

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ERODIBILIDADE DE SOLOS TROPICAIS NÃO
SATURADOS NOS MUNICÍPIOS DE SENADOR
CANEDO E BONFINÓPOLIS - GO**

JOÃO GUILHERME RASSI ALMEIDA

D0077G13
GOIÂNIA
2014

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autoriza a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9510/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	João Guilherme Rasal Almeida		
CPF:	705.505.651-91		
E-mail:	cerradoguilherme@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor:	Nenhum		
Agência de fomento:	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	Sigla:	CNPQ
País:	Brasil	UF:	Go
CNPQ:			
Título:	Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis - GO		
Palavras-chave:	Erodibilidade, Solos Tropicais, Solos Não Saturados, Anelinho de Inderbitzen, Ensaio de Desagregação.		
Título em outra língua:	Analyses of the erodibility in tropical and unsaturated soils in the municipalities of Bonfinópolis and Senador Canedo - GO		
Palavras-chave em outra língua:	Erodibility, Tropical Soils, Unsaturated Soils, Inderbitzen Apparatus, Disaggregation Test.		
Área de concentração:	Geotecnia		
Data de defesa: (dd/mm/aaaa)	25/07/2013		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil		
Orientador (a):	Patrícia de Araújo Rêgo		
E-mail:	pat.ressa@yahoo.com.br		
Co-orientador (a):	Márcia Maria dos Anjos Mascarenha		
E-mail:	marciamascarenha@gmail.com		

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização? total parcial

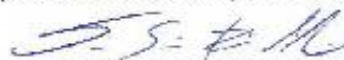
Em caso de disponibilização parcial, assinalar as permissões:

Capítulos. Especifique: _____

Outras restrições: _____

Acordo concluído com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema de Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão/trace) usando o padrão do Acrobat.


Assinatura do (a) autor(a)

Data: 26/09/14

Em caso de rescisão, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todos os termos e metadados ficarão sempre disponibilizados.

JOÃO GUILHERME RASSI ALMEIDA

**ERODIBILIDADE DE SOLOS TROPICAIS NÃO
SATURADOS NOS MUNICÍPIOS DE SENADOR
CANEDO E BONFINÓPOLIS - GO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: DSc. Patrícia de Araújo Romão

Coorientadora: DSc. Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

D0077G14

GOIÂNIA

2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
GPT/BC/UFG**

A447e Almeida, João Guilherme Rassi.
Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO [manuscrito] / João Guilherme Rassi Almeida. – 2013.
Xv, 133 f. : il., figs, tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Patrícia de Araújo Romão; Co-orientadora: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2013.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.

1. Erodibilidade 2. Solos Tropicais 3. Solos Não Saturados 4. Aparelho de Inderbitzen 5. Ensaio de Desagregação I. Título.

CDU: 631.459(817.3)

Autorizamos a reprodução total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa.

Goiânia, 25/07/2013

Assinatura:



e-mail: cerradoguilherme@gmail.com



Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

**Erodibilidade de Solos Tropicais Não Saturados nos Municípios de
Senador Canedo e Bonfinópolis-GO**

João Guilherme Rassi Almeida

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Patrícia de Araújo Romão

Prof. Dr. Patrícia de Araújo Romão (GECON/UFG)

Maurício Martins Sales

Prof. Dr. Maurício Martins Sales (GECON/UFG)

José Camapum de Carvalho

Prof. Dr. José Camapum de Carvalho (UnB)

Goiânia, 25 de julho de 2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que sempre estão do meu lado me apoiando e incentivando os meus estudos, em especial aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a todas as divindades, como: Budha, Jesus, às Divindades Hindus, aos Deuses Indígenas, aos Espíritos, a Jah, e todas as outras crenças e religiões que possuem o mesmo propósito em comum: a PAZ.

Aos meus pais Sarah e Geraldo, os meus melhores exemplos de vida, que sempre me incentivaram e apoiaram os meus estudos e de toda nossa família. À minha irmã e segunda mãe, Roberta, e ao meu irmão Paulo, quem devo cita-lo para não o magoar.

Às minhas Orientadoras, Patrícia e Márcia, pessoas com quem tive o prazer de conviver durante este período de formação, e as quais espero manter esta amizade pelo caminho que se segue. Além de ótimas mestras, são pessoas incríveis que tiveram paciência e souberam me orientar pelo caminho percorrido.

Aos demais docentes da Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil (GECON) da Universidade Federal de Goiás, em especial ao Carlos, Gilson, Lilian, Maurício e Rita, os quais sempre me receberam de “braços abertos” para sanar quaisquer dúvidas ou dificuldades.

Ao meu primo Fernando pela ajuda no *Abstract*, aos meus colegas pela companhia nas madrugadas em “claro”, e em especial à Melina, minha professora particular, que muito me ensinou durante a etapa de disciplinas. À Mônica, Mauro e ao Luciano, técnico do laboratório de solos, no auxílio aos ensaios laboratoriais. À Glacielle, no auxílio da formatação das Referências.

À Petrobrás, financiadora do Projeto *Mapeamento e Caracterização Geológica Geotécnica Aplicados na Avaliação da Erodibilidade dos Materiais Inconsolidados ao Longo da Faixa do Duto OSBRA da PETROBRAS*, onde tive a oportunidade de ampliar meus conhecimentos sobre o assunto de erosões.

À Furnas / Eletrobrás, a qual gentilmente realizou os ensaios e gerou os resultados de DRX.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização desta dissertação e com quem tive o prazer de conviver nestes últimos anos.

RESUMO

Os processos erosivos são fenômenos que envolvem sérios problemas ambientais, sociais e econômicos, tais como: perda da produtividade dos solos, assoreamentos de rios e lagos, deslizamentos em áreas de risco e o comprometimento de serviços públicos. Aspectos como o clima, o relevo, o tipo de solo e o uso e ocupação do solo pelo homem são determinantes no entendimento da suscetibilidade de um terreno aos processos erosivos hídricos. Contudo, em se tratando de regiões tropicais, dois aspectos apresentam relevante importância nos estudos de erodibilidade: a não saturação e o grau de intemperização. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo geral a análise da influência da sucção e do grau de laterização na erodibilidade dos solos, destacando parâmetros importantes para a realização de ensaios de erodibilidade. Foram selecionadas 02 (duas) regiões próximas ao município de Goiânia com características pedogenéticas distintas, uma com ocorrência de solos jovens (ou mesmo intermediário, conforme foi constatado) e outra onde os processos de intemperismo agiram mais intensificadamente, correspondentes a um solo do tipo Cambissolo e do tipo Latossolo, respectivamente. Em cada local foram coletadas amostras deformadas e indeformadas com a finalidade de realizar ensaios de caracterização convencional e específicos para solos tropicais, curvas características solo-água e ensaios de erodibilidade dos solos. Como resultado, obteve-se que ambos os solos são lateríticos, apresentando desde minerais primários até óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A curva característica solo-água resultou em formato bimodal para o Latossolo, devido à presença de micro e macroporos, e com distribuição heterogênea para o Cambissolo, devido à presença de grãos de variados tamanhos. Por fim, na análise dos processos erosivos, constatou-se que, em geral, as amostras com menores valores de sucções iniciais apresentaram-se mais resistentes à erodibilidade superficial e à estabilidade quando inundados. No ensaio de Inderbitzen a amostra de Latossolo demonstrou-se mais susceptível aos processos erosivos laminares do que a amostra de Cambissolo, devido à baixa vazão do fluxo de água. Já no ensaio de desagregação total e parcial, as amostras do Latossolo apresentaram-se bem coesas, ao contrário do ocorrido nas amostras do Cambissolo.

Palavras-chave: Erodibilidade. Solos Tropicais. Solos Não Saturados. Aparelho de Inderbitzen. Ensaio de Desagregação.

ABSTRACT

Environment, social and economic problems are related with erosive processes, like: loss of soil productivity, silting of rivers and lakes, landslides in areas of risk and commitment of public services. Aspects such as climate, topography, soil type and the use and occupation of land by humans are decisive in understanding the susceptibility of a site to water erosion. However, in the case of tropical regions, two aspects have relative importance in studies on erodibility: non saturation and weathering degree. In this way, the present study aims to analyze the suction effect and laterization degree in erodible soil, emphasizing important parameters for carried out erodibility tests. Therefore, were selected two (02) areas near the city of Goiânia with distinct pedogenetic characteristics, one with younger soils (or even intermediate, as observed during the study) and another where weathering processes acted more intense, corresponding to a Cambisol soil type and a Oxisol type, respectively. In each site were collected disturbed and undisturbed samples with the aim to perform characterization tests, tropical soils tests, soil water retention curves and erodibility tests. On results were noted that both samples are lateritic soils, presenting even primary minerals and iron oxides. The adjusting of soil water retention curves results on a bimodal shape for the Oxisol type due to the presence of micro and macropores, and with heterogeneous distribution shape for Cambisol Type, due the presence of grains on different sizes. At finally, the analysis of erosion, in general, results that the samples with lower initial suctions were more resistance to laminar erosions and in the processes of slope stability when submerged. On the Inderbitzen tests, the Oxisol showed be more susceptible to the erosive processes than the Cambisol type, probably because of the lower flow of the water. In the total and partial disintegration test, the samples of Oxisol demonstrate to be a good cohesive soil, opposite behavior have the Cambisol samples.

Keywords: Erodibility. Tropical Soils. Unsaturated Soils. Inderbitzen Apparatus. Disaggregation Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução mineralógica dos solos do Distrito Federal devido ao intemperismo químico (CARDOSO, 1995).	27
Figura 2.2 – Solos de Brasília: (a) Solo pouco intemperizado, profundidade de 10 m; (b) Solo profundamente intemperizado, profundidade de 2 m (CAMAPUM DE CARVALHO <i>et al.</i> , 2012).	28
Figura 2.3 – (a) Pico de uma partícula grande e bem cristalizada com largura do pico à meia altura = b; e (b) pico de outra partícula menor ou pior cristalizada, com largura do pico à meia altura = B (RESENDE <i>et al.</i> , 2005)	30
Figura 2.4 - Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura de um solo laterítico, apresentando os macro e microporos (MASCARENHA, 2008).	36
Figura 2.5 – Raízes expostas devido à erosão laminar (Foto: ALDEN, 2000 em BACELLAR, 2006).	39
Figura 2.6 – Ensaio do furo de agulha para solo proveniente da voçoroca em Goiânia – GO (SANTOS, 1997).	41
Figura 2.7 – Modelo de CCSA e PSD do tipo bi-modal, comumente referente a solos tropicais.	47
Figura 2.8 – Típicas curvas características solo-água (MARINHO, 2005).	50
Figura 2.9 – Anéis de PVC e penetrômetro manual utilizados no ensaio de pastilha	53
Figura 2.10 - Carta de Classificação do Método das Pastilhas referente a metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995; DERSA, 2006)	54
Figura 2.11 – Ensaio de erodibilidade em um perfil de intemperismo de Brasília (CAMAPUM DE CARVALHO <i>et al.</i> , 2006)	56
Figura 3.1 - Mapa de Localização das áreas em estudo	64
Figura 3.2 – Carta imagem e mapa pedológico da área de estudo	65
Figura 3.3 – Local de obtenção das amostras de Cambissolo: (a) relevo acentuado da área; (b) presença de laterita nas proximidades; (c) processo erosivo do tipo ravina; (d) processo erosivo do tipo sulco se desenvolvendo ao lado das intervenções antrópicas	66

Figura 3.4 – Local de obtenção das amostras de Latossolo: (a) relevo variando entre suave a ondulado; (b) amostra de Latossolo	67
Figura 3.5 – Extração de amostras indeformadas: (a) aplicação da talagarça em bloco cúbico parafinado; (b) encaixe da caixa cúbica, para transporte; (c) amostrador de Inderbitzen cravado; (d) amostrador de Inderbitzen selado com plástico filme.....	68
Figura 3.6 – Utilização do Papel Filtro na obtenção da sucção matricial	71
Figura 3.7 – Procedimento para atingir o equilíbrio entre o corpo-de-prova e o papel filtro ..	71
Figura 3.8 – (a) Amostra de Latossolo em molde cilíndrico; (b) Amostra de Cambissolo com formato amorfo.....	72
Figura 3.9 – Aparelho de WP4C utilizado para obtenção da sucção total na amostra de Cambissolo (DECAGON DEVICE, 2010)	73
Figura 3.10 – (a) Corpo de prova da amostra de Cambissolo com superfície irregular; (b) Corpo de prova da amostra de Latossolo com superfície alinhada aos limites do amostrador	75
Figura 3.11 – Equipamento de Inderbitzen	75
Figura 3.12 – Mensuração das dimensões do amostrador	76
Figura 3.13 – Nivelamento do aparelho de Inderbitzen	77
Figura 3.14 – Peneira nº 200 (0,075 mm) adaptada ao final do equipamento.....	77
Figura 3.15 – Lavagem dos agregados	78
Figura 3.16 – Modelos dos corpos de prova: (a) amostra de Cambissolo em formato amorfo; (b) amostra de Latossolo, em formato cúbico	79
Figura 4.1 – Curva granulométrica com e sem defloculante de ambos os solos.....	84
Figura 4.2 – Amostra de Cambissolo: (a) com pequenas trincas, aspecto rugoso; (b) com baixo processo expansivo	89
Figura 4.3 - Carta de Classificação do Método das Pastilhas.....	89
Figura 4.4 – Amostra de Latossolo com elevada contração diametral.....	89
Figura 4.5 – Ensaio de adsorção de azul de metileno – “Método da Mancha”; (a) amostra de Cambissolo com ponto de viragem em 3 ml; (b) amostra de Latossolo com ponto de viragem em 6 ml.....	91
Figura 4.6 – Difratograma de raios-X da amostra integral de Cambissolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras	92

Figura 4.7 – Difratoograma de raios-X da fração argila da amostra de Cambissolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras	93
Figura 4.8 – Difratoograma de raios-X da amostra integral de Latossolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras.	94
Figura 4.9 – Difratoograma de raios-X da fração argila da amostra de Latossolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras.	95
Figura 4.10 – Curva característica solo-água (Sucção x Teor gravimétrico de água) das amostras de Cambissolo e Latossolo	98
Figura 4.11 – Curva característica solo-água (Sucção x Grau de saturação) das amostras de Cambissolo e Latossolo	98
Figura 4.12 – Ensaio de <i>crumb test</i> : (a) amostras de Cambissolo, sem sinal de turvação na água; (b) amostra de Latossolo, também sem sinal de turvação no água	100
Figura 4.13 – Massa erodida retida lavada acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Cambissolo	102
Figura 4.14 – Massa erodida retida lavada acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Latossolo	102
Figura 4.15 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica com defloculante, para os CPs de Latossolo	103
Figura 4.16 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica com defloculante, para os CPs de Cambissolo	103
Figura 4.17 – Massa total erodida acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Cambissolo	104
Figura 4.18 – Massa total erodida acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Latossolo.....	105
Figura 4.19 – Gráfico da sucção x massa total erodida no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Cambissolo	105
Figura 4.20 – Diferença entre os amostradores de Inderbitzen da amostra de Cambissolo: (a) CI-2 demonstrando ser um material mais granular; (b) CI-3 demonstrando ser um material mais maciço	106
Figura 4.21 – Gráfico da sucção x massa total erodida no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Latossolo.....	108

Figura 4.22 – Porcentagem total de solo erodido retido no peneiramento dos CPs de Cambissolo	109
Figura 4.23 – Porcentagem total de solo erodido retido no peneiramento dos CPs de Latossolo	110
Figura 4.24 - Imagem pós-ensaio: (a) CP CAMB.01, onde é possível visualizar partículas de diâmetros maiores “soltas”, porém não carregadas pela lamina d’água; (b) CP LATO.01, onde é possível visualizar uma amostra mais homogênea quanto ao tamanho dos diâmetros das partículas.....	110
Figura 4.25 – Massa total erodida acumulada desprezando o primeiro minuto, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Cambissolo.....	111
Figura 4.26 – Gráfico da sucção x massa total erodida, desprezando o primeiro minuto, no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Cambissolo.....	112
Figura 4.27 – Massa total erodida acumulada desprezando o primeiro minuto, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Latossolo.	112
Figura 4.28 – Gráfico da sucção x massa total erodida, desprezando o primeiro minuto, no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Latossolo.	113
Figura 4.29 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Cambissolo; (a) CPs pré-ensaio; (b) CPs submergidos; (c) término do ensaio após 24h	115
Figura 4.30 – Detalhes das amostras de Cambissolo: (a) rachadura no meio da amostra CT-2; (b) desprendimento em bloco de uma das faces do CT-3 (fenômeno de fraturamento)	116
Figura 4.31 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Latossolo; (a) CPs pré-ensaio; (b) CPs submergidos; (c) término do ensaio após 24h	117
Figura 4.32 – Detalhe das amostras de Latossolo: (a) rompimento da base típica ocorrida nos CPs LT-1 e LT-2; (b) trincas típicas ocorridas nos CPs LT-1, LT-2 e LT-3.	117
Figura 4.33 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial nas amostras de Cambissolo: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras até umedecimento por ascensão capilar; (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras por 15 min.; (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras; (d) submersão total das amostras; (e) final do ensaio após 24h	120

Figura 4.34 – Detalhes ocorridos no ensaio de desagregação parcial nos CPs da amostra de Cambissolo (a) desmoronamento semelhante a um processo de fraturamento, no CG-2, porém as faces externas não mantiveram as formas originais; (b) rachadura na amostra CG-5, provável início de processo de fraturamento 121

Figura 4.35 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial nas amostras de Lambissolo: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras por 30 min.; (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras por 15 min.; (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras; (d) submersão total das amostras; (e) final do ensaio após 24h 121

Figura 4.36 – Trincas ocorridas no topo do CP LG-5 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Superfície específica de alguns argilominerais (LAN, 1979).....	60
Tabela 2.2 – Capacidade de troca catiônica de alguns tipos de argila (BEAULIEU, 1979; <i>apud</i> PEJON, 1992).....	61
Tabela 4.1 – Índices físicos das amostras em estudo.	83
Tabela 4.2 – Porcentagem das frações granulométricas para as amostras de Cambissolo e Latossolo.....	85
Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos no ensaio de adsorção de azul de metileno – Método da Mancha	91
Tabela 4.4 – Parâmetros representativos de ajuste matricial das equações de Durner (1994 <i>apud</i> OTÁLVARO; CORDÃO-NETO, 2011), para as amostras de Cambissolo e Latossolo	97
Tabela 4.5 – Parâmetros pré e pós-ensaio de Inderbitzen e parâmetros iniciais dos CPs de Desagregação.....	99
Tabela 4.6 – Variação dos teores de umidade ao longo dos CPs (topo, meio e base).....	113
Tabela 4.7 – Resumo dos resultados obtidos nas amostras de Cambissolo e Latossolo nos ensaios de Inderbitzen, Desagregação Total e Desagregação Parcial, para os cinco graus de saturação pré-ensaios.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CP	Corpo de Prova
Dersa	Desenvolvimento Rodoviário S.A. do Estado de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DRX	Ensaio de difratometria de raios-X
Ep	Mineral 2:1 expansivo
GO	Estado de Goiás
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
PF	Papel Filtro
PPG-Gecon	Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil
PSD	Densidade de tamanho de poros
SE:	Superfície específica
SE _{AM} :	Superfície específica do corante azul de metileno
SIEG	Sistema Estadual de Estatística e de Informação Geográfica do Estado de Goiás
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFG	Universidade Federal de Goiás
VEA	Valores de entrada de ar
VEA _L	Valores de entrada de ar referente aos macroporos
VEA _S	Valores de entrada de ar referente aos microporos

LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Angstrom
A	Porcentagem, em massa, de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, de acordo com a curva granulométrica sem defloculante;
Ac	Índice de atividade coloidal da argila
B	Porcentagem, em massa, de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, de acordo com a curva granulométrica com defloculante
CA	Coefficiente de atividade da fração argilosa (< 0,002 mm)
C	Concentração da solução padrão de azul de metileno
c'	Coefficiente relacionado à contração diametral - indica a argilosidade do solo
cm	Centímetros
C _u	Coefficiente de uniformidade
d	Distância entre planos atômicos
D ₁₀	Diâmetro efetivo - diâmetro tal que o peso correspondente às partículas menores que este é 10% do peso da amostra
D ₆₀	Diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas
e	Índice de vazios médio
e _{wL}	Índice de vazios dos macroporos
e _{wS}	Índice de vazios dos microporos
G	Densidade do solo
h	Horas
I _A	Índice de atividade
IP	Índice de plasticidade
kPa	quilo Pascal
LA	Areia laterítica quartzosa
LA'	Solo arenoso laterítico
LG'	Solo argiloso laterítico
M	Massa do solo seco ensaiado
m ² /g	Metros quadrados por grama
min	Minutos
ML	Silte de baixa compressibilidade
m _L	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção na transição
ml/s	Mililitros por segundo

mPa	mega Pascal
m _S	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção após o valor de umidade higroscópica
M _T	Massa total erodida
M _{R200}	Massa lavada retida na peneira n° 200
n	Número inteiro referente à ordem da difração
NA	Areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico
NA'	Misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso)
NS'	Solo siltiloso não laterítico
NG'	Solo argiloso não laterítico
n _L	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos macroporos
nm	Nanômetro
n _S	Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos microporos
P	Coefficiente de capacidade de desagregação das partículas quando submerso em água
Pf	Porcentagem, do peso da fração < 0,002 mm
P _{P200}	Porcentagem passante na peneira n° 200 (0,075 mm), conforme curva granulométrica
P ₂₀₀	Porcentagem da amostra total que passa na peneira de abertura 0,074 mm
S	Coefficiente de sorção
SC-SM	Areia argilo-siltosa
S _f	Grau de Saturação final
S ₀	Grau de Saturação inicial
S _{res}	Grau de saturação residual
TA	Teor de Agregação
V	Volume adicionado de solução padrão de azul de metileno durante o ensaio
V _t	Volume total de azul de metileno adsorvida em 1 g da amostra integral do solo
w	Teor de umidade
w _f	Teor de umidade final
w _L	Limite de liquidez
w _{nat}	Teor de umidade natural
w _p	Limite de plasticidade
α _L	Parâmetro relacionado ao valor de entrada de ar dos macroporos

α_s	Parâmetro relacionado ao valor de entrada de ar dos microporos
λ	Comprimento de onda dos raios-X incidentes
λ_{Cu}	Comprimento de onda dos raios-X incidentes, com fonte emissora de cobre
η	Porosidade média
θ	Ângulo de difração
ψ_f	Sucção final
ψ_0	Sucção inicial
Υ_s	Massa específica dos grãos

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
CAPÍTULO 1	21
INTRODUÇÃO.....	21
CAPÍTULO 2	24
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 SOLOS TROPICAIS	24
2.1.1 Formação e ocorrência dos solos tropicais	24
2.1.2 Mineralogia.....	29
2.1.3 Comportamento geotécnico dos solos tropicais	33
2.2 PROCESSOS EROSIVOS	37
2.2.1 Tipos de erosões	38
2.2.1.1 Erosão superficial ou laminar	38
2.2.1.2 Erosão interna.....	40
2.2.1.3 Sulcos, ravinas e voçorocas	43
2.2.1.4 Outros tipos de erosão	44
2.2.2 Erodibilidade em solos não saturados	45
2.2.3 Processos erosivos em solos tropicais	53
CAPÍTULO 3	63
METODOLOGIA.....	63
3.1 SELEÇÃO DA ÁREA.....	63
3.2 COLETA DE AMOSTRAS.....	67
3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS	68

3.3.1	Caracterização do material	69
3.3.2	Ensaio em solos tropicais	69
3.3.3	Ensaio em solos não saturados	70
3.3.4	Ensaio de erodibilidade	74
3.3.4.1	Ensaio de Inderbitzen	74
3.3.4.2	Ensaio de desagregação	79
3.3.4.3	Ensaio de dispersabilidade (<i>crumb test</i> ; sedimentométrico comparativo; e teor de agregação).....	80
CAPÍTULO 4		83
ANÁLISE DOS RESULTADOS		83
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	83
4.2	ENSAIOS EM SOLOS TROPICAIS	88
4.2.1	Identificação Expedida do Solo Laterítico – “Método da Pastilha”.....	88
4.2.2	Adsorção de Azul de Metileno – “Método da Mancha”	90
4.2.3	Caracterização Mineralógica por Difração de Raios-X.....	91
4.3	CURVAS CARACTERÍSTICAS SOLO-ÁGUA (CCSA)	96
4.4	ENSAIOS DE ERODIBILIDADE	100
4.4.1	Ensaio de Torção (<i>crumb test</i>)	100
4.4.2	Ensaio de Inderbitzen	100
4.4.3	Ensaio de Desagregação	114
4.4.3.1	Desagregação por imersão total.....	114
4.4.3.2	Desagregação por imersão parcial	118
CAPÍTULO 5		124
CONCLUSÕES		124
REFERÊNCIAS		128

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os processos erosivos são fenômenos naturais, de alta ponderação na formação dos relevos. Contudo, o uso e a ocupação desordenada do solo pelo ser humano aumenta a intensidade com que este processo ocorreria normalmente, podendo acarretar problemas ambientais, sociais e econômicos, tais como: perda de solos produtivos com conseqüente redução na produção de alimentos; assoreamentos de rios e lagos; deslizamentos em áreas de risco; e comprometimentos de serviços públicos, como a interdição de estradas e a exposição / ruptura de canalizações e dutos enterrados.

