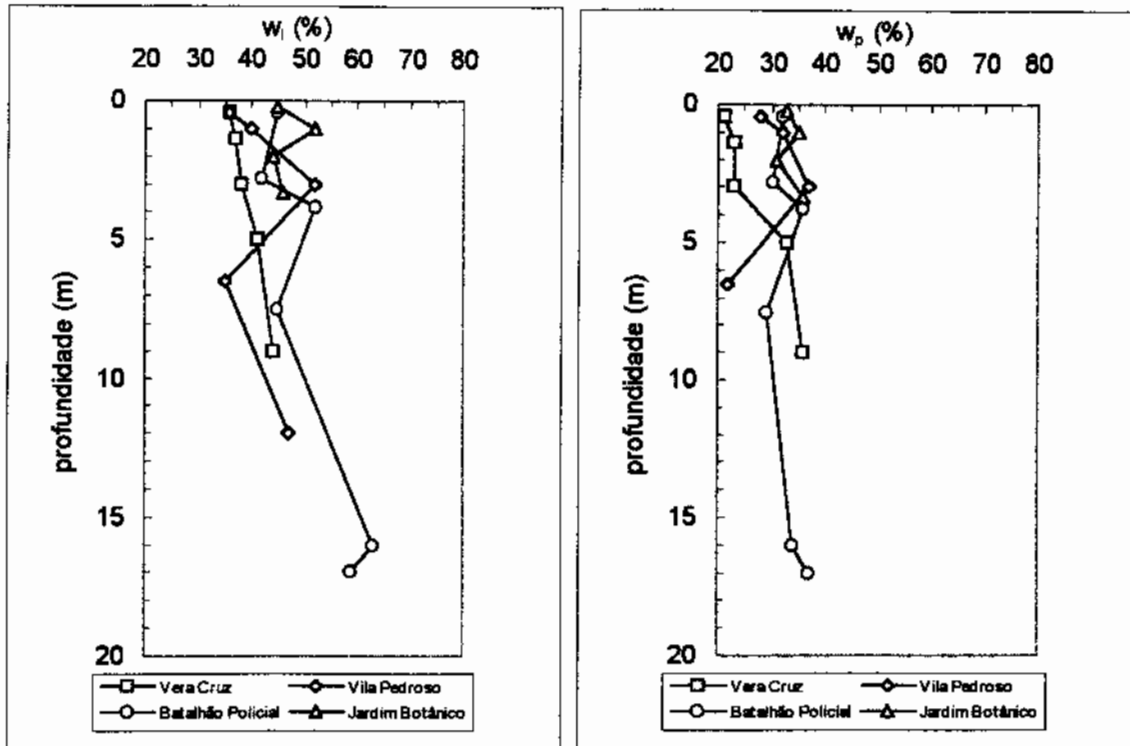


Figura 5.3 - Variação dos limites de liquidez (w_l) e plasticidade (w_p) com a profundidade

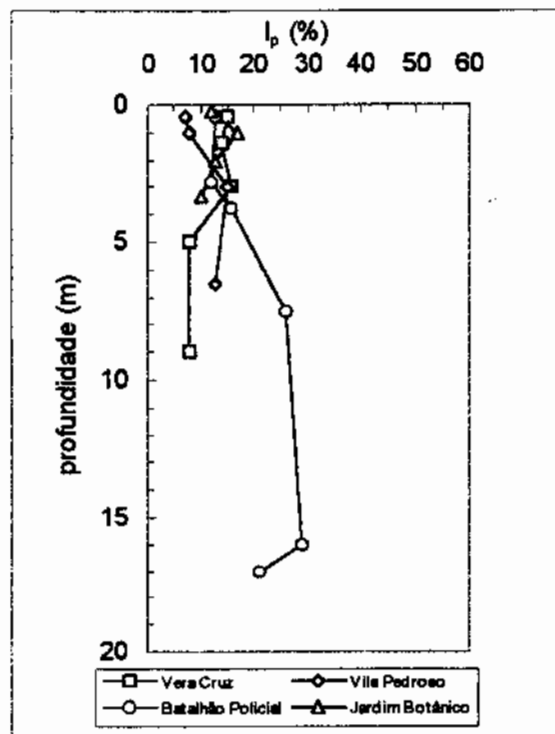


Figura 5.4 - Variação do índice de plasticidade (I_p) com a profundidade

5.3.4 Índice de Vazios e Grau de Saturação

A Figura 5.5 mostra a evolução dos índices de vazios e do grau de saturação com a profundidade para as erosões analisadas.

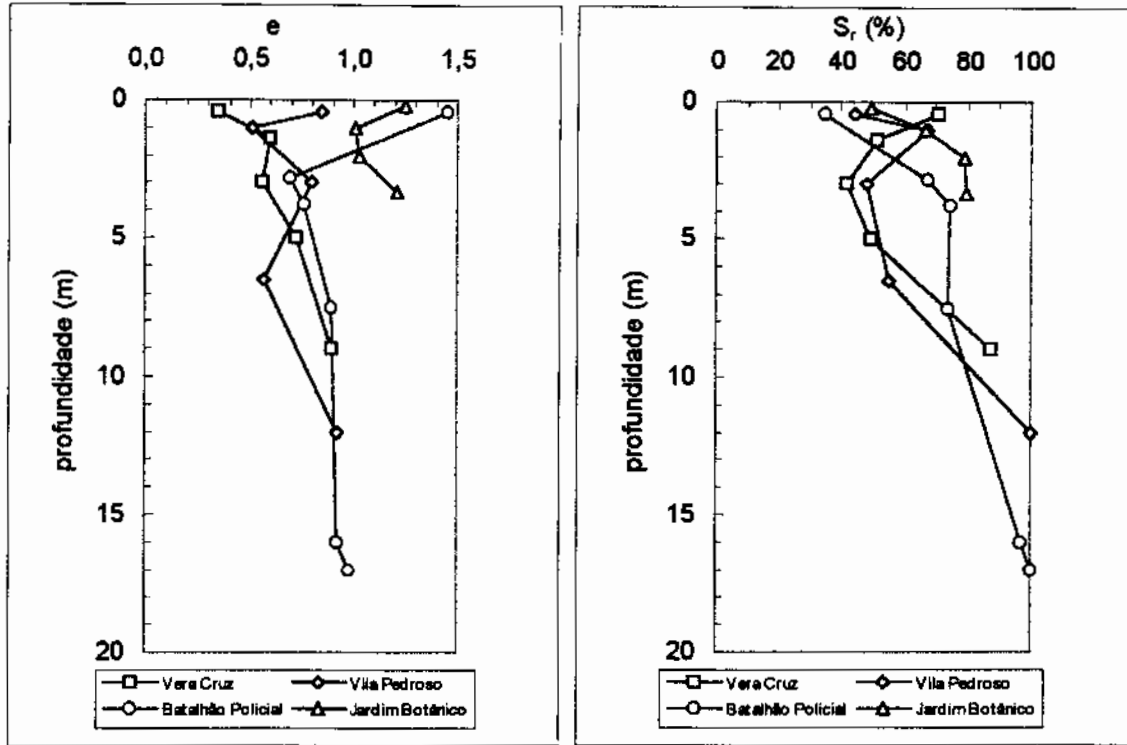


Figura 5.5 - Variação do índice de vazios (e) e do grau de saturação (S_r)

A análise destas figuras mostra valores altos de índices de vazios próximos à superfície e valores mais baixos nos horizontes concrecionários. A exceção é o horizonte superficial da erosão do Conjunto Vera Cruz onde o baixo valor do índice de vazios apresentado deve-se provavelmente a atividade agrícola que gerou compactação do solo no local. Observa-se também que o comportamento das curvas que representam a evolução do índice de vazios com a profundidade é o inverso do comportamento apresentado pelo peso específico aparente seco (Figura 5.2), evidenciando a relação existente entre estas propriedades.

Gidigasu (1976) mostra que os processos de lixiviação geram um aumento na porosidade o que explica em parte os altos valores dos índices de vazios nos horizontes superficiais ao passo que nos horizontes concrecionários, onde há acumulação de material, este valor diminui. Porém a atividade biológica de plantas e animais pode gerar um aumento no índice de vazios

No caso da erosão do Jardim Botânico, os valores mais altos dos índices de vazios são devido a origem geológica destes solos onde a deposição dos sedimentos por processos aluvionares ocorreu sem uma compactação significativa.

Com relação ao grau de saturação, observa-se para os horizontes inferiores um aumento dos seus valores com a profundidade devido a maior proximidade com o lençol freático. Já nos horizontes superficiais, observa-se para alguns locais um aumento do grau de saturação próximo à superfície, fato comum nos períodos chuvosos. Mortari (1994) atribui este aumento à formação de uma frente úmida pela água de chuva que eleva a umidade do solo muitas vezes sem chegar a saturá-lo. Mais uma vez, fica bastante evidente a mudança de comportamento ocorrida em torno de 3 metros de profundidade.

5.3.5 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada conforme proposta de Camapum de Carvalho *et al.* (1996) que sugere algumas modificações em relação à norma NBR 7181/1984 da ABNT.

A metodologia consiste inicialmente na lavagem do solo na peneira nº 100 (0,150 mm de abertura), onde o material retido é seco e levado para o peneiramento. Já o material que passa pela peneira nº 100 é decantado, seco e destorroado para a utilização no ensaio de sedimentação. O ensaio de sedimentação é realizado conforme a norma da ABNT, NBR 7181/1984.

Desta forma, procurou-se minimizar a ocorrência de descontinuidades nas curvas granulométricas, fato bastante comum em solos lateríticos analisados conforme a norma.

Nogami & Villibor (1980), citados por Mortari (1994), atribuem as descontinuidades apresentadas pela curva granulométrica ao uso de defloculante que destrói os aglomerados presentes no solo.

Camapum de Carvalho *et al.* (1996) mostram que as curvas granulométricas obtidas segundo as normas da ABNT revelam descontinuidades entre os resultados da sedimentação e as frações correspondentes ao peneiramento fino. Entende-se que estas descontinuidades podem ser devidas não só à lavagem do material mas também devido ao efeito do defloculante sobre os argilo-minerais presentes em algumas concreções.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de granulometria são mostrados sob a forma da variação percentual das frações granulométricas com a profundidade (Figuras 5.6 e 5.7) e sob a forma de curvas de distribuição granulométrica (Figura 5.8).

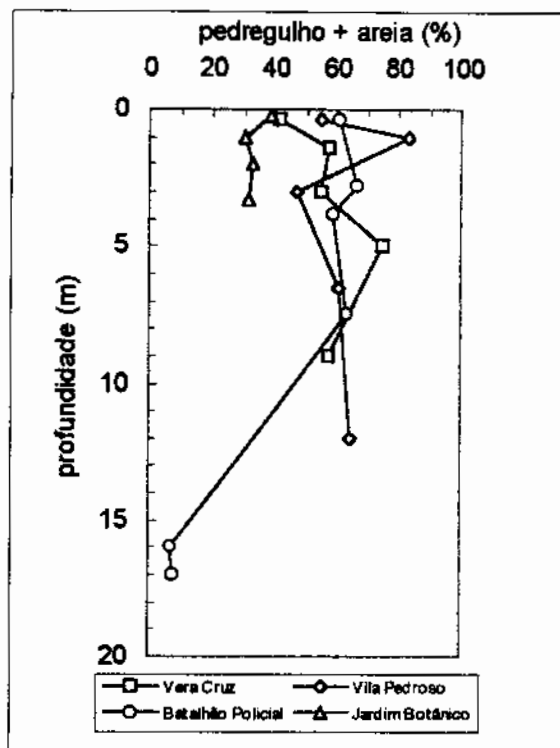


Figura 5.6 - Variação das frações pedregulho e areia com a profundidade

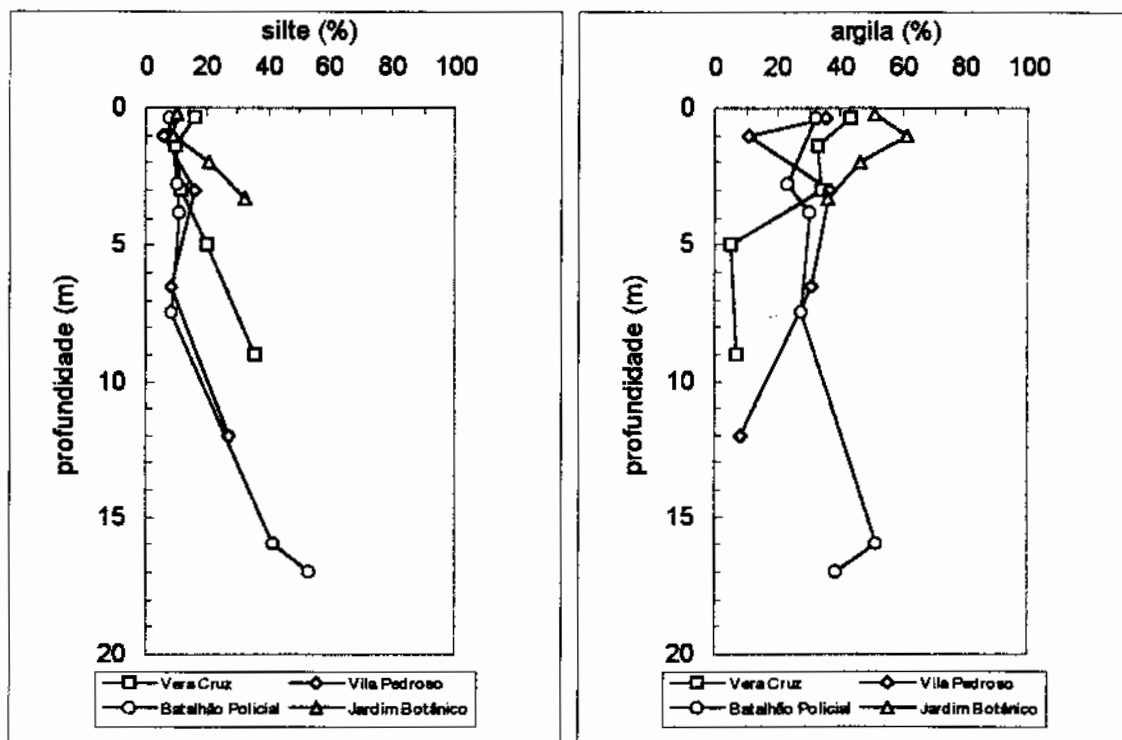


Figura 5.7 - Variação da fração silte e da fração argila com a profundidade

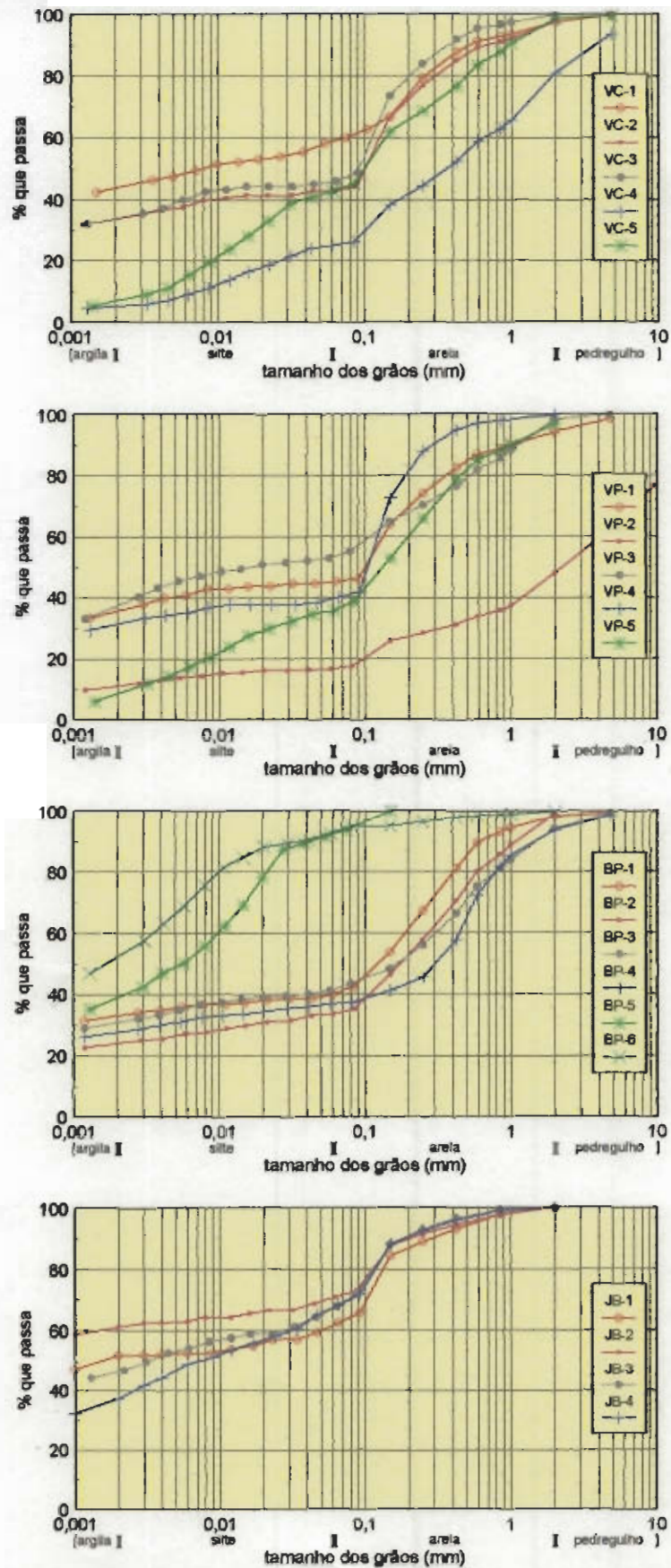


Figura 5.8 - Resultados dos ensaios granulométricos com o uso de defloculante

As curvas granulométricas obtidas mostram um comportamento bastante semelhante revelando uma uniformidade granulométrica ao longo dos perfis analisados. Porém algumas observações podem ser feitas.

- Para a erosão do Conjunto Vera Cruz, observa-se uma menor quantidade da fração argila nos horizontes inferiores, possivelmente devido à presença de cristais maiores de muscovita que nos horizontes superiores se alterou para minerais argilosos de menor diâmetro efetivo. Este fato também ocorre na erosão da Vila Pedroso.
- Ainda nas curvas granulométricas da erosão da Vila Pedroso pode-se destacar bem a curva relativa à amostra VP-2 , que representa o horizonte concrecionário endurecido com elevada quantidade de partículas no tamanho pedregulho.
- Com relação à erosão do Batalhão Policial, observa-se um incremento de material fino nos horizontes inferiores, possivelmente devido a diferenças na composição original da rocha que deu origem a estes horizontes.

Conclui-se que a metodologia empregada para a análise granulométrica produz resultados satisfatórios pois as descontinuidades na curva granulométrica não se manifestam, ou o fazem de forma bastante tênue, mostrando que o efeito desagregador da lavagem do solo torna-se bastante reduzido quando se utiliza a metodologia proposta por Camapum de Carvalho *et al.* (1996).

Visando observar a influência do meio dispersor na desagregação dos solos, as amostras foram submetidas a ensaios de sedimentação sem o uso de defloculante cujos resultados são mostrados na Figura 5.9. Os seguintes comentários podem ser traçados da análise desta figura.

- A redução da fração argila é expressiva para todas as amostras analisadas. Apenas os horizontes superiores de cada perfil de alteração apresentam uma certa quantidade de fração argila. Estes valores maiores podem ser devidos à presença de material orgânico nesta fração granulométrica ou mesmo à presença de argilo-minerais dispersados pela própria existência do material orgânico.
- Com relação às descontinuidades presentes nas curvas granulométricas obtidas com o uso de defloculante, observa-se que estas não sofrem modificações muito importantes quando não se usa o defloculante (por exemplo, nas amostras VP-4, BP-1, JB-3 e JB-4). Recomenda-se desta forma o uso da metodologia proposta por Camapum de Carvalho *et al.* (1996) para a realização de ensaios granulométricos, já que esta fornece curvas mais contínuas e representativas.