Os fenômenos erosivos são definidos como a perda de massa de solo devido ao carreamento de partículas, principalmente pela ação das águas e dos ventos. Em ambientes úmidos, de média à elevada precipitação anual, os processos erosivos devido à ação da água em movimento são mais intensos. Dentre os processos erosivos existentes devido à energia cinética da água, e outros fatores, destacam-se: erosão superficial ou laminar; erosão interna; sulcos; ravinas; voçorocas; perda de fertilidade; e deslocamentos de massa.

Condicionantes como o clima, o relevo, tipo de solo e o uso e ocupação do solo pelo homem são determinantes no entendimento da suscetibilidade de um terreno aos processos erosivos hídricos. Dessa forma, esses condicionantes necessitam ser verificados isoladamente para analisar a influência de cada um deles no processo erosivo. Analisando especificamente o solo, têm-se dois importantes fatores que influenciam sua erodibilidade: a não saturação e o grau de intemperização.

Em regiões de climas tropicais ocorrem constantemente solos na situação não saturada, principalmente na região denominada de zona ativa (perfil de solo compreendido entre a superfície terrestre e a profundidade aproximada de três metros ou limítrofe com a zona freática). No decorrer dessa zona ativa ocorre variação constante de umidade, e conseqüentemente de sucção, demonstrando assim que grande parte dos processos erosivos inicia-se em solos não saturados.

Outra característica típica das regiões tropicais são os tipos de solos existentes, denominados de solos tropicais, que em geral, apresentam características especiais que diferem o seu comportamento hidromecânico dos solos de ambientes temperados.

Para a realização de um estudo sobre o comportamento e previsão de erosões em uma determinada região, é necessário verificar como as características dos solos não saturados, tanto em solos de comportamento laterítico quanto em não laterítico, influenciam no processo erosivo. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo geral a análise da influência da sucção e do grau de laterização na erodibilidade dos solos, destacando parâmetros importantes para a realização de ensaios de erodibilidade.

Outro aspecto importante em destaque no estudo é com relação às metodologias de ensaios. Portanto, nesta pesquisa, como objetivo específico, também se procurou estabelecer métodos de ensaios congruentes com os objetivos a serem alcançados, inclusive adaptando e modificando algumas metodologias quando necessário, como por exemplo, no ensaio de Inderbitzen, que ainda não se encontra normalizado.

Dessa forma, esta dissertação está organizada em cinco capítulos, os quais são descritos a seguir:

- Capítulo 1: introduz os principais assuntos a serem abordados nesse estudo, assim como seus objetivos (geral e específicos).
- Capítulo 2: apresenta uma Revisão Bibliográfica a respeito dos assuntos a serem abordados, como mineralogia presente em solos tropicais e seus respectivos comportamentos geotécnicos, os tipos e formas de ocorrência dos processos erosivos, abordando-os principalmente na condição não saturada.
- Capítulo 3: relata a metodologia para seleção dos solos em estudo, além dos métodos utilizados na execução dos ensaios realizados (caracterização; identificação expedita pelo método da pastilha, adsorção de azul de metileno pelo “método da mancha”; caracterização mineralógica por difratometria por raio-X; obtenção das curvas características solo-água pelo método do papel filtro; mensuração da erodibilidade laminar pelo equipamento de Inderbitzen modificado; análise da desagregação do solo; e a avaliação da dispersibilidade dos solos).

- Capítulo 4: apresenta os principais resultados obtidos nos ensaios, descrevendo e justificando o comportamento ocorrido em cada corpo de prova ensaiado.
- Capítulo 5: resume os aspectos mais relevantes obtidos no estudo, propondo ainda pesquisas futuras que venham a contribuir com os assuntos abordados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados conceitos e definições, metodologias, estudos de casos e recomendações de diversos autores que contribuíram para o conhecimento de assuntos como a formação e ocorrência dos solos tropicais, erodibilidade e solos não saturados.

2.1 SOLOS TROPICAIS

Aspectos como a formação e ocorrência dos solos tropicais, além da composição mineralógica serão detalhados nos itens a seguir.

2.1.1 Formação e ocorrência dos solos tropicais

Os solos tropicais apresentam comportamento peculiar, podendo ser classificados na geotecnia em solos de comportamento laterítico e não laterítico. Os solos de comportamento não laterítico em geral correspondem aos horizontes denominados saprolíticos. Os horizontes saprolíticos em sua maioria correspondem a solos residuais jovens que conservam as características da rocha de origem. Já os lateríticos, devido ao intenso processo de intemperismo, apresentam agregações das partículas, em geral da fração argila, fazendo com que estes materiais inconsolidados possuam comportamentos mecânicos distintos. Cardoso (2002), em seu trabalho, utiliza a denominação de solos lateríticos como sinônimo de solos tropicais. Em geral, segundo Cozzolino e Nogami (1993), as amostras naturais de solos tropicais apresentam baixa densidade natural, elevada permeabilidade, com cores variando entre vermelho e amarelo, devido a presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que são responsáveis pelas aglomerações e conseqüente existência de macro e microporos no solo.

O material de origem (material-mãe) e o relevo são aspectos primários no estudo da formação dos solos tropicais. Esse material de origem influencia em muitas propriedades do solo, principalmente em regiões secas e frias, e nos estágios iniciais do desenvolvimento do solo. Quanto ao papel do relevo na formação do solo, afirmam que além de influir na drenagem interna e externa do solo, o relevo modifica as condições microclimáticas do ambiente. Visto

ser a declividade um dos principais parâmetros de influência nos processos erosivos, o relevo torna-se um aspecto essencial para a formação dos solos residuais (autóctones) e dos transportados (alóctones) (BIGARELLA; BECKER; PASSOS, 1996).

Bigarella, Becker e Santos (1994) afirmam que em regiões úmidas e quentes há predominância de decomposição química, enquanto que em regiões semi-áridas a áridas, a desintegração mecânica é o principal agente. Em regiões tropicais ocorrem intensos processos de intemperismo, definido pelos autores como o “conjunto de modificações mecânicas, físicas e químicas que uma rocha sofre quando em contato com os agentes atmosféricos”. Quanto aos processos de formação do solo (pedogênese), não apenas a atmosfera é responsável pela ação nos fragmentos rochosos desagregados do intemperismo, mas também os seres vivos (animais, plantas, bactérias e fungos) que introduzem a matéria orgânica, um dos principais responsáveis pelos processos bioquímicos mais complexos.

Bigarella, Becker e Santos (1994) abordam que o fator das águas da chuva, as quais apresentam teores de gás carbônico (CO_2) dissolvidos, dando origem ao ácido carbônico (H_2CO_3), ao entrar em contato com as rochas atua como um reagente químico, assim como os ácidos húmicos, oriundos da decomposição da matéria orgânica. Dentre as reações químicas que mais comumente ocorrem, alterando a composição químico-mineralógica das rochas, formando novas substâncias, destacam-se a dissolução, hidratação, hidrólise, carbonatação, oxidação e redução.

Em termos gerais, o processo de **dissolução** ocorre devido a concentração de H^+ , expressa como pH, podendo assumir caráter ácido ou alcalino. Já o fenômeno de **hidratação** constitui na adição de água no mineral, e sua adsorção dentro do retículo cristalino, causando a expansão do mineral. A redução de volume devido à perda de água é denominada **desidratação**. No processo de **hidrólise**, a água não atua apenas como solvente, ela reage quimicamente com o mineral através dos íons H^+ ou OH^- com os íons do mineral. Na **carbonatação** o ácido carbônico, oriundo das chuvas e da decomposição da matéria orgânica, reage com os minerais. Já o processo de **óxi-redução** ocorre quando a água apresenta oxigênio dissolvido e entra em contato com o material inconsolidado. O oxigênio reage principalmente com os minerais ricos em ferro, manganês e enxofre (BIGARELLA, BECKER e SANTOS, 1994). Vale ressaltar que dentre estes fenômenos, o processo de **hidrólise** é o que apresenta maior importância na formação dos solos tropicais.

Silva (2010) afirma que em solos intemperizados em ambientes quentes e úmidos, todos os minerais primários, com exceção do quartzo, são intemperizados por hidrólise em condições neutras, sendo que uma fração considerável de sílica e das bases são removidas em solução.

Camapum de Carvalho *et al.* (2012) relatam que nos solos de regiões temperadas e frias, em especial nos sedimentares, de um modo geral as características estruturais estão ligadas ao histórico de tensões. As partículas de argila presentes nestes solos apresentam certa individualidade, ao contrário das agregações que ocorrem entre as partículas em solos tropicais.

Segundo esses autores os solos tropicais possuem suas “características estruturais ditadas principalmente pela história de transformação químico-mineralógica pela qual passaram.”, ou seja, o perfil de solo deve ser considerado segundo os níveis de intemperismo, podendo ser: profundamente intemperizados (solos lateríticos), solos de transição (zona geralmente mosqueada) e solos pouco intemperizados (solos saprolíticos e saprólito).

Bigarella, Becker e Passos (1996) ressaltam ainda que em regiões tropicais de baixa ou moderada altitude, e em condições bem drenadas, o teor de húmus no solo é bem inferior aos terrenos de regiões frias, pois a atividade bacteriana é superior nos climas tropicais, minimizando a formação e acumulação do húmus. A presença de húmus influencia principalmente na lixiviação de óxidos de ferro e de alumínio, os quais são removidos ou re-depositados nas camadas inferiores. Na ausência de húmus, a água não é acidificada ao ponto de remover tais elementos, os quais permanecem nas camadas superiores, apresentando coloração avermelhada ou amarelada ao solo, sendo uma das características dos solos lateríticos.

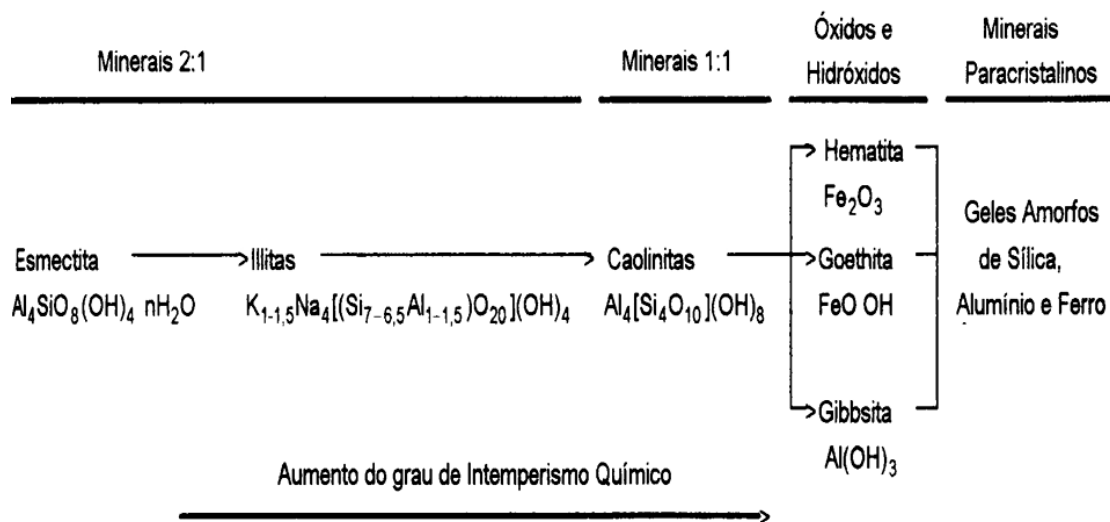
Bigarella *et al.*(1994) e Dersa (2006) afirmam que o processo denominado de laterização ocorre acima do nível freático e consiste na intensa migração superficial de partículas devido à alternância de estações secas (intensa evaporação) e úmidas (forte lixiviação), dando origem a um horizonte superficial poroso, permanecendo quase que exclusivamente os minerais mais estáveis.

Bigarella, Becker e Passos (1996) afirmam que o “complexo coloidal do solo” formado pelos coloides minerais (argila) e orgânicos (húmus) são os responsáveis pelas aglomerações dos grãos de silte e areia, dando origem aos agregados do solo. O teor de matéria orgânica pode

influir ainda em propriedades do solo, tais como: absorção e retenção de água; armazenamento de bases em formas trocáveis; e capacidade de fornecer nitrogênio, fósforo, enxofre e outros macro e micro-elementos nutritivos.

Por meio dos processos biológicos, físicos e principalmente químicos, os solos tropicais tendem a sofrer uma determinada evolução na formação dos minerais. Silva (2010) exemplifica que o remanescente de sílica pode combinar com o alumínio e formar a caulinita, e no caso de excesso de alumínio, origina-se a gibbsita. Já Cardoso (1995) apresenta a evolução mineralógica dos solos do Distrito Federal ao intemperismo químico, conforme Figura 2.1.

Figura 2.1 – Evolução mineralógica dos solos do Distrito Federal devido ao intemperismo químico (CARDOSO, 1995).



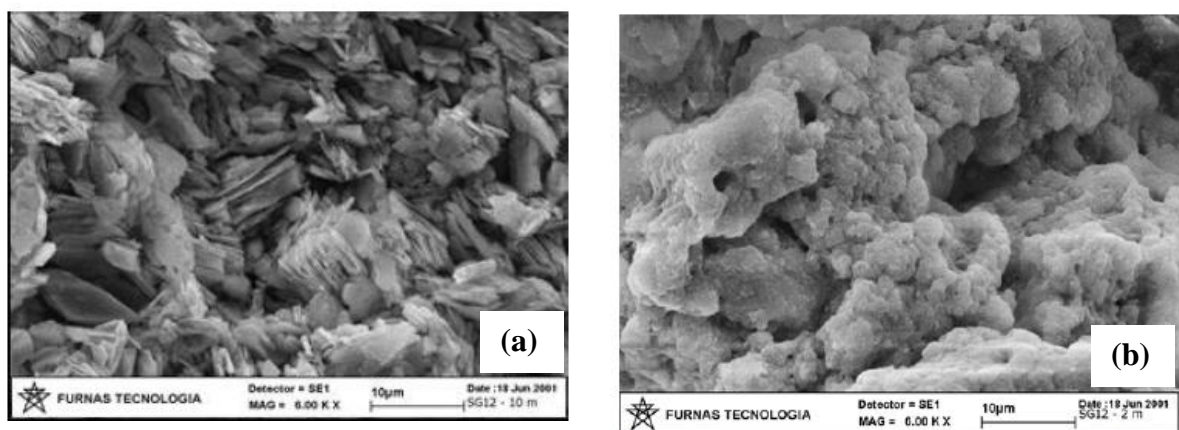
Camapum de Carvalho *et al.* (2012) estabelece de modo explicativo três categorias básicas de composição do solo no seu trajeto de evolução a partir da rocha: os minerais primários (feldspato e quartzo); os argilominerais com estrutura 2:1 (esmectitas e illitas); os argilominerais do tipo 1:1 (caulinita); e os oxihidróxidos de ferro e alumínio (hematita e gibbsita). As Figuras 2.2a e 2.2b ilustram a diferença de estruturas entre solos pouco intemperizados e profundamente intemperizados. Nos solos pouco intemperizados (Figura 2.2a) observa-se a presença de partículas isoladas e em pacotes. Já nos solos bastante

intemperizados (Figura 2.2b) elas se encontram predominantemente agregadas dando origem aos macroporos entre agregados.

Resende *et al.* (2005) afirmam que devido a formação da caulinita ser a partir de uma grande variedade de materiais de origem, torna-se um dos argilominerais de mais ampla ocorrência em solos, especialmente se tratando de solos tropicais. Já a respeito das micas e ilitas, os autores comentam que na maioria dos casos estes argilominerais são de origem primária, oriundas da rocha mãe, podendo ser de ampla variedade, como xistos, calcários, filitos, gnaisses e granitos.

Resende e Santana (1988) comentam que os Latossolos brasileiros são bastante intemperizados e apresentam composição principal da fração argilosa formada por caulinita, gibbsita, goethita e hematita, em diferentes proporções. Resende *et al.* (2007¹ *apud* CAMPOS *et al.*, 2008) complementam que os latossolos vermelhos e vermelhos amarelos apresentam predomínio de argilominerais do tipo 1:1 (caulinita) e sesquióxidos de ferro e alumínio, tal como a gibbsita. A concentração de caulinita é um indicativo de grau de coesão e a presença de gibbsita no solo promove a aglomeração de partículas de argila, formando consequentemente estruturas granulares, com macroporos

Figura 2.2 – Solos de Brasília: (a) Solo pouco intemperizado, profundidade de 10 m; (b) Solo profundamente intemperizado, profundidade de 2 m (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2012).



¹RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5^a ed. Lavras: Editora UFLA, 2007. 322 p

2.1.2 Mineralogia

Bigarella (1994), Sousa Pinto (2006), Silva e Santana (2013) enfatizam a existência de dois tipos de estruturas dos minerais, uma de tetraedros justapostos num plano e outra de octaedros. A caulinita, por exemplo, é formada por uma camada tetraédrica e uma octaédrica (estrutura de camada 1:1), com uma espessura de aproximadamente 7 \AA ($1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$), ligadas por pontes de hidrogênio que impedem a separação e a introdução de moléculas de água. Já as esmectitas e as ilitas, com um arranjo octaédrico entre duas tetraédricas (estrutura de camada 2:1), com cerca de 10 \AA de espessura, unidas por ligações de Van der Waals (íons O^{2-} e O^{2+}), são mais fracas do que as realizadas pelas estruturas 1:1.

Cada mineral, quando bem cristalizado, apresenta espaçamento interplanar característico, podendo ocorrer pequenas variações, devido principalmente ao grau de cristalinidade. Para a determinação dos minerais existentes em uma amostra, costuma-se realizar ensaios de difratometria por raios-X, gerando difratogramas, os quais apresentam diversos picos correspondentes aos ângulos de incidência de raios-X. Por meio da equação de Bragg obtém-se a distância entre os planos atômicos (para cada pico) e comparando-os com a distância interplanar conhecida de cada mineral é possível identificar os minerais existentes nas amostras de solo.

Resende *et al.* (2005) caracterizam o difratograma como sendo “uma resposta dos planos atômicos dos minerais à radiação de raios-X.” Albers *et al.* (2002) afirmam que a técnica de difração por raios-X é bastante eficiente pois na maioria dos cristais, “os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X.” Segundo Albers *et al.* (2002) e Resende *et al.* (2005) a incidência de um feixe de raios-X num cristal, causa a interação com os átomos do sólido, originando o fenômeno de difração, o qual ocorre segundo a Lei de Bragg (Equação 2.1), em função do ângulo de difração e da distância entre os planos atômicos de cada elemento cristalino.

$$n\lambda = 2d \text{ sen}\theta \quad (2.1)$$

Onde:

n = número inteiro referente à ordem da difração;

λ = comprimento de onda dos raios-X incidentes (no caso de fonte emissora ser o cobre; $\lambda_{\text{Cu}} = 0,15418 \text{ nm}$);

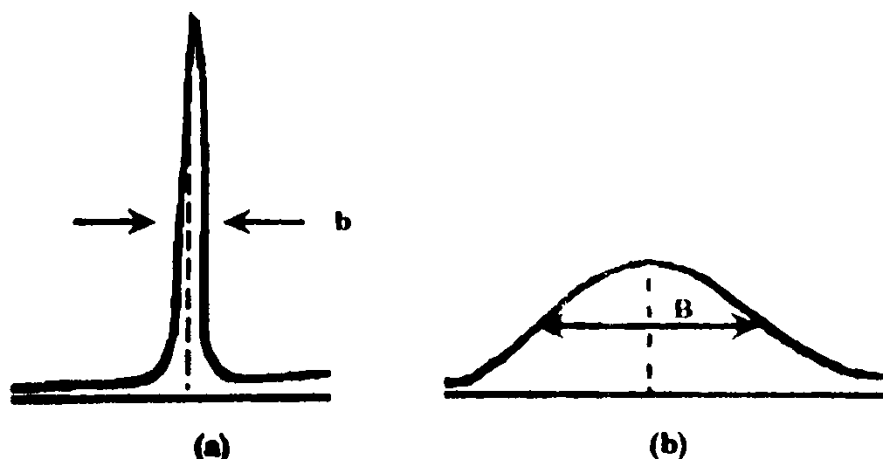
d: distância entre planos atômicos;

θ : ângulo de difração.

Resende *et al.* (2005) ressaltam ainda que o uso da difração de raios-X apresenta as finalidades de: identificar, determinar o grau de cristalinidade, o tamanho, a substituição isomórfica (entrada de um elemento no lugar de outro, sem alterar substancialmente a estrutura) e de quantificar os minerais existentes na amostra (área dos picos, comparadas a um padrão).

Analisando os picos obtidos nos difratogramas, Resende *et al.* (2005) dizem que o grau de cristalinidade e o tamanho da partícula são inversamente proporcionais à largura do pico à meia altura, ou seja, quanto mais largo for o pico, menor será o tamanho da partícula do cristal ou pior será o grau de cristalinidade (Figura 2.3b). Já os picos com largura à meia altura estreita, remetem a partículas grandes e bem cristalizadas (Figura 2.3a).

Figura 2.3 – (a) Pico de uma partícula grande e bem cristalizada com largura do pico à meia altura = b; e (b) pico de outra partícula menor ou pior cristalizada, com largura do pico à meia altura = B (RESENDE *et al.*,2005)



Devido à semelhança de comportamento frente à reflexão dos raios-X incidentes nos minerais, Resende *et al.* (2005) citam um exemplo que comumente ocorrem entre dois ou

mais minerais. Ambos os minerais, caulinita e haloisita, apresentam estrutura básica do tipo 1:1, contudo a caulinita costuma apresentar reflexão basal a 0,7 nm e a haloisita, pela presença de água, apresenta reflexão de 1,0 nm. Entretanto suas reflexões basais podem ser confundidas em torno de 0,7 a 0,74 nm se a caulinita estiver pobremente cristalizada ou a haloisita estiver parcialmente hidratada, sendo assim necessária a realização de tratamentos especiais pré-ensaios para melhor identificação.

Dentre os pré-tratamentos mais simples da amostra na execução do ensaio de difratometria por raios-X, Resende *et al.* (2005) apresentam duas formas de se preparar a lâmina que será submetida à irradiação por raios-X. A primeira é denominada **montagem orientada**, onde o material é disposto em porta-amostra apropriado, com a finalidade de beneficiar a orientação preferencial das partículas. No caso de não favorecer a orientação preferencial, a montagem é denominada **em pó**.

Resende *et al.* (2005) descrevem mais detalhadamente essas e outras técnicas e tratamentos especiais no preparo da amostra com a finalidade de destacar alguns componentes minerais, para facilitar sua e diferenciação no difratograma. Dentre essas técnicas destacam-se:

- Obtenção da fração argila: por meio de tratamentos físicos e químicos (peneiramento e sedimentação com defloculantes) separam-se as frações de argila das de areia e silte;
- Montagem orientada: por meio das técnicas de “esfregaço” (atrito brando entre laminas contendo uma pasta de argila com água) e da pipeta (suspensão diluída da argila é depositada na lâmina e posta para secagem) é possível identificar melhor os argilominerais silicatados;
- Montagem em pó: não há um tratamento ou orientação específica. Essa forma é recomendada, por exemplo, na diferenciação entre a caulinita e a haloisita;
- Saturação com potássio, magnésio e solvatação com etilenoglicerol ou glicerol e aquecimento: após cada um destes tratamentos, ou combinações entre si, montam-se lâminas orientadas. Dos difratogramas obtidos comparam-se com o da amostra sem tratamento, analisando o deslocamento ou cancelamento das reflexões (pícos);

- Remoção de ferro: possui o objetivo de remover o Fe livre (presente na hematita, goethita, maghemita, etc.) alterando o mínimo possível os Fe presentes nos minerais silicatos (magnetita e ilmenita);
- Remoção de silicatos e gibbsita: objetiva concentrar a amostra com óxidos de Fe, destruindo assim os minerais silicatados (podendo não ser completa) e eliminando facilmente a gibbsita. Contudo pode-se ocorrer ainda a destruição parcial da mica (ilita) e a eliminação da caulinita.

Albers *et al.* (2002) descrevem os procedimentos de glicolagem e aquecimento da amostra, afirmando que os procedimentos servem para ajudar na diferenciação de alguns argilominerais que possuem distância interplanar (d) semelhantes. A solvatação com etilenoglicol (glicolagem) faz com que alguns argilominerais realizem ligações com álcoois, e estes por sua vez, com a água, ocorrendo assim aumento da distância interplanar basal. Já o procedimento de aquecimento da amostra reduz a distância entre os planos atômicos.

Albers *et al.* (2002) após realizarem ensaios de difratometria em 03 (três) frações de argila distintas, e submetendo-as a três procedimentos diferentes (geral, glicolagem e aquecimento da amostra) comprovaram que não houve deslocamento dos picos para cada mineral, ocorrendo apenas a variação da intensidade de difração, ou seja, independentemente dos processos pré-ensaio realizados, o mineral continua na mesma localização 2θ de difração dos raios-X.

Paralelamente ao constatado por Albers *et al.* (2002), Resende *et al.* (2005) complementam que os minerais do grupo das micas podem ser identificados nos difratogramas de raios-X (orientado ou em pó) pelos picos mais expressivos na região de 1,00 e 0,33 nm (10 e 3,3 Å), geralmente na posição 2θ aproximada de $8,8^\circ$ e 27° , os quais não se alteram com os pré-tratamentos de saturação com potássio, magnésio e solvatação com etilenoglicerol ou glicerol e aquecimento.

Outro fator de relevância citado por Resende *et al.* (2005) é que para melhor interpretação dos picos dos óxidos de ferro recomenda-se o uso de radiações oriundas do cobalto ou ferro ($\text{CoK}\alpha$, $\text{FeK}\alpha$) ao invés de cobre ($\text{CuK}\alpha$) pois assim evita-se o fenômeno de fluorescência, o qual reduz a intensidade dos picos dos óxidos de ferro. Devido ao tamanho reduzido dos

óxidos de ferro, em muitos casos são recomendáveis a utilização de outras técnicas somadas à difração, como por exemplo, a espectroscopia infravermelha.

Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de serem os principais responsáveis pelas agregações em solos lateríticos, caracterizam a coloração do solo. Campos *et al.* (2008) estudando latossolos de Brasília, demonstrou que a goethita e a hematita são os principais minerais responsáveis pela coloração amarela e vermelha do solo, respectivamente.

Nesta mesma linha, Resende *et al.* (2005) afirmam ser os óxidos de ferro (óxidos, oxidróxidos e hidróxidos) os mais abundantes óxidos metálicos dos solos. Dentre os principais óxidos de ferro, destacam-se: a goethita (responsável pela coloração amarelada dos solos); a hematita (coloração avermelhada); a lepidocrocita (coloração alaranjada, particularmente nos mosqueados gleizados); e a ferridrita (cores bruno-avermelhadas em canais de raízes ou paredes de drenos).

Já quanto aos óxidos de titânio, estruturas resistentes ao intemperismo, comumente presentes nos solos tropicais, Cardoso (2002), analisando os solos tropicais do Distrito Federal, constatou que o TiO_2 dos solos estudados estão na forma de rutilo e anatásio, sendo o último dominante em relação ao primeiro, principalmente nos horizontes de solo mais superficiais.

Em termos gerais, abordando tanto as frações granulares quanto finas, Silva (2010) ressalta que é comum a ocorrência de quartzo nas frações pedregulho, silte e areia. Já a fração argila, constituída por argilominerais, é composta basicamente por silicatos de Al hidratados, sendo a caulinita (estrutura 1:1) o argilomineral predominante, apresentando baixa atividade coloidal. Ao se agregar com óxidos e hidróxidos, a atividade coloidal da caulinita torna-se ainda menor.

2.1.3 Comportamento geotécnico dos solos tropicais

Em relação à textura dos solos intensamente intemperizados e seu comportamento, Resende *et al.* (2005) e Souza Pinto (2006) afirmam que os feldspatos são os minerais mais abundantes e atacados pela natureza, dando origem geralmente à caulinita, haloisita, gibbsita e aos argilominerais do tipo 2:1, que pelo reduzido tamanho e constituição mineralógica apresenta comportamento extremamente diferenciado dos grãos de silte e areia.

Os solos lateríticos constituem a camada mais superficial de um perfil de solo, geralmente bem drenada, com cor característica, variando entre vermelho a amarelo e espessura média de 2 a 10 metros. Mineralogicamente, apresentam grãos de areia e pedregulho muito resistentes aos processos mecânicos e químicos, e elevada porcentagem de partículas constituídas de hidróxidos e óxidos de Fe e Al na fração argila. Devido aos agregados da fração fina apresentam grande quantidade de vazios preenchidos de ar, justificando assim a sua baixa densidade natural (COZZOLINO; NOGAMI, 1993).

Sousa Pinto (2006) ressalta que os solos argilosos podem possuir vazios entre as partículas argilosas que constituem as agregações, denominados de microporos, e entre as agregações, denominados de macroporos. Estas estruturas são de suma importância para o estudo de solos lateríticos, pois um solo com elevada fração argilosa, por exemplo, pode apresentar permeabilidade natural alta, visto que as agregações da fração fina pode se comportar como um solo granular.

Neste pensamento, Farias *et al.* (2011) afirmam que os solos bem intemperizados, lateríticos, apresentam poros oriundos de estruturas intra-agregadas (fração argilosa composta pela agregação de minerais e suas ligações) e interagregadas (arranjo de diferentes grãos e grumos), de características bastantes distintas. O comportamento hidráulico e mecânico dos solos são bastante influenciados pelos poros interagregados, e em menor proporção devido aos intra-agregados. Logo, em se tratando de solos tropicais, deve-se atentar para o uso de parâmetros como porosidade e índice de vazios globais, visto que um mesmo solo pode apresentar estruturas distintas.

De acordo com Mitchell e Sitar (1982² *apud* OTÁLVARO; CORDÃO NETO, 2011) os solos tropicais apresentam características diferenciais como: presença de agregações de partículas devido à ação dos agentes cimentantes; endurecimento dos argilominerais devido à secagem; baixo peso específico seco quando compactados; umidades naturais superiores às ótimas, entre outras.

Cardoso (2002) afirma que a presença de matéria orgânica e de oxi-hidróxidos de ferro no solo são responsáveis pelo aumento da plasticidade dos solos tropicais intemperizados. Farias

²Mitchell, J.K. and Sitar, N. 1982. Engineering properties of tropical residual soils, Proceedings of the Conference on Engineering and Construction in Tropical Residual Soils, ASCE, Honolulu, HI: 30-57.

et al. (2011) complementam que o fato de o solo possuir alta plasticidade, não significa necessariamente que tenha um comportamento mecânico desfavorável. Como exemplo, Nogami e Villibor (1995) citam que os óxidos e hidróxidos de Fe e Al, como a goethita e a gibbsita, apresentam propriedades pozolânicas (cimentícias), características úteis para a engenharia.

Romão (1995) e Delgado (2002) complementam que as argilas presentes em solos tropicais apresentam-se envolvidas por óxidos de ferro e alumínio. Essa condição mineralógica, além de determinar a formação das agregações, confere uma atividade muito baixa a esse solo.

Sousa Pinto (2006) afirma que os Limites de Atterberg são bons indicativos quanto à influência da fração fina argilosa no comportamento do solo. Dependendo da composição mineralógica, certos solos com elevados teores de argila podem apresentar índices mais baixos do que outros com pequena fração argilosa. Logo, o solo é denominado de muito ativo quando possui baixos teores de argila, em comparação a altos índices de consistência, conforme a Equação 2.2.

$$I_A = \frac{I_p}{\text{Fração argila (menor que } 0,002\text{mm)}} \quad (2.2)$$

Onde:

I_A : Índice de atividade da fração argila;

I_p : Índice de plasticidade.

Para $0,75 \leq I_A \leq 1,25$ tem-se uma fração argilosa considerada normal; para $I_A < 0,75$, tem-se uma argila inativa; e para $I_A > 1,25$, a fração argilosa é considerada ativa.

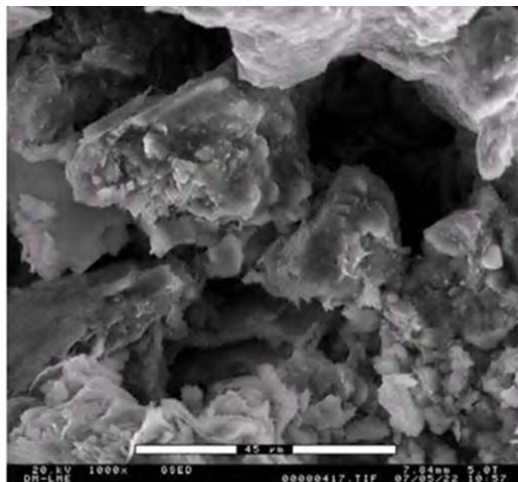
Meirelles e Davison Dias (2004) correlacionam a plasticidade com a coesão, sendo que solos não plásticos tendem a apresentar baixa a nenhuma coesão. Os autores citam ainda que mesmo em solos argilosos, com baixa plasticidade, suas partículas de pequenas dimensões e peso apresentarão baixa coesão, sendo facilmente desprendidas e carreadas. Ressalvam, contudo, “que essa análise não considera a cimentação capaz de conferir ao solo resistência ao

processo erosivo, mas alerta para o fato que a perturbação do seu estado natural poderá implicar em processos erosivos de grande intensidade.”

A respeito do comportamento de solos laterítico quando compactado, Dersa (2006) relata que estes materiais apresentam características desejáveis para sua aplicação na engenharia, como baixa expansão, resistência elevada, permeabilidade e deformabilidade baixa, segundo a classificação da miniatura compactada tropical (MCT). Quanto ao solo em estado natural, a instituição caracteriza-o como um “material homogêneo e pouco erodível”. Já os solos tropicais de comportamento não laterítico, geralmente apresentam “estrutura reliquiar da rocha matriz, embora possam desenvolver outras estruturas com o intemperismo.” Os minerais presentes geralmente se encontram em processo intermediário de modificação pela ação das intempéries, possuindo peculiaridades que permitem identificar suas variedades como: cor (verde, roxo, róseo, violeta, azul e branco), a presença de manchas, listras e mosqueamentos. Trata-se de um material heterogêneo e susceptível à erosão (DERSA, 2006).

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (1994) os solos lateríticos são metaestáveis, constituídos de micro e macroporos e, por consequência, podendo apresentar comportamento colapsível. Além disso, a existência de micro e macroporos resulta numa curva de retenção bimodal, com dois valores de entrada de ar, um na micro e outro na macroestrutura. A Figura 2.4, apresentada por Mascarenha (2008), representa uma imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura Ambiental, com aumento de 1000x, expondo os macroporos e os microporos presentes num típico solo laterítico.

Figura 2.4 - Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura de um solo laterítico, apresentando os macro e microporos (MASCARENHA, 2008).



2.2 PROCESSOS EROSIVOS

Salomão (2007) relata que o entendimento correto da dinâmica hídrica sobre o terreno é um fator essencial para um efetivo controle de prevenção e correção de processos erosivos. O autor destaca ainda dois importantes eventos que ocorrem no início dos processos erosivos: o impacto das gotas da chuva no solo e o escoamento superficial das águas. O primeiro provoca a desagregação das partículas, principalmente em solos desprotegidos de vegetação. Já o segundo é responsável pelo arrancamento e transporte das partículas desagregadas.

Jacintho *et al.* (2006) definem erosão como sendo o transporte de material desagregado ou desgastado pela ação de agentes erosivos como a água, vento ou gelo. Devido a diversas variáveis que contribuem para o desprendimento e transporte do solo, a compreensão de um processo erosivo deve abordar uma série de aspectos, como: condições climáticas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, tipos de solo, proteção superficial (principalmente pela vegetação) e ação antrópica.

Em outras palavras, Camapum de Carvalho *et al.* (2006) dividem em dois fatores, externos e internos, os aspectos que contribuem para a formação e intensificação dos processos erosivos. Dentre os fatores externos estão: potencial de erosividade da chuva, condições de infiltração, escoamento superficial, declividade e comprimento do talude ou encosta. Já como fatores internos são citados: gradiente crítico, desagregabilidade e erodibilidade do solo. Esses autores enfatizam a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo como fatores de elevada ponderação em estudos de erosões, principalmente em estudos para planejamento do uso do solo. Camapum de Carvalho e Melo (2006) enfatizam ainda que a ocupação e o uso do solo desordenado e sem planejamento no meio urbano é um dos principais motivos do surgimento de erosões de grande porte, dos tipos ravina e voçoroca.

Camapum de Carvalho, Lima e Mortari (2001) definem erosividade como sendo a capacidade de ação do agente erosivo (das gotas de chuva, do escoamento superficial e de fluidos agressivos) em causar o destacamento e o transporte do solo. Já a erodibilidade, segundo Vilar e Prandi (1993³ *apud* CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006), é definida como a resistência do solo ao processo erosivo, incluindo além de suas características intrínsecas,

³VILAR, O. M. e PRANDI, E. C. (1993). Erosão dos solos – Solos do interior de São Paulo. (eds. J.C.A. Cintra e J.H. Albiero), ABMS, Departamento de Geotecnia, EESC, USP, p. 177-206.

fatores secundários como os ciclos de umedecimento e secagem, e composição da água presente.

Sobre os tipos de erosão, Salomão (2007) diz que o escoamento superficial da água é um dos principais fatores que determinam sua ocorrência em uma vertente ou talude, podendo ser do tipo laminar ou em sulcos.

2.2.1 Tipos de erosões

Camapum de Carvalho *et al.* (2006) classificam as erosões em quatro grandes grupos, de acordo com os agentes erosivos: erosão hídrica, eólica, glacial e organogênica. Abreu (2007) chama a atenção para três tipos específicos de erosões:

- Erosão geológica: erosão natural, decorrente de períodos geológicos que contribuíram para a formação de montanhas, planícies, serras e vales;
- Erosão eólica: possui o vento como agente erosivo, o qual provoca abrasão de rochas pelo atrito de grãos de areia e de solo. Ocorre mais intensamente em regiões áridas e semiáridas;
- Erosão hídrica: considerada o tipo mais comum de erosão, pois é devida à ação da água em movimento, seja pela chuva, rios ou ondas.

Quanto à forma de ocorrência e desenvolvimento da erosão, Camapum de Carvalho *et al.* (2006) e Abreu (2007) citam alguns outros tipos de erosão: erosão superficial ou laminar; erosão interna; sulcos, ravinas e voçorocas; erosão da fertilidade do solo; e deslocamentos de massas de solo.

2.2.1.1 Erosão superficial ou laminar

Santos, Sobreira e Coelho Neto (2002) relatam que o escoamento superficial laminar é o princípio dos processos erosivos provocados pela ação das chuvas, que ao concentrar-se forma sulcos, podendo dar origem a ravinas e, posteriormente, a voçorocas, sendo esta última o estágio que causa os maiores danos, estabelecendo um impedimento ao processo de desenvolvimento sustentável de qualquer região.

A erosão laminar ocorre devido ao escoamento difuso das águas de chuva, resultando na remoção relativamente uniforme das camadas ou horizontes superficiais do solo. O escoamento superficial é inversamente proporcional à taxa de infiltração, ou seja, o parâmetro de permeabilidade apresenta significativa importância no estudo deste tipo de erosão (SALOMÃO, 2007). Camapum de Carvalho *et al.* (2006) apresentam fatores que se correlacionam diretamente com o grau de infiltração do solo, como o grau de compactação, a porosidade do solo, a vegetação e a topografia.

Sobre o transporte das partículas do solo, ou de suas agregações, Camapum de Carvalho *et al.* (2006) enfatizam que o transporte das partículas do solo ou de agregados ocorre em dois momentos: pelo impacto das gotas de chuva e pela tensão de arraste entre a lamina d'água e o solo. Bertoni e Lombardi Neto (1990⁴ *apud* ABREU, 2007) afirmam que a erosão laminar geralmente é menos perceptível, devido à homogeneidade do processo erosivo e por carrear partículas mais leves e nutrientes do solo. Contudo, em culturas perenes e em campos com espécies arbóreas é possível notar sinais deste tipo de erosão ao analisar as raízes das árvores, pois as mesmas ficam expostas, conforme é possível observar na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Raízes expostas devido à erosão laminar (Foto: ALDEN, 2000 em BACELLAR, 2006).



Camapum de Carvalho *et al.* (2006) abordam questões de culturas anuais, citando o exemplo de um solo coesivo e rico em matéria orgânica, que, por sua natureza, pareceu ser pouco erodível. Contudo, o mesmo solo costumava ser arado e gradeado para o plantio, o que o tornava vulnerável à erosão laminar, ainda mais ao se observar que esse processo de

⁴BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo: Ícone, 1990.

preparação da terra iniciava-se próximo ao período chuvoso. Já em áreas urbanas, os loteamentos recém-implantados com terrenos desmatados e as ruas não pavimentadas são as principais localidades afetadas pela erosão superficial.

Bastos, Milititsky e Gehling (2000) afirmam que dentre os ensaios de erosões laminares, o ensaio de Inderbitzen é o mais empregado no meio geotécnico, principalmente pela sua simplicidade. O ensaio baseia-se na mensuração da perda de solo em amostras cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável por onde passa um fluxo d'água com vazão controlada. O equipamento apresenta diversas variáveis, como: declividade de rampa, vazão de escoamento e duração do ensaio. Sendo assim, o equipamento de Inderbitzen procura simular em laboratório o comportamento do solo no campo frente a um fluxo d'água superficial.

2.2.1.2 Erosão interna

Dentre os processos erosivos internos, destacam-se dois tipos principais de ocorrência, a esqueletização e o piping. Segundo Camapum de Carvalho (2006) o fenômeno da esqueletização é o processo de degradação física do solo que aumenta sua porosidade, podendo gerar instabilidade dos taludes das erosões. O processo de esqueletização ocorre devido ao transporte de partículas ou de compostos ou elementos químicos solubilizados.

Segundo Augustin e Aranha (2006), no processo de *piping* ocorrem à formação de túneis, a partir do arraste de partículas de argila e outros colóides, ou mesmo da remoção de componentes do solo por meio de solução, no qual atuam forças tanto físicas, quanto químicas. Em geral esse fenômeno ocorre na transição de camadas mais permeáveis, para camadas pouco permeáveis.

O ensaio denominado furo de agulha ou *Pinhole test* é uma das formas de se entender o mecanismo de funcionamento da erosão localizada em solos dispersivos. Sherard, Decker e Ryker (1972⁵ *apud* NBR 13602, ABNT, 1996a) definem que o processo de dispersão ou defloculação ocorrem em argilas muito erodíveis, denominadas de solos dispersivos, podendo ser comparados a solos não coesivos como as areias finas e siltes.

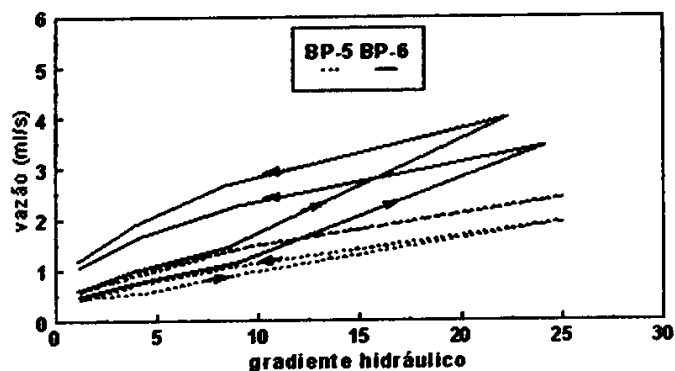
⁵SHERARD, J. L.; DECKER, R. S.; RYKER, N. L. (1972) "Piping in Earth Dams of Dispersive Clay". Proceedings on the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth – Supported Structures, ASCE, vol. 01, Part 1, p.p. 589-626.