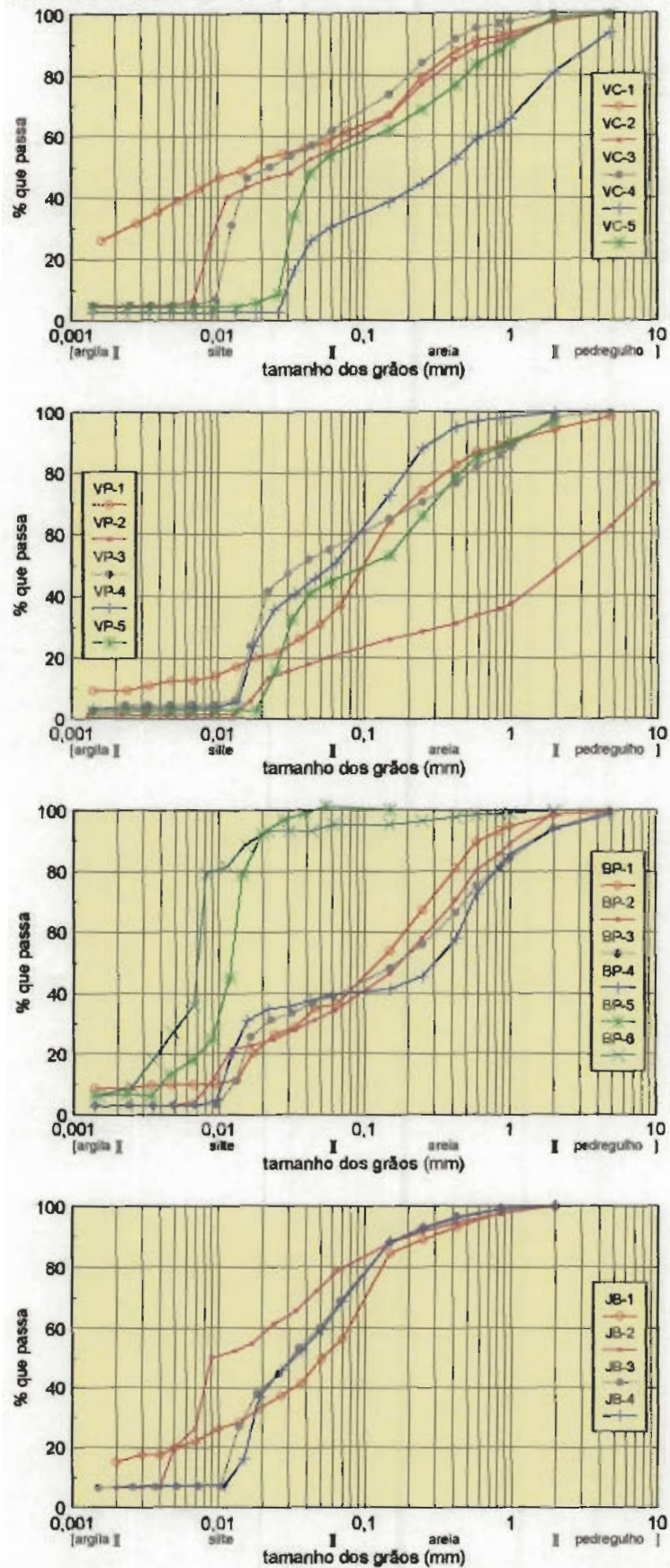


Figura 5.9 - Resultados dos ensaios granulométricos sem o uso de defloculante

- Com relação às discontinuidades que normalmente são verificadas na passagem do peneiramento para a sedimentação, em 0,150 mm, observa-se que elas praticamente inexistem nos ensaios sem o uso de defloculante, o que mostra que este problema está ligado às variações nos níveis de agregação. Observa-se porém que ocorrem discontinuidades entre 0,007 e 0,04 mm devido a presença de microconcreções preservadas de tamanho silte.

Uma melhor visualização das discontinuidades existentes na curva granulométrica pode ser obtida plotando-se o gráfico da quantidade não acumulada de material retido pelo diâmetro das partículas, conforme pode ser observado nas Figuras 5.10 e 5.11. Neste tipo de gráfico, as discontinuidades aparecem sob a forma de picos, revelando as frações granulométricas predominantes. Os picos que ocorrem entre 0,07 e 1 mm correspondem a presença de quartzo e de pequenos nódulos de cor marrom-avermelhada, conforme observado na análise visual do material submetido ao peneiramento. Com relação a fração silte, observa-se o surgimento de picos nas amostras ensaiadas sem o uso de defloculante, podendo serem feitas as seguintes observações:

- a exceção da amostra BP-1, os picos não ocorrem para as camadas superficiais, provavelmente devido à presença de matéria orgânica que atua como agente inibidor de agregações estáveis;
- para as amostras do Conjunto Vera Cruz (VC) e do Jardim Botânico (JB), ocorre uma tendência deste pico ocorrer em granulometrias maiores, na medida que se aprofunda no perfil de alteração. Já para as voçorocas da Vila Pedroso (VP) e do Batalhão de Polícia (BP), a granulometria dos picos se situam entre 0,01 e 0,03 mm e 0,004 e 0,02 mm, respectivamente, sem que ocorra alguma tendência de variação com a profundidade.

Atribui-se a existência dos picos verificados nos ensaios sem defloculante ao processo de aglutinação de partículas. Estas partículas são desagregadas quando se faz o uso de defloculante obtendo-se gráficos com curvas mais suaves para estas condições. Herbillon & Nahon (1988) afirmam que, nos horizontes ricos em caulinita, estes minerais ocorrem sob a forma de pequenos aglomerados, chamados de "livros", cujo tamanho pode variar entre 0,001 e 0,1 mm. Estes aglomerados podem ser substituídos epigeneticamente por óxidos de ferro formando os nódulos ferruginosos presentes nos solos lateríticos. Deste modo, pode-se explicar a existência dos picos não só nos horizontes superiores, ricos em óxidos de ferro e alumínio, como também nos horizontes inferiores, onde a quantidade de caulinita é alta.

Os picos existentes nas amostras do Jardim Botânico constituem-se de gibbsita e caulinita. Análises mineralógicas por difratometria de raios X realizadas para a fração areia (> 0,150 mm) da amostra JB-4, indicam a presença de agregados de gibbsita e caulinita, minerais que normalmente só ocorrem na fração mais fina do solo. Quando defloculada, ocorre uma segregação mineralógica na qual a gibbsita e a caulinita irão se concentrar nas frações mais finas (argila) e o quartzo nas frações mais grosseiras (silte).

É importante destacar que mesmo com a utilização de defloculante, muitas agregações se mantêm estáveis, conforme mostrado por Camapum de Carvalho et al. (1996) em estudos de solos do Distrito Federal.

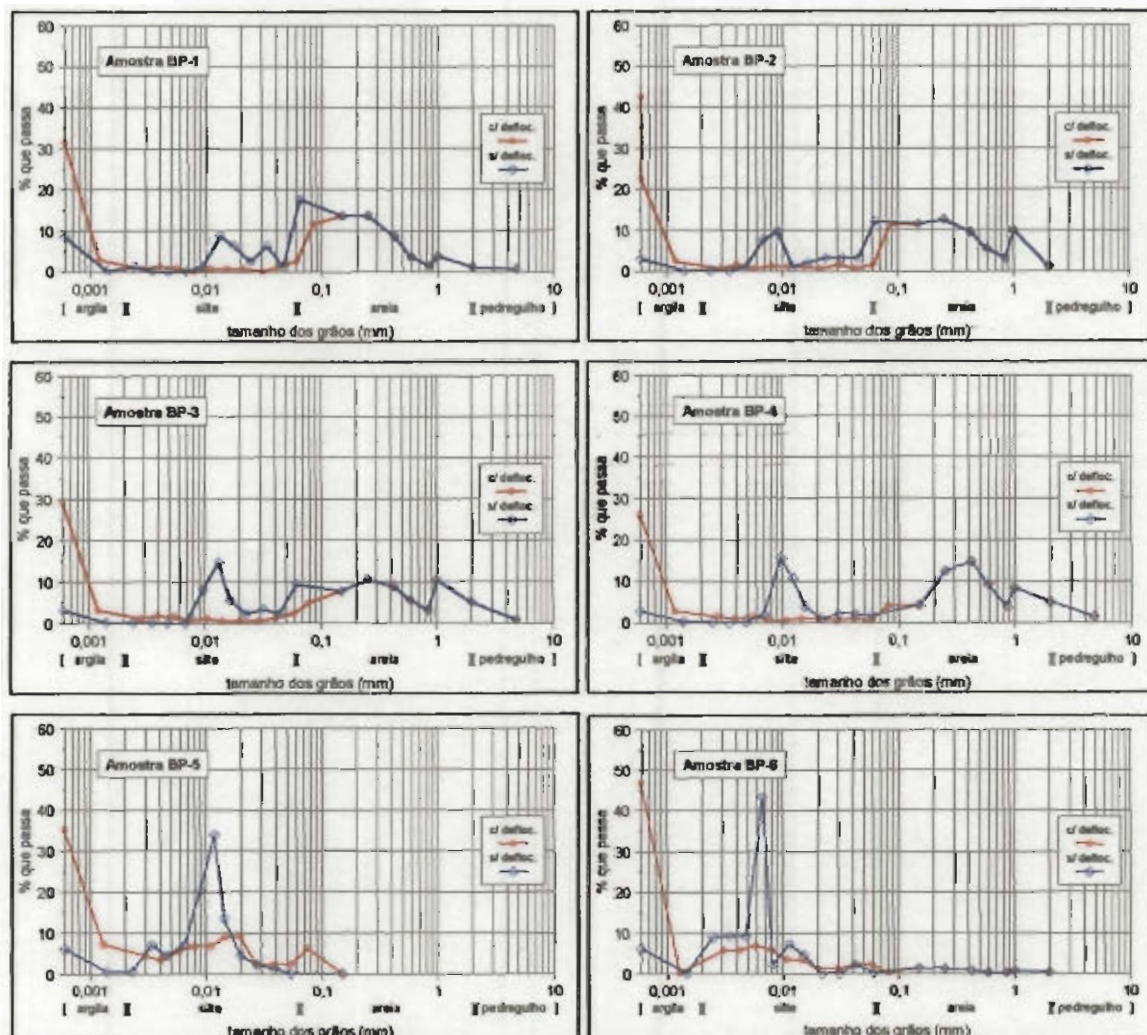


Figura 5.10 - Distribuição granulométrica das amostras analisadas

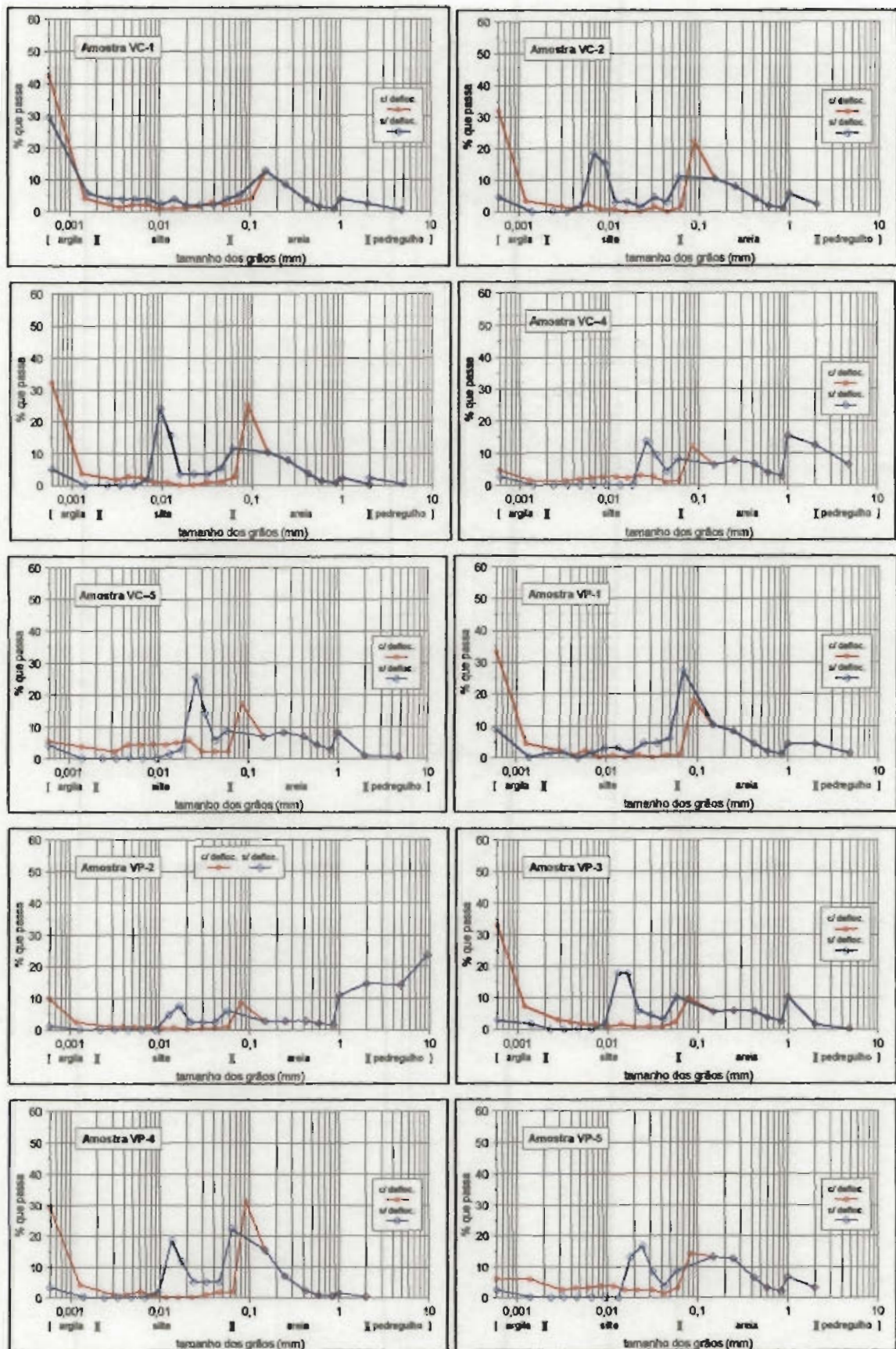


Figura 5.11 - Distribuição granulométrica das amostras analisadas (continuação)

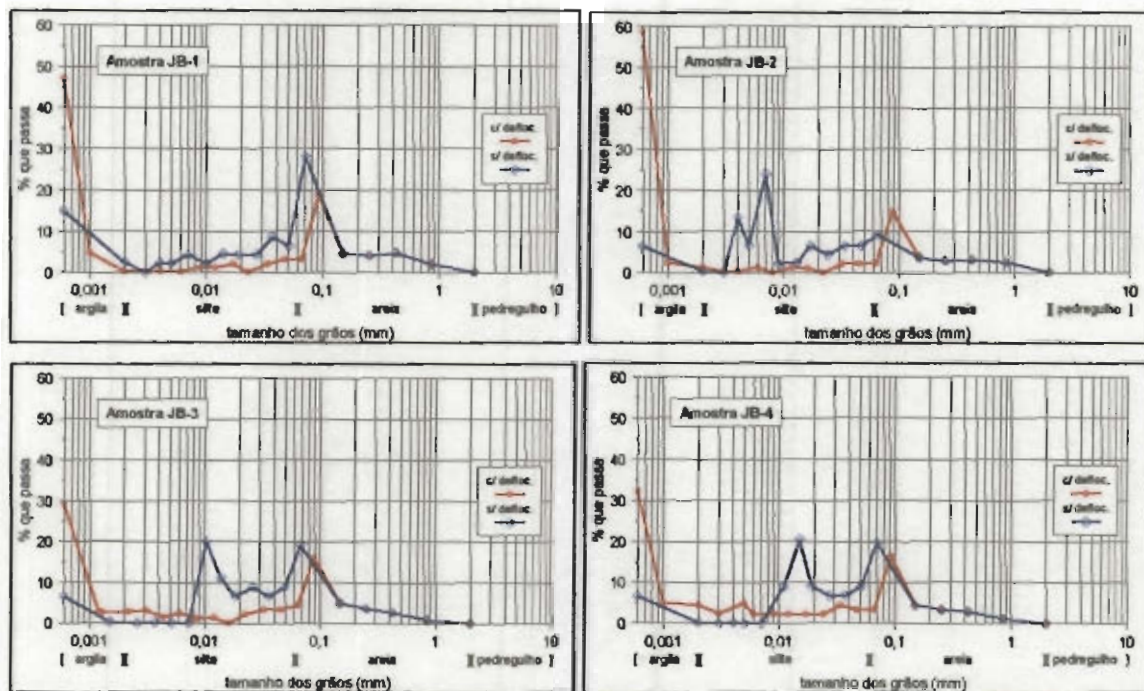


Figura 5.12 - Distribuição granulométrica das amostras analisadas (continuação)

5.3.6 Índice de Atividade

Os Limites de Atterberg refletem a influência dos argilo-minerais nas propriedades do solo independente do tipo e da quantidade dos argilo-minerais presentes. Mitchell (1993) cita que, para separar a influência destes dois fatores, Skempton (1953) propôs o termo índice de atividade que é definido como sendo a razão entre o índice de plasticidade e a fração tamanho argila (menor que 0,002 mm). Quanto maior a atividade, maior a influência da fração argila nas propriedades do solo.

Cozzolino & Nogami (1993) citam que a presença de minerais micáceos na fração silte imprime um comportamento peculiar ao solo, aumentando a plasticidade e tornando discutíveis os resultados apresentados segundo a proposta de Skempton.

Os resultados obtidos a partir das amostras ensaiadas (Figura 5.13) revelam que elas são na maioria inativas ($I_a < 0,75$), com exceção das amostras BP-4 e VC-5 que mostram atividade normal ($0,75 < I_a < 1,25$) e da amostra VC-4 que apresenta atividade ($I_a > 1,25$).

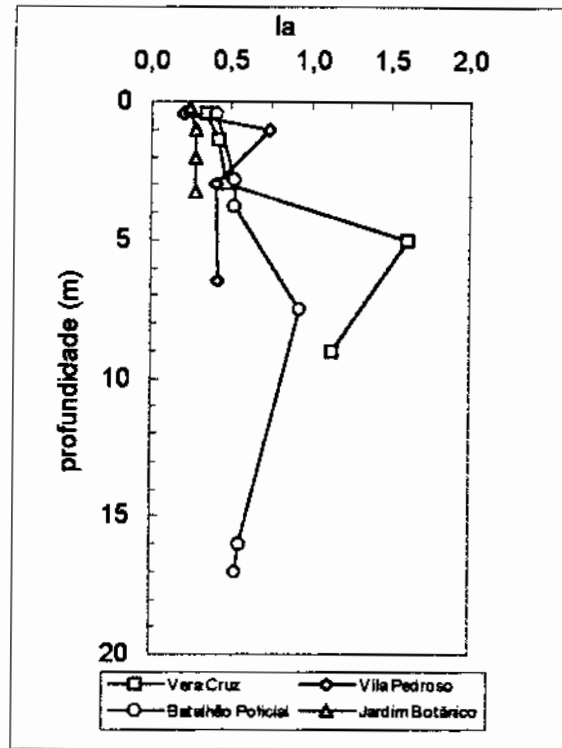


Figura 5.13 - Variação do índice de atividade (Ia) com a profundidade

5.3.7 Correlações Entre os Índices Físicos Obtidos

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização permitem o estabelecimento de correlações dos teores de umidade higroscópica com os demais índices físicos obtidos. As Figuras 5.14 apresenta estas correlações.

Para a confecção destes gráficos utilizaram-se apenas os resultados relativos às amostras representantes dos horizontes superiores dos perfis analisados (classificados nos ítem 4.4 como solos orgânicos, solos lateríticos e solos saprolíticos). As amostras representantes dos horizontes inferiores (classificadas como saprólitos ou rochas muito alteradas), onde as características distintas de cada substrato geológico são melhor preservadas e geravam uma grande dispersão dos dados, não foram incluídas nos gráficos das correlações.

O maior valor obtido para o coeficiente de correlação (R^2) refere-se ao gráfico da umidade natural versus umidade higroscópica (Figura 5.14). Conclui-se que para os horizontes superiores, foco das correlações, os teores de umidade variam somente em função das características do material, não sofrendo influência da proximidade do lençol freático.