A dispersão ocorre quando as forças de repulsão entre as partículas da argila são superiores as forças de atração, formando uma suspensão, quando em contato com a água, ou erodindo internamente (carreamento de partículas dispersas) na presença de fluxo de água. A relação entre a quantidade de cátions de sódio e a quantidade de cátions de sódio, potássio, cálcio e magnésio dissolvidos na água intersticial irão definir a susceptibilidade de ocorrer erosão interna por difusão, pois o sódio age no sentido de aumentar a espessura da camada de água difusa (envolve as partículas individuais de argila), reduzindo assim as forças de atração entre partículas (NBR 13602, ABNT, 1996a).

Porém, como descrito em Lima (2003), os solos tropicais de maneira geral apresentam baixa concentração de sódio, por causa do grau de intemperismo, por isso não apresentando dispersibilidade. Inicialmente os ensaios de furo de agulha eram submetidos a diferentes cargas hidráulicas, que iam sendo incrementadas com o decorrer do tempo. Santos (1997) propôs uma modificação na metodologia de análise dos resultados, observando-se os gráficos de vazão versus carga hidráulica, gerados, para o mesmo gradiente hidráulico. Em caso de a fase de descarga apresentar maior vazão do que a fase de carga, isso significa que o solo está sendo erodido internamente.

Em um solo localizado em Goiânia, estudado por Santos (1997), foi notado por ele, conforme representado na Figura 2.6, que a amostra BP-6 apresentou uma variação entre a vazão de carga e descarga para os mesmos gradientes hidráulicos, confirmando assim o arraste interno de partículas. Na amostra BP-5 a variação entre carga e descarga para o mesmo gradiente hidráulico foi praticamente desprezível, representando um solo de baixa erodibilidade interna.

Figura 2.6 – Ensaio do furo de agulha para solo proveniente da voçoroca em Goiânia – GO (SANTOS, 1997).



A NBR 13601 (ABNT, 1996b), apresenta de forma bastante simples outro tipo de ensaio para análise da dispersibilidade do solo, conhecido como ensaio de dispersão rápida, ensaio do torrão e *crumb test*, o qual consiste em analisar uma pequena porção de solo em relação à dispersão quando inundado (em béquer contendo de 100 a 150 ml de água destilada) por um período de uma hora, conhecendo assim algumas de suas características quanto ao fenômeno de erosão interna (JACINTHO *et al.*, 2006).

Analisando a capacidade de desprendimento de partículas ao redor da amostra de solo imersa, a NBR 13601 (ABNT, 1996b) classifica em 04 graus a tendência de desprendimento:

Grau 1 – sem reação: a amostra permanece inalterada no fundo do béquer, sem nenhum sinal de turbidez na água, permanecendo lisa a superfície do corpo de prova;

Grau 2 – pequena reação: uma pequena turbidez da água é observada na superfície da amostra;

Grau 3 – reação moderada: verifica-se uma turbidez, acompanhada de uma fina camada de partículas no fundo do béquer;

Grau 4 – forte reação: observa-se uma nuvem de coloides em suspensão, praticamente cobrindo todo o fundo do béquer. Em casos extremos, toda a água do béquer torna-se turva.

Ainda segundo a NBR 13601 (ABNT, 1996b) o ensaio do torrão é recomendado apenas em investigações preliminares, pois segundo Sherard, Dunnigan e Decker (1976⁶ *apud* NBR 13601, ABNT, 1996b), quando o ensaio indica a ocorrência de dispersão, provavelmente trata-se de um solo dispersivo, contudo o inverso não é necessariamente verdadeiro, ou seja, um solo pode ser dispersivo sendo classificado como não dispersivo. Logo, a presente Norma sugere a realização de outros ensaios para se obter resultados mais conclusivos, tais como o ensaio sedimentométrico comparativo, ensaios químicos da água intersticial ou o ensaio do furo de agulha (*pinhole test*).

⁶ SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, R. S. (1976) "Identification and Nature of Dispersive Soils". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 102, n° GT4, p.p. 287-301.

2.2.1.3 Sulcos, ravinas e voçorocas

Numerosas definições de sulcos, ravinas e voçorocas podem ser encontradas na literatura, podendo ser baseadas na geometria, tamanho ou em aspectos geomecânicos e de fluxo nas erosões.

A erosão em sulcos ou canais é devida à concentração de fluxo de água em determinadas localidades, acarretando em pequenas incisões na superfície do terreno, com tendência de expansão destas incisões, surgindo assim erosões denominadas de ravinas ou voçorocas (SALOMÃO, 2007).

Quando a erosão em sulco atinge o nível freático, o fluxo de água subsuperficial passa a contribuir também para o desenvolvimento da erosão, formando uma feição denominada de boçoroca ou voçoroca (PICHLER, 1953⁷ *apud* SALOMÃO, 2007). Nesse caso, o processo erosivo pode evoluir com o carreamento do solo provocado por *piping*, instabilizando e conseqüentemente intensificando fenômenos de colapsos e desabamentos (SALOMÃO, 2007).

A respeito das voçorocas, Mortari (1994) e Abreu (2007) apresentam outras características: o canal erodido é profundo e apresenta as forma de “U” ou “V”, podendo ser superficiais ou subsuperficiais, ou seja, com ação ou não das águas subterrâneas. Em geral a evolução das voçorocas ocorre mais intensamente em profundidade e comprimento, do que em largura, no início do processo, alargando-se mais durante a evolução do processo.

Para Camapum de Carvalho *et al.* (2001), sulcos são canais de até 10 cm de profundidade, ravina são canais entre 10 e 50 cm de profundidade, ou quando o talude começa a apresentar instabilidade por deficiência de coesão real e de cimentação, adotando a maior delas. As boçorocas seriam classificadas a partir da profundidade máxima das ravinas, estando atreladas a taludes instáveis e ao afloramento do nível freático.

Um dos ensaios bastante realizados em amostras de taludes para análise qualitativa do comportamento de um solo frente ao processo de imersão é o ensaio de desagregação. Santos (1997) realizando ensaios de desagregação em solos de erosões em Goiânia identificou que o

⁷ PICHLER, E. (1953). Boçorocas. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, v. 2, n. 1, p. 3-16

principal mecanismo observado nas amostras foi o abatimento provocado pelo processo de saturação das amostras, que anula a sucção matricial e gera poropressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo.

Holmgren e Flanagan (1977⁸ *apud* SANTOS, 1997) apresentam o seguinte sistema de classificação quanto à resposta do solo frente à inundação no ensaio de desagregação:

Sem resposta: quando a amostra mantém a forma e o 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 a 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 consequente fraturamento;

Dispersão: as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma "nuvem" coloidal que cresce à 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. (HOLMGREN; FLANAGAN, 1977 *apud* SANTOS, 1997, p. 90).

2.2.1.4 Outros tipos de erosão

Camapum de Carvalho *et al.* (2006) e Abreu (2007) definem erosão da fertilidade do solo como a perda de fertilidade (nutrientes) do solo por diluição na água, mesmo sem ocorrer

⁸ 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

remoção física do solo. Este tipo de erosão acaba por afetar mais intensamente o horizonte A, por ser mais fértil.

Em relação aos deslocamentos de massas de solo, Abreu (2007) afirma que os deslocamentos ocorrem geralmente devidos aos cortes feitos nas bases de morros com vertentes muito inclinadas ou pelo afloramento do nível freático nos taludes naturais.

Existem ainda os processos erosivos nas margens dos reservatórios, as quais são intensificadas por embate de ondas ou pelo alto grau de encharcamento em períodos chuvosos, provocando a queda de taludes. Como forma de evitar estes processos devem-se proteger as margens com vegetação ou utiliza-las seguindo práticas conservacionistas, principalmente em regiões próximas ao barramento (CARVALHO *et al.*, 2000).

2.2.2 Erodibilidade em solos não saturados

Geralmente, profissionais da área geotécnica costumam dar maior ênfase em estudos que abordam solos saturados, como percolação através de estruturas de terra e na superfície. Apesar disso, a partir da década de 60 tem havido uma maior preocupação envolvendo também as condições não saturadas (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Fredlund e Rahardjo (1993) e Miguel, Teixeira e Padilha (2006) afirmam que os solos podem ser encontrados sob duas condições: saturados ou não saturados. Quando seus vazios encontram-se totalmente preenchidos por água, denomina-se solo saturado, e quando há presença de ar, denomina-se não saturado. Devido à pressão isotrópica da água intersticial, ou seja, a diferença de pressão entre as fases líquidas e gasosas presente nos vazios do solo, ocorre o fenômeno denominado de sucção, o qual influenciará, juntamente com as condições climáticas, no acréscimo ou decréscimo do grau de saturação.

A sucção total pode ser dividida em duas componentes:

- Sucção matricial: é a diferença entre pressão de ar e água nos vazios do solo ($u_a - u_w$), depende da estrutura e composição do solo, e tende a zero com a saturação do solo;
- Sucção osmótica: depende basicamente da concentração química da água do solo.

A sucção matricial e a tensão efetiva são consideradas duas variáveis de suma importância para obtenção da resistência, compressibilidade e permeabilidade de um solo (VILLAR, 1997).

Fredlund e Rahardjo (1993) citam a curva característica solo-água (CCSA) de sucção como uma forma de obtenção da variação de sucção do solo, em função do teor de umidade ou do grau de saturação. Por meio da curva de sucção é possível estimar a capacidade de retenção de água no solo.

Otálvaro e Cordão-Neto (2011) afirmam que a curva de retenção solo-água é a relação entre sucção e o volume de água armazenado nos poros do solo. Usualmente a mesma é definida em termos de sucção matricial, expressa como a diferença entre as pressões de ar e água ($u_a - u_w$) nos poros do solo. A partir da curva de retenção solo-água pressupõem-se o comportamento hidromecânico do solo, como a resistência ao cisalhamento, a variação de volume e o fluxo de água.

Para Fredlund e Rahardjo (1993), as CCSA podem ser obtidas em laboratório por trajetórias de secagem ou molhagem. Contudo, geralmente, as curvas não coincidem entre si, devido ao fenômeno de *histerese*. Este fenômeno está associado a fatores como não uniformidade geométrica de cada poro, bolhas de ar oclusas (processo de umedecimento) e alterações na estrutura do solo decorrentes da expansão ou contração.

Vertamatti e Araújo (1998) e Marinho (2005) relatam que o formato da curva característica de um solo é bastante influenciado pelo histórico de tensões sofridas e conseqüentemente pelo volume de vazios da amostra. Nacinovic, Mahler e Avelar (2012) complementam que, em geral, “quanto mais diminuto as dimensões dos poros, maior será a capacidade de retenção de água e, maior será o valor da sucção que permite a entrada de ar e o avanço da interface ar/água (membrana contrátil)”.

A diferença entre granulometrias acaba por gerar diferenças significativas entre curvas características de sucção, comparando-se os solos granulares aos solos finos. No primeiro caso ocorre perda brusca de umidade nos macroporos (baixo valor de entrada de ar). Já em solos finos as curvas são geralmente mais suaves, pois os macroporos apresentam dimensões reduzidas. Contudo, solos tropicais lateríticos comumente apresentam distribuição de vazios

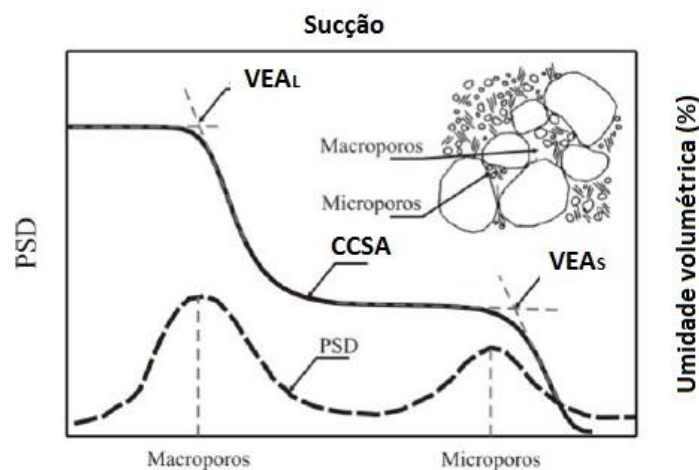
irregulares, por vezes mal graduados, e com características bimodais (MIGUEL; TEIXEIRA; PADILHA, 2006).

Em análise aos comportamentos típicos de CCSAs, Camapum de Carvalho (2011) cita dois tipos de curvas, as bimodais, onde a distribuição de poros se concentra em dois extremos (macro e microporos) e as monomodais, onde geralmente apresentam distribuição de poros bem graduados e/ou uniformes. Ressalva-se que as curvas bimodais são típicas de solos tropicais.

Otálvaro e Cordão-Neto (2011) apresentam um modelo de Curva Característica Solo-Água (CCSA) do tipo bi-modal e uma curva de densidade de tamanho de poros (PSD), conforme Figura 2.7, sendo que o PSD está relacionado com o diâmetro dos poros dominantes na amostra. A partir da Figura 2.7, é possível notar a existência de dois diâmetros de poros predominantes na amostra, um referente aos macroporos e outro aos microporos. A interpretação da CCSA é fundamentada principalmente nesse valores, apresentando conseqüentemente, dois valores de entrada de ar (VEA), sendo o VEA_L referente aos macroporos e o VEA_s referente aos microporos.

Dentre os diversos modelos existentes para a representação matemática dos dados experimentais da curva de retenção destaca-se, neste trabalho, a equação proposta por Durner (1994), o qual modificou a expressão para a curva característica de Van Genuchten (1980), a fim de estendê-la a curvas bimodais, típicas dos solos tropicais. A nova equação proposta é apresentada na Equação 2.3:

Figura 2.7 – Modelo de CCSA e PSD do tipo bi-modal, comumente referente a solos tropicais.



$$w = \frac{100e_{wL}}{G} \left[\frac{1}{1 + (\alpha_L * (u_a - u_w))^{n_L}} \right]^{m_L} + \frac{100e_{wS}}{G} \left[\frac{1}{1 + (\alpha_S * (u_a - u_w))^{n_S}} \right]^{m_S} \quad (2.3)$$

Onde:

G: densidade do solo;

e_{wL} : índice de vazios dos macroporos;

α_L : relacionado ao valor de entrada de ar dos macroporos;

n_L : inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos macroporos;

m_L : inclinação da reta que relaciona umidade e sucção na transição;

e_{wS} : índice de vazios dos microporos;

α_S : relacionado ao valor de entrada de ar dos microporos;

n_S : inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos microporos;

m_S : inclinação da reta que relaciona umidade e sucção após o valor de umidade higroscópica do solo.

Vale ressaltar que m pode ser obtido a partir de n , pela seguinte relação (Equação 2.4):

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.4)$$

Onde:

m : inclinação da reta que relaciona umidade e sucção na transição e após o valor de umidade higroscópica;

n : inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos macros e microporos.

Brooks e Corey (1964)⁹ e White *et al.* (1970)¹⁰, *apud* Gitirana Jr. e Fredlund (2004), relatam que o solo permanece saturado até o valor de entrada de ar nos macroporos, onde os poros de

⁹ Brooks, R. H., and Corey, A. T. (1964). "Hydraulic properties of porous media." *Hydrol. Paper No. 3*, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., 27.

¹⁰ White, N. F., Duke, H. R., and Sunada, D. K. (1970). "Physics of desaturation in porous materials." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 165–191

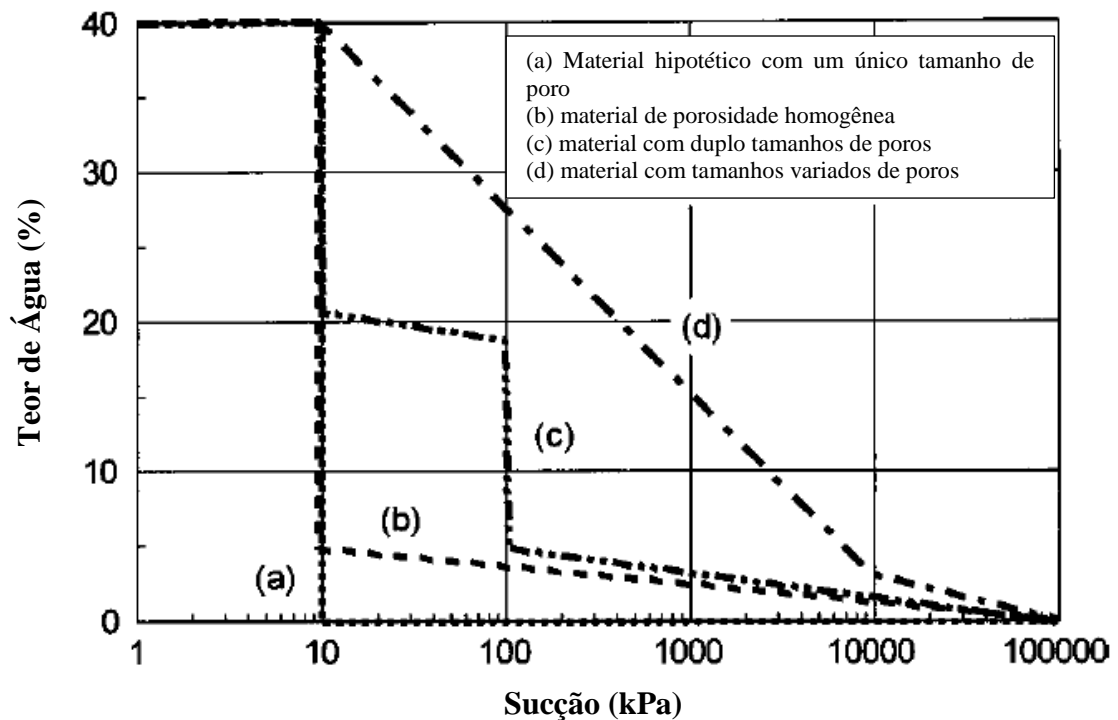
maior dimensão começam a ser drenados. Gitirana Jr. e Fredlund (2004) definem outros parâmetros de relativa importância na análise das CCSAs, como: o valor do grau de saturação residual (S_{res}) e a sucção residual (ψ_{res}), onde grandes aumentos de sucção refletem em pequenas mudanças no grau de saturação. Tratando-se de solos de comportamento bi-modal, têm-se valores de S_{res} e ψ_{res} distintos para os macros e microporos.

Camapum de Carvalho (2011) analisando curvas características solo-água (CCSA) realizadas por Camapum de Carvalho *et al.* (2002) num perfil de intemperismo do Distrito Federal, chegou a conclusão, no estudo específico, que apesar de o potencial de retenção de água estar relacionado com as propriedades físicas microestruturais (distribuição de poros, macroporosidade e microporosidade), o mesmo é mais dependente das propriedades químicas e mineralógicas do que das propriedades físicas globais (índice de vazios global). No caso de solos menos ativos, como os arenosos (quartzosos), o potencial de retenção de água será muito mais dependente das propriedades físicas que das químico-mineralógicas.

Marinho (2005) apresenta um gráfico (Figura 2.8) de Sucção x Teor de água, representando os típicos formatos existentes das curvas características solo-água (CCSA), sendo que a curva (a) representa um material hipotético rígido poroso, com um único tamanho de poro. Contudo, o autor ressalta que a remoção total de água, mesmo em solos porosos, depois do valor de entrada de ar (sucção residual) é bastante incomum, pois seriam necessárias elevadíssimas sucções para a remoção total da água presente. Logo, o formato da curva (b) seria a mais representativa para solos com distribuição uniforme dos poros, apresentando sucção residual mais comumente observada na prática. O formato da curva (c) representa um solo com predominância de dois poros de tamanhos diferentes, os micros e macroporos, típicos de solos tropicais. Já solos bem graduados podem ser representados pela curva (d), apresentando geralmente uma redução gradual do teor de umidade em função do acréscimo de sucção.

Segundo Miguel, Teixeira e Padilha (2006) o processo de laterização ocorre devido aos ciclos de infiltração e evaporação, ocorrendo assim a migração de partículas, formando um horizonte poroso com minerais mais estáveis (ex.: quartzo, magnetita e caulinita). Devido a sua alta porosidade, os solos lateríticos apresentam boa capacidade de drenagem, permanecendo geralmente no estado não saturado. Em muitos casos, a estrutura agregada dos solos finos lateríticos se comporta como siltes ou mesmo como areias finas.

Figura 2.8 – Típicas curvas características solo-água (MARINHO, 2005)



Araújo (2012) afirma que a sucção é uma característica do solo de grande relevância na erodibilidade, sendo inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a sucção menor a susceptibilidade do solo à erosão. Contudo, conforme é destacado em item posterior, em processos erosivos laminares, a sucção e a erodibilidade parecem ser diretamente proporcionais.

Fatores como chuvas e variações de temperatura atuam degradando e instabilizando os taludes de voçorocas e encostas naturais, assim como as condições físicas, químicas e de sucção, são bastante influenciados pela drenagem do solo (JACINTHO *et al.*, 2006).

Quanto à atuação da água na estabilidade de encostas e taludes, Jacintho *et al.* (2006) apresentam dois mecanismos amplamente discutidos na literatura:

- O primeiro mecanismo é provocado pelo rápido aumento de pressões positivas de ar geradas em eventos pluviométricos intensos. Nesse caso, a ruptura é provocada por causa do fluxo d'água desenvolvido aproximadamente paralelo à superfície da encosta, devido à ocorrência de uma camada que pode ser instabilizada, situada sobre

um horizonte menos permeável, o que provoca dessa forma um brusco aumento de poropressões positivas.

- O segundo mecanismo é causado pela rápida redução da sucção nos solos, nos quais a ruptura ocorre devido à perda de sucção, durante o processo de infiltração nas encostas, com o avanço da frente de saturação. Essa frente, quando alcança profundidades abaixo da zona com presença de raízes, pode provocar a perda de coesão aparente.

Outro problema devido à variação das pressões de ar e água, é exemplificado por Santos Júnior *et al.* (1997¹¹ *apud* Jacintho *et al.*, 2006), a qual pode provocar, a longo prazo, a fadiga estrutural do solo, acarretando também a instabilidade do talude.

Bastos, Gehling e Milititsky (1999) procuraram correlacionar a perda de coesão do solo com seu umedecimento por fluxo superficial. Esses autores demonstraram que a resistência à erosão do solo superficial apresenta relação direta com a resistência ao cisalhamento do solo na superfície, representada pela coesão. Nesta mesma linha, Bender (1985¹² *apud* BASTOS, GEHLING e MILITITSKY, 1999), afirma ser a coesão um dos parâmetros mais adequados para avaliar a resistência à erosão.

Ainda quanto à resistência ao cisalhamento na superfície dos terrenos, representada pela coesão Bastos, Gehling e Bica (1998¹³ *apud* BASTOS; MILITITSKY e GEHLING, 2000) concluíram em estudo que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior perda de coesão com o umedecimento e inundação, logo são mais vulneráveis ao destacamento de partículas por cisalhamento hidráulico.

¹¹ SANTOS JÚNIOR, F. O., LACERDA, W. A. e EHRLICH, M. (1997). Triaxial tests with cyclic pore pressure variation for simulation of the seasonal variation of water level in slopes. In: Proc. Symposium on recent developments in Soil and Pavement Mechanics. Rio de Janeiro. 6p.

¹² BENDER, H. Erosion: Un probleme de resistance au cisaillement en fonction du chemin des contraintes pendant l'infiltration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANIS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1., 1985, Brasília/DF. Proceedings..., Brasília/DF: ABMS, 1985. v.2, p.15–25.