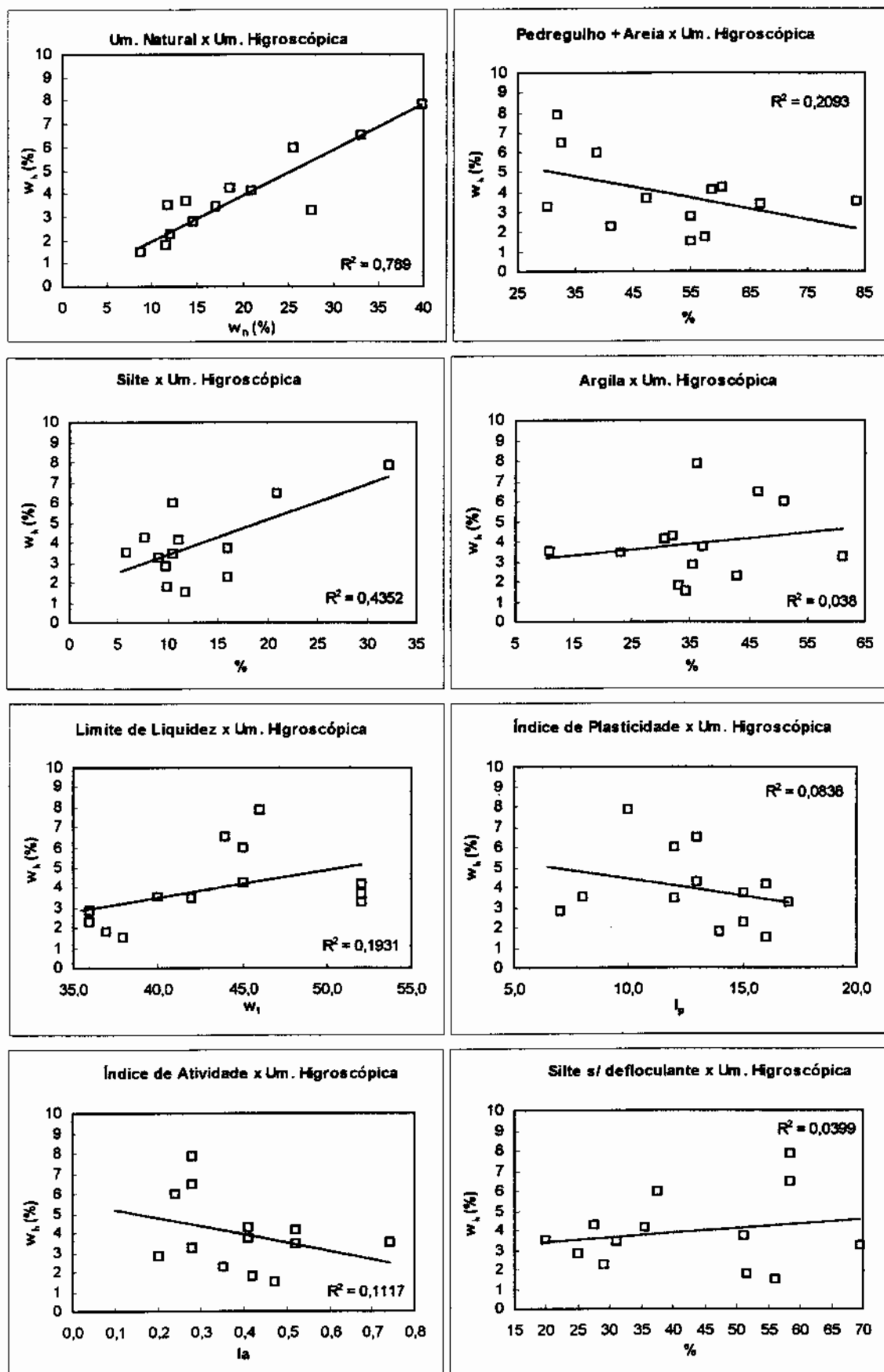


Figura 5.14 - Correlações entre as principais propriedades físicas

As correlações entre as frações granulométricas e a umidade higroscópica refletem o comportamento esperado. A percentagem da fração pedregulho + areia é inversamente proporcional ao teor de umidade higroscópica, reflexo da própria constituição mineralógica desta fração, sempre rica em quartzo, que não favorece a retenção de água. Já nos constituintes da fração mais fina (argila e silte), a relação é diretamente proporcional.

Os valores do limite de liquidez aumentam proporcionalmente aos teores de umidade higroscópica, como conseqüência da própria quantidade de finos do material. Porém esta relação de proporcionalidade não é observada no gráfico do índice de plasticidade versus umidade higroscópica.

Supõe-se que, nos casos dos ensaios de plasticidade, os micro-agregados presentes nos solos lateríticos possuem condições particulares de umidade em seu interior, fazendo com que os valores dos teores de umidade obtidos nestes ensaios não sejam efetivamente aqueles presentes no momento dos ensaios. Como reflexo, a variação dos valores dos índices de atividade em relação à umidade higroscópica também apresenta uma tendência diferente da esperada. Além disso, a presença destes micro-agregados confere uma característica mais siltosa ao solo, alterando sua plasticidade.

O gráfico da quantidade de silte, obtida sem o uso de defloculante, versus umidade higroscópica mostra que a presença de micro-agregados, não destruídos neste tipo de ensaio gera uma maior dispersão dos valores em relação a linha de tendência do comportamento.

5.4 CONCLUSÕES

Embora desenvolvidos sobre substratos geológicos diversos, os perfis de alteração estudados não apresentam propriedades físicas substancialmente diferentes que permitam o estabelecimento de domínios distintos. Esta tendência também é observada na análise da composição mineralógica que, de um modo geral, também mostra-se bastante uniforme, principalmente nos horizontes superiores (Figuras 4.9 a 4.11). Pode-se supor então que os processos pedogenéticos que levam à formação destes perfis de intemperismo tendem a homogeneizar algumas de suas características físicas independente da rocha de origem.

Os ensaios granulométricos realizados conforme a proposta de Camapum de Carvalho *et al.* (1996) apresentam curvas de distribuição granulométrica bastante suaves que representam de maneira satisfatória os constituintes dos solos em estudo.

Os ensaios realizados sem o uso de defloculante constituem-se, para os solos estudados, numa maneira simples de se determinar as frações granulométricas onde ocorrem

agregações dos constituintes. Estes agregados ocorrem essencialmente na fração silte e necessitam de um estudo micromorfológico para uma melhor caracterização da sua mineralogia e estrutura.

O processo de homogeneização das características geotécnicas dos horizontes superiores pela pedogênese fica evidenciado ao se estabelecerem correlações entre os índices físicos dos solos. As correlações só mostram uma tendência definida de comportamento quando se analisam apenas os horizontes superiores do perfil de alteração. Estas correlações são as vezes prejudicadas pela presença de agregados. Estes agregados encontram-se preservados durante os ensaios de plasticidade, conferindo características siltosas aos solos, ao passo que, nos ensaios de sedimentação, são destruídos pelo uso de defloculante, conferindo-lhes características argilosas.

Com relação ao potencial de perda de solo dos horizontes analisados torna-se difícil o estabelecimento de uma relação direta entre as propriedades físicas estudadas neste Capítulo e a susceptibilidade à erosão, já que as características geotécnicas do solo não são capazes isoladamente de identificar a erodibilidade dos solos estudados.

Fácio (1991), após o estudo de modelos lineares múltiplos que relacionam perda de solo com granulometria, grau de laterização e ensaios de caracterizações físico-químicas, conclui ser difícil o estabelecimento de correlações para solos que apresentem elevada gama de parâmetros influentes no processo erosivo. Sugere então que seria mais importante o estudo da influência de cada parâmetro em condições específicas de modo a se obter um modelo global do comportamento do solo frente a um esforço erosivo.

6. ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

6.1 INTRODUÇÃO

Conforme já citado anteriormente, Fácio (1991) conclui que o uso de correlações entre a erodibilidade dos solos e suas características geotécnicas e físico-químicas é bastante difícil devido ao elevado número de parâmetros que interferem no processo erosivo.

Desta forma os ensaios de erodibilidade realizados, embora fornecendo dados quantitativos, buscaram o estabelecimento de um quadro comparativo da susceptibilidade à erosão dos diversos perfis analisados. Foram realizados ensaios de Pinhole, ensaios de Inderbitzen e ensaios de desagregação. Os resultados obtidos foram então confrontados às observações de campo e revelaram-se bastante compatíveis entre si.

6.2 ENSAIOS DE PINHOLE

6.2.1 Metodologia

Os ensaios de pinhole foram realizados nos laboratórios da Empresa Furnas Centrais Elétricas S. A., no município de Aparecida de Goiânia, Goiás e sua viabilização se deu através do Convênio de cooperação técnica existente entre esta Empresa e a Universidade de Brasília. Este ensaio é definido pela NBR 6502/1995 como "Ensaio de furo de agulha" e consiste em se fazer percolar água sob um gradiente hidráulico definido através de um furo de 1 mm de diâmetro que atravessa um corpo de prova cilíndrico (Figura 6.1).

A resistência à erosão é estimada pelo diâmetro final do furo, pela coloração da água que sai e pela vazão de percolação. Segundo Sherard *et al.* (1976a), o ensaio de Pinhole constitui-se no melhor teste para a identificação de argilas dispersivas quando comparados a outros de mesmo propósito.

Os ensaios foram realizados seguindo-se os procedimentos contidos no Projeto 02:004.02-022 (1996) da ABNT. Este projeto visa a normatização do ensaio de pinhole e propõe a adoção de uma metodologia baseada nos procedimentos descritos por Sherard *et al.* (1976b). Porém durante a realização dos ensaios adotaram-se algumas modificações com

relação a estes procedimentos visando melhor caracterizar o comportamento dos solos frente aos esforços erosivos.

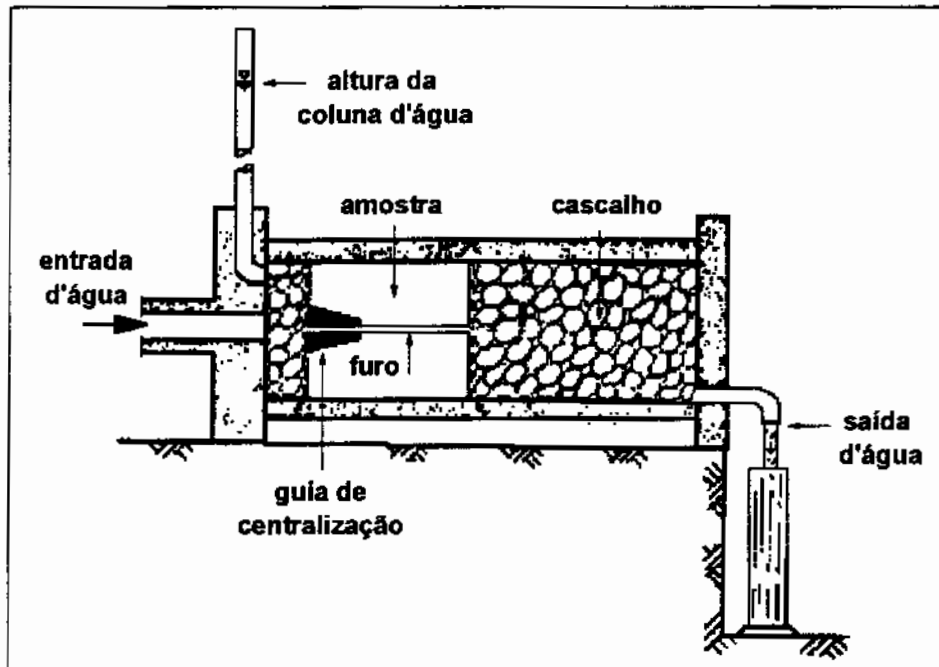


Figura 6.1 - Modelo esquemático do ensaio de Pinhole (modificado - Sherard *et al.*, 1976b)

Os ensaios foram realizados em amostras indeformadas obtidas a partir dos blocos retirados nas paredes das erosões estudadas. O tempo de saturação utilizado foi de um dia.

A amostra era montada no interior do aparelho e nela era colocada uma pressão de saturação mínima, sem fluxo, deixando-se aberta a saída de ar superior, iniciando-se o ensaio no dia seguinte. Após o ensaio eram determinados os teores de umidade e o grau de saturação das amostras.

Os ensaios iniciavam com a percolação de água durante 5 minutos sob uma carga hidráulica de 5 centímetros (em torno de 2 polegadas). O efluente era coletado, sendo observada a presença ou não de partículas ou turbidez. Media-se a vazão nos intervalos de 30 segundos, 2 e 4 minutos. Após 5 minutos de ensaio, a carga hidráulica era aumentada para 18, 40 e 102 cm (7, 15 e 40 polegadas, respectivamente) seguindo-se os mesmos procedimentos descritos.

Optou-se também pelo prosseguimento dos ensaios no sentido inverso, diminuindo-se progressivamente o gradiente hidráulico até as condições iniciais. Desta forma, um eventual alargamento do furo se faria sentir através de um aumento da vazão na fase de retorno, ou seja, para um mesmo gradiente hidráulico a vazão no processo de retorno seria maior, evidenciando a ocorrência do processo erosivo.

Apesar de originalmente proposto por Sherard et. al. (1976b) para avaliar a erosão em solos compactados de granulação fina, foram realizados também ensaios em solos com expressiva quantidade de material grossa (veja amostras VC-3 e VC-5, Tabela 5.1).

Um dos principais problemas da realização de ensaios de pinhole em amostras indeformadas consiste na moldagem dos corpos de prova. Construiu-se então um anel de cravação com o mesmo diâmetro interno do aparelho a fim de se evitar que o fluxo corresse pelas paredes internas do aparelho mascarando a medição dos valores de vazão.

Após moldada dentro do anel de cravação, a amostra era empurrada para o interior do aparelho com o uso de um êmbolo cilíndrico. Cravava-se a guia de centralização e fazia-se o furo a partir de seu interior.

6.2.2 Resultados

A análise dos resultados seguindo-se os procedimentos do Projeto 02:004.02-022 (1996) classifica todos os solos como ND1, ou seja, solos não erodíveis, onde o efluente é claro e a vazão sob a carga maior (102 cm) não excede 4,0 ml/s. Porém o fenômeno erosivo ocorre na amostra BP-6 (Batalhão Policial) onde a ocorrência de erosão interna é evidenciada pelo aumento expressivo do diâmetro dos furos conforme observado na Figura 6.2.

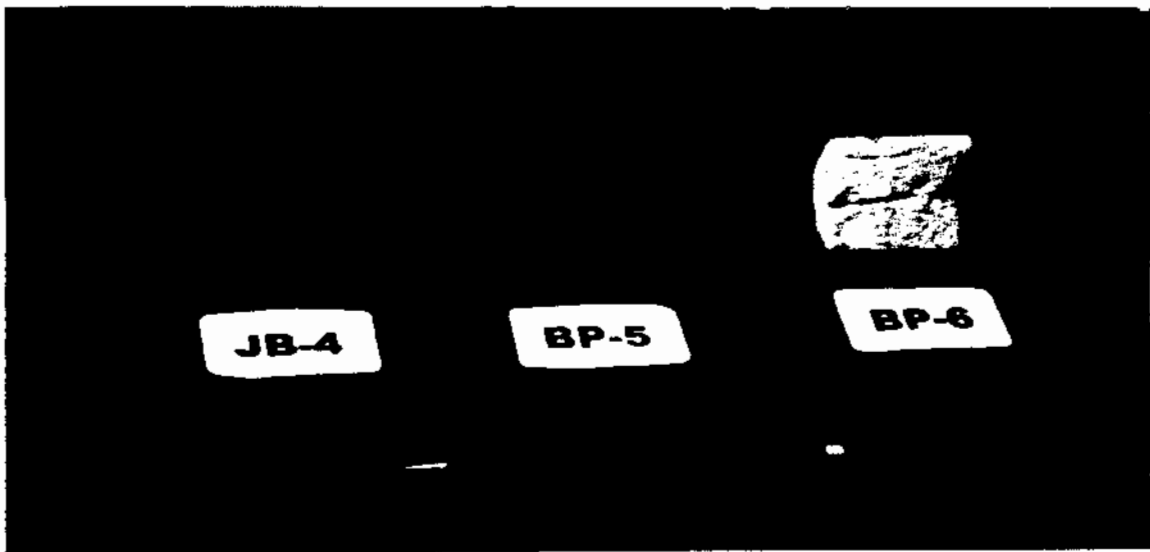


Figura 6.2 - Amostras submetidas ao ensaio de Pinhole. A concavidade na extremidade direita das amostras é devida a incisão da guia de centralização.

O furo da amostra BP-6 teve o seu diâmetro aumentado de 1 mm para até 3,9 mm em alguns pontos. Apesar disto o fluxo se manteve quase sempre claro. Apenas nas medições iniciais e quando da mudança de carga para 102 cm houve um ligeiro aumento da turbidez da

água, aumento este que cessava após alguns segundos. No final do ensaio constatou-se a presença de certa quantidade de sedimentos finos misturados ao cascalho colocado na saída do aparelho. Conclui-se então que ocorre erosão mecânica nas amostras BP-6 onde as condições de fluxo são suficientes para destacar e transportar partículas sem que ocorra o processo de dispersão.

Skempton & Borgan (1994), estudando o fenômeno de erosão interna (*piping*) em solos grosseiros de distribuição granulométrica bimodal, detectaram a ocorrência do fenômeno a níveis bastante baixos de gradiente hidráulico. Segundo estes autores, toda a sobrecarga de pressão efetiva atuante nestes solos se concentra nas partículas grossas. O material mais fino, submetido a tensões menores seria mais afetado pelo aumento da pressão neutra facilitando-se assim o seu transporte pelo fluxo hidráulico. Pode-se explicar assim a ocorrência de erosão interna nas amostras do Batalhão Policial (amostra BP-6, Figura 6.3). Supõe-se, neste caso, que ocorre em primeiro lugar o destacamento das partículas mais finas seguindo-se então o colapso e transporte do material mais grosso.

Os gráficos das Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 permitem uma boa visualização da ocorrência ou não do fenômeno erosivo. Quando plotados na escala aritmética, os gráficos de vazão x gradiente hidráulico para solos considerados não erodíveis apresentam uma curva de comportamento quase linear, com ligeira inflexão para baixo.

Já nos solos considerados erodíveis (amostras BP-6) ocorre uma inflexão bem marcante para cima a partir do momento em que a erosão começa a ocorrer. Ressalta-se aqui que as amostras BP-6 foram retiradas no mesmo local onde se observam evidências do fenômeno de *piping* (Figura 4.8), mostrando a boa correlação existente entre os resultados de laboratório e as observações de campo.

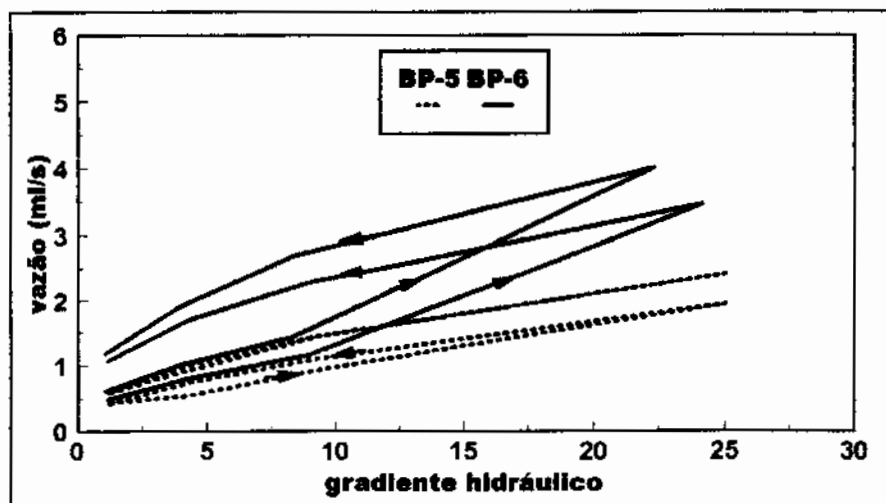


Figura 6.3 - Resultados dos ensaios de Pinhole para voçoroca do Batalhão Florestal de Policia

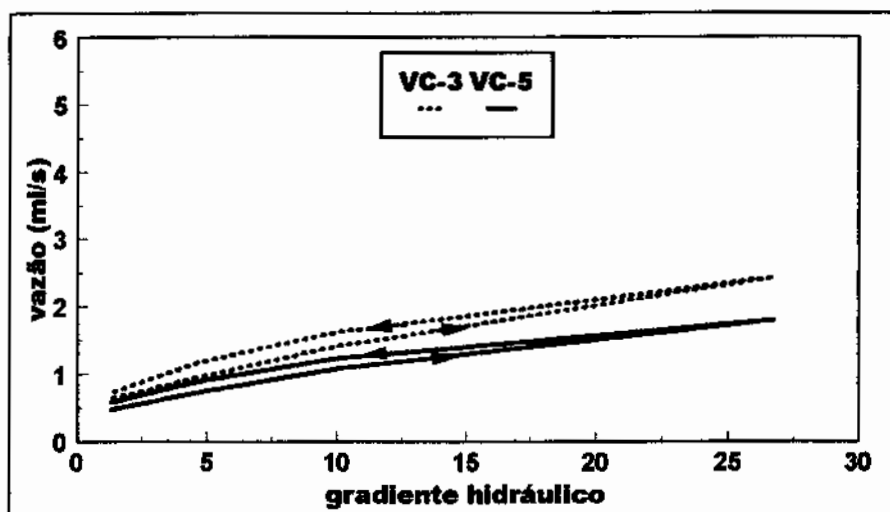


Figura 6.4 - Resultados dos ensaios de Pinhole para voçoroca do Conjunto Vera Cruz

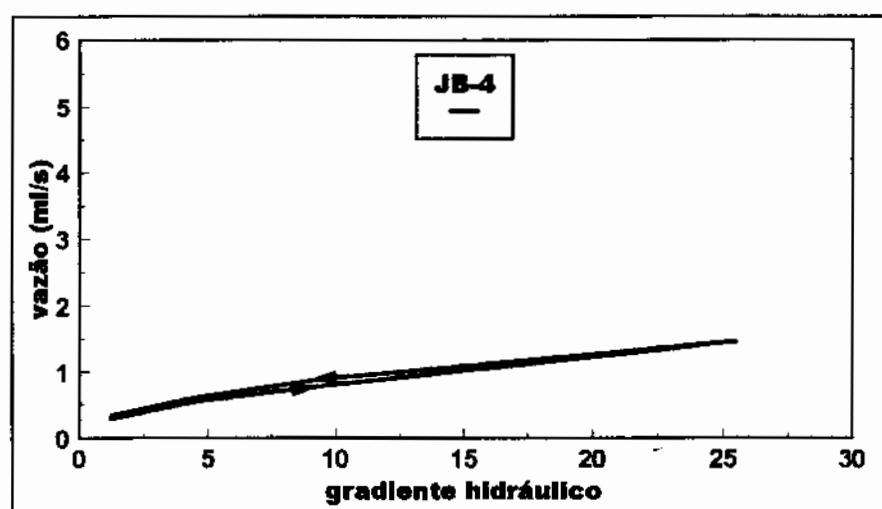


Figura 6.5 - Resultados dos ensaios de Pinhole para voçoroca do Jardim Botânico

Considerando-se a Lei de Darcy ($Q = k \cdot i \cdot a$) deveria-se esperar um comportamento linear para os gráficos de vazão (Q) versus gradiente hidráulico (i) relativos aos solos não erodíveis, já que a área da seção do furo (a) permanece constante ao longo do ensaio e o único fator modificado pelo operador é o gradiente hidráulico.

Observa-se porém para estes solos que os gráficos apresentam uma ligeira inflexão para baixo. Como a área da seção do furo não se modifica ao longo do ensaio, deduz-se que o coeficiente de permeabilidade (k) sofre uma pequena redução durante o ensaio.

No caso dos solos erodíveis (amostras BP-6), o gráfico assume um aspecto bem característico com a concavidade voltada para cima devido ao aumento da área do furo.

Com relação ao tipo de fluxo através da amostra, Sherard *et. al.* (1976b) asseguram que o fluxo se processa de maneira laminar durante todo o ensaio. Lambe & Whitman (1979) citam que Reynolds encontrou uma velocidade crítica de percolação definida pelo número de Reynolds (R), definido como:

$$R = \frac{v_c \cdot D \cdot \gamma_w}{\mu \cdot g} \quad (6.1)$$

onde:

- v_c = velocidade crítica de percolação;
- D = diâmetro do furo;
- γ_w = peso específico da água;
- μ = viscosidade da água;
- g = aceleração da gravidade.

O número de Reynolds constitui-se num parâmetro bastante usado para a determinação do limite superior de validade da Lei de Darcy, onde o fluxo se processa de forma laminar. Com base nas considerações feitas por Sherard *et al.* (1976b), pode dizer que todos os ensaios foram realizados sob condições de fluxo laminar.

Observa-se também que para os solos erodíveis a curva de retorno, ou seja, aquela relativa a diminuição das valores de carga hidráulica até o valor inicial, apresenta uma trajetória bastante diferente daquela apresentada pela curva inicial, devido ao aumento do diâmetro do furo. Evidencia-se assim de forma bastante clara a ocorrência do processo erosivo.

Com relação aos solos não erodíveis, observam-se pequenas diferenças entre a curva inicial e a curva de retorno. Sherard *et al.* (1976b) indicam que durante o início dos ensaios, alguns fragmentos podem se manter soltos dentro do furo sendo então removidos pelo fluxo até o estabelecimento do equilíbrio. Desta forma pode-se explicar a ocorrência de vazões ligeiramente menores na fase inicial em relação a fase de retorno. A presença de material solto dentro do furo deve ser também a responsável pelo ligeiro traço de cor observado em algumas amostras durante a mudança de carga.

Com relação ao tempo de saturação, o prazo de um dia se mostrou suficiente, já que todas as amostras apresentaram grau de saturação acima de 95 % após a realização do ensaio. Garante-se desta forma que toda a água que penetra na entrada do aparelho é utilizada para a percolação através da amostra e que as forças de sucção não influenciam nos resultados.

Com relação a aplicabilidade do ensaio para solos com elevada quantidade de material grosseiro, este se mostrou possível de apresentar resultados conclusivos. É evidente que,

nestes casos, a única erosão medida, caso venha a ocorrer, será aquela atuante sobre a fração fina existente nestes solos. O maior problema para estes solos consiste na inserção da agulha que, ao encontrar um fragmento mais grosseiro, não consegue atravessá-lo. Nestes casos, é necessário a moldagem de um novo corpo de prova.

6.2.3 Influência da Composição do Líquido Percolante

Uma questão levantada refere-se à influência da composição do fluido percolante sobre a erodibilidade dos solos. Discute-se aqui se um eventual vazamento de esgotos domésticos, fato não muito raro em ambientes urbanos, poderia favorecer a ocorrência de processos de erosão interna.

Von Sperling (1995) cita que o valor típico do pH dos esgotos domésticos situa-se ao redor de 7. Camapum de Carvalho *et al.* (1987), analisando a influência do pH sobre a colapsividade dos solos do Distrito Federal, citam que os processos de decomposição anaeróbia podem levar a ocorrência de valores de pH em torno de 4, com o surgimento de gás sulfídrico. O gás sulfídrico, dissolvendo-se em água aerada, se transforma em ácido sulfúrico, o qual é capaz de agir sobre o óxido de ferro, material que atua como cimento nos solos lateríticos.

Statton & Mitchell (1977) analisam a influência da composição da solução sobre o comportamento dispersivo de solos finos. Segundo estes autores, o decréscimo no pH do líquido percolante para valores abaixo de 4 (usando-se ácido hidrolórico) ou seu aumento para valores acima de 11 (usando-se hidróxido de cálcio ou de sódio) ocasionam uma mudança do comportamento dispersivo para não dispersivo, ou seja, o solo torna-se menos susceptível aos processos de erosão interna por dispersão. Este mesmo comportamento estabilizante é verificado durante o incremento na concentração de sais (cloreto de cálcio ou de sódio) no líquido percolante.

Conclui-se que a dissolução dos óxidos de ferro, material que atua na cimentação das partículas nos solos lateríticos, assim como a possibilidade de defloculação dos argilo-minerais por este tipo de solução, deve ser analisada mais detalhadamente.

6.3 ENSAIOS DE INDERBITZEN

6.3.1 Metodologia

Os ensaios de Inderbitzen foram realizados no laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília no mesmo aparelho utilizado por Fácio (1991) (Figura 6.6). A proposta original deste ensaio foi apresentada por Inderbitzen (1961) e consiste na passagem de um fluxo d'água sobre uma amostra indeformada de 100 mm de diâmetro, simulando uma situação real de fluxo superficial.



Figura 6.6 - Vista frontal do aparelho de Inderbitzen durante a realização do ensaio

As amostras escolhidas para os ensaios foram aquelas retiradas de locais onde o fluxo superficial atua no campo de forma mais marcante, ou seja, na superfície do terreno (VC-1, VP-1, BP-1 e JB-1) e no fundo das erosões (VC-5, VP-5 e JB-4). Os efeitos erosivos

causados pelas gotas de chuva não foram considerados nestes ensaios, já que, nas condições para as quais foi simulado o processo de fluxo superficial, a gota d'água tem o seu poder erosivo bastante reduzido devido à altura da lâmina d'água que se forma.

Fácio (1991) descreve detalhadamente todo o aparelho e a metodologia do ensaio de Inderbitzen. A partir de uma série de ensaios com variações nos valores de vazão, declividade da rampa e no tempo de ensaio e de saturação da amostra, este autor propõe a realização do ensaio sob condições normatizadas, a saber:

- tempo de embebedimento = 15 minutos;
- vazão = 50 ml/s;
- declividade da rampa = 10°;
- tempo de ensaio = 20 minutos.

Tais condições permitem que a erosão sobre as amostras ocorra de maneira gradual e significativa para diversos tipos de solo, facilitando a observação do processo erosivo. O embebedimento das amostras é realizado para anular as eventuais forças de sucção presentes na amostra em seu estado natural.

O autor propõe ainda que os resultados dos ensaios sejam apresentados sob a forma de gráficos de perda acumulada de solo (em $\text{g}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$) versus tempo (em minutos). Deste modo, facilita-se a análise comparativa dos resultados obtidos.

Visando melhorar a qualidade dos resultados obtidos foram feitas algumas modificações no aparelho utilizado por Fácio. A rampa sobre a qual incide o fluxo d'água teve a sua largura reduzida para 100 milímetros, assegurando que todo o fluxo d'água gerado corresse unicamente sobre a amostra e não ao seu lado, como às vezes acontecia (Figura 6.6). Desta forma, reduziu-se proporcionalmente a vazão para 17,5 ml/s sem alterar as condições de ensaio propostas por Fácio (1991). O tempo de ensaio foi aumentado para 30 minutos visando melhor caracterizar o comportamento da curva perda de solo versus tempo. O material carregado pelo fluxo superficial foi coletado em peneiras com 0,074 mm de abertura (peneira 200), sendo depois secado em estufa e pesado.

Ressalta-se que o material passante na peneira 200 representa uma fração expressiva dos solos analisados, conforme observado no Capítulo 5. Deste modo, os resultados foram plotados sob as formas de perda de solo medida e de perda de solo ponderada pela fração maior que 0,074 mm. Estas frações são provenientes das curvas granulométricas obtidas sem o uso de defloculante, mostradas anteriormente na Figura 5.9.

6.3.2 Resultados

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de Inderbitzen são mostrados nas Figuras 6.7 e 6.8. Observa-se que as curvas de perda de solo versus tempo mostram uma forma semelhante às curvas apresentadas por Fácio (1991), evidenciando as condições de repetibilidade que o ensaio oferece.

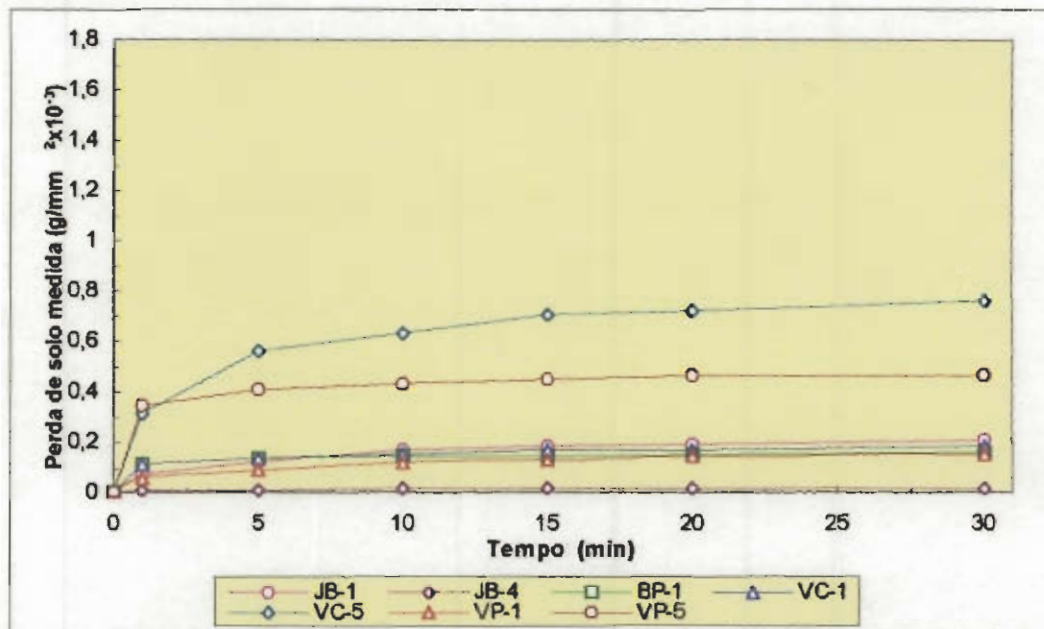


Figura 6.7 - Resultado dos ensaios de Inderbitzen para a fração > 0,074 mm (medido)

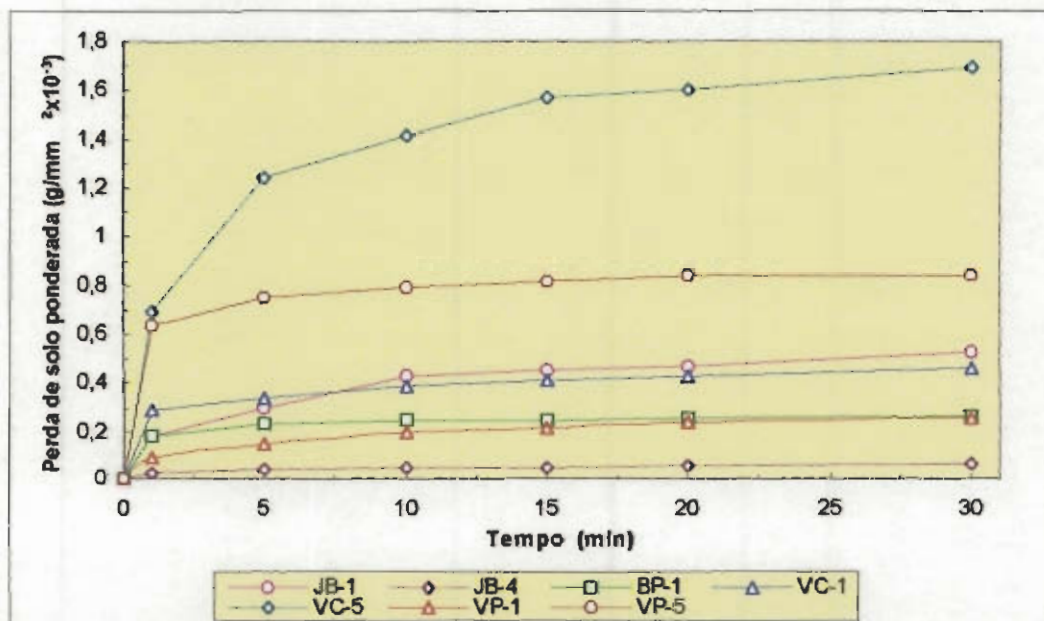


Figura 6.8 - Resultado dos ensaios de Inderbitzen para a quantidade total de solo (ponderado)

A maior quantidade de perda de solo é registrada nos 5 minutos iniciais do ensaio, onde as curvas apresentam inclinações mais acentuadas. Fonseca & Ferreira (1981), ao realizarem ensaios em aparelho construído conforme a proposta de Inderbitzen, já haviam observado esta tendência.

O comportamento apresentado no gráfico de perda de solo ponderada (Figura 6.8) foi idêntico ao apresentado no gráfico de perda de solo medida (Figura 6.7), já que os solos analisados possuem distribuição granulométrica não muito distinta. Observa-se apenas uma maior dispersão dos valores para os horizontes superficiais (JB-1, BP-1, VC-1 e VP-1), mas a posição relativa das curvas não se altera. Deste modo a análise relativa referente à susceptibilidade entre as amostras analisadas não se altera significativamente.

A análise das curvas de perda de solo versus tempo revela também que as amostras representantes dos horizontes superficiais possuem um comportamento bastante semelhante, ao passo que as amostras coletadas no fundo das erosões (amostra JB-4 e amostras VC-5 e VP-5) mostram comportamentos distintos, conforme descrito a seguir.

A amostra JB-4, retirada de solos gerados em terraços aluviais recentes, apresenta baixos valores de perda de solo. Conforme visto no Capítulo 5, este solo possui plasticidade mediana, alto teor de matéria orgânica e elevada quantidade de finos, o que pode explicar em parte a maior resistência à erosão observada. Porém o grau de influência de cada um destes parâmetros sobre a resistência à erosão apresentada por este solo fica dificultado pelo elevado número de parâmetros que interferem no processo, conforme dito anteriormente no item 2.3.

Já as amostras VC-5 e VP-5, classificadas no item 4.4 como horizontes de rocha muito alterada, mostram-se muito mais erodíveis do que as amostras recolhidas na superfície. Ao contrário da amostra JB-4, estas amostras apresentam baixos teores de argila que pode justificar em parte a maior susceptibilidade à erosão.

Fonseca & Ferreira (1981), analisando o perfil de alteração sobre rochas gnáissicas através deste mesmo ensaio, também observam essa diferenciação dos resultados para os diversos horizontes, concluindo ser o horizonte inferior, com características de rocha muito alterada, o mais susceptível à erosão.

Os dados apresentados revelam-se compatíveis com as observações de campo. Para a voçoroca do Jardim Botânico, onde o horizonte inferior se mostra pouco erodível, a voçoroca apresenta pouca profundidade, nunca maior que 4 metros. Já as voçorocas mais profundas são aquelas onde as amostras coletadas nos seus respectivos horizontes inferiores se mostram mais erodíveis.

Deste modo fica clara a representatividade do ensaio de Inderbitzen em relação aos fenômenos ocorridos no campo assim como o seu potencial para a previsão da evolução do processo erosivo para cada substrato geológico.

Conclui-se que o substrato geológico é um forte condicionante na evolução dos processos de voçorocamento existentes na região. Solos desenvolvidos sobre rochas xistosas do Grupo Araxá ou rochas gnáissicas do Complexo Anápolis-Itauçu (amostras VP-5 e VC-5, respectivamente) tendem a apresentar uma evolução muito mais rápida do processo de voçorocamento quando expostos os horizontes saprolíticos. Cuidados especiais devem ser dedicados então à prevenção da erosão nestes domínios litológicos.

6.3.3 Influência da Anisotropia

Visando observar a influência das feições anisotrópicas (bandamento e xistosidade) sobre a susceptibilidade à erosão, foram realizadas variações nos ensaios de Inderbitzen de forma a representar a influência da direção do fluxo sobre estas feições. Utilizou-se para isto amostras do horizonte inferior da voçoroca do Conjunto Vera Cruz (amostras VC-5). Este horizonte, apesar de bastante friável, apresenta um bandamento herdado da rocha original, conforme mostrado anteriormente na Figura 4.5.

Realizaram-se então, para duas amostras deste horizonte, ensaios onde o fluxo corresse paralelamente, e depois perpendicularmente à direção do bandamento. Os resultados mostrados na Figura 6.9 revelam não haver, para este solo, diferenças substanciais quando se modifica a direção do fluxo em relação ao bandamento. As diferenças observadas no gráfico são devidas a heterogeneidades no material, ora mais, ora menos friável.

Pode-se dizer então que, para rochas muito alteradas, as feições anisotrópicas não influenciam na susceptibilidade à erosão. Desta forma, as feições de "encaixe" de fluxo superficial, conforme descrito por Mortari (1994) para solos do Distrito Federal, não devem ocorrer neste horizonte do perfil de alteração, bastante comum na região de Goiânia. As feições anisotrópicas, apesar de visualmente perceptíveis, não se refletem nas características de resistência do material.

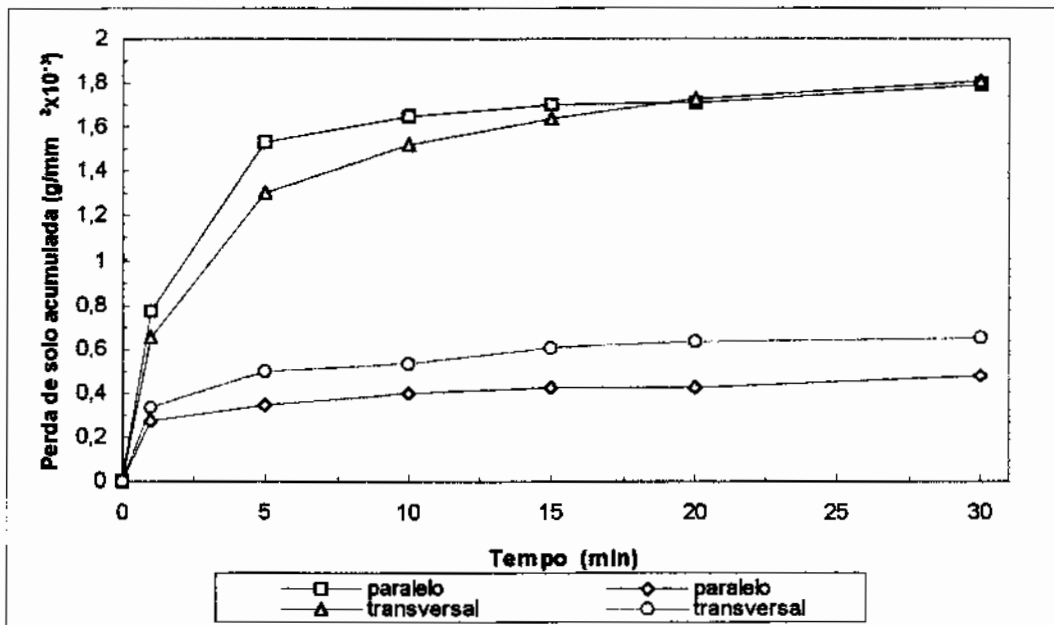


Figura 6.9 - Influência da direção do fluxo sobre os resultados do ensaios de Inderbitzen

6.4 ENSAIOS DE DESAGREGAÇÃO

6.4.1 Metodologia

Os ensaios de desagregação foram realizados nos laboratórios da Empresa Furnas Centrais Elétricas S.A.. Utilizou-se para isto, amostras indeformadas obtidas a partir dos blocos retirados das erosões estudadas.

Procurou-se nestes ensaios observar a existência de alguma correspondência entre os ensaios de desagregação e os ensaios de Inderbitzen. Ressalta-se porém que os ensaios de Inderbitzen são realizados integralmente sob condições saturadas ao passo que nos ensaios de desagregação, estas condições variam no decorrer de sua realização.

Os ensaios de desagregação consistiam na colocação de amostras dentro de uma bandeja com água, observando-se então as suas reações ao processo de submersão. As amostras eram cortadas em forma de cubos com 6 cm de lado e colocadas em duas bandejas.

Na primeira delas, as amostras foram submetidas à imersão total desde o início do ensaio prosseguindo sob esta condição até o final do ensaio, 24 horas depois. Já na segunda bandeja, as amostras foram colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com o nível d'água sendo mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos. A seguir,

a altura d'água era aumentada sucessivamente para 1/3, 2/3, até a submersão total das amostras, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos. Após a submersão total, o ensaio prosseguia até o período de 24 horas.