¹³ BASTOS, C.A.B.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. **Some considerations about the shear strength and erodibility of unsaturated residual soils.** In: International Conference on Unsaturated Soils, 2., 1998, Beijing. Proceedings..., Beijing: ISSMGE/CISMGE–CCES, 1998a. v.1, p.19–24.

Bastos, Gehling e Milititsky (2001a) destacam que os solos saprolíticos arenosos são potencialmente erodíveis. A redução na coesão entre partículas e/ou entre agregados, provocada pela perda de cimentação e de sucção em virtude do aumento de umidade pelo fluxo d'água superficial são responsáveis pela baixa resistência à erosão desses solos.

Com relação à erodibilidade em solos tropicais, Facio (1991) e Bastos, Gehling e Milititsky (1999) destacam a perda de coesão com a redução da sucção matricial. Para Bastos, Gehling e Milititsky (1999) os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior redução da coesão com a saturação do solo na condição de fluxo d'água superficial.

Ainda em relação à coesão, Menezes e Pejon (2010) afirmam que materiais finos são menos erodíveis que grossos, devido as suas forças de coesão. Segundo esses autores, o umedecimento do solo pode dissolver os agentes cimentantes e reduzir a coesão aparente (coesão grãos-água), podendo causar brusca redução de volume e colapso do solo.

Contudo, nem sempre o colapso advém da redução da coesão aparente, pode ocorrer também devido ao excesso de poropressão positiva, conforme pode ser constatado no ensaio de desagregação, com inundação total ou parcial. Em se tratando de inundação total, pode ocorrer a ruptura estrutural do corpo de prova, caso a fase ar seja contínua, pois o efeito da sucção/capilaridade envolve todo o corpo de prova, reduzindo seu volume. Essa redução de volume aumenta consequentemente a poropressão positiva de ar, tornando-a superior à coesão do solo (tensão efetiva mais cimentação) (JACINTHO *et al.*, 2006; SANTOS, 1997).

Segundo Jacintho *et al.* (2006), o solapamento de bases de taludes pode ser exemplificado como um fenômeno de ruptura estrutural. Esse fenômeno de ruptura estrutural não tende a ocorrer quando a fase ar é descontínua, nem quando a inundação é parcial, pois a variação da sucção é mínima, para o primeiro caso, e no segundo caso há tempo de o ar ser expulso do solo à medida que ocorre a ascensão capilar.

Quanto à relação entre o grau de saturação do solo e o escoamento superficial, nos processos erosivos o grau de saturação pode ser determinante no volume de água a ser escoado. Em um perfil de solo, caso a fase ar seja contínua, a lâmina de água superficial impedirá a saída de ar do solo, aumentando significativamente a pressão positiva, consequentemente resistindo à infiltração da água e aumentando o escoamento superficial (JACINTHO *et al.*, 2006).

2.2.3 Processos erosivos em solos tropicais

Fortes, Zuppolini Neto e Merighi (2002) ressaltam que as classificações tradicionais do solo, quando aplicadas a solos de países de clima tropical, como no caso o Brasil, apresentam sérias discrepâncias quanto ao comportamento geotécnico esperado do solo.

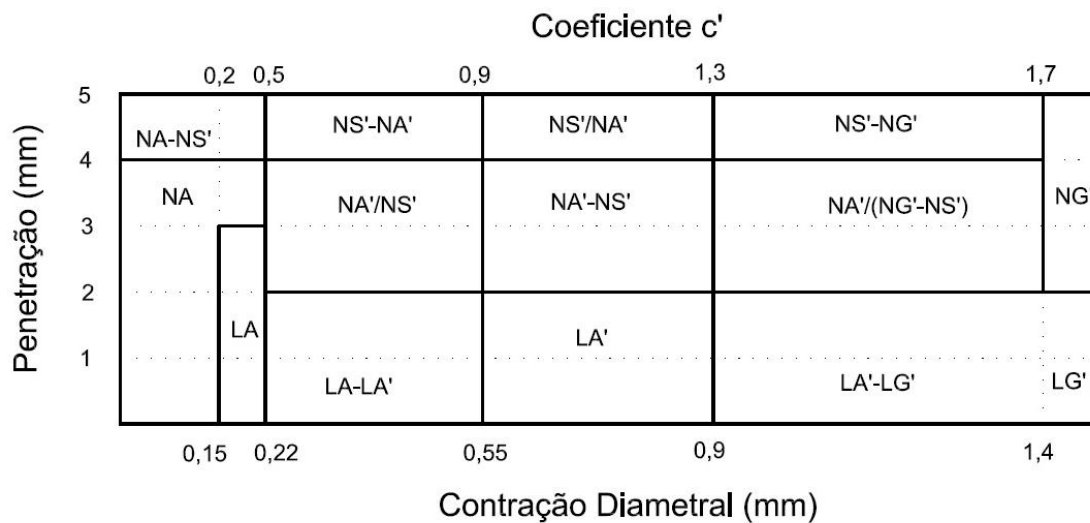
Uma das formas de classificar os solos quanto ao seu comportamento tropical é baseado no método da pastilha, desenvolvido por Nogami e Villibor (1995) e padronizado por Fortes, Zuppolini Neto e Merighi (2002) e DERSA (2006). O método da pastilha para identificação expedita do grupo MCT baseia-se na análise de pastilhas moldadas em anéis de inox, quando depois de secadas, são submetidas ao umedecimento capilar. Verifica-se então a contração diametral, o surgimento ou não de trincas, de expansão e a resistência à penetração de um penetrômetro padrão de 10 gramas. Vale ressaltar que neste estudo foram utilizados anéis de PVC e um penetrômetro manual, os quais são apresentados na Figura 2.9.

Para a classificação dos materiais estudados deve-se analisar as médias aritméticas dos valores de contração diametral (Ct) e de penetração, expressas em milímetros. Em seguida identifica-se na Carta de Classificação do Método das Pastilhas (Figura 2.10) o grupo no qual o solo analisado se enquadra na metodologia MCT.

Figura 2.9 – Anéis de PVC e penetrômetro manual utilizados no ensaio de pastilha



Figura 2.10 - Carta de Classificação do Método das Pastilhas referente a metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995; DERSA, 2006)



Onde, segundo Nogami e Villibor (1995) e DERSA (2006):

LA: areia laterítica quartzosa;

LA': solo arenoso laterítico;

LG': solo argiloso laterítico;

NA: areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico;

NA': misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso);

NS': solo siltoso não laterítico;

NG': solo argiloso não laterítico.

Já o coeficiente c' , presente na Carta de Classificação do Método das Pastilhas, relacionado à contração diametral, indica a argilosidade do solo, ou seja, um c' elevado (acima de 1,5) caracteriza as argilas e solos argilosos, enquanto que valores baixos (abaixo de 1,0) caracterizam as areias e siltes não plásticos ou pouco coesivos. No intervalo entre 1,0 e 1,5 se situam diversos tipos de solos, tais como: areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas e argilas siltosas. (DERSA, 2006)

Paixão e Camapum de Carvalho (1994) enfatizam que, em regiões tropicais próximas a Brasília, ocorre a presença de solos lateríticos, possuindo alta porosidade e, geralmente com grande sensibilidade das ligações cimentícias à presença de água (colapsividade), principalmente em se tratando de argilas.

Jacinto *et al.* (2006) ressalta que são numerosos os parâmetros que influenciam o potencial erosivo da água e a erodibilidade dos solos tropicais, e que dificilmente será possível correlacioná-los isoladamente. Sendo assim, a referida autora propõe diferentes tipos de ensaios, diretos e indiretos, para determinação do índice de erodibilidade de um solo.

Dentre as determinações diretas, destacam-se o ensaio de desagregação, *Pinhole*, *Crumb Test* e *Inderbitzen*. Contudo, esses ensaios geralmente são específicos para cada situação, não retratando universalmente as características do solo quanto à erodibilidade. Por exemplo, no ensaio de *Inderbitzen* faz-se necessário definir a inclinação da rampa, a vazão e o tempo a ser ensaiado. Ou seja, o ensaio representa a perda de massa de um determinado solo para estas condições especificadas, não retratando toda a região onde este solo está presente.

Por causa da necessidade de especificação de cada parâmetro do ensaio de *Inderbitzen*, várias são as padronizações adotadas pelos diversos autores. Fácio (1991) propôs, por exemplo, que os parâmetros ideais seriam com vazão de 50 ml/s, 10° de inclinação da rampa e 20 minutos de ensaio. Já Santos (1997) realizou pequenas modificações na proposta de Fácio (1991), tais como a redução da largura da faixa de escoamento ao diâmetro do corpo de prova e o aumento do tempo de escoamento para 30 minutos, com a finalidade de observação da erosão de maneira gradual.

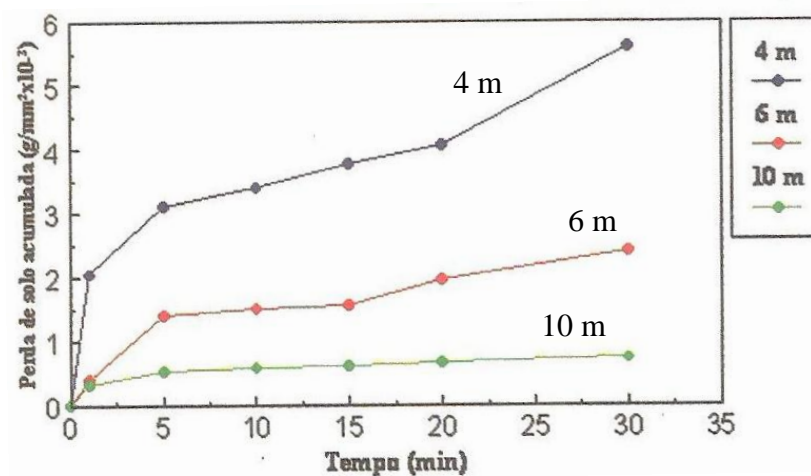
Fácio (1991) verificou que os ensaios apresentaram certas tendências, tais como: a perda de solo aumenta quando o grau de saturação inicial é menor e que a perda de solo ocorre mais significativamente nos primeiros 5 minutos de ensaio.

Ensaio de *Inderbitzen* foram realizados em um perfil de solo do Distrito Federal, comparando-se o aumento do grau de intemperismo em função da profundidade com a erodibilidade dos solos. Foi notado que quanto maior o grau de intemperismo, maior é a erodibilidade do solo quanto ao fluxo superficial (Figura 2.11). Os solos ensaiados da profundidade de 4 e 6 metros foram classificados como lateríticos, já o de 10 metros de profundidade, como um solo saprolítico. Ao estudar uma determinada erosão, estes resultados

contribuem bastante para as medidas a serem tomadas (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).

Conforme mencionado anteriormente por Paixão e Camapum de Carvalho (1994), os solos lateríticos do Distrito Federal apresentam grande sensibilidade das argilas à presença de água. Sousa Pinto (2006) atribui a sensibilidade das argilas ao arranjo estrutural das partículas, estabelecido durante o processo de sedimentação ou mesmo da própria estrutura do solo residual, seja por guardar características da rocha que lhe deu origem, seja por efeito cimentante de certos sais depositados entre partículas (evolução laterítica). A inter-relação química entre as partículas ou a remoção de sais existentes na água em que o solo se formou pode explicar o fato do surgimento de argilas sensitivas. Sendo assim, as forças eletroquímicas entre as partículas podem provocar um verdadeiro “castelo de cartas”.

Figura 2.11 – Ensaio de erodibilidade em um perfil de intemperismo de Brasília (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006)



Molinero Júnior *et al.* (2011), por meio da utilização de diferentes metodologias, procuraram correlacionar o potencial erodível do solo com seus parâmetros geotécnicos. Para tal realizaram os seguintes ensaios: de determinação da massa específica aparente, da massa específica dos grãos, do teor de umidade, da granulometria, dos limites de consistência, os ensaios da metodologia MCT, a avaliação da erodibilidade, segundo propostos por Pejon (1992), realizaram ainda os ensaios de identificação da capacidade de troca catiônica (CTC), de determinação da superfície específica e da atividade de argila (ensaio de azul de metileno).

Associando a curva granulométrica com a erosão, Molinero Junior *et al.* (2011) obtiveram dois fatores: porcentagem de dispersão e coeficiente de uniformidade (C_u). Os solos com porcentagem de dispersão maior que 50% foram caracterizados como altamente dispersivos; entre 20 e 50% foram classificados como moderados; e menor que 20% como não dispersivos. Já para os coeficientes de uniformidade, Molinero Junior *et al.* (2011) adotaram: $C_u < 5$ equivalente a solos muito uniformes e erodíveis; $5 < C_u < 15$ equivalente a solos de média uniformidade e média erodibilidade; e $C_u > 15$ como solos não uniformes com baixa erodibilidade.

O Coeficiente de Uniformidade (C_u) do solo é um parâmetro que analisa se um solo granular é “bem ou mal-graduado”. Segundo Sousa Pinto (2006) o C_u pode indicar se as partículas menores ocupam os espaços vazios maiores, criando um entrosamento entre si, resultando em menor compressibilidade e maior resistência. O C_u pode ser obtido através da Equação 2.5:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.5)$$

Onde:

C_u : Coeficiente de uniformidade;

D_{60} : diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas;

D_{10} : diâmetro efetivo – análogo ao D_{60} ; diâmetro tal que o peso correspondente às partículas menores que este é 10% do peso da amostra.

Molinero Junior *et al.* (2011) classificaram ainda os solos analisados quanto aos limites de consistência. Os autores dividiram a carta de plasticidade em três regiões: $w_L < 30$ e $IP < 15$ (silte-arenosos e argilas arenosas), classificados como solos de alto potencial de erosão; solos com valores de w_L maiores ou iguais a 30 % e menores ou iguais a 50 %, com $10 \% \leq IP \leq 30 \%$ (argilas e siltes de baixa plasticidade), como solos de médio potencial de erosão; e solos com $w_L > 50\%$ e $IP > 30 \%$ (argilas e siltes de alta plasticidade), como solos de baixo potencial de erosão.

Outro fator de relevância no estudo de erosões é o índice de atividade coloidal da argila (Ac), ou seja, é a influência que a fração argila exerce no comportamento do solo. Molinero Junior *et al.* (2011) utilizaram o conceito de Ac definido por Skempton (1953)¹⁴, conforme a Equação 2.6.

$$Ac = \frac{IP}{\% \text{ argila}} \quad (2.6)$$

Onde:

Ac: Índice de atividade coloidal da argila;

IP: índice de plasticidade;

% argila: porcentagem de argila na amostra.

Segundo Skempton (1953 *apud* MOLINERO JUNIOR *et al.*, 2011), quando $Ac < 0,75$, a fração argila no solo pode ser considerada inativa e conseqüentemente sujeita à fácil desagregação, reduzindo a coesão dos solos.

Molinero Junior *et al.* (2011) realizaram ainda ensaios desenvolvidos especialmente para determinação de erodibilidade em solos tropicais, como o de infiltrabilidade, perda de massa por imersão e adsorção de azul de metileno.

No ensaio de infiltrabilidade o objetivo é calcular a velocidade e a vazão de água que penetra em camadas de solo, ou seja, o coeficiente de sorção (S). Já o ensaio de perda de massa por imersão consiste em analisar o solo quanto a sua capacidade de desagregação das partículas, quando submerso em água, obtendo o coeficiente P.

Já o ensaio de azul de metileno apresenta vantagens do tipo: rapidez de execução, simplicidade, a possibilidade de realização em campo e a utilização de pequenas quantidades de amostras. Pejon (1992) afirma que em regiões de solos tropicais a fração argilosa é constituída predominantemente por minerais de baixa capacidade de adsorção e por isso deve-se utilizar concentrações baixas do azul de metileno.

O ensaio de adsorção de azul de metileno ou “método da mancha” foi baseado em Pejon (1992) e Fabri (1994). O presente ensaio foi descrito por Lan (1979), o qual afirma que o corante possui afinidade com os argilominerais, ou seja, com a fração argilosa do solo.

¹⁴ SKEMPTON. A. W (1953). The colloidal activity of clays. III ICSMFE. Vol 1 pág 143-147.

Segundo Romão (1995) o ensaio é finalizado quando ocorre o ponto de viragem da concentração de azul de metileno, ou seja, quando se é observada uma auréola azul clara em torno da mancha escura de solo+água+azul de metileno adsorvido pelo solo.

Utilizando a concentração de 1,5 g/l da solução de azul de metileno, adotada por Pejon (1992), Fabbri (1994) obteve uma equação para determinação do coeficiente de atividade (CA) da fração argilosa (no presente estudo será considerado partículas de diâmetro < 0,002 mm), em função do volume total de azul de metileno (Vt) adsorvida por 1 g de solo, conforme Equação 2.7:

$$CA = \frac{100 \times Vt}{Pf} \quad (2.7)$$

Onde:

CA: coeficiente de atividade da fração argilosa (< 0,002 mm);

Vt: volume total de azul de metileno adsorvida em 1 g da amostra integral do solo, dado em ml.

Pf: porcentagem, do peso da fração < 0,002 mm presente na amostra de solo.

Contudo, como o ensaio é realizado somente pela fração que passa na peneira de abertura 0,074 mm, não representando assim toda a amostra de solo, o valor de Vt a ser utilizado na Equação 2.7, deve ser ajustado pela Equação 2.8:

$$Vt = V \times \left(\frac{P_{200}}{100} \right) \times \left(1 + \frac{w}{100} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

Vt: volume total de azul de metileno adsorvida em 1 g da amostra integral do solo, dado em ml.

V: volume adicionado de solução padrão de azul de metileno durante o ensaio;

P₂₀₀: porcentagem da amostra total que passa na peneira de abertura 0,074 mm;

w: teor de umidade (%) no momento do ensaio, da amostra que passa na peneira de abertura 0,074 mm.

De posse dos respectivos valores, Fabbri (1994) classifica os solos pouco ativos ($CA < 11$) como laterizados; os ativos ($11 < CA < 80$) como combinações de minerais do tipo caulinita e illita, por exemplo; e os muito ativos ($CA > 80$) correspondendo aos argilo-minerais do grupo montmorilonita, por exemplo.

Por meio do “método da mancha” também é possível fazer inferência quanto à superfície específica e à capacidade de troca catiônica do tipo de argilomineral presente no solo.

Para o cálculo da superfície específica (SE), Pejon (1992) adotou a seguinte Equação 2.9:

$$SE = \frac{(SE_{AM} \times V)}{M} \quad (2.9)$$

Onde:

SE: Superfície específica da amostra ensaiada, em m^2/g ;

SE_{AM} : Superfície específica do corante azul de metileno, adotado por Pejon (1992) igual a $130 \times 10^{-20} m^2$. Porém, nesta pesquisa será utilizado o valor adotado por Romão (1995), ou seja, $2,44 m^2/g$ para 1 g de solo, pois Pejon (1992) usou concentração de 1,5 g/l;

V: Volume de solução padrão de azul de metileno consumido, em ml;

M: Massa do solo seco ensaiado, em g (admitindo como sendo 1 g).

Lan (1979) apresenta alguns tipos de argilominerais com seus respectivos valores de superfície específica, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Superfície específica de alguns argilominerais (LAN, 1979)

Tipo de argilomineral	Superfície específica (m^2/g)
Montmorilonita	800
Vermiculita	200
Illita	40 – 60
Caulinita	05 - 20

Para a obtenção dos valores de capacidade de troca catiônica (CTC), Pejon (1992) utilizou a seguinte Equação 2.10:

$$CTC = \frac{(V \times C \times 100)}{M} \quad (2.10)$$

Onde:

CTC: capacidade de troca catiônica, em meq/100g;

V: volume da solução padrão de azul de metileno utilizada no ensaio, em ml;

C: concentração da solução padrão de azul de metileno, em meq/ml (foi adotado o valor utilizado por Romão (1995), igual a $2,68 \times 10^{-3}$ meq/ml);

M: massa do solo seco ensaiado em g (admitido como sendo 1 g);

Beaulieu (1979¹⁵ *apud* PEJON, 1992) apresenta os valores de CTC para alguns tipos de argilo-minerais, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Capacidade de troca catiônica de alguns tipos de argila (BEAULIEU, 1979; *apud* PEJON, 1992)

Argila	CTC (meq/100g)	Argila	CTC (meq/100g)
Caolinita	3 – 15	Montmorilonita	80 – 150
Haloisita 2H ₂ O	5 – 10	Clorita	10 – 40
Haloisita 4H ₂ O	10 – 40	Atapulgita	20 – 30
Ilita	10 – 40	Vermiculita	100 – 150

Complementando, Fabbri (1994), em estudos sobre o ensaio de azul de metileno, concluiu que a adsorção do corante pela montmorilonita é superior ao da vermiculita, seguido pela ilita e menor na caulinita. O autor ressalva ainda que os solos lateríticos ou de comportamento laterítico apresentam a caulinita revestida por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio como o principal argilomineral presente, reduzindo ainda mais a adsorção pelo azul de metileno.

Quanto ao fenômeno de dispersão, Bastos, Milititsky e Gehling (2001b) em estudos em solos residuais tropicais e com baixo teor de sais dissolvidos, concluíram que a perda de massa não

¹⁵ BEAULIEU, J., (1979). “ Identification géotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au moyeu du bleu de méthylène”. Thèse de Doctorat de 3^o cycle, Univ. De Paris-Sud, Orsay, 133p.

está associada à dispersibilidade. Tal observação pode ser estendida a todos os solos com essas características.

O conhecimento das propriedades dos solos quanto à maior ou menor erodibilidade é necessário, não somente para observação do comportamento geotécnico ao longo de um perfil, mas também para delimitação de áreas mais ou menos suscetíveis aos processos erosivos. Essa delimitação é importante para a prevenção quanto à deflagração ou aceleração de processos erosivos, ou para o controle dos existentes.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa baseou-se na seleção de dois locais susceptíveis à erosão laminar, com solos que apresentassem formação pedogenética distinta, ou seja, características físico-químicas e mineralógicas diferentes. Após a seleção das áreas, houve a coleta de amostras com a finalidade de realizar ensaios específicos, de caracterização, para obtenção da curva característica solo-água (CCSA), ensaios em solos tropicais e de erodibilidade. Terminada a etapa laboratorial, realizaram-se correlações entre os diversos parâmetros obtidos nos ensaios.

3.1 SELEÇÃO DA ÁREA

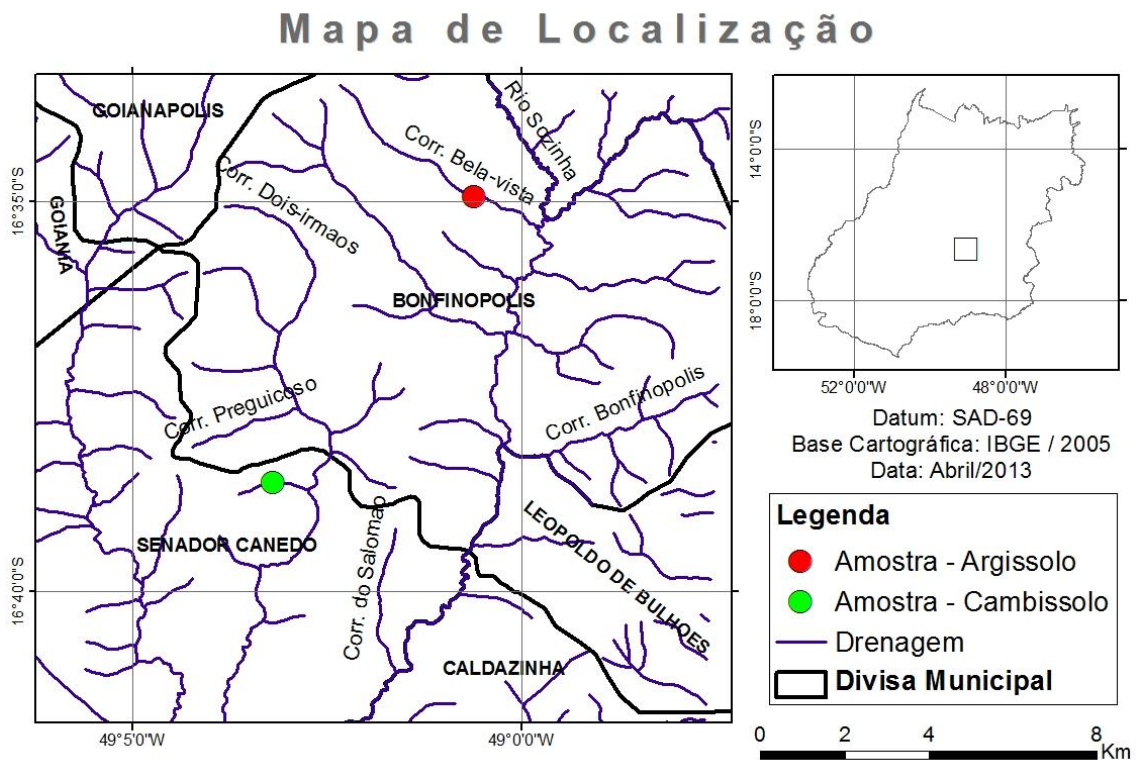
A partir de um banco de dados de mapeamento fornecido pelo Sistema Estadual de Estatística e de Informação Geográfica do Estado de Goiás – Sieg e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, selecionou-se 02 (duas) regiões com características pedogenéticas distintas aos arredores do município de Goiânia, devido à proximidade com o Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Foram selecionados para o presente estudo uma área com ocorrência de solos mais jovens e outra onde os processos de intemperismo agiram mais intensamente, correspondentes a um solo do tipo Cambissolo e outro do tipo Latossolo, respectivamente.

Com base no referido banco de dados, a amostra de solo do tipo Cambissolo se encontra sobre a unidade geológica, Grupo Araxá, com litologia correspondente a rochas metamórficas, do tipo Clorita xisto, Quartzo-mica xisto, Muscovita-biotita xisto, Sericita xisto e Muscovita quartzito. Já a amostra de solo do tipo Latossolo encontra-se sobre o substrato rochoso correspondente ao Complexo Granulítico Anápolis-Itaçu – Associação Supracrustais, correspondente principalmente a rochas metamórficas do tipo Gnaisse aluminoso, Gondito, Mármore, Rocha calcissilicática.

A Figura 3.1 apresenta o mapa de localização das áreas em estudo. A amostra de Cambissolo foi extraída no município de Senador Canedo - Goiás, mais precisamente na margem esquerda

de um afluente do córrego Dois Irmãos, com coordenadas UTM, Fuso 22, 707644E / 8158889N (Datum: SAD-69). Já a amostra de Latossolo está localizada na margem direita do córrego Bela Vista, no município de Bonfinópolis – Goiás, com coordenadas UTM, Fuso 22, 712304E / 8165596N (Datum: SAD-69). A Figura 3.2 apresenta a Carta Imagem (composição RGB) e o mapa pedológico das regiões em estudo.

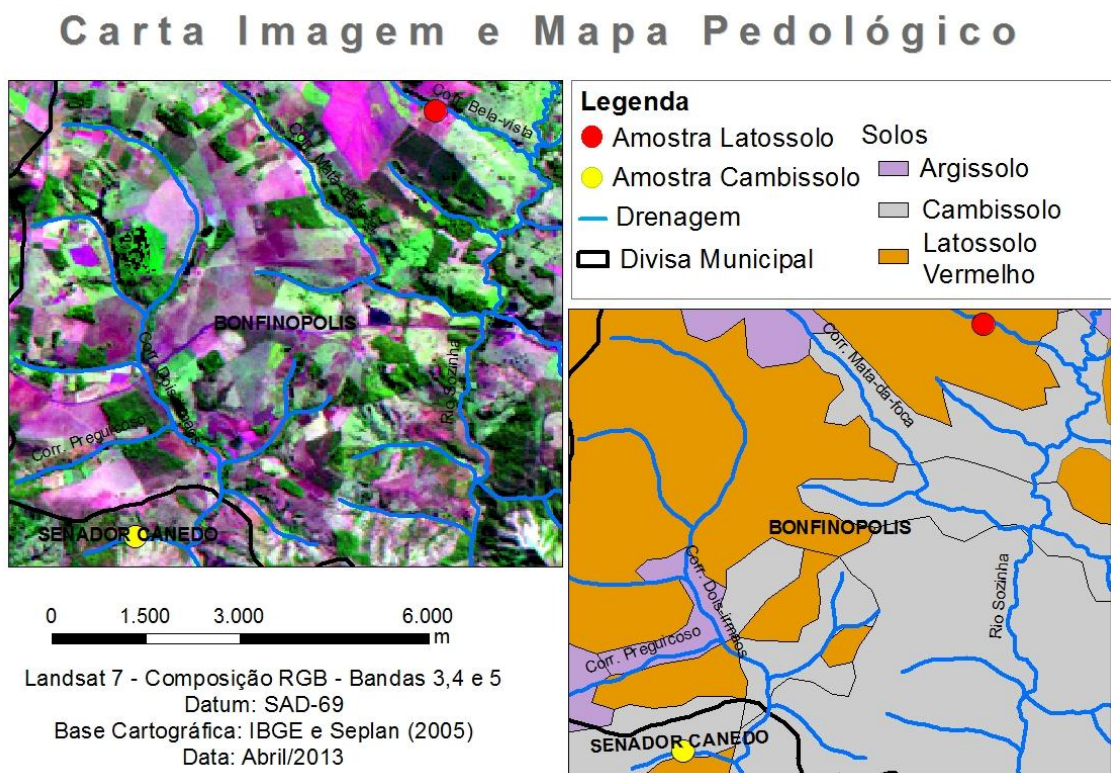
Figura 3.1 - Mapa de Localização das áreas em estudo



As áreas em estudo estão localizadas no Planalto Central brasileiro, classificado por Bigarella, Becker e Santos (1994) como um Domínio de chapadões tropicais recobertos por cerrados e penetrados por florestas de galeria, o qual ocupa uma área de cerca de 1,88 a 2 milhões de quilômetros quadrados de extensão, apresentando chuvas que se concentram no verão, sendo pouco frequentes no inverno (geralmente seco), com precipitações anuais que variam de 1300 a 1800 mm. De acordo com a classificação climática de Köppen, o cerrado enquadra-se como uma savana tropical (Aw), geralmente com temperatura média do mês mais frio do ano ≥ 18 °C; estação invernal seca; e forte precipitação anual no verão, < 2500 mm (ROLIM *et al.*, 2007).

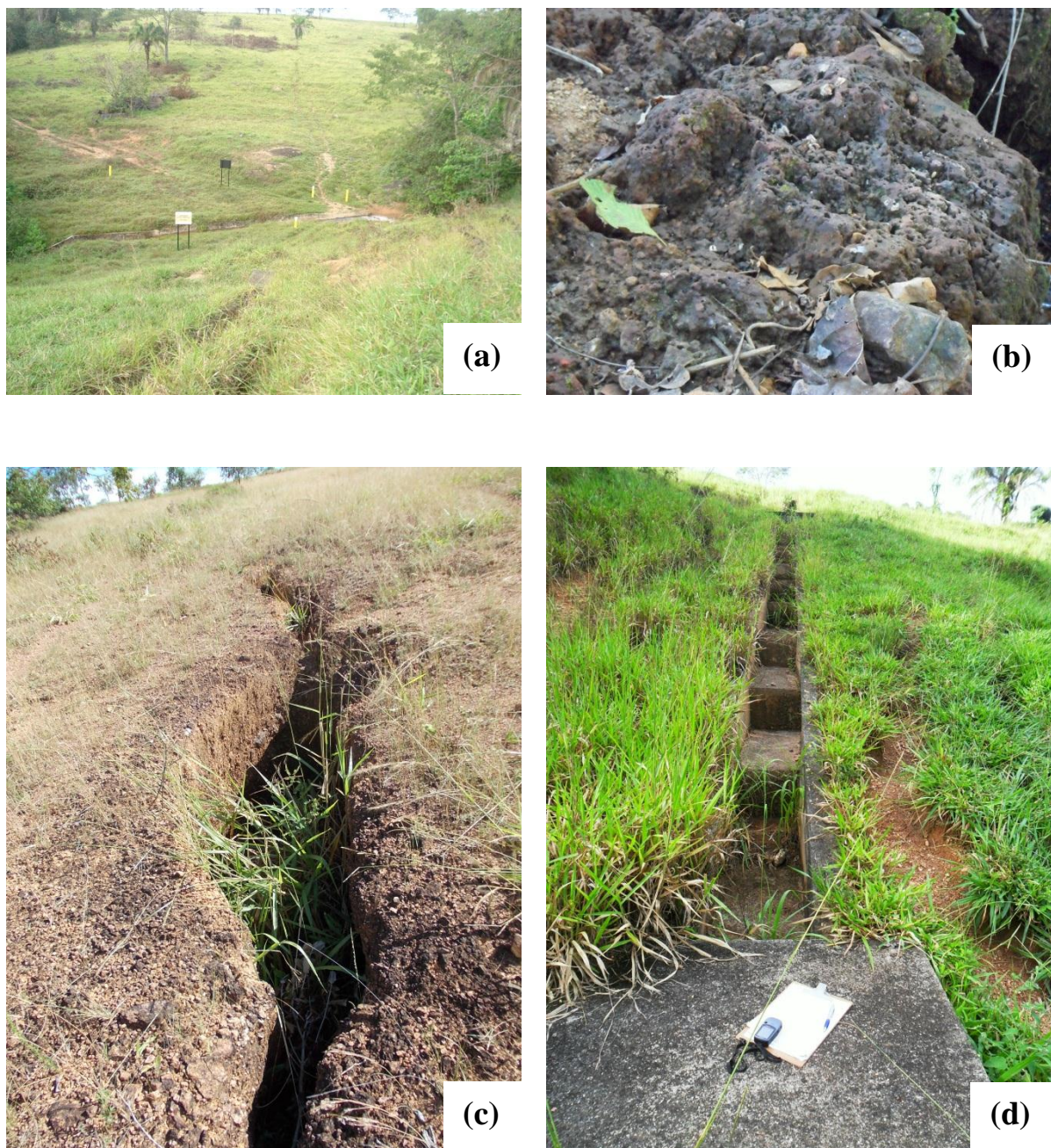
Segundo IBGE (2007), os cambissolos apresentam drenagem variando entre acentuada e imperfeita, possuindo muitas vezes solos pedregulhosos, cascalhentos e mesmo rochosos. Ocorre mais frequentemente em regiões serranas ou montanhosas. Já os latossolos se caracterizam pela homogeneidade do material ao longo do perfil, sendo em geral muito intemperizados e bem drenados. A fração argila é composta principalmente pela caulinita, com elevados teores de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio e praticamente não apresentam minerais primários em sua composição.

Figura 3.2 – Carta imagem e mapa pedológico da área de estudo



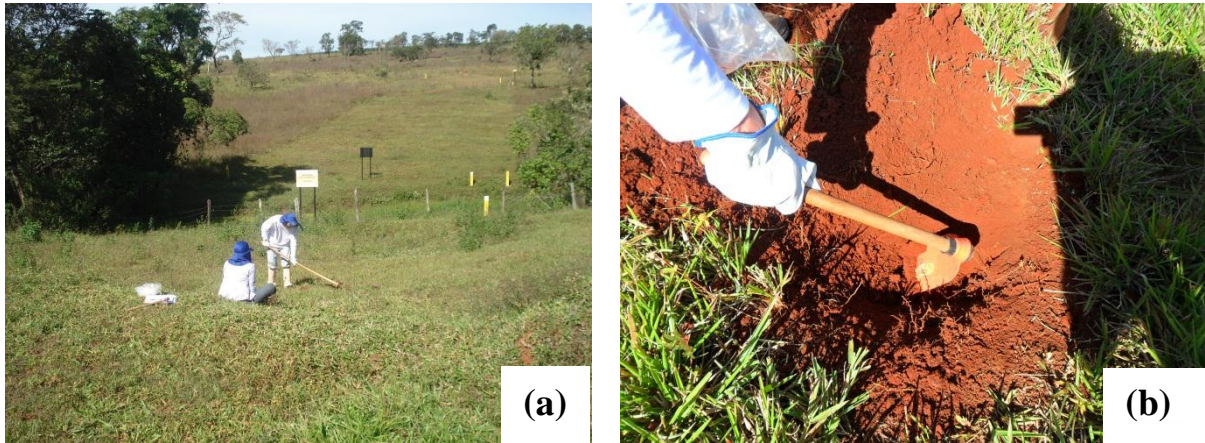
Definidos os locais de estudo, foram realizadas vistorias *in loco* com a finalidade de caracterizar visualmente os locais. A Figura 3.3 apresenta registros fotográficos da área correspondente à amostra de Cambissolo. Foi possível notar que a área está sendo utilizada como pastagem, apresentando elevada declividade em ambas as vertentes, presença de concreção laterítica próximo ao local de extração das amostras, indícios de processos erosivos com presença de sulcos e ravinas, além de intervenções antrópicas, como escadas redutoras de energia e canalização de parte do córrego, com a finalidade de controlar ou minimizar os impactos causados pelos processos erosivos.

Figura 3.3 – Local de obtenção das amostras de Cambissolo: (a) relevo acentuado da área; (b) presença de laterita nas proximidades; (c) processo erosivo do tipo ravina; (d) processo erosivo do tipo sulco se desenvolvendo ao lado das intervenções antrópicas



A Figura 3.4 apresenta fotografias do local em que foram coletadas as amostras de Latossolo, sendo o uso do solo identificado também como pastagem, com declividade das vertentes variando entre suave a ondulado, porém sem indícios diretos da ocorrência de processos erosivos, como por exemplo, sulcos e ravinas.

Figura 3.4 – Local de obtenção das amostras de Latossolo: (a) relevo variando entre suave a ondulado; (b) amostra de Latossolo



Ressalva-se que a fase de levantamento de dados em campo é essencial para a compreensão dos fatores que agem atenuando os processos erosivos que ocorrem na região. Por meio da análise dos fatores físicos (declividade, tipo de solo, curvatura da vertente, concentração de fluxo e tipo de vegetação) e antrópicos é possível adotar as medidas cabíveis para minimização dos impactos erosivos. A região em que se encontra a amostra de Cambissolo mostrou-se mais susceptível à ocorrência de processos erosivos, devido à maior declividade e ao tipo de solo presente. A região em que se encontra a amostra de Latossolo apresenta-se em relevo plano, fator este essencial para a formação desse tipo de solo, podendo ser considerada, atualmente, como um local menos suscetível aos processos erosivos laminares.

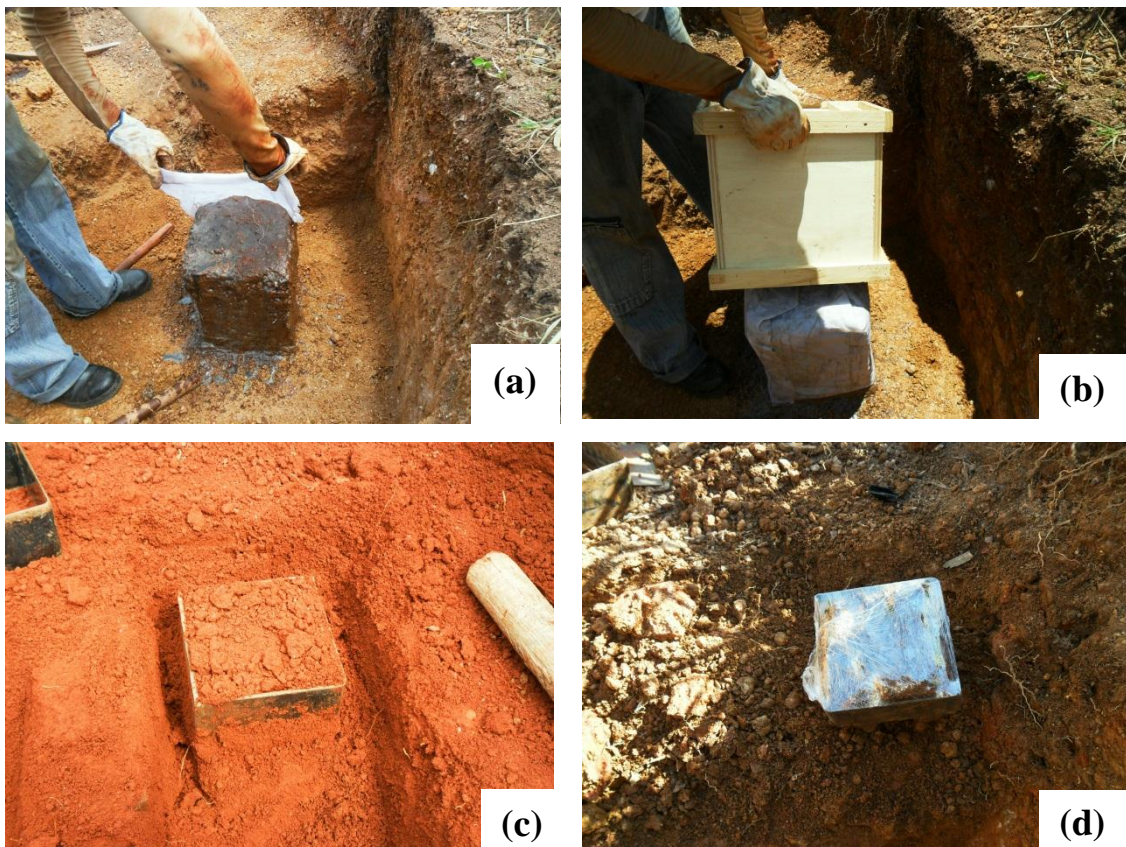
3.2 COLETA DE AMOSTRAS

Como já descrito, foram selecionados 02 (dois) locais com características distintas quanto à formação pedogenética do solo. No dia 15/10/2012 foram coletadas no município de Bonfinópolis-GO amostras de um solo bastante intemperizado, classificado segundo a pedologia como um Latossolo. No dia 18/10/2012, em Senador Canedo – GO coletou-se amostras em um solo residual jovem, classificado como Cambissolo.

Em ambos os locais foram retiradas amostras deformadas e indeformadas de solo seguindo o procedimento da NBR 9604 (ABNT, 1986a), a qual dita sobre abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. As amostras

deformadas foram coletadas em profundidades que variaram entre 40 e 70 cm. Quanto às amostras indeformadas, foram coletados 02 (dois) blocos cúbicos de aproximadamente 28 cm de aresta e 05 (cinco) corpos de prova prismáticos de Inderbitzen, com dimensões de 10 x 10 x 5 cm (lado x lado x altura), em cada local. Vale ressaltar que os corpos de prova do aparelho de Inderbitzen foram cravados a uma profundidade média variando entre 50 a 70 cm, posteriormente envoltos em plástico filme, e acomodados em caixa térmica. A Figura 3.5 demonstra o processo de extração das amostras indeformadas.

Figura 3.5 – Extração de amostras indeformadas: (a) aplicação da talagarça em bloco cúbico parafinado; (b) encaixe da caixa cúbica, para transporte; (c) amostrador de Inderbitzen cravado; (d) amostrador de Inderbitzen selado com plástico filme



3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

As amostras deformadas e indeformadas foram encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia, da Escola de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Goiás - UFG, a fim de se realizar os ensaios de caracterização, de identificação expedita pelo método da pastilha, de adsorção

de azul de metileno pelo método da mancha, de desagregação, *crumb test*, sucção e Inderbitzen. Já o ensaio de difratometria por raio-X foi executado na Central de Análise do Instituto de Química, da referida universidade.

3.3.1 Caracterização do material

Os ensaios de caracterização dos solos foram realizados utilizando as seguintes normas: NBR 6457 (ABNT, 1986b) que dita sobre amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, NBR 7181 (ABNT, 1984a) a qual dita sobre a análise granulométrica, NBR 6459 (ABNT, 1984b) para determinar o limite de liquidez, NBR 6508 (ABNT, 1984c) a qual prescreve a metodologia para determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm e NBR 7180 (ABNT, 1984d) para a determinação do limite de plasticidade.

3.3.2 Ensaio em solos tropicais

Como foram selecionados 02 (dois) solos tropicais com características pedogenéticas distintas, com a finalidade de caracterizar esses solos quanto as suas peculiaridades e quanto aos seus comportamentos geotécnicos, foram realizados os ensaios de pastilha para identificação expedita do grupo MCT, o ensaio de adsorção de azul de metileno e o ensaio de difratometria por raio-X, objetivando nos dois últimos identificar a composição mineralógica principal existente nas amostras.

O método da pastilha foi realizado conforme consta na Diretriz para Identificação Expedita do Solo Laterítico – “Método da Pastilha” utilizado pelo Desenvolvimento Rodoviário S.A. do Estado de São Paulo (DERSA, 2006) e Fortes, Zuppolini Neto e Merighi (2002).

O ensaio de adsorção de azul de metileno ou “método da mancha” foi realizado de acordo com o proposto por Pejon (1992) e Fabri (1994), adotando-se as modificações propostas por Romão (1995).

Os ensaios de difratometria de raios-X (DRX) – executado e analisado pelo laboratório de solos de Furnas / Eletrobras – foi feito tanto em amostras integrais dos solos em estudo, quanto na fração argila. O equipamento utilizado foi o difratômetro da marca Siemens, modelo D5000. As amostras foram analisadas sob voltagem 40KV e amperagem de 30 mA,

com velocidade de varredura de $0,05^\circ/\text{seg}$, de 3° a 70° em 2θ (o qual indica a distância interplanar basal de cada mineral). A fonte de energia foi por meio de um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios-X era de cobalto-Co (anodo).

As amostras foram submetidas à desagregação com o uso de moinho orbital até obtenção de 100% do material passante na peneira de 325 mesh Tyler (0,043mm). Concluída esta etapa, parte do material foi analisada no Difratorômetro de Raios-X pelo Método do Pó Não-Orientado.

As interpretações dos resultados foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se software para captura de dados *Diffra Plus* versão 2.3 de 2009, e para interpretação de dados, Software EVA, versão 2009, com banco de dados de 2009 do International Center for Diffraction Data (ICDD).