6.4.2 Resultados

A Figura 6.10 apresenta as amostras submetidas a imersão total desde o início do ensaio, passado um período de 15 minutos. Observa-se que a amostra VC-5 se desagrega totalmente após este período, transformando-se numa pilha de material inconsolidado e aumentando ligeiramente a turbidez da água. Nas amostras JB-1 e BP-1 ocorre o desprendimento de algumas partículas ao passo que a amostra JB-4 não é afetada pelo processo de inundação, mantendo a sua forma original.

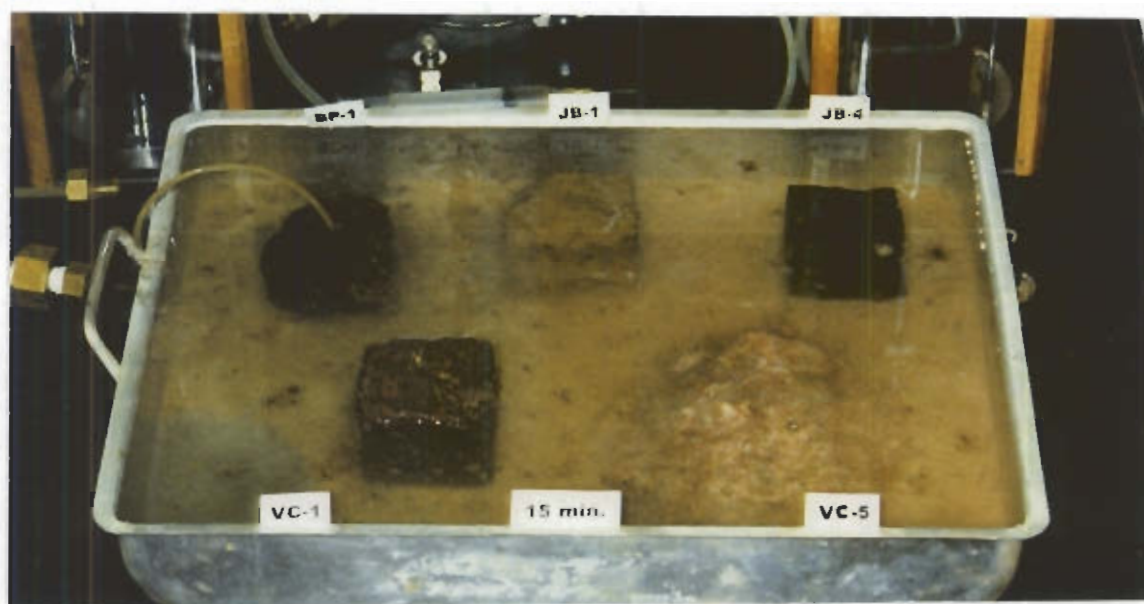


Figura 6.10 - Ensaio de desagregação por imersão total, após um período de 15 minutos

As Figuras 6.11a, 6.11b e 6.11c mostram a evolução do ensaio realizado por etapas progressivas de imersão.

Quando colocadas em contato com a água apenas através de suas bases (Figura 6.11a), as amostras não apresentam o fenômeno de desagregação. Nota-se apenas a ascensão capilar da água ocorrendo de forma lenta na amostra VC-1 e de forma mais rápida nas outras amostras. Quando a inundação atinge 1/3 da altura das amostras (Figura 6.11b) começa a haver desagregação na amostra VC-5. Observa-se que o fenômeno se inicia nas partes mais claras, ricas em material caulínico. Com 2/3 da inundação (Figura 6.11c), a amostra VC-5 se desagrega totalmente.

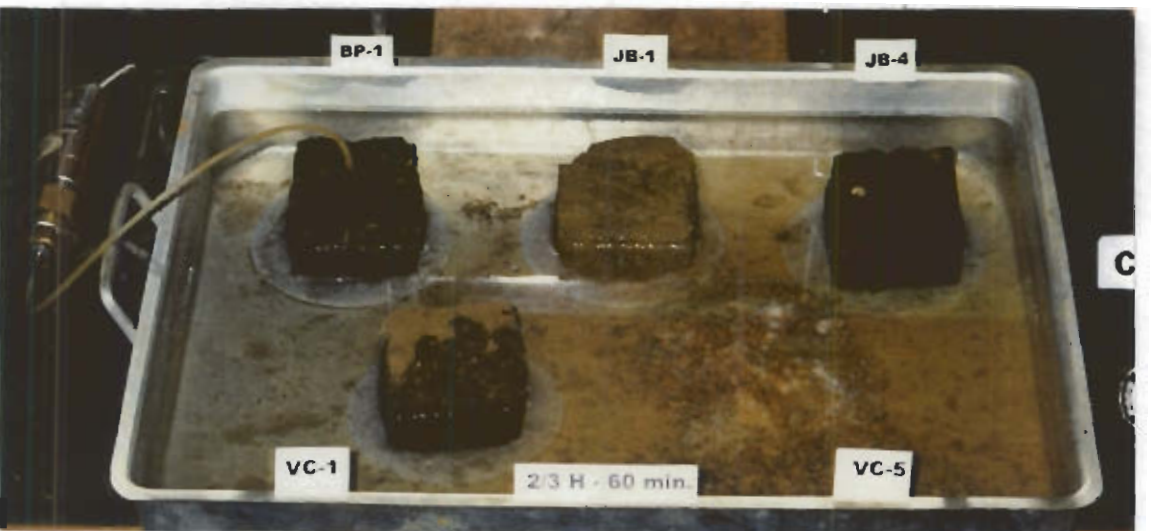
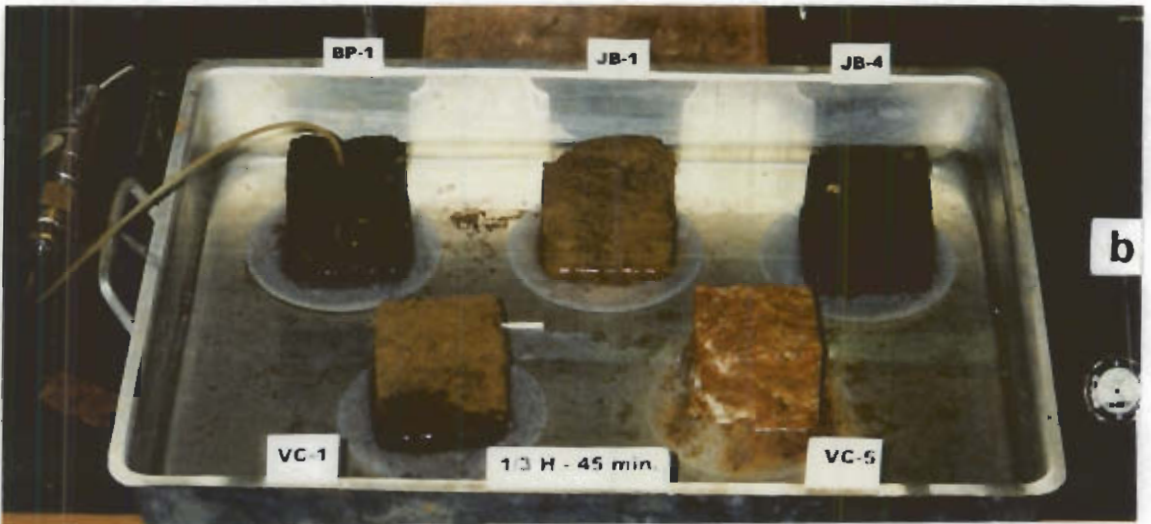
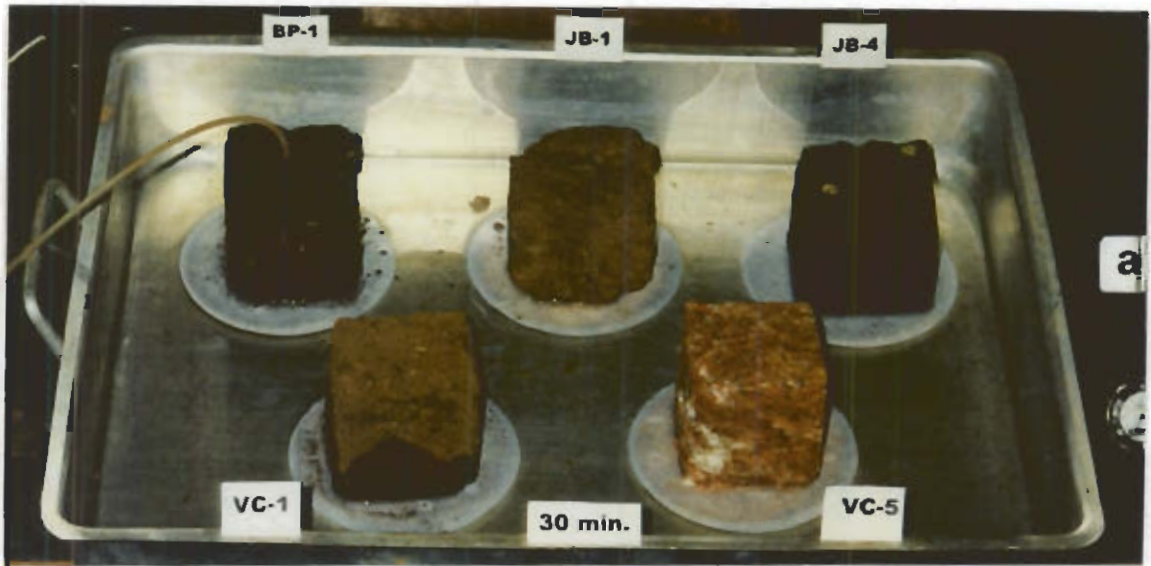


Figura 6.11 - Evolução do ensaio de desagregação por imersão progressiva

Holmgren & Flanagan (1977), após a realização de uma série de ensaios de desagregação em amostras remoldadas, classificam os tipos de reação à inundação em:

- sem resposta: quando a amostra mantém sua forma e tamanho originais;
- abatimento (*slumping*): quando a amostra se desintegra formando uma pilha de material desestruturado. Os mecanismos primários que causam a desintegração são a hidratação e desaeração que atuam gerando pressões positivas que desagregam o solo;
- fraturamento: quando a amostra se quebra em fragmentos mantendo a forma original das faces externas. O principal mecanismo atribuído a este processo é a expansão osmótica. Quando a concentração de íons dentro da fase sólida é maior do que a da solução ambiente, a água tende a mover-se para dentro do solo a fim de reduzir esta concentração, causando então o processo de expansão e conseqüente fraturamento;
- dispersão: as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma "nuvem" coloidal que cresce a medida que a amostra se dissolve. Segundo os autores, o processo de dispersão ocorre quando as pressões de expansão são grandes o suficiente para causar a separação entre partículas individuais. A principal condição para a ocorrência do fenômeno é a presença de sódio no sistema. Porém outros fatores podem influenciar tais como a concentração de sais, o pH do solo e a umidade inicial.

Seguindo-se a abordagem proposta por Holmgren & Flanagan (1977) pode-se dizer que a desagregação da amostra VC-5 ocorreu pelo processo de abatimento causado pela hidratação e desaeração geradas na fase de inundação.

Verifica-se também uma boa correlação entre os resultados apresentados pelos ensaios de desagregação e os ensaios de Inderbitzen. As amostras que se desagregam (amostras VC-5) foram aquelas que apresentam maior perda de solo no ensaio de Inderbitzen, ao passo que aquelas onde a perda de solo é menor (amostras JB-4) nada se modificam durante a imersão.

Fonseca & Ferreira (1981) também estabelecem esta correlação concluindo ser o ensaio de desagregação um bom índice qualitativo na previsão do comportamento dos solos frente aos esforços erosivos.

6.5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados pelos ensaios de erodibilidade revelaram boa correspondência com as observações de campo e constituem-se numa potencial ferramenta para a previsão do comportamento dos solos frente aos esforços erosivos.

Verifica-se que o ensaio de Pinhole pode também ser usado na previsão de processos de erosão mecânica, e não apenas de erosão por dispersão, conforme proposta original de Sherard *et al.* (1976b).

Com relação aos procedimentos do ensaio de Pinhole, recomenda-se a medição das vazões também na fase de retorno, quando se diminui o gradiente hidráulico, a fim de melhor se caracterizar um eventual alargamento do furo como consequência de um processo erosivo. Recomenda-se também que a plotagem dos dados seja feita em gráficos de escala aritmética, os quais possibilitam uma melhor distinção entre os ensaios onde ocorre ou não ocorre o processo erosivo.

Os ensaios de Inderbitzen revelam bem a diferença de comportamento das amostras analisadas, podendo a partir destes indentificar-se os horizontes mais susceptíveis à erosão por fluxo superficial. As condições de ensaio utilizadas permitem uma boa distinção entre a susceptibilidade à erosão das diversas amostras analisadas.

Os resultados obtidos encontram boa correspondência com a situação observada no campo. É necessário porém, que seja feita a normatização deste ensaio com a criação de sistemas classificatórios das características de susceptibilidade dos solos à erosão. A fim de se testar o poder de previsibilidade deste ensaio, recomenda-se também que este ensaio seja feito comparando-se amostras retiradas das erosões com amostras retiradas de um terreno adjacente e de características semelhantes.

Fica claro então que o processo pedogenético produz uma homogeneização das características físicas do solo. Os resultados apresentados pelos ensaios de Inderbitzen para os horizontes superiores, mais intemperizados, são bastante próximos. Já os resultados relativos aos horizontes inferiores revelam comportamentos bastante distintos, função dos diferentes substratos geológicos analisados.

As modificações adotadas no aparelho construído por Fácio (1991), como a redução da largura da rampa e a redução relativa da vazão asseguram um fluxo d'água sobre a amostra constante e homogêneo ao longo do ensaio, permitindo a obtenção de resultados confiáveis.

Os ensaios de desagregação, apesar de sua simplicidade, revelam resultados coerentes com aqueles obtidos nos ensaios de Inderbitzen e, por consequência, uma boa correlação com as observações de campo. As amostras que mais se desagregaram são aquelas que se mostram mais erodíveis nos ensaios de Inderbitzen. Já para as amostras onde não há reação, os ensaios de Inderbitzen revelam um comportamento pouco erodível.

Seguindo-se a classificação de Holmgren & Flanagan (1977), o principal mecanismo de desagregação observado, quando esta ocorria, foi o abatimento das amostras. Neste mecanismo, o processo de saturação da amostra anula as forças de sucção e passa a gerar pressões positivas que desestruturam e desagregam o solo.

Devido a sua facilidade de execução, recomenda-se o uso destes ensaios para uma previsão inicial do comportamento dos solos frente a um esforço erosivo. Através da realização destes ensaios, pode-se melhor direcionar a realização de ensaios de erodibilidade mais elaborados, tais como os ensaios de Inderbitzen e Pinhole.

7. ESTABILIDADE DE TALUDES

7.1 INTRODUÇÃO

Conforme descrito anteriormente no Capítulo 2 desta dissertação, as voçorocas são palco de vários processos interativos que se alternam e contribuem para sua evolução. Destacam-se aqui os processos de escorregamentos dos taludes da voçoroca, que são responsáveis por movimentos de expressivos volumes de terra em curto espaço de tempo. Desta forma, os estudos da evolução dos processos de voçorocamento e de sua contenção devem contemplar a análise da estabilidade de seus taludes.

Guidicini & Nieble (1983) definem três tipos fundamentais de movimentos de massa: os escoamentos, os escorregamentos e as subsidências, além das formas de transição e dos movimentos de massa complexos. Os escorregamentos propriamente ditos, principal foco desta análise, constituem-se segundo os autores em movimentos rápidos, de duração curta, cuja massa de terreno deslocada é bem definida e tem o seu centro de gravidade deslocado para baixo e para fora do talude durante a movimentação. A velocidade varia geralmente até valores de 30 cm/h, podendo atingir a queda livre durante o momento de desprendimento.

Guidicini & Nieble (1983) também distinguem os termos agente e causa, envolvidos na estabilidade dos taludes. Consideram como causa o modo de atuação de um determinado agente, sendo que um agente pode se expressar por meio de uma ou mais causas.

São considerados agentes predisponentes o conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais sobre o qual o movimento de massa irá ocorrer. Já os agentes efetivos são aqueles que provocam o desencadeamento do movimento de massa, incluindo-se aí os fenômenos atmosféricos, os fenômenos geológicos e as atividades antrópicas.

Com relação às causas, estes mesmos autores distinguem as causas internas, as causas externas e as causas intermediárias. As causas internas resultam na movimentação dos taludes em função da mudança nos parâmetros de resistência interna dos materiais (aumento da pressão neutra ou diminuição da coesão e ângulo de atrito interno por intemperismo), sem ter havido mudança na geometria do talude. Já as causas externas são aquelas que provocam mudanças nas tensões atuantes sem que ocorram mudanças nos parâmetros de resistência do material (cortes no talude, sobrecarga e abalos sísmicos). As causas intermediárias resultam da atuação de agentes externos no interior do talude, tais como liquefação espontânea, rebaixamento rápido do lençol e erosão interna.

A evolução dos escorregamentos em voçorocas está intimamente relacionada com a ocorrência de eventos pluviométricos. Segundo Mortari (1994), as precipitações podem gerar uma frente de saturação que avança progressivamente da superfície para o interior do solo. Ao promoverem uma saturação do solo, as águas pluviais anulam as tensões de sucção diminuindo a resistência ao cisalhamento do solo.

O avanço da frente de saturação depende da condutividade hidráulica do solo. Caso a condutividade hidráulica do solo seja maior que a precipitação que o atinge, ocorrerá a formação de uma frente úmida, sem que ocorra a saturação do solo.

Estas variações de umidade e as conseqüentes variações na resistência do solo foram consideradas na presente análise de estabilidade de taludes. Outro aspecto contemplado neste capítulo é a mudança da geometria dos taludes causada pelo solapamento de suas bases pelos processos erosivos.

7.2 METODOLOGIA

As análises de estabilidade aqui efetuadas consideram os taludes bidimensionais. Utilizou-se o Método do Equilíbrio Limite, no qual considera-se o balanço entre as forças estabilizadoras e as forças indutoras dos movimentos de massa.

O método de análise aplicado foi o Método de Bishop Simplificado. O critério de ruptura utilizado foi o de Mohr-Coulomb. A análise foi realizada utilizando-se valores de tensões efetivas e os valores de coesão e ângulo de atrito utilizados foram obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto, ou estimados em alguns casos.

7.2.1 O Método de Bishop

Segundo Pastore & Matsuda (1994), o Método proposto por Bishop (1955) realiza a análise de estabilidade dos taludes dividindo a provável cunha de ruptura em várias lamelas, levando-se em conta a interação entre as mesmas.

Levando-se também em conta as considerações de Fredlund (1995), que reconhece o importante papel que as forças de sucção desempenham sobre a resistência dos solos, pode-se definir a resistência ao cisalhamento mobilizada ao longo da superfície de escorregamento como:

$$S_{mob} = \frac{c' + (\sigma - u_w).tg\phi' + (u_s - u_w).tg\phi^b}{FS} \quad (7.1)$$

onde: FS = fator de segurança;

c' = coesão efetiva;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo;

σ = tensão normal atuante na superfície de ruptura;

u_w = poro-pressão de água ao longo da superfície de ruptura;

$(u_a - u_w)$ = sucção matricial, na qual u_a é a pressão no ar;

ϕ^b = ângulo de atrito do solo em relação à sucção matricial.

A equação da resistência mobilizada é utilizada para o cálculo do fator de segurança na análise da estabilidade dos taludes. Durante análise, são geradas superfícies de deslizamento onde os fatores de segurança (FS) obtidos permitem a individualização de três domínios:

- FS > 1, onde o talude é considerado estável;
- FS = 1, para taludes na iminência de ruptura;
- FS < 1, para taludes considerados instáveis.

7.2.2 Voçorocas Analisadas

Foram analisadas as voçorocas do Conjunto Vera Cruz, do Batalhão Florestal da Polícia e do Jardim Botânico. A voçoroca da Vila Pedroso apresenta morfologia semelhante à voçoroca do Batalhão de Polícia, razão pela qual optou-se por concentrar a análise nas três feições aqui citadas.

A voçoroca do Conjunto Vera Cruz apresenta muitas evidências de escorregamentos ao longo de toda a sua extensão lateral, indicando serem os processos de escorregamento um dos mecanismos predominantes no processo de evolução desta voçoroca. A superfície típica para os taludes existentes nesta voçoroca apresenta inclinação média de 70° com relação à horizontal, resultado de escorregamentos pretéritos, conforme mostrado anteriormente na Figura 4.2.

Fendas de tração são observadas no campo ao longo do topo do talude, indicando condições de instabilidade. Contribui para o aparecimento destas fendas a intensa insolação a que é submetido o solo do local, já que a cobertura vegetal existente é pouco expressiva. A distribuição dos solos apresentada foi obtida a partir de observações de campo. Os critérios usados para classificação destes solos são aqueles descritos anteriormente no item 4.2.2.

No caso da voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia, ao contrário da voçoroca anteriormente citada que possui um formato linear quando observada em planta, esta erosão se

encontra numa cabeceira de drenagem apresentando formato semi-circular onde os taludes possuem grande altura e elevada declividade. Nesta voçoroca, o processo de erosão interna (*piping*) leva à formação de pequenos abatimentos no pé do talude solapando a sua base e conferindo-lhe um perfil diferenciado em relação às demais voçorocas. Estes solapamentos contribuem para a instabilização dos taludes. Fendas de tração são observadas em alguns pontos da superfície do solo.