3.3.3 Ensaio em solos não saturados

Para a obtenção das curvas características solo-água, foi utilizado o método do papel filtro, mais especificamente pelas metodologias de Marinho (1994) e Lima (1999), utilizando o papel filtro da marca *Whatman n°42*, com a finalidade de se obter a curva característica por molhagem, mensurando-se a sucção matricial. Segundo Marinho (2005) o método do papel filtro, para obtenção da sucção matricial, é recomendado para sucções que variam de 30 a 1500 kPa. Para valores de sucções acima de 1500 kPa, independentemente do método de mensuração, estará se medindo a sucção total.

A Figura 3.6 exemplifica a medição da sucção matricial, onde o papel filtro fica em contato com o corpo-de-prova. O conjunto corpo-de-prova e papel filtro foi envolto por plástico filme e papel laminado, postos em vasilhames e armazenados em caixa térmica por 14 dias, conforme Figura 3.7, para que fosse estabelecido o equilíbrio entre o corpo-de-prova e o papel filtro.

Passado o período de equilíbrio foram removidos os papéis filtro dos corpos-de-prova, pesando-os dentro de cápsulas hermeticamente fechadas, em balança com resolução de 0,0001g. Posteriormente o conjunto cápsula (aberta) e papel filtro foram submetidos à secagem em estufa com temperatura variando de 105 a 110°C por 24 horas, pesando-se

novamente o conjunto. Subtraindo-se os dois, foi obtida a massa do papel filtro e consequentemente sua umidade.

Figura 3.6 – Utilização do Papel Filtro na obtenção da sucção matricial

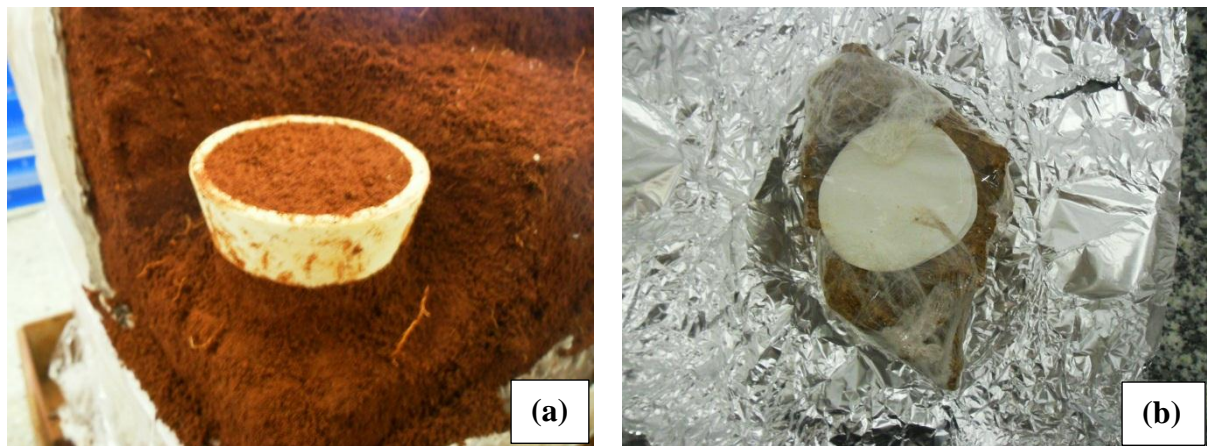


Figura 3.7 – Procedimento para atingir o equilíbrio entre o corpo-de-prova e o papel filtro



Vale ressaltar que, para a amostra de Latossolo, foram moldados cilindros com dimensões médias de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Por outro lado, as amostras de Cambissolo, devido à sua heterogeneidade, não foram moldadas em corpos de prova cilíndricos de volume conhecido. As Figuras 3.8a e 3.8b apresentam os corpos de prova das amostras de Latossolo e Cambissolo, respectivamente, submetidas ao método do papel filtro.

Figura 3.8 – (a) Amostra de Latossolo em molde cilíndrico; (b) Amostra de Cambissolo com formato amorfo



Marinho e Chandler (1993¹⁶ *apud* MARINHO, 2005) destacam que no método do papel filtro, quando em contato direto com o solo (mensuração da sucção matricial), o sistema solo-água pode não estar em contato adequado, podendo haver uma combinação de mensurações entre a sucção matricial e a total. Logo, na amostra de Cambissolo, devido a sua heterogeneidade e consequentemente um contato imperfeito entre o CP e o papel filtro, foi realizado também a mensuração da sucção no aparelho de WP4C, com a finalidade de conferir os resultados obtidos pelo método do papel filtro.

O aparelho utilizado de WP4C - Dewpoint Potencia Meter (medidor do ponto de condensação) da marca Decagon Devices, pertence ao Laboratório de Solos Não Saturados da UFG. Trata-se de um equipamento de medição do potencial osmótico e matricial (sucção total), em amostras de solo deformadas ou indeformadas de forma rápida. Ressalva-se que para o presente estudo, foram utilizadas amostras deformadas. O equipamento é capaz de mensurar poropressões de água na escala de 0 a -300 Mpa, com acurácia de 1 % para sucções variando de -5 a -300 MPa. Trata-se ainda de um equipamento portátil e que pode ser utilizado em campo, conectando-o a uma fonte de 12V. A Figura 3.9 apresenta o modelo do equipamento utilizado no ensaio.

¹⁶ Marinho, F. A. M., and Chandler, R. J. (1993). "Aspects of the behavior of clays on drying." *Unsaturated Soils, ASCE Geotechnical Special Publication No. 39*, ASCE, New York, 77-90.

Figura 3.9 – Aparelho de WP4C utilizado para obtenção da sucção total na amostra de Cambissolo (DECAGON DEVICE, 2010)



Visto que para o cálculo do grau de saturação dos corpos de prova é necessário o conhecimento dos índices de vazios (e) das amostras. Foram realizados ensaios de balança hidrostática, conforme a NBR 10838 (ABNT, 1988), a qual prescreve: solo – determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Ressalta-se que para a amostra de Latossolo, todos os corpos de prova foram submetidos à balança hidrostática, e para a amostra de Cambissolo, foram realizados três ensaios de balança hidrostática, e adotado uma média aritmética entre eles, embora este solo possa sofrer contração quando seco e expansão quando úmido.

A partir dos dados experimentais obtidos pelo papel filtro e pelo ensaio de balança hidrostática, plotou-se graficamente os valores em função da Sucção matricial x Teor de umidade gravimétrico; e em função da Sucção Matricial x Grau de saturação.

Para a representação matemática dos dados experimentais da curva de retenção utilizou-se a equação proposta por Durner (1994), exemplificada em Otálvaro e Cordão Neto (2011). Durner (1994) modificou a expressão para a curva característica de Van Genuchten (1980), a fim de estendê-la a curvas bimodais, típicas dos solos tropicais.

3.3.4 Ensaios de erodibilidade

3.3.4.1 Ensaio de Inderbitzen

Os ensaios de erodibilidade foram executados por meio do aparelho de Inderbitzen adaptado, construído por Aguiar (2009). Para a realização deste ensaio foram moldados 05 (cinco) corpos de prova para cada amostra de solo, sendo uma de Cambissolo e outra de Latossolo. Ressalva-se que os amostradores foram extraídos diretamente em campo, em uma profundidade variando entre 50 e 70 cm, aproximadamente. Devido à necessidade de se repetir certos corpos de prova, para conferência de resultados, estes foram moldados nos blocos de amostras indeformadas.

Os amostradores em que os solos foram moldados apresentam forma prismática, com aproximadamente 100 mm de lado e 50 mm de altura. Após moldados, os corpos de prova foram secos ao ar, e posteriormente, umedecidos em diferentes umidades. Em seguida foram deixados em repouso em caixa térmica, encapsulados, por 24 horas, a fim de se estabelecer o equilíbrio de umidade e assim padronizar o ensaio.

Após análise da curva característica solo-água (CCSA) da amostra de Cambissolo adotou-se os seguintes teores de umidade iniciais para os corpos de prova do aparelho de Inderbitzen, ou seja, umidade pré-ensaio: CAMB.01 ($S_0 = 25\%$); CAMB.02 ($S_0 = 43\%$); CAMB.03 ($S_0 = 61\%$); CAMB.04 ($S_0 = 74\%$); CAMB.05 ($S_0 = 98\%$). Já os amostradores com Latossolo apresentaram os seguintes teores de umidade iniciais: LATO.01 ($S_0 = 12\%$); LATO.02 ($S_0 = 24\%$); LATO.03 ($S_0 = 36\%$); LATO.04 ($S_0 = 60\%$); LATO.05 ($S_0 = 96\%$). No Item 4.3 são apresentadas as curvas características solo-água, justificando a escolha de tais umidades iniciais.

Ressalva-se que devido à heterogeneidade da amostra de Cambissolo, a mesma não pôde ser moldada rente ao amostrador, ficando com as superfícies superiores e inferiores irregulares, conforme apresentado na Figura 3.10a. Por outro lado, a Figura 3.10b apresenta um corpo de prova da amostra de Latossolo, com superfície obedecendo aos limites do amostrador.

Como o equipamento de Inderbitzen (Figura 3.11) apresenta algumas variáveis como: declividade da rampa, vazão de água, forma do corpo-de-prova, tempo de duração do ensaio,

dentre outras, a metodologia utilizada foi semelhante à de Aguiar (2009) e Almeida, Rocha e Gitirana Jr. (2013), porém contendo algumas modificações.

Figura 3.10 – (a) Corpo de prova da amostra de Cambissolo com superfície irregular; (b) Corpo de prova da amostra de Latossolo com superfície alinhada aos limites do amostrador

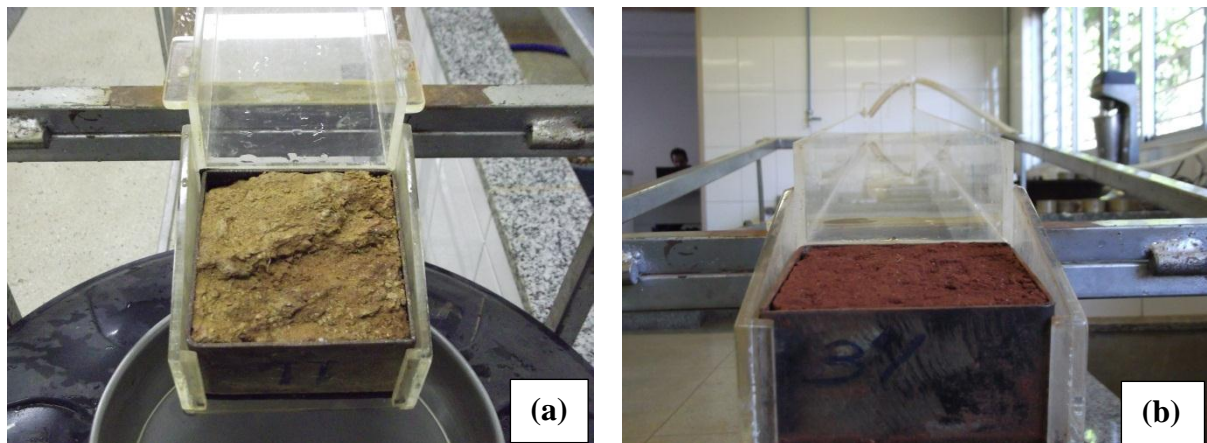


Figura 3.11 – Equipamento de Inderbitzen

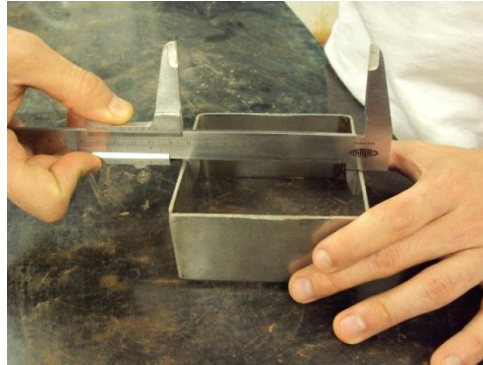


Visto que Aguiar (2009) pretendia saturar suas amostras antes da realização do ensaio e que este estudo visa correlacionar a sucção do solo com a erodibilidade, alguns processos foram adaptados ao presente estudo.

Para a realização deste ensaio em solos não saturados, foram adotados os seguintes passos:

- a) Pesar o amostrador vazio;
- b) Mensurar as dimensões e conseqüentemente o volume do amostrador (Figura 3.12);

Figura 3.12 – Mensuração das dimensões do amostrador



- c) Moldar o solo junto ao amostrador (parte superior e inferior da amostra);
- d) Pesar o conjunto (solo e amostrador);
- e) Secar ao ar e posteriormente umedecer o corpo-de-prova à umidade desejável;
- f) Colocar a borracha (EVA) na parte inferior e entre o amostrador e o equipamento de Inderbitzen, a fim de minimizar o carreamento de material por baixo do corpo-de-prova;
- g) Incliná-lo a rampa em 10° e corrigir qualquer inclinação em relação à horizontal (Figura 3.13);
- h) Adaptar uma peneira nº 200 (0,075 mm) ao final da rampa, conforme apresentado na Figura 3.14;
- i) Iniciar o ensaio com vazão constante de 50ml/s;
- j) Trocar a peneira de mesma abertura (sem interromper o fluxo de água) nos intervalos de 1; 2,5; 5; 7,5; 10; 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos, e coletar o solo erodido retido na peneira nº 200 (0,075 mm) para cada intervalo de tempo;

Figura 3.13 – Nivelamento do aparelho de Inderbitzen



Figura 3.14 – Peneira nº 200 (0,075 mm) adaptada ao final do equipamento



- k) Lavar com água corrente à baixa pressão a fim de desagregar as partículas finas menores que 0,075 mm, conforme Figura 3.15, para cada intervalo de tempo;
- l) Submeter à estufa em temperatura de 105 a 110°C o material retido na peneira nº 200 (0,075 mm) para cada intervalo de tempo;
- m) Ao término dos 60 minutos, pesar o conjunto amostrador e solo e posteriormente obter a umidade final do solo, mensurando o topo, o meio e o fundo, para posterior cálculo da média aritmética;

Figura 3.15 – Lavagem dos agregados



Vale ressaltar a diferença metodológica adotada no item (j) com o procedimento adotado por Aguiar (2009), o qual interrompia o fluxo de água a cada intervalo de tempo com a finalidade de mensurar a massa do corpo de prova. Contudo, em ensaios preliminares, foi possível notar que a retirada do amostrador do equipamento de Inderbitzen para mensuração da massa, acarretava perdas consideráveis de solo que ficava retido no equipamento ou na borracha EVA. Outro problema, observado nessa etapa, ocorre quando o fluxo é reiniciado, criando um efeito de inércia atuando sobre as partículas de dimensões maiores que 4,8 mm (diâmetro médio), provavelmente, por causa da vazão adotada. Este último aspecto é detalhado no item relativo às Análises dos Resultados.

Ao término do ensaio foram realizados os cálculos para a estimativa da massa de solo perdida, por meio da comparação com a curva granulométrica, conforme a Equação 3.1, proposta por Almeida, Rocha e Gitirana Jr. (2013).

$$M_T = \frac{100 \times M_{R200}}{100 - P_{P200}} \quad (3.1)$$

Onde:

M_T : massa total erodida;

M_{R200} : massa lavada retida na peneira n° 200 (0,075 mm);

P_{P200} : porcentagem passante na peneira n° 200 (0,075 mm), conforme curva granulométrica.

A partir da pesagem do total retido na peneira n° 200 (0,075 mm) em cada intervalo de tempo, correlacionando com a Equação 3.1, foi possível estimar a perda total de massa para cada

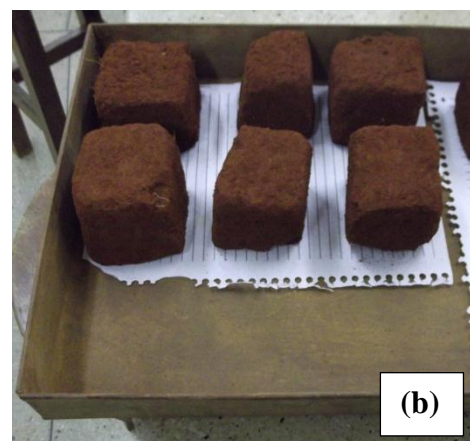
intervalo de tempo. Realizados os cálculos, foram construídos os gráficos com as curvas de perda de solo acumulado pelo tempo decorrido para os corpos de prova com diferentes teores de umidades iniciais.

Do material retido na peneira nº 200, realizou-se o peneiramento fino, obtendo as porcentagens constituintes em cada fração retida nas peneiras de abertura igual a 4,8 mm; 2 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,425 mm; 0,3 mm; 0,15 mm e 0,075 mm. Em posse desses dados realizou-se uma comparação com as frações retidas na curva granulométrica.

3.3.4.2 Ensaio de desagregação

Por meio deste ensaio pode-se prever a influência da água no solo quando submerso, verificando assim a estabilidade do corpo de prova. A metodologia utilizada ocorreu conforme Santos (1997), com inundação total e parcial, em amostras indeformadas de solo, no formato de cubos com 60 mm de aresta. Ressalva-se que por ser a amostra de Cambissolo bastante heterogênea, com a presença constante de pedregulhos, não foi possível moldar precisamente cubos de 6 cm de aresta, pois os blocos se desmoronavam na raspagem ao encontrar algum fragmento rochoso. Logo, buscou-se moldar estruturas semelhantes ao cubo, que possuíssem estabilidade na base, a fim de minimizar a interferência nos resultados. A Figura 3.16 apresenta os formatos dos corpos de prova das amostras de Cambissolo e Latossolo.

Figura 3.16 – Modelos dos corpos de prova: (a) amostra de Cambissolo em formato amorfo; (b) amostra de Latossolo, em formato cúbico



No ensaio de imersão total, inunda-se o corpo-de-prova totalmente, permanecendo assim por 24 h. Já para o ensaio de imersão parcial, a amostra é disposta em uma pedra porosa inundada por 30 minutos. Em seguida adiciona-se água para 1/3, 2/3 e completa imersão do corpo-de-prova, aguardando 15 minutos em cada etapa, sendo que após a completa imersão mantém-se o solo inundado por 24 h. A resposta do corpo de prova à inundação é observada e descrita.

Assim como no ensaio de Inderbitzen, os corpos de prova do ensaio de desagregação (total e parcial) foram submetidos a diferentes teores de umidade iniciais. Para a amostra de Cambissolo foram adotadas as seguintes umidades iniciais: CT/CG 01 ($S_0 = 25\%$); CT/CG 02 ($S_0 = 43\%$); CT/CG 03 ($S_0 = 61\%$); CT/CG 04 ($S_0 = 74\%$); CT/CG 05 ($S_0 = 98\%$). Para a amostra de Latossolo foram adotados os seguintes teores de umidade iniciais: LT/LG 01 ($S_0 = 12\%$); LT/LG 02 ($S_0 = 24\%$); LT/LG 03 ($S_0 = 36\%$); LT/LG 04 ($S_0 = 60\%$); LT/LG 05 ($S_0 = 96\%$).

3.3.4.3 Ensaios de dispersabilidade (*crumb test*; sedimentométrico comparativo; e teor de agregação)

As metodologias empregadas para a análise da dispersibilidade dos solos em estudo foram a NBR 13601 (ABNT, 1996b), a qual dita sobre Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*); a NBR 13602 (ABNT, 1996a), a qual descreve sobre Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS; e análise do Teor de agregação, conforme executado por Silva (2010).

Também conhecido como ensaio de dispersão SCS, em homenagem à contribuição dada pelo *Soil Conservation Service*, dos Estados Unidos da América na divulgação do experimento. Este método é executado segundo a NBR 13602 (ABNT, 1996a) e deve ser utilizado em solos que apresentam mais de 12% de fração argilosa (partículas com diâmetro inferior a 0,005 mm), além de ser analisado conjuntamente com a NBR 7181 (ABNT, 1984a), a qual prescreve a metodologia para análise granulométrica.

Após realizar as curvas granulométricas com e sem defloculante, obteve-se a porcentagem de dispersão de cada solo obedecendo a Equação 3.2:

$$D(\%) = \left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

D (%): porcentagem de dispersão;

A: porcentagem, em massa, de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, de acordo com a curva granulométrica sem defloculante;

B: porcentagem, em massa, de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, de acordo com a curva granulométrica com defloculante.

A porcentagem de dispersão igual a 100% indica uma fração argila completamente dispersiva e uma porcentagem de dispersão igual a zero indica argila completamente não dispersiva.

Apesar de ambas as NBRs serem específicas para solos argilosos, os ensaios foram realizados tanto para a amostra de Cambissolo quanto para a de Latossolo, visto que ambos os solos apresentam quantidades significativas de frações finas.

Analisando também as curvas granulométricas com e sem defloculante, Lima (2003), por meio do Teor dos agregados totais, obteve um parâmetro denominado de Teor de agregação dos solos, conforme Equação 3.3.

$$TA = \frac{B - A}{B} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

TA: Teor de Agregação, %;

A: porcentagem de argila sem defloculante (partículas < 0,005 mm), %;

B: porcentagem de argila com defloculante (partículas < 0,005 mm), %;

Comparando-se as equações de porcentagem de dispersão (Equação 3.1) e de teor de agregação (Equação 3.3), pode-se notar que os resultados obtidos em cada equação são complementares entre si, ou seja, a somatória desses será igual a 100%.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nos itens que se seguem serão expostos os resultados e as análises dos ensaios realizados durante a pesquisa, referentes à caracterização do material, ensaios específicos para solos tropicais, para solos não saturados e de erodibilidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Conforme comentado na Metodologia, foram realizados ensaios de caracterização nas amostras de Latossolo e Cambissolo. Dessa forma, a Tabela 4.1 apresenta os valores dos principais índices físicos das amostras em estudo, sendo estes: umidade natural (w_{nat}); limite de liquidez (w_L); limite de plasticidade (w_p); índice de plasticidade (I_p); massa específica dos grãos (γ_s); índice de vazios médio (e); porosidade média (η); e índice de atividade (I_A).

Tabela 4.1 – Índices físicos das amostras em estudo.