Já a voçoroca do Jardim Botânico, de dimensões bem menores, não apresenta feições que evidenciem a presença de processos de escorregamento. Os taludes desta voçoroca se apresentam subverticalizados e com pouca altura, conforme observado na Figura 4.12, e provavelmente sua forma atual deve-se apenas ao processo de remoção de material pelo fluxo superficial.

7.2.3 Ensaios de Cisalhamento Direto e Parâmetros Utilizados

Em cada uma destas voçorocas foram retiradas amostras indeformadas representativas para a realização de ensaios de cisalhamento direto. Estes ensaios foram realizados nos laboratórios da Empresa Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, utilizando-se para isto amostras moldadas com 4 polegadas de lado por uma polegada de altura.

A metodologia utilizada nos ensaios de cisalhamento direto seguiu os procedimentos descritos por Head (1980). Foram realizados ensaios com tensões de adensamento de 50, 150 e 300 kPa para as amostras VC-1, VC-3, VC-5, JB-1, JB-4 e BP-1. As amostras BP-5 e BP-6, retiradas em profundidades maiores, foram ensaiadas sobre tensões de 50, 100 e 400 kPa. Estas últimas amostras apresentavam uma foliação horizontal bastante evidente, razão pela qual optou-se pela realização de ensaios para superfícies de ruptura horizontais e verticais, a fim de verificar-se a influência da foliação nos parâmetros de resistência.

A fim de simular a influência do avanço da frente de saturação sobre os horizontes superiores, as amostras retiradas em superfície (VC-1, JB-1 e BP-1) foram ensaiadas em condições de umidade natural e sob condições saturadas. Já as amostras retiradas nos horizontes inferiores foram ensaiadas sob condições de saturação, devido ao alto grau de saturação observado no seu estado natural, conforme mostrado anteriormente no item 5.2.4.

A adoção de valores máximos de tensão cisalhante como critério de ruptura, procedimento comumente adotado, conduz a valores de ângulo de atrito bastante elevados para os tipos de solos analisados. Diante de tal constatação, passou-se a analisar dois novos

critérios de ruptura que levassem em consideração as mudanças de comportamento verificadas nos gráficos de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

A primeira mudança de comportamento verificada acontece geralmente entre 1 e 2 milímetros, sendo devida provavelmente à quebra das cimentações existentes. As curvas referentes aos ensaios sobre tensões de 150 e 300 kPa mostradas na Figura 7.1 mostram um exemplo destas mudanças para deslocamentos em torno de 1 milímetro. Outra mudança de comportamento observada nas amostras ensaiadas acontece entre 5 e 8 milímetros de deslocamento e pode ser claramente observada na curva referente ao ensaio para 150 kPa de tensão confinante.

A partir destas considerações foram adotados os seguintes critérios de ruptura:

- tensão de cisalhamento máxima atingida durante o ensaio ou ocorrência de pico no gráfico de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, critério normalmente adotado;
- deslocamento de 4 mm ou ocorrência de pico em deslocamentos inferiores a este valor, critério visando contemplar as mudanças de comportamento registradas nos pequenos deslocamentos e os picos que, quando ocorrem, situam-se geralmente nesta faixa;
- deslocamento de 8 mm ou ocorrência de pico em deslocamentos inferiores a este valor, critério visando contemplar as mudanças de comportamento observadas neste intervalo.

A partir da aplicação destes critérios sobre o gráfico de tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal obtém-se três retas distintas no gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal (Figura 7.1). Verifica-se desta maneira a influência dos critérios de ruptura adotados sobre os parâmetros de resistência obtidos. Nota-se que, para os deslocamentos de 1 mm (150 e 300 kPa), 6 mm (150 kPa) e 8 mm (300 kPa), as mudanças de comportamento na curva são bem evidentes.

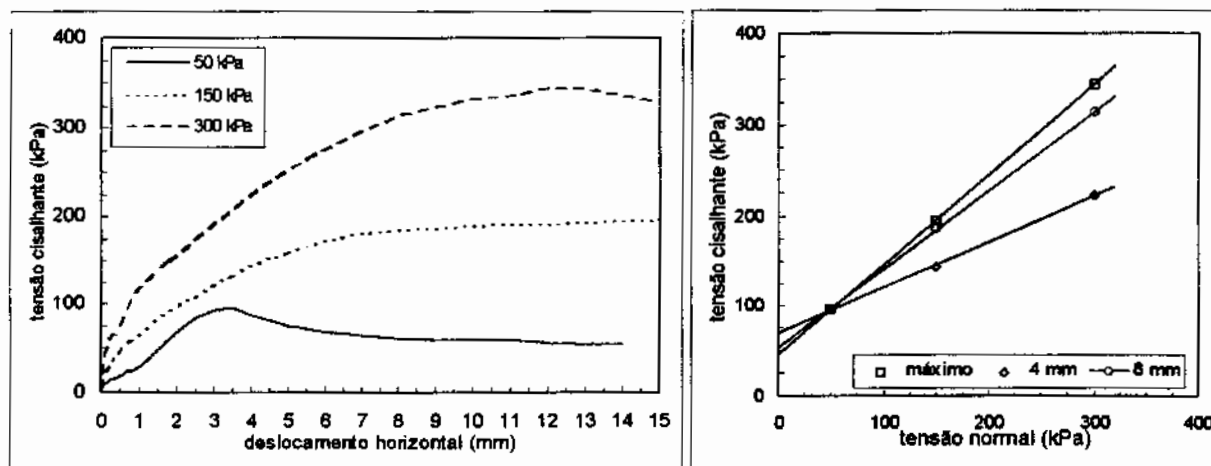


Figura 7.1 - Obtenção de parâmetros de resistência a partir da curva de deslocamento.

Tabela 7.1 - Principais parâmetros adotados na análise de estabilidade de taludes

Amostra	Prof.	c' (kPa)			ϕ' (°)			ϕ^b (°)			γ (kN/m ³)	condição
		4 mm	max	8mm	4 mm	max	8mm	4 mm	max	8mm		
VC-1	0 - 0,8 m	75	40	55	25	46	37	13*	23*	19*	17,33	NV
VC-1	0 - 0,8 m	20	20	10	25	46	37	13*	23*	19*	18,13	SV
VC-2	0,8 - 2 m	40*	30*	40*	25*	46*	25*	13*	23*	13	18,60	
VC-3	2 - 3 m	25	15	25	30	39	30	15*	20	15*	18,59	SV
VC-4	3 - 6 m	20*	15*	20*	30*	39*	30*	15*	20	15*	18,34	
VC-5	6 - 9 m	20	20	10	30	37	30	15*	19*	15*	18,65	SH
BP-1	0 - 2 m	10	25	15	28	42	42	14*	21*	21*	13,19	NV
BP-1	0 - 2 m	2	2	2	28	42	38	14*	21*	19*	17,02	SV
BP-2	2 - 3,5 m	20*	25*	20*	25*	40*	36*	13*	20*	18*	18,85	
BP-3	3,5 - 4 m	20*	25*	20*	25*	30*	25*	13*	15*	13*	18,71	
BP-4	4 - 11 m	20*	25*	20*	25*	30*	25*	13*	15*	13*	17,58	
BP-5	11 - 17 m	35	30	35	25	28	25	13*	14*	13*	19,25	SV
BP-5	11 - 17 m	15	15	15	25	25	25	13*	13*	13*	19,25	SH
BP-6	variável	10	5	2	23	33	33	13*	17*	17*	18,07	SV
BP-6	variável	10	15	10	23	28	26	13*	14*	13*	18,07	SH
JB-1	0 - 0,4 m	45	45	45	27	38	35	14*	19*	18*	13,50	NV
JB-1	0 - 0,4 m	15	10	15	27	38	27	14*	19*	14*	16,32	SV
JB-2	0,4 - 1,8 m	30*	30*	15*	30*	38*	30*	15*	19*	15*	15,63	
JB-3	1,8 - 2,1 m	20*	25*	15*	30*	38*	30*	15*	19*	15*	16,14	
JB-4	2,1 - 3,5 m	10	15	25	30	37	30	15*	19*	15*	16,41	SH

* - parâmetros estimados; N - natural; S - saturada; V - vertical; H - horizontal

7.2.4 Análise de Estabilidade de Taludes

A análise de estabilidade de taludes foi realizada visando a simulação das condições naturais nas estações seca e chuvosa. Utilizou-se para isto, o programa SLOPE/W, versão 3, da GEO-SLOPE International Ltd.

Na simulação da estação seca adotou-se, para os horizontes superiores, os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento direto sob condições naturais, ou seja, sob condições não saturadas (Tabela 7.1). A superfície freática interceptava o talude em sua base.

Já na simulação da estação chuvosa, o nível da superfície freática foi elevado, passando a interceptar a superfície do talude a uma altura acima da sua base. Para os horizontes superiores de cada erosão foram adotados os parâmetros de resistência referentes aos ensaios sob condições saturadas (Tabela 7.1), nos quais a principal diferença observada é a redução expressiva dos valores de coesão.

Outra situação considerada foi o solapamento da base dos taludes pelo fluxo superficial, circunstância que gera a formação de paredes subverticalizadas na base dos taludes, contribuindo para sua instabilização. Considerou-se para a voçoroca do Batalhão Policial um solapamento de 1 metro de extensão horizontal em direção ao interior do talude. Para a voçoroca do Jardim Botânico, de menores dimensões e talude mais íngremes, considerou-se um solapamento de 25 centímetros na direção horizontal. Para estas situações, utilizaram-se os parâmetros referentes às condições saturadas do solo.

Utilizou-se o caso da voçoroca do Conjunto Vera Cruz para simular o avanço do solapamento em direção ao interior do talude e sua influência sobre os fatores de segurança. Foram analisados os casos para solapamentos de 0,5, 0,75 e 1 metro de extensão horizontal.

Fendas de tração foram também consideradas na análise. Adotou-se a ocorrência destas fendas em toda a profundidade dos horizontes superiores de cada erosão. Para a simulação da estação chuvosa considerou-se a situação em que as fendas encontravam-se cheias de água, simulando desta forma a pressão que a água exerce em seu interior.

No caso do horizonte inferior da voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia (amostras BP-5), a foliação de atitude horizontal existente confere um caráter anisotrópico ao material, levando à obtenção de diferentes valores de coesão e ângulo de atrito efetivos para superfícies de ruptura horizontais e verticais. Porém, devido a proximidade entre os valores obtidos, optou-se pela adoção de valores médios para estes parâmetros de resistência durante a análise de estabilidade.

Os dados referentes às amostras BP-6, material de cor clara rico em caulinita, não foram utilizados na análise de estabilidade de taludes devido à forma localizada de ocorrência deste material. Porém a ocorrência do fenômeno de erosão interna (*piping*) sobre este material afeta a estabilidade do talude em questão por criar solapamentos em sua base conforme descrito anteriormente.

O ângulo de ϕ^b , definido como o ângulo que indica a taxa de incremento da resistência ao cisalhamento do solo em relação à sucção matricial, foi estimado em um valor médio igual à

metade do ângulo de atrito efetivo (ϕ'). A escolha do valor de ϕ^b pode ser feita em função da curva característica dos solos, conforme explicado a seguir.

Fredlund (1995) cita que a forma do gráfico da variação de ϕ^b versus a sucção matricial possui uma forma similar à curva característica do solo. A curva característica, que define a relação entre o teor volumétrico de água e a sucção matricial de um solo, varia entre um valor de 100 % de saturação, onde a sucção é baixa, até um valor inferior, definido como saturação residual, onde as forças de sucção são elevadas. Para este mesmo intervalo de valores de sucção, o valor de ϕ^b varia de um máximo, igual ao valor do ângulo de atrito efetivo (ϕ'), até um valor nulo.

Para as voçorocas analisadas, cuja curva característica é desconhecida, os valores de grau de saturação obtidos nos ensaios de caracterização permitem supor que estes valores situam-se numa faixa intermediária dentro desta curva característica. O mesmo raciocínio se aplica ao ângulo ϕ^b , razão pela qual seu valor foi estimado sendo igual metade do ângulo de atrito efetivo (ϕ').

Os valores de peso específico (γ) utilizados foram aqueles obtidos a partir dos ensaios de caracterização (Capítulo 5). Porém, para as análises de estabilidade sob condições saturadas, os valores de peso específico do solo foram obtidos pela fórmula:

$$\gamma = \frac{D_R + S_r \cdot e}{1 + e} \cdot \gamma_w \quad (7.2)$$

onde: D_R = densidade relativa dos sólidos;

S_r = grau de saturação dos solos;

e = índice de vazios;

γ_w = peso específico da água.

Os principais dados utilizados na análise de estabilidade de taludes, além dos parâmetros de resistência do solo obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto estão mostrados na Tabela 7.1.

7.3 RESULTADOS

As superfícies de ruptura geradas pelo programa SLOPE/W são mostradas nas Figuras 7.2, 7.3 e 7.4. Nestas figuras observam-se também as fendas de tração nos horizontes superiores e a superfície freática, representada pelas letras "N.A.", além do eixo do círculo de ruptura. As superfícies de ruptura referem-se às análises com o solo em condições saturadas e

não diferem daquelas geradas pelo programa para a simulação dos outros casos analisados. Limitou-se que as superfícies de ruptura passassem pela base do talude, refletindo as condições de ruptura observadas no campo.

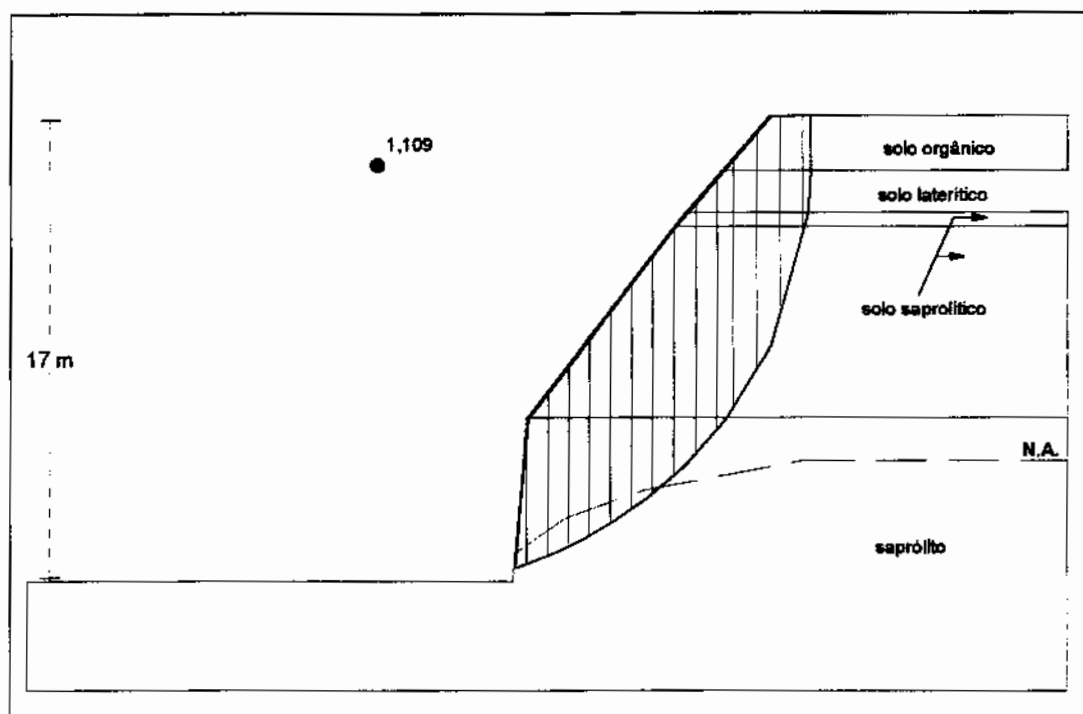


Figura 7.2 - Superfície de ruptura para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia. O eixo do círculo de ruptura está representado por um ponto e o nível da superfície freática por N.A.

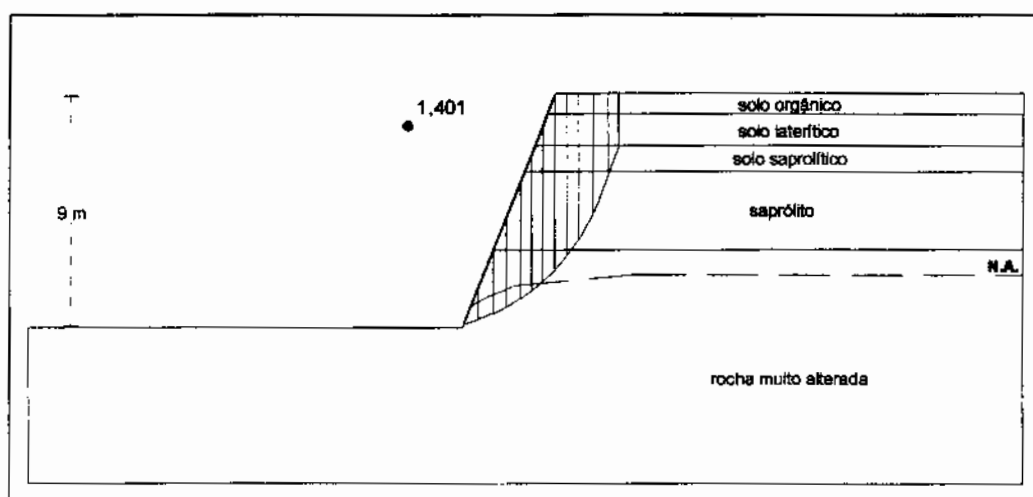


Figura 7.3 - Superfície de ruptura para a voçoroca do Conjunto Vera Cruz

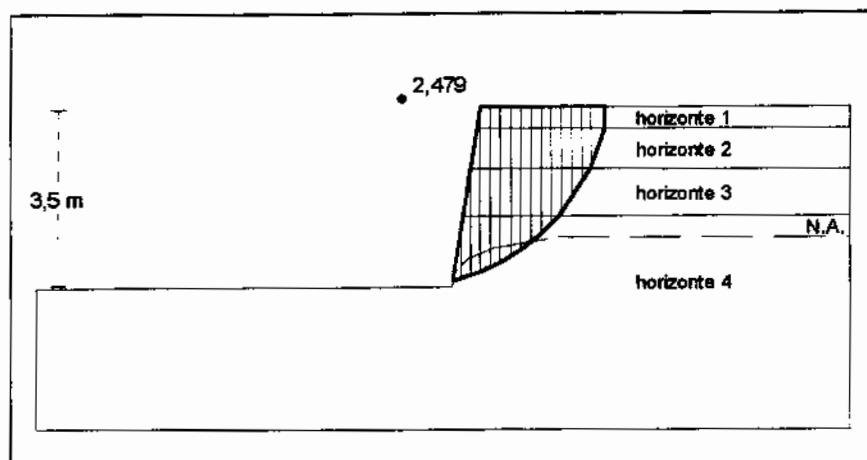


Figura 7.4 - Superfície de ruptura para a voçoroca do Jardim Botânico

Os fatores de segurança obtidos a partir das análises de estabilidade de taludes são mostrados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Valores de Fator de Segurança (FS) obtidos pelo programa SLOPE/W

		Voçoroca		
ruptura	condição	Vera Cruz	Batalhão Policial	Jardim Botânico
máximo	natural	1,472	1,138	2,505
"	saturada	1,401	1,109	2,479
"	solapada	1,308	1,063	2,376
4 mm	natural	1,301	1,045	1,997
"	saturada	1,239	1,015	1,908
"	solapada	1,153	0,972	1,868
8 mm	natural	1,155	1,045	2,694
"	saturada	1,045	1,014	2,821
"	solapada	0,999	0,971	2,746

Observa-se que, para o estado natural ou estado saturado, qualquer que seja a condição de ruptura adotada, que as voçorocas do Conjunto Vera Cruz e do Jardim Botânico apresentam taludes considerados estáveis ($FS > 1$). Já para os taludes da voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia, o processo de ruptura para os critérios de 4 mm e 8 mm é iminente, quando no estado saturado.

Fica claro porém que o principal mecanismo instabilizador dos taludes estudados é o solapamento de suas bases. As maiores diferenças nos valores do fator de segurança entre a

condição saturada e a condição solapada (e saturada) são verificados nas voçorocas do Conjunto Vera Cruz e do Batalhão de Polícia, que possuem taludes menos íngremes. Nestes locais, a influência do solapamento é maior.

Já na voçoroca do Jardim Botânico, onde os taludes possuem pouca altura e declividade elevada, o solapamento pouco influencia. Neste caso, a atuação mais intensa das forças de coesão em relação às outras componentes de resistência possibilita a ocorrência de taludes mais íngremes e estáveis.

A influência de cada componente da resistência ao cisalhamento mobilizado ao longo da superfície de ruptura analisada pode ser bem visualizada nas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7. Observam-se nestas figuras a resistência devida à coesão efetiva (c'), a resistência friccional e a resistência devida à sucção. Nestas figuras, são mostrados os resultados referentes aos parâmetros obtidos pelo critério de ruptura na tensão máxima de cisalhamento. Porém o comportamento destas curvas não se modifica substancialmente para os outros critérios de ruptura adotados.