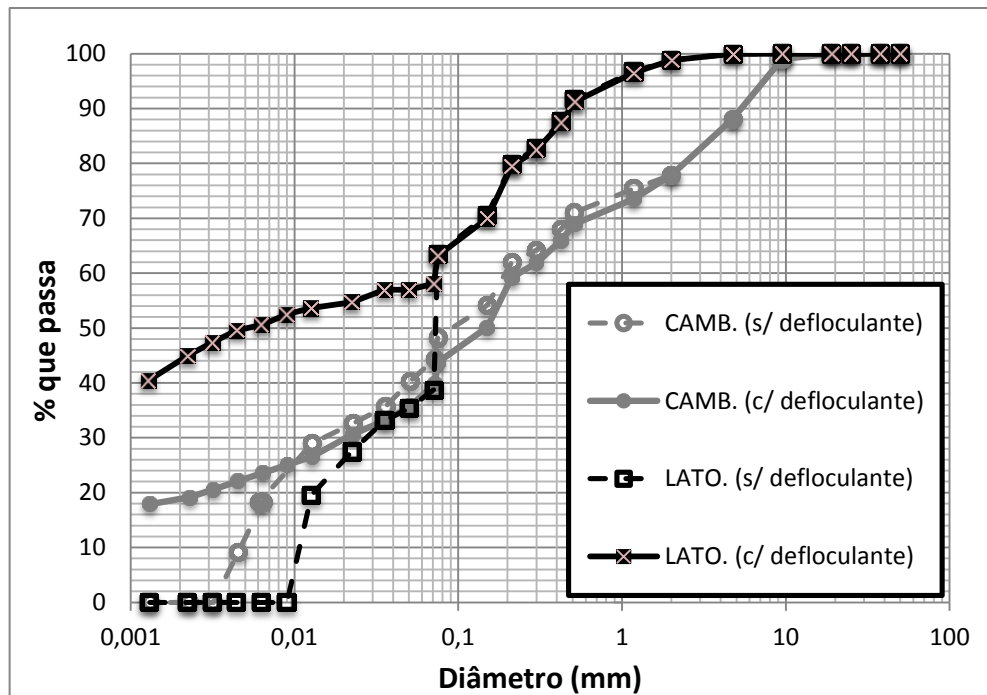
Amostra	w_{nat} (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	γ_s (g/cm ³)	e	η (%)	I_A
Cambissolo	11	38	26	12	2,798	0,456	0,313	0,63
Latossolo	22	48	36	12	2,876	1,192	0,544	0,27

Conforme pôde ser observado na Tabela 4.1, a amostra de Latossolo apresenta elevado teor de umidade natural, devido a maior presença de fração argilosa que, além de estar agregada, tornando o material mais poroso, apresenta a característica de reter a água. Por outro lado, o índice de vazios do Cambissolo e a baixa capacidade de retenção da areia, resultam em um baixo teor de umidade natural. Os limites de liquidez e plasticidade também refletem essa característica da fração argilosa, pois a amostra de Latossolo possui valores de consistência maiores, bastante influenciados pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, comumente presentes nos solos tropicais.

Segundo Molinero Junior *et al.* (2011), solos de médio potencial de erosão possuem $30\% \leq w_L \leq 50\%$; e $10\% \leq I_p \leq 30\%$. Dessa forma, tanto a amostra de Cambissolo quanto de Latossolo poderiam ser considerados solos com médio potencial à erosão, se classificados segundo esses autores.

A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica com e sem defloculante e a Tabela 4.2 apresenta a porcentagem de cada fração granulométrica constituinte das amostras em estudo, conforme NBR 7181 (ABNT, 1984a) e NBR 6502 (ABNT, 1995), as quais estabelecem os critérios para elaboração da curva granulométrica e a granulometria de cada fração, respectivamente.

Figura 4.1 – Curva granulométrica com e sem defloculante de ambos os solos.



Com base na curva granulométrica com defloculante e nos índices físicos de cada solo, realizou-se a classificação segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e segundo o Sistema Rodoviário de Classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Segundo a metodologia do SUCS, a amostra de Cambissolo se enquadra como uma areia argilo-siltosa (SC-SM) e a amostra de Latossolo como um silte de baixa compressibilidade (ML). Já pela metodologia AASHTO a amostra de Cambissolo encontra-se no Grupo A-6, e a de Latossolo no Grupo A-7-5.

Segundo o DNIT (2006) os solos do Grupo A-6 possuem as seguintes características: solo argiloso, plástico, possuindo geralmente 75% ou mais de material passante na peneira de abertura de 0,074mm. Podem ainda incluir misturas de solos argilosos, com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira retro mencionada. Comumente apresentam elevada mudança

de volume entre os estado seco e úmido. Já os solos do Grupo A-7-5 apresentam índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elásticos e sujeitos a elevadas mudanças de volume.

Tabela 4.2 – Porcentagem das frações granulométricas para as amostras de Cambissolo e Latossolo

Amostra	Pedregulho (%) (2 a 60)mm	Areia (%) (0,06 a 2)mm	Silte(%) (0,002 a 0,06)mm	Argila (%) (< 0,002)mm	Σ (%)
Cambissolo (c/ defloc.)	22,14	40,31	18,77	18,78	100
Cambissolo (s/ defloc.)	22,14	35,84	42,02	0,00	100
Latossolo (c/ defloc.)	1,17	41,33	13,62	43,88	100
Latossolo (s/ defloc.)	1,17	61,85	36,98	0,00	100

Segundo Molinero Junior *et al.* (2011), o coeficiente de uniformidade dos solos pode ser correlacionado ao potencial erosivo destes, visto que solos não uniformes apresentam baixa erodibilidade e solos uniformes são potencialmente erodíveis. Dessa forma, os coeficientes de uniformidade dos solos foram obtidos a partir das curvas granulométricas sem defloculante, pois nas curvas com defloculante não foi possível obter os valores de D_{10} (diâmetro efetivo). Assim, a amostra de Cambissolo possui Coeficiente de Uniformidade (C_u) igual a 46, o que o caracteriza como um solo não uniforme ($C_u > 15$). Por outro lado, a amostra de Latossolo apresenta $C_u = 8$, o que o caracteriza como um solo de média uniformidade ($5 < C_u \leq 15$). Ou seja, a amostra de Cambissolo possui baixa erodibilidade e a de latossolo representa solos de média erodibilidade, segundo essa classificação.

O Índice de atividade (I_A) foi calculado utilizando-se a curva granulométrica com defloculante, considerando que a fração argilosa consiste nas partículas menores que 0,002 mm. Dessa forma, conforme esperado, a amostra de Cambissolo apresentou índice de atividade maior que o do latossolo, sendo $I_A = 0,63$ para o primeiro e $I_A = 0,26$ para o último. No entanto, ambos os solos foram classificados como de baixa atividade, conforme Sousa Pinto (2006). Segundo Bastos (2007), I_A inferior a 0,75 infere que o solo possui em sua constituição predomínio de argilas com estrutura molecular do tipo 1:1 (ex.: caulinita). Por outro lado, I_A maiores que 1,25, correlacionam-se às argilas 2:1 (ex.: micas/ilitas). Dessa forma, os resultados sugerem que ambas as amostras são compostas principalmente por caulinitas.

Analisando a porcentagem das frações granulométricas com e sem defloculante (Figura 4.1), foi possível notar consideráveis agregações das partículas de argila em ambos os solos. A amostra de Latossolo, como pode ser melhor detalhado na Tabela 4.2, apresentou maiores quantidades de agregações das partículas de argila do que a amostra de Cambissolo. Observa-se ainda que as agregações da amostra de Latossolo apresentaram diâmetros de tamanho referentes ao grãos de areia e silte, com maior representatividade nesta última fração.

No caso da amostra de Cambissolo, em geral, as agregações das partículas de argila adquiriram diâmetros referentes ao tamanho das partículas de silte. Outro fator relevante observado na amostra de Cambissolo foi que a fração de areia da amostra sem defloculante apresentou valor inferior ao obtido na amostra com defloculante, enquanto esperava-se ao contrário, visto que o produto químico deveria desagregar eventuais partículas de areia que correspondessem a agregações de fração argila. Este comportamento justifica-se ou pela heterogeneidade da amostra, e/ou pela própria variabilidade do ensaio, visto que as diferenças não são relevantes.

O fator de heterogeneidade, ao se estudar essa amostra de Cambissolo, apresenta muita influência na execução do processo de destorroamento com almofariz e mão de grau recoberta com borracha. Pôde-se notar certa fragilidade, baixa resistência, dos fragmentos rochosos existentes na amostra. Logo, o processo de destorroamento desta amostra foi realizado de forma mais branda, a fim de minimizar as rupturas destes fragmentos.

Os dados obtidos por meio da curva granulométrica serviram também para análise do Ensaio Sedimentométrico Comparativo e do Ensaio de Teor de Agregação, com a finalidade de se avaliar a dispersibilidade do solo.

Analisando as curvas granulométricas com e sem defloculante (Figura 4.1), da amostra de Cambissolo, tem-se que a porcentagem, em massa, de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm da curva sem defloculante - $A_{\text{Camb.}} = 11,42\%$. Já a porcentagem referente à curva granulométrica com defloculante - $B_{\text{Camb.}} = 22,48\%$. Fazendo o cálculo da porcentagem de dispersão (Cambissolo) = $(A_{\text{Camb.}} / B_{\text{Camb.}}) \times 100$, de acordo com a NBR 13602 (ABNT, 1996a); tem-se um valor de 51%, ou seja, a fração argilosa pode ser classificada como de média dispersibilidade. Por outro lado, a amostra de Latossolo apresentou $A_{\text{Lato.}} = 0\%$ e

$B_{\text{Lato.}} = 49,88\%$, tendo-se uma relação igual á 0%, ou seja, fração argilosa completamente não dispersiva.

Dessa forma, classificando as amostras segundo a metodologia adotada por Molinero Junior *et al.* (2011), onde solos com porcentagem de dispersão maior que 50% são caracterizados como altamente dispersivos; entre 20 e 50% como moderados; e menor que 20% como não dispersivos; pode-se notar que a amostra de Cambissolo enquadra-se no limiar entre um solo moderado a altamente dispersivo, enquanto a amostra de Latossolo enquadra-se como um solo não dispersivo.

Vale ressaltar que os cátions de sódio presentes nos solos ou na água intersticial são os principais fatores de dispersibilidade nos solos. A região em estudo não costuma apresentar solos dispersivos, conforme constatado no Ensaio de *Crumb Test*, que é apresentado em item posterior. Logo alguns autores adotam o parâmetro Teor de Agregação (TA) como mais representativo para solos tropicais.

Dessa forma, a amostra de Cambissolo apresentou $TA_{\text{Camb.}} = 49,2 \%$ e a amostra de Latossolo, apresentou $TA_{\text{Lato.}} = 100 \%$. Como pôde ser visto anteriormente, era de se esperar que a amostra de Latossolo fosse altamente agregada por não apresentar partículas de diâmetros referentes ao tamanho de argila no ensaio sem defloculante. Contudo, a amostra de Cambissolo, por ser um solo jovem, aparentemente sem características de comportamento de solos tropicais, apresentou-se com teor de agregados consideráveis, praticamente com metade da sua composição argilosa. Conforme é possível ser observado a seguir, no ensaio de difratometria, os elevados teores de agregações se devem à existência de óxidos e/ou hidróxidos de ferro e/ou alumínio presentes nas amostras.

Visto que os materiais inconsolidados em estudo se encontram em regiões tropicais, tratando-se de um solo mais jovem e outro maduro, com teores de agregação consideráveis, podendo assim apresentar características distintas às classificações tradicionais, viu-se a necessidade de realizar uma classificação específica para solos tropicais a fim de obter um melhor entendimento quanto ao comportamento de cada solo, principalmente quanto ao processo de laterização.

4.2 ENSAIOS EM SOLOS TROPICAIS

Foram realizados ensaios voltados para análise do estágio de formação e constituição dos agregados existentes nos solos em questão, especificamente para o conhecimento das características dos solos tropicais. Assim, foram realizados os seguintes ensaios: Identificação Expedita do Solo Laterítico – “Método da Pastilha”; Adsorção de Azul de Metileno – “Método da Mancha”; e o de Caracterização Mineralógica por Difração de Raio-X.

4.2.1 Identificação Expedita do Solo Laterítico – “Método da Pastilha”

A partir da realização do ensaio de Identificação Expedita do Solo Laterítico – “Método da Pastilha” seguindo a metodologia de Fortes, Zuppolini Neto e Merighi (2002) e DERSA (2006), foi possível notar na amostra de Cambissolo a presença de trincas minúsculas com aspecto rugoso (Figura 4.2a), baixo processo expansivo estrutural durante o umedecimento (Figura 4.2b), contração diametral média de 0,98 mm e penetração média do penetrômetro padrão de 1,25 mm. A partir da contração e penetração média foi possível classificar a amostra de Cambissolo como correspondente a um material em transição entre um solo arenoso laterítico e argiloso laterítico (LA` - LG`), conforme Carta de Classificação do Método das Pastilhas (Figura 4.3). Destaca-se que este resultado é coerente com a classificação obtida utilizando-se o SUCS: areia argilo-siltosa (SC-SM).

Segundo Sousa Pinto (2006), certos solos, na condição não saturada, quando submetidos à saturação, podem apresentar processo expansivo. Essa expansão é geralmente devido à entrada de água nas interfaces das estruturas mineralógicas das partículas argilosas, ou devido à liberação de pressões de sucção às quais o solo estava sujeito, podendo ser pelo efeito de ressecamento ou pela ação de compactação a que foi submetido. Logo, o processo expansivo ocorrido na amostra de Cambissolo, quando submetido à saturação, deve-se provavelmente, à liberação de pressões de sucção, às quais o solo estava submetido por efeito de ressecamento.

Já na amostra de Latossolo, ocorreram contrações consideráveis no processo de secagem (Figura 4.4), porém durante o umedecimento não foram constatadas trincas nem expansão. A amostra foi classificada segundo a Carta de Classificação do Método das Pastilhas (Figura 4.3) como um solo argiloso laterítico (LG`), com penetração do penetrômetro igual a zero e possuindo contração diametral média de 1,88 mm.

Figura 4.2 – Amostra de Cambissolo: (a) com pequenas trincas, aspecto rugoso; (b) com baixo processo expansivo



Figura 4.3 - Carta de Classificação do Método das Pastilhas

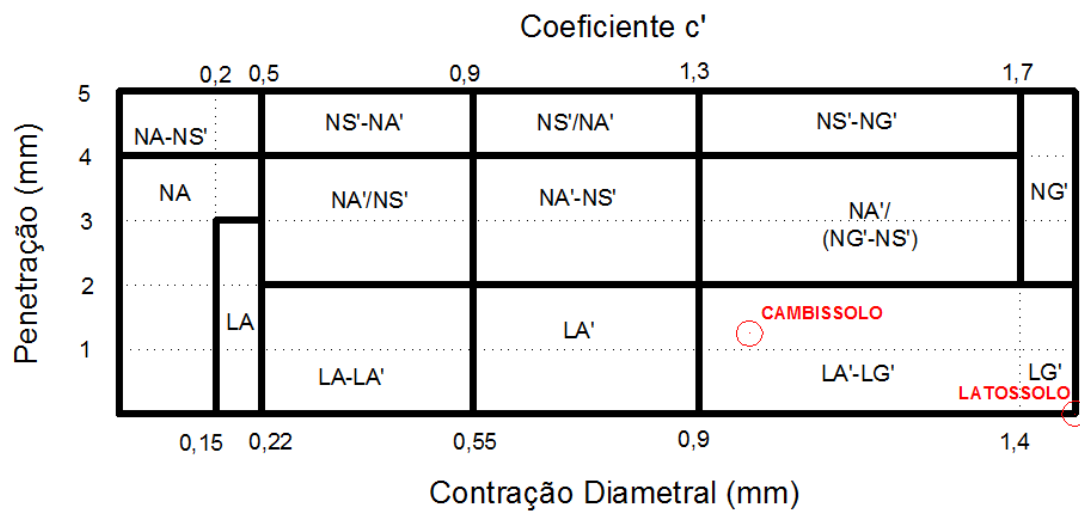


Figura 4.4 – Amostra de Latossolo com elevada contração diametral



4.2.2 Adsorção de Azul de Metileno – “Método da Mancha”

A realização do ensaio de Adsorção de Azul de Metileno – “Método da Mancha”, tem por finalidade obter indiretamente o Coeficiente de Atividade (CA); Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica (SE) de cada amostra de solo estudado.

A Figura 4.5 apresenta os papeis filtros da marca *Whatman n° 42* utilizados nos ensaios para análise do consumo de azul de metileno pela fração argilosa das amostras de Cambissolo e Latossolo. Nota-se que a amostra de Cambissolo consumiu 3 ml da solução de azul de metileno e a amostra de Latossolo consumiu 6 ml da solução.

Os cálculos para obtenção do Coeficiente de Atividade (CA), Superfície Específica (SE) e Capacidade de Troca Catiônica (CTC) seguiram as Equações 2.7 a 2.10, referenciadas anteriormente na Revisão Bibliográfica (Item 2.2.3). Os parâmetros obtidos no ensaio estão discriminados na Tabela 4.3.

Os valores apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2 (Item 2.2.3) foram utilizados para estimar o argilo mineral predominante nos solos estudados. A partir dos dados obtidos nos ensaios obtiveram-se os valores da Superfície Específica (LAN, 1979) referente e da Capacidade de Troca Catiônica (Beaulieu, 1979¹⁵, *apud* PEJON, 1992), os quais são apresentados na Tabela 4.3. Os resultados mostram que ambas as amostras possuem a caulinita como o principal argilomineral. Quanto ao Coeficiente de Atividade (CA), ambos os solos foram classificados como pouco ativos, visto apresentarem $CA < 11$, o que é uma característica do argilo mineral predominante nas amostras.

Vale ressaltar que os Índices de Atividade (I_A) obtidos por meio dos valores de Índices de Plasticidade (I_p) também se apresentam como pouco ativos e possuindo a caulinita como principal argilomineral presente em ambas as amostras.

Figura 4.5 – Ensaio de adsorção de azul de metileno – “Método da Mancha”; (a) amostra de Cambissolo com ponto de viragem em 3 ml; (b) amostra de Latossolo com ponto de viragem em 6 ml

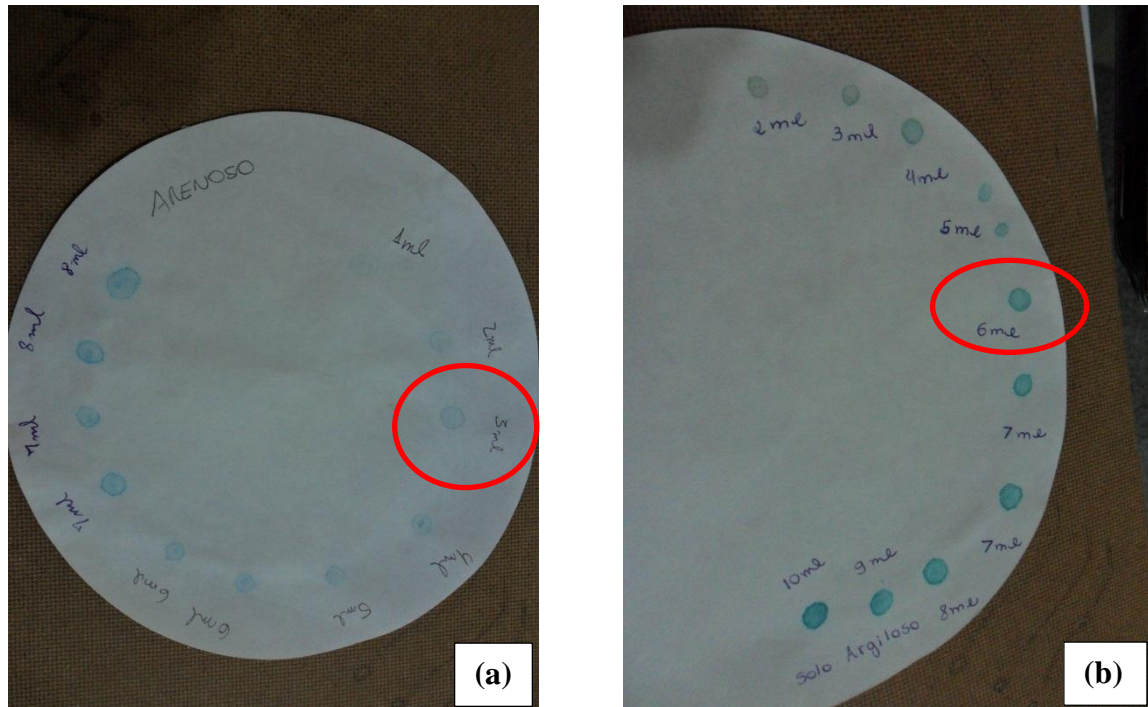


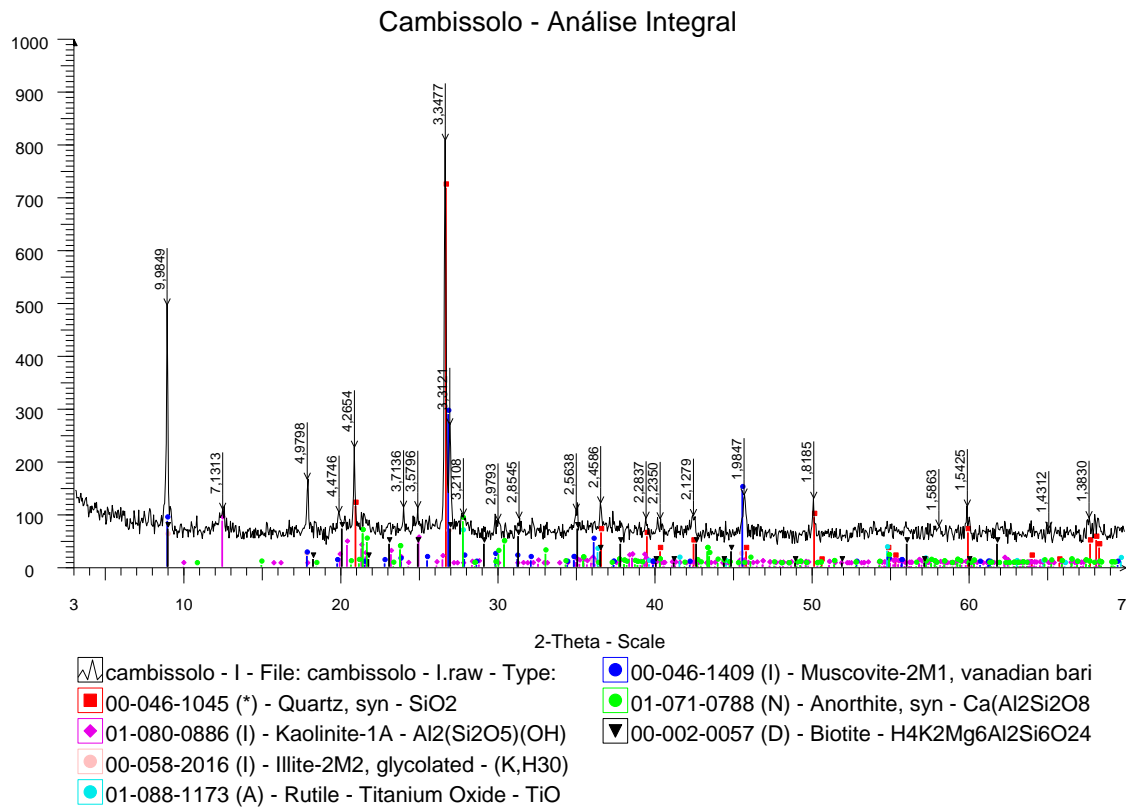
Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos no ensaio de adsorção de azul de metileno – Método da Mancha

Parâmetro / Amostra	Cambissolo	Latossolo
Volume de azul de metileno consumido (ml)	3	6
CA	5,8	7,83
SE (m²/g)	7,32	14,64
CTC (meq/100g)	0,8	1,61

4.2.3 Caracterização Mineralógica por Difração de Raios-X

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos entre as amostras analisadas no ensaio de azul de metileno, realizou-se a caracterização mineralógica por difração de raios-X. Os ensaios foram realizados e analisados pelo laboratório de solos de Furnas / Eletrobrás em amostras integrais dos materiais inconsolidados (Figuras 4.6 e 4.8) e em amostras da fração argila (Figuras 4.7 e 4.9).

Figura 4.6 – Difratoograma de raios-X da amostra integral de Cambissolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras