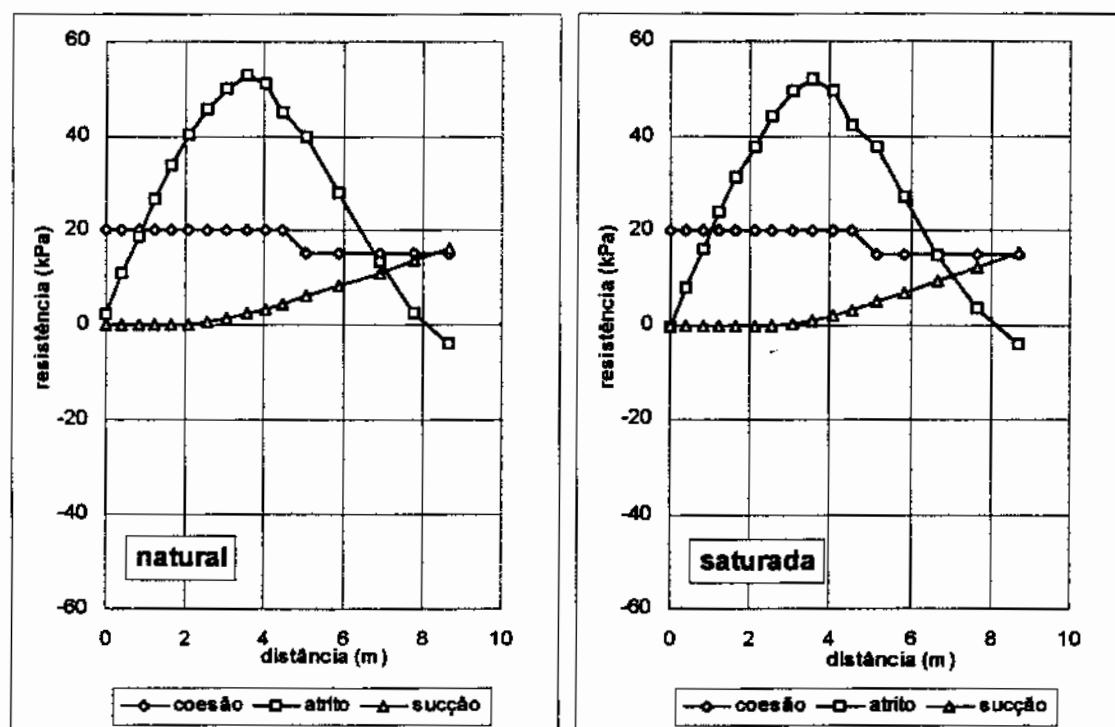


Figura 7.5 - Variação das componentes de resistência ao longo da superfície de ruptura para a voçoroca do Conjunto Vera Cruz

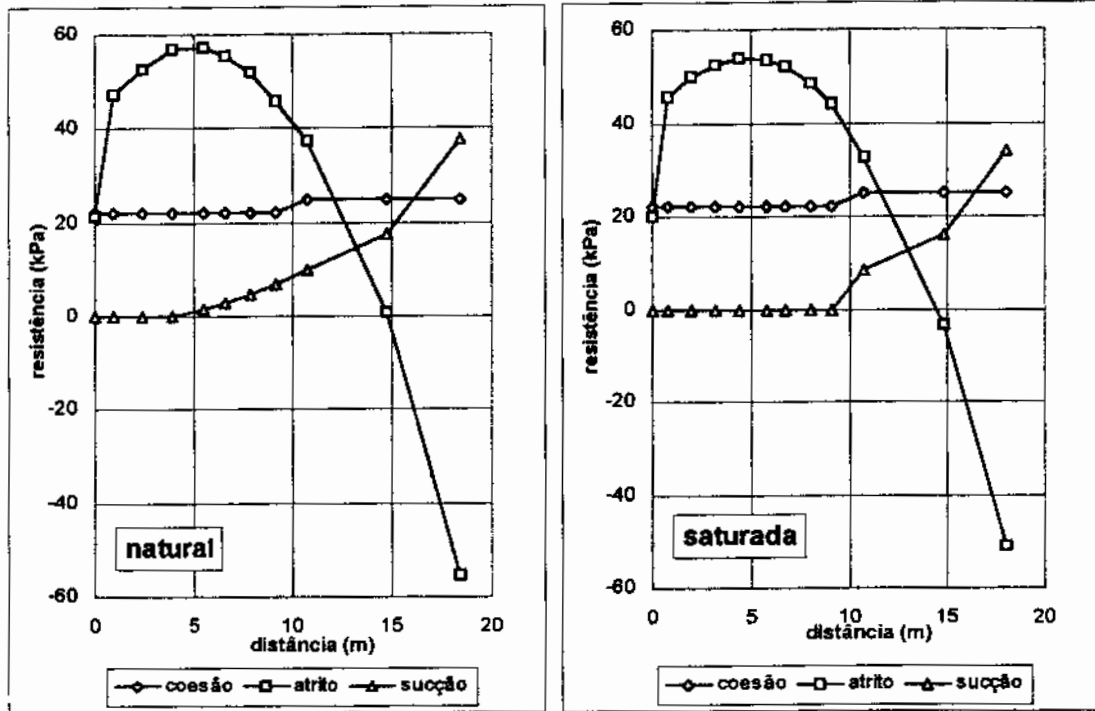


Figura 7.6 - Variação das componentes de resistência ao longo da superfície de ruptura para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia

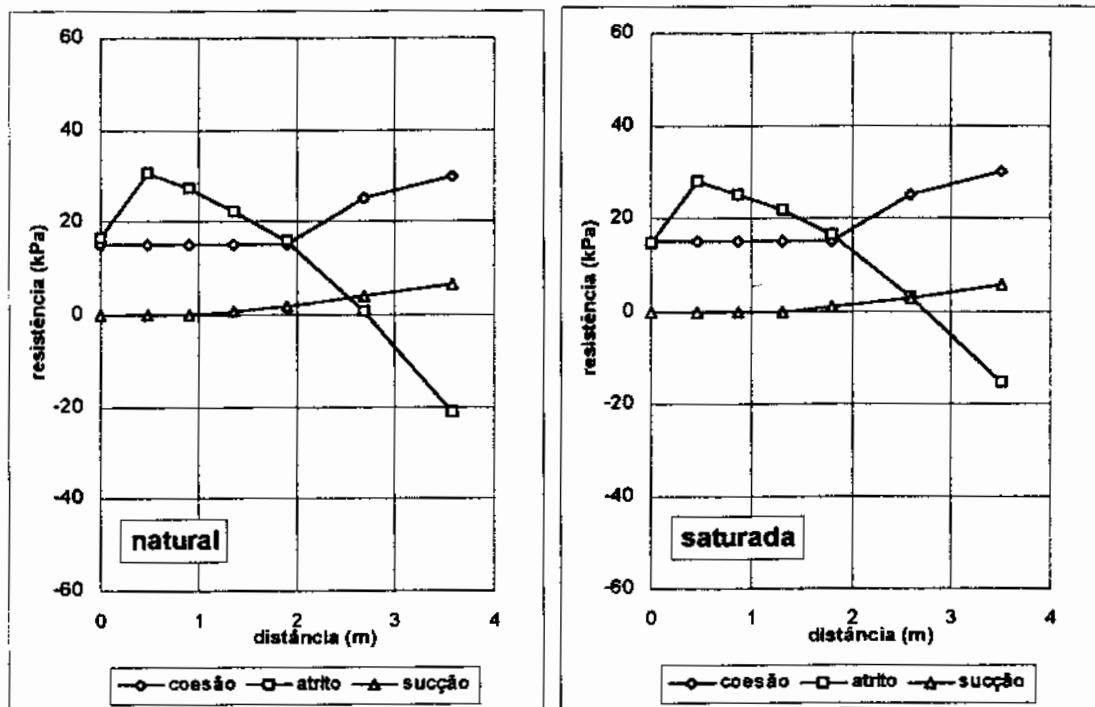


Figura 7.7- Variação das componentes de resistência ao longo da superfície de ruptura para a voçoroca do Jardim Botânico

A parcela devida à resistência coesiva é oriunda da coesão do solo, obtida nos ensaios de cisalhamento direto. Estes dados estão também mostrados na Tabela 7.1 e são os mesmos para os casos naturais e saturados. Observa-se que, para a voçoroca do Jardim Botânico (Figura 7.8), a coesão mobiliza uma parcela relativamente maior da resistência do solo, quando comparado com as resistências devidas ao atrito e a sucção.

A parcela de resistência devida à sucção, dada pela componente $(u_s - u_w).tg \phi_b$ da Equação 7.1, apresenta um incremento no sentido da porção superior da superfície de ruptura. Nota-se que as componentes de sucção pouco se modificam quando da mudança da condição natural para a condição saturada, já que a subida do nível da superfície freática pouco influi na superfície de ruptura.

As curvas das variações das componentes de resistência friccional sofrem um ligeiro deslocamento para baixo quando da mudança das condições naturais para as condições saturadas. A resistência friccional, dada pela componente $(\sigma - u).tg \phi'$ da Equação 7.1, aumenta até um certo valor, diminuindo em seguida até assumir valores negativos na porção superior da superfície de ruptura. Segundo Campos (1985), os valores negativos obtidos para a componente de resistência friccional não são coerentes com a teoria de empuxo de terra. Isto ocorre porque o termo m_α , contido na equação da resistência mobilizada se iguala, ou tende a zero.

$$\text{O termo } m_\alpha \text{ é definido como: } m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\text{sen } \alpha \cdot \text{tg } \phi'}{FS} \quad (7.3)$$

No caso em questão, o termo m_α tende a zero no topo da superfície de ruptura onde o valor do ângulo α é alto, ultrapassando o valor limite. Segundo Campos (1985), o valor limite para a inclinação no topo da superfície de ruptura, dado pela teoria clássica, é:

$$\alpha_L = 45 + \frac{\phi'}{2} \quad (7.4)$$

Citando Ching & Fredlund (1983), Campos (1985) relaciona a ocorrência de forças normais negativas à casos de superfícies de ruptura pouco profundas com parâmetros de coesão elevados. Para minimizar o problema, estes autores sugerem a adoção de fendas de tração no topo do talude e recomendam manter quaisquer outros valores de forças normais negativas para a solução da análise.

No caso das voçorocas estudadas, a adoção de fendas de tração constitui uma boa solução, por diminuir em parte a ocorrência do problema, além de representar uma situação

real observada no campo. As inclinações elevadas geradas para as superfícies de ruptura analisadas também refletem a situação de ruptura observada no campo.

Conforme dito anteriormente, a escolha de determinado critério de ruptura pode levar à adoção de parâmetros de resistência distintos e muitas vezes irreais. A verificação dos parâmetros de resistência que mais se adequam às condições campo pode ser feita através de uma retroanálise dos resultados obtidos.

Utilizou-se o exemplo da voçoroca do Conjunto Vera Cruz para esta verificação devido às seguintes considerações. A voçoroca do Jardim Botânico apresenta sempre altos valores de fator de segurança, quaisquer que sejam os parâmetros e situações adotados, razão pela qual torna-se difícil o estabelecimento do fator de segurança mais adequado às condições observadas no campo.

No caso da voçoroca do Batalhão de Polícia, a forma semicircular de sua cabeceira leva à formação de tensões de arqueamento não consideradas nesta análise bidimensional e que contribuem para um aumento nos valores dos fatores de segurança em relação aos obtidos neste trabalho. Desta forma optou-se pela retroanálise dos parâmetros de resistência da voçoroca do Conjunto Vera Cruz.

Escolhido o caso a ser analisado, simulou-se uma evolução progressiva do solapamento da base do talude para valores de 0,5, 0,75 e 1 metro de avanço na direção horizontal. Aplicaram-se então os parâmetros de resistência referentes aos três critérios de ruptura utilizados para cada estágio de solapamento. Os fatores de segurança obtidos para cada análise são apresentados na Tabela 7.3. O gráfico mostrando a tendência de evolução destes valores com o avanço do solapamento é apresentado na Figura 7.8.

Tabela 7.3 - Variação dos fatores de segurança com o solapamento

solapamento	critério de ruptura		
	máximo	4 mm	8 mm
hor. / vert.			
0 / 0	1,401	1,239	1,045
0,5 / 1,4	1,362	1,202	1,027
0,75 / 2,1	1,332	1,176	1,012
1 / 2,7	1,308	1,153	0,999

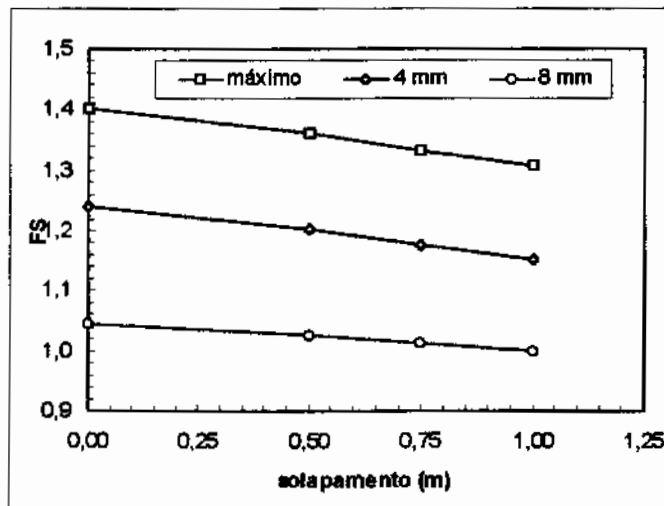


Figura 7.8 - Evolução dos fatores de segurança com o solapamento

Percebe-se que, para os critérios de ruptura pelo valor máximo e para 4 milímetros de deslocamento, a instabilização dos taludes só acontecerá para altos valores de solapamento, situações que não condizem com a realidade observada no campo. Pode-se dizer então que os parâmetros obtidos para a ruptura com 8 milímetros de deslocamento são os que melhor se adequam à situação observada no campo.

7.4 CONCLUSÕES

Para todas as simulações realizadas, verifica-se que o principal mecanismo instabilizador dos taludes das voçorocas estudadas é o solapamento de suas bases, seja pelo fluxo superficial, seja pela erosão interna. Observa-se também a influência das condições de saturação no decréscimo da resistência dos taludes.

Fica evidente aqui que o período chuvoso é o mais propício para que os processos de escorregamentos venham a ocorrer, devido ao decréscimo nos parâmetros de resistência dos taludes verificados nos solos submetidos às condições de saturação. Além disso, no período chuvoso é que se verifica com maior intensidade o processo de solapamento da base pelo fluxo superficial proveniente de chuvas intensas.

Os fatores de segurança obtidos para a voçoroca do Jardim Botânico são relativamente altos, qualquer que seja o critério de ruptura adotado. Isto indica que, nas condições atuais, não há possibilidade de instalação de processos de ruptura de talude nesta erosão, fato este confirmado por observações de campo, onde não há registros de evidências de rupturas pretéritas.

No caso da voçoroca do Conjunto Vera Cruz, o processo de retroanálise revelou que os parâmetros obtidos pelo critério de ruptura em 8 mm de deslocamento são os mais adequados para aquela feição, pois são os que melhor representam a situação de campo. Deve-se no entanto dar continuidade a este tipo de análise para outras voçorocas de modo a se definir com maior precisão um critério mais abrangente.

Já os valores dos fatores de segurança apresentados para a voçoroca do Batalhão Florestal da Polícia para as condições natural, saturada e solapada, respectivamente, indicam uma iminente condição de ruptura. O solapamento da base por efeito do *piping* contribui bastante para a situação atual do talude. Ressalta-se porém que, para o caso desta voçoroca, a forma semicircular de sua cabeceira leva à formação de tensões de arqueamento que não são consideradas na análise bidimensional utilizada e que contribuem para a estabilização de seus taludes. Uma análise tridimensional poderia trazer resultados mais conclusivos a este respeito.

No caso das voçorocas analisadas, além dos parâmetros de resistência do solo e das condições climáticas, o aprofundamento das voçorocas constitui um fator determinante de seu desenvolvimento na medida em que são gerados taludes cada vez mais instáveis com o aprofundamento das feições.

Por fim, a sucção constitui um fator importante na resistência do material. Recomenda-se então a realização de ensaios de sucção para determinação da curva característica do solos envolvidos, a fim de melhor se conhecer a influência deste fator, e conseqüentemente do ângulo ϕ_b , na estabilidade dos taludes. A construção de perfis de umidade é também importante para o estabelecimento do avanço da frente de saturação durante a estação chuvosa. A determinação destes perfis pode ser feita a partir do uso de sondagens a trado nas estações seca e chuvosa.

8. ANÁLISE DO PROCESSO EVOLUTIVO E CONSIDERAÇÕES RELATIVAS A TRABALHOS DE CONTROLE DOS PROCESSOS EROSIVOS

Com base nas observações de campo e nos ensaios realizados pode-se definir dois tipos básicos de voçorocas existentes no Município de Goiânia, classificados essencialmente em função de sua forma e posição na vertente. Os processos formadores destas voçorocas são basicamente os mesmos, porém a interação entre eles ocorre de forma diferenciada.

No primeiro grupo, incluem-se as voçorocas situadas à meia vertente, em áreas de declividade mediana. Estas voçorocas possuem um aspecto retilíneo, quando observadas em planta, onde a extensão longitudinal é bem maior do que a largura. A profundidade varia pouco ao longo da extensão longitudinal da voçoroca. Exemplos deste grupo são as voçorocas do Conjunto Vera Cruz e do Jardim Botânico.

Estas erosões encontram-se desconectadas da rede de drenagem natural existente. Apesar de interceptarem o lençol freático, fazendo que este aflore na superfície, os principais mecanismos atuantes são o fluxo superficial e os movimentos de massa.

O segundo grupo consiste nas voçorocas formadas nas regiões de ruptura de declive, caracterizadas como cabeceiras de drenagem. Neste grupo, o comprimento e a largura são semelhantes e a voçoroca assume um aspecto semicircular quando observada em planta. O gradiente hidráulico de saída é sempre elevado, devido à própria declividade do terreno e a ocorrência de processos de erosão interna (*piping*) é bastante freqüente. Estas voçorocas também tem a sua origem ligada ao fluxo superficial, mas a interação com o fluxo subterrâneo e os movimentos de massa faz com que os mecanismos de sua evolução sejam mais complexos. Exemplos deste grupo são as voçorocas do Batalhão Florestal da Polícia e da Vila Pedroso. A evolução destas voçorocas se faz através da interação entre os mecanismos de erosão superficial, erosão interna e movimentos de massa.

Ridente Júnior *et al.* (1996) identificam as feições de cabeceira de drenagem como unidades geotécnicas de alta susceptibilidade à ocorrência de processos geológicos tais como erosões e escorregamentos. Estes autores também ressaltam o caráter complexo dos processos atuantes enfatizando que as ações de controle sobre estes devem ser feitas a partir de uma análise pontual de cada caso visando a caracterização e quantificação dos processos.

Ressalta-se que a forma de classificação aqui adotada, realizada basicamente em função da morfologia, e por consequência da forma de atuação dos processos erosivos, conduz a resultados semelhantes aos obtidos pelo DAEE/IPT (1990), no qual as voçorocas são classificadas de acordo com a sua forma de deflagração.

8.1 ASPECTOS CONCEITUAIS PARA OBRAS DE CONTROLE DAS VOÇOROCAS ESTUDADAS

O correto diagnóstico dos processos envolvidos no desenvolvimento de uma voçoroca é de suma importância para a elaboração de projetos de controle e recuperação da área degradada.

A partir dos modelos aqui estabelecidos, podem ser discutidos alguns fundamentos teóricos que devem subsidiar o processo de escolha de uma metodologia de intervenção e controle dos processos erosivos. Lembrando que os projetos de contenção de voçorocas devem ser adaptados para cada caso, em função de suas particularidades, podem-se traçar aqui algumas considerações básicas para a realização de projetos de controle de voçorocas.

As voçorocas de aspecto retilíneo podem suportar sistemas de drenagem de fundo, onde as escavações realizadas promovam aumento no gradiente hidráulico, desde que devidamente monitorados. Nestas voçorocas, a superfície freática geralmente acompanha a superfície do terreno e os valores de gradiente hidráulico não são muito elevados. Desta forma, o risco de erosão interna é menor. Já nas voçorocas de formato semicircular estudadas, onde os valores de gradiente hidráulico são mais elevados devido às maiores declividades, o rebaixamento do nível do lençol freático na região da base do talude irá aumentar ainda mais os valores do gradiente hidráulico e, por conseqüência, a possibilidade de erosão interna. Para este tipo de voçoroca, o uso de soluções que envolvam o rebaixamento do nível do lençol freático devem necessariamente contemplar a adoção de critérios de filtragem.

Com relação ao uso de técnicas de retaludamento, as voçorocas de formato semicircular, geralmente de grande profundidade, apresentam taludes com baixos fatores de segurança, sendo necessário obras de retaludamento para sua contenção. Já para as voçorocas de aspecto retilíneo, os fatores de segurança são geralmente maiores e as instabilizações são geradas pela atuação de um agente adicional, neste caso, o solapamento da base do talude pelo fluxo superficial. Para estas situações, a construção de um canal de fundo, que evite o solapamento eliminará a atuação dos agentes ativadores gerando uma situação de estabilidade e que não exige trabalhos de retaludamento. Um pequeno acerto das paredes do talude pode ser executado visando uma melhoria estética do perfil do talude. A movimentação de material necessária neste caso é certamente bem menor.

Outra solução comumente adotada na contenção de voçorocas é a construção de barragens de terra ou material semelhante a serem assoreadas pelo material proveniente de montante. No caso das voçorocas de aspecto semicircular, a sua aplicação é limitada, devido à

pequena altura das paredes da voçoroca em sua porção de jusante. Já para as voçorocas de aspecto retilíneo, onde o aporte de sedimentos é maior e a construção dessas barragens se justifica, devem ser tomadas algumas precauções. A subida do nível da superfície freática, gerada devida a construção da barragem, pode conduzir a um processo de instabilização dos taludes das laterais da voçoroca devido à diminuição dos parâmetros de resistência pela saturação, ocasionando o seu alargamento e aumentando a intensidade do processo erosivo. A possibilidade de ocorrência de fenômenos de erosão interna, devido ao estabelecimento de um fluxo que se cria no interior da barragem ou em suas ombreiras, deve ser também considerada.

No caso de erosões pouco profundas, a construção de bacias de dissipação de energia pode ser uma técnica eficiente. Porém é também necessário um estudo do fluxo subterrâneo a ser criado visando evitar o desencadeamento do processo de erosão interna.

Ressalta-se que os comentários aqui deferidos são de caráter genérico e não esgotam de forma alguma a gama de possibilidades de técnicas de contenção. A adoção de qualquer procedimento de controle do fenômeno erosivo deve sempre preceder-se de estudos detalhados dos processos atuantes e deve ser sempre considerada a sua especificidade, evitando-se a sua generalização.

8.2 TRABALHOS DE CONTROLE REALIZADOS NO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA

Os trabalhos relativos à contenção dos processos erosivos por voçorocamento no Município de Goiânia são ainda escassos. Dentre os poucos trabalhos existentes destaca-se o realizado por Nascimento (1994). Este trabalho consta de uma análise do levantamento e do cadastramento das voçorocas existentes no Município.

Alguns dados estatísticos levantados por este trabalho são:

- 57,7 % das voçorocas existentes no Município situam-se sobre o domínio litológico do Grupo Araxá. O restante situa-se em sua maioria sobre terrenos do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu;
- a grande maioria (91 %) das voçorocas situa-se sobre o domínio dos latossolos que, conforme observado no item 3.3, predominam em toda a área do Município.

Outra constatação deste trabalho é a inexistência, até o momento de sua realização, de trabalhos efetivos de controle dos processos erosivos. Até esta época, os métodos de "controle" das voçorocas existentes consistiam no aterramento de sua cabeceira com o uso de entulho de construção civil. Estes aterros são realizados sem nenhum controle geotécnico da disposição do material, sendo frequente a adição de lixo doméstico e podas de árvore a este

material. Tal prática gera um material heterogêneo e de características geotécnicas desconhecidas, além de representar um grave risco de contaminação dos aquíferos. Segundo Nascimento (1994), a presença destes aterros foi verificada em 82,2% das voçorocas cadastradas.

Consoni *et al.* (1995) reconhecem que o lançamento de lixo domiciliar em erosões constitui um grave crime ambiental, devendo ser combatido com severidade pela população e pelas autoridades competentes. Segundo estes autores a instalação de aterros sanitários em áreas degradadas pela erosão não é recomendada já que as intervenções de projeto necessárias à sua viabilização técnica, além do potencial de risco ambiental que se cria, inviabilizam a sua execução.

No Município de Goiânia, o Departamento de Estradas de Rodagem Municipal (DERMU) constitui-se no órgão executor da política de controle e prevenção de erosões. Os principais trabalhos desenvolvidos por este órgão concentram-se atualmente em obras de eliminação ou atenuação dos agentes erosivos, por exemplo, o escoamento superficial, ao passo que as obras de reabilitação das feições erodidas propriamente ditas ainda são escassas.

As principais formas de intervenção para o controle dos processos erosivos realizadas pelo DERMU consistem em:

- construção de galerias de drenagem de águas pluviais com lançamento em locais mais apropriados;
- construção de lombadas nas ruas à montante das áreas degradadas e abertura de curvas de nível para a atenuação da energia do fluxo superficial;
- construção de barragens de infiltração, seja à montante, seja no leito das feições erodidas;
- construção de paliçadas em bambu para erosões de pequeno porte;
- aterramento da erosão com o uso de materiais diversos tais como seixo e capim, solo fino e entulho ou blocos de rocha e solo fino).

As medidas que vem sendo adotadas pelo DERMU, apesar de muito bem vindas, não são suficientes para deter o avanço dos processos erosivos dentro do Município, visto que a ocorrência destas feições erosivas vem aumentando, conforme levantamentos feitos pelo próprio órgão.

Ocorre que as intervenções adotadas enquadram-se dentro do domínio denominado de "soluções estruturais", onde o sistema de drenagem urbana é concebido com o intuito de conduzir as águas provenientes da precipitação para locais afastados da bacia de drenagem ocupada. Lloret Ramos (1995) ressalta que tais soluções, na medida em que ocorre o aumento

da impermeabilização, ocasionam um aumento dos picos de descarga ao longo do sistema de drenagem, gerando como consequência a ocorrência de erosões e enchentes nas áreas periféricas, desprovidas destes sistemas.

Lloret Ramos (1995) cita a existência de novos conceitos de drenagem urbana, denominados de "soluções não estruturais", onde se procura manter as condições hidrológicas originais da bacia de drenagem, privilegiando-se as áreas destinadas à infiltração e retenção das águas de escoamento superficial, tais como parques ou outras áreas verdes. Tais soluções apresentam um custo bastante inferior ao das soluções estruturais, pois não envolvem a execução de grandes obras. Soluções adotadas dentro deste conceito, ao promoverem um aumento da infiltração, reduzem os picos das enchentes diminuindo a ocorrência de processos erosivos e o assoreamento de cursos d'água.

O autor cita ainda a dificuldade de se implantar soluções não estruturais em áreas urbanas já consolidadas, devido à falta de espaços disponíveis, ao passo que para novas áreas de expansão urbana é sugerida a adoção de um "Plano Diretor de Drenagem Urbana" a ser desenvolvido conjuntamente aos programas de planejamento urbano dos municípios.

Dentro do que foi aqui exposto, pode-se dizer que a ocorrência de processos erosivos tende a aumentar no Município de Goiânia. O modelo de expansão urbana adotado pelo Município favorece o aparecimento de novas erosões nas áreas periféricas, já que estas recebem grande parte da água escoada das áreas já consolidadas. Por outro lado, as soluções de controle das erosões já existentes são ainda escassas e não são aplicadas com a intensidade e tecnologias necessárias à solução do problema.

9. CONCLUSÕES

9.1 ASPECTOS FÍSICOS

As características físicas do Município de Goiânia, tais como, geologia, geomorfologia, solos e clima, constituem fatores condicionantes dos processos erosivos atuantes no Município.

Os processos de intervenção antrópica modificam as formas de atuação dos agentes erosivos ativos, ao alterar a intensidade das chuvas e as formas de escoamento superficial, proporcionando a ocorrência do fenômeno indistintamente em todo o Município. Porém, uma vez iniciado o processo erosivo, a atuação dos agentes passivos, tais como geologia, solos e geomorfologia, irá condicionar a forma e a intensidade da evolução deste processo. Deste modo, os projetos de controle e prevenção de processos erosivos devem contemplar uma análise das características do meio físico onde sejam determinados a forma e a intensidade da atuação dos agentes erosivos e a susceptibilidade do meio físico à atuação destes processos.

9.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

O processo pedogenético tende a gerar uma homogeneização das características físicas e mineralógicas dos solos estudados, quaisquer que sejam os substratos geológicos. As diferenças em relação à susceptibilidade aos processos erosivos só se evidenciam quando o processo erosivo atinge os estratos inferiores do perfil de alteração, onde cada domínio litológico mostra um comportamento particular.

Os ensaios de caracterização mostram bem o processo de homogeneização dos horizontes superiores pela pedogênese. As correlações entre os índices físicos mostram tendências definidas de comportamento quando agrupados os dados relativos aos horizontes superiores, mais pedogenizados, quaisquer que sejam os substratos geológicos.

A presença de agregados na fração silte confere um comportamento particular aos solos estudados. Solos com comportamento de silte nos ensaios de plasticidade apresentam granulometrias típicas de argila nos ensaios de sedimentação, devido à destruição dos agregados pelo defloculante.

Os ensaios de Inderbitzen realizados em amostras dos horizontes superficiais mostram resultados idênticos. Isto mostra que os latossolos, que recobrem a quase totalidade da área do

Município de Goiânia, possuem susceptibilidade semelhante ao processo de sulcagem por escoamento superficial, qualquer que seja o substrato geológico.

Já os horizontes inferiores apresentam comportamentos distintos em relação à susceptibilidade ao processo erosivo. O domínio dos aluviões quaternários, quando em sua porção mais argilosa e rica em matéria orgânica, mostra-se pouco susceptível ao processo erosivo. O contrário ocorre nos domínios relativos aos xistos do Grupo Araxá e nos gnaisses do Complexo Anápolis-Itauçu. Nestes domínios, a rocha muito alterada apresenta baixa resistência ao processo de erosão superficial, o que faz com que as erosões progridam mais rapidamente, a partir do momento em que são expostos os horizontes de rocha muito alterada.

O ensaio de Pinhole constitui um instrumento bastante útil para a previsão de processos de erosão interna, causa do insucesso de muitas obras de contenção. Sua execução deve contemplar o aumento progressivo do gradiente hidráulico e o seu retorno até as condições iniciais. Os resultados dos ensaios devem ser plotados em gráficos de escala linear, onde uma provável ocorrência do processo erosivo é melhor caracterizada. Recomenda-se a sua execução sempre que o gradiente hidráulico assumir valores elevados.

Os ensaios de desagregação apresentam resultados satisfatórios para uma previsão inicial da susceptibilidade dos solos ao processo erosivo. Por ser um ensaio simples e de fácil execução, sugere-se que a sua utilização seja feita para orientar a posterior execução de outros ensaios, por exemplo, os ensaios de Inderbitzen. Recomenda-se a realização deste ensaios em duas formas: por saturação lenta e gradual e por inundação total e instantânea.

As análises de estabilidade de taludes revelam que o principal mecanismo instabilizador dos taludes das voçorocas estudadas é o solapamento de suas bases, seja pelo fluxo superficial, seja pela erosão interna (*piping*). Observa-se também a influência das condições de saturação no decréscimo da resistência dos taludes. O processo de retroanálise utilizado permite a obtenção de parâmetros que mais se aproximam da realidade observada no campo.

9.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O diagnóstico de processos erosivos constitui um campo de pesquisa bastante extenso, parte dele abordado neste trabalho, restando ainda várias linhas de pesquisa a serem desenvolvidas.

Com relação aos ensaios de caracterização, os resultados obtidos são ainda pouco expressivos, necessitando-se de uma quantidade maior de dados para uma representatividade

satisfatória. O papel dos agregados do solo sobre os índices físicos, sua constituição e a influência das metodologias de ensaios devem ser melhor estudadas.

A análise da estabilidade de taludes deve contemplar também as variações de umidade dentro do perfil, assim como sua relação com a pluviosidade. As forças de sucção desempenham um importante papel na estabilidade dos taludes e devem ser melhor determinadas para a realização de uma análise mais detalhada. O processo de retroanálise dos parâmetros de resistência deve ser utilizado em outras voçorocas a fim de se definir com maior precisão um critério de ruptura de caráter geral para os solos da região.

O número de ensaios de erodibilidade realizados foi bastante reduzido. Recomenda-se sua aplicação em outras voçorocas existentes na região, a fim de verificar-se a representatividade dos resultados obtidos.

Por fim, recomenda-se que seja feito, por parte dos órgãos competentes, um trabalho de monitoramento das voçorocas existentes no município. Este monitoramento, documentado fotograficamente, deve contemplar as formas e a intensidade da evolução dos processos erosivos e deve ser utilizado como instrumento orientador do processo de tomada de decisões relativas ao controle dos processos erosivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. (1976). The upper precambrian of South America. Boletim do Instituto de Geociências. USP, São Paulo. v. 7: 45-80.
- BAPTISTA, G.M.M. (1997). Diagnóstico Ambiental da Perda Laminar de Solos no Distrito Federal por Meio de Geoprocessamento. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, UnB, Brasília, DF, 112p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., NUNES, P.M., BERBERIAN, D. & FERREIRA, E.S. (1987). Influence of pH saturation liquid on collapsability. (in Spanish). VIII Panamerican Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, V.2, Cartagena, Colombia. 1-8.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., GUIMARÃES, R.C., CARDOSO, F.B. & PEREIRA, J.H.F. (1996). Proposta de uma nova metodologia para ensaios de sedimentação. XXX Reunião Anual de Pavimentação. ABPv. Salvador, BA. v.2: 520-531.
- CAMPOS, T.M.P. (1985). Análise de estabilidade: métodos, parâmetros e pressões neutras. Artigo Técnico, AT 18/85. Dpto. Eng. Civil. PUC/RJ. Rio de Janeiro. 39 p.
- CARVALHO, E.T. (1992). O Mecanismo das Voçorocas. II Simpósio Situação Ambiental e Qualidade de Vida na Região Metropolitana de Belo Horizonte e Minas Gerais, ABGE, Belo Horizonte, MG. 71-73.
- CASSETI, V. (1991). Ambiente e Apropriação do Relevo. Contexto, São Paulo. 147p.
- CASSETI, V. (1992). Geomorfologia do Município de Goiânia-GO. Boletim Goiano de Geografia, UFG, 12(1): 65-85.
- CHAVES, H.M.L. (1994). Método estocástico para a estimativa da erosão em sulcos e voçorocas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 18: 285-294.
- CNEN/CPRM (1993). Projeto Abadia de Goiás. Relatório Final de Estudos Hidrológicos. Convênio: Comissão Nacional de Energia Nuclear / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Goiânia. 45p.
- CONCIANI, W., LORANDI, R. & PRADO, H. (1995). Aplicação de mapas pedológicos no planejamento de rodovias. XXIX Reunião Anual de Pavimentação. ABPv. Cuiabá, MT: 321-332.
- CONSONI, A.J., ALMEIDA FILHO, G.S., RIDENTE JÚNIOR, J.L. & AZEVEDO, S.G. (1995). Como não resolver dois problemas de uma só vez: erosão e lixo urbano. V Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Bauru, São Paulo: 423-426.
- COSTA, J.B. (1985). A matéria orgânica no solo. Caracterização e Constituição do Solo, 3 ed., Fundação Calouste Gulbenkan, Lisboa. pp. 109-188.
- COZZOLINO, V.M.N & NOGAMI, L.S. (1993). Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. Solos e Rochas: Revista Brasileira de Geotecnia. ABMS/ABGE. v. 16(2): 77-91.

- DAEE/IPT. (1990). Controle de Erosão. Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, 92 p.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. (1981). Minerais Constituintes das Rochas: Uma Introdução. Fundação Calouste Gulbenkan, Lisboa. 558 p.
- FÁCIO, J.A. (1991). Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos Solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 120 p.
- FONSECA, A.M.M.C.C. & FERREIRA, C.M.S. (1981). Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE/UF RJ, CNPq, ABMS, Rio de Janeiro. 646-667.
- FREDLUND, D.G. (1995). The scope of unsaturated soil mechanics: an overview. Keynote Adress, First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, France. V.3: 1-23.
- GIDIGASU, M.D. (1976). Laterite Soil Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company, New York. 554 p.
- GOMES, C.B. (1984). Difractometria de raios X. Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia. Edgard Blücher/PROMINÉRIO, São Paulo: 1-43.
- GRIM, R.E. (1962). Applied Clay Mineralogy. McGraw Hill Book Company, New York. 422 p..
- GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. (1984). Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Edgard Blücher, São Paulo. 194 p..
- HARGERTY, D.J. (1991a). Piping/Sapping Erosion. I: Basic considerations. Journal of Hydraulic Engineering, 117(8): 991-1008.
- HARGERTY, D.J. (1991b). Piping/Sapping Erosion. II: Identification and diagnosis. Journal of Hydraulic Engineering, 117(8): 1009-1025.
- HEAD, K.H. (1988). Direct shear tests. Manual of Soil Laboratory Testing,. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Vol. 2. Pentech Press, London. pp. 509-580.
- HERBILLON, A.J. & NAHON, D. (1988). Laterites and laterization processes. Iron In Soils And Clay Minerals, J.W. Stuck, B.A. Goodman & U. Schertmann, D. Reidel Publishing Company, USA, pp. 779-796.
- HOLMGREN, G.G.S. & FLANAGAN, C.P. (1977). Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM Special Technical Publication 623: 218-239.
- IBGE. (1994). Zoneamento Econômico Ecológico da Área do Aglomerado Urbano de Goiânia. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, Goiânia, GO.
- INDERBITZEN, A.L. (1961). An erosion test for soils. Materials Research & Standarts 1(7): 553-554.

- IPLAN. (1990). Mapa de Solos do Município de Goiânia. Instituto de Planejamento Municipal. Goiânia,GO.
- IPLAN. (1990). Mapa de Uso do Solo no Município de Goiânia. Instituto de Planejamento Municipal. Goiânia,GO.
- LAMBE, T.W. & WITHMAN, R.V. (1979). Soil Mechanics, SI Version. John Wiley & Sons, New York, USA, 553 p.
- LEPSCH, I.F. & OLIVEIRA, J.B. (1987). Explicações sumárias sobre a nova nomenclatura das legendas de mapas pedológicos de São Paulo. Boletim Técnico do Instituto Agrônomo, Campinas, 117: 36 p..
- LORET RAMOS, C. (1995). A erosão urbana no contexto dos sistemas de drenagem. V Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Bauru, São Paulo: 101-103.
- MITCHELL, J.K. (1993). Fundamentals of Soil Behavior. 2 ed. John Wiley & Sons, New York, USA. 437 p.
- MORETON, L.C. (1994). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Goiânia - Folha SE.22-X-B-IV. Estado de Goiás. Escala 1:100.000. CPRM/DNPM. Brasília, DF. 136p.
- MORTARI, D. (1994). Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 200 p.
- NASCIMENTO, M.A.L.S. (1993). Cadastro das erosões urbanas em Goiânia. Vol. 2 Convênio UFG/DERMU.
- NASCIMENTO, M.A.L.S. (1994). Erosões urbanas em Goiânia. Boletim Goiano de Geografia, UFG, 14(1): 77-101
- NBR 6502. (1995). Rochas e Solos. ABNT, Rio de Janeiro. 18 p.
- NEARING, M.A., FOSTER, G.R., LANE, L.J. & FINKNER, S.C. (1989). A process-based erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. Transactions of ASAE, 32(5): 1587-1593.
- PASTORE, E.L. (1995). Weathering Perfíles. X Panamericam Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, Guadalajara, Mexico. 353-364.
- PASTORE, E.L. & MATSUDA, K. (1994). Análise de Estabilidade de Taludes de Escavação em Mineração pelo Método do Equilíbrio Limite. IPT, São Paulo. 50 p.
- PROJETO 02:004.02-002 (1996). Solo - Identificação e classificação de solos argilosos dispersivos por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test). ABNT, Rio de Janeiro. 9 p.
- OWOPUTI, L.O. & STOLTE, W.J. (1995). Soil detachment in the physically based soil erosion process: A Review. Transactions of ASAE, 38(4): 1099-1110.

- RIDENTE JÚNIOR, J.L., SILVA, V.C.R., OLIVEIRA, A.M.S. & ALVES, C.F.C. (1996). Cabeceiras de drenagem: Uma unidade de análise na elaboração de cartas geotécnicas. II Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, ABGE, São Carlos, São Paulo: 185-190.
- SHERARD, J.L., DUNNIGAN L.P. & DECKER, R.S. (1976). Identification and nature of dispersive soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 102(4): 287-301.
- SHERARD, J.L., DUNNIGAN L.P., DECKER, R.S. & STEELE, E.F. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 102(1): 69-85.
- SKEMPTON, A.W. & BORGAN, J.M. (1994). Experiments on piping sandy gravels. *Géotechnique*, 44(3): 449-460.
- STATTON, C.T. & MITCHELL, J.K. (1977). Influence of eroding solution composition on dispersive behavior of a compacted clay shale. *Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects*, ASTM Special Technical Publication 623: 398-407.
- TE CHOW, V. (1988). *Applied Hidrology*. McGraw Hill Publishing Company, New York. 543 p..
- THOMAS, M.F. (1974). Laterite. *Tropical Geomorphology A Study of Weathering and Landform Development in Warm Climates*, John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 49-82.
- VARGAS, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. McGraw Hill do Brasil, São Paulo. 509 p..
- VILAR, O.M. & PRANDI, E.C. (1993). *Erosão dos solos. Solos do Interior de São Paulo*. ABMS/USPSC, 177-206.
- VON SPERLING, M. (1995). *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Vol.1. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. DESA/UFMG. 240 P.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide planning*. *Agricultural Handbook*, 587: 58 p..
- ZACHAR, D. (1982). *Soil Erosion*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York. 547 p.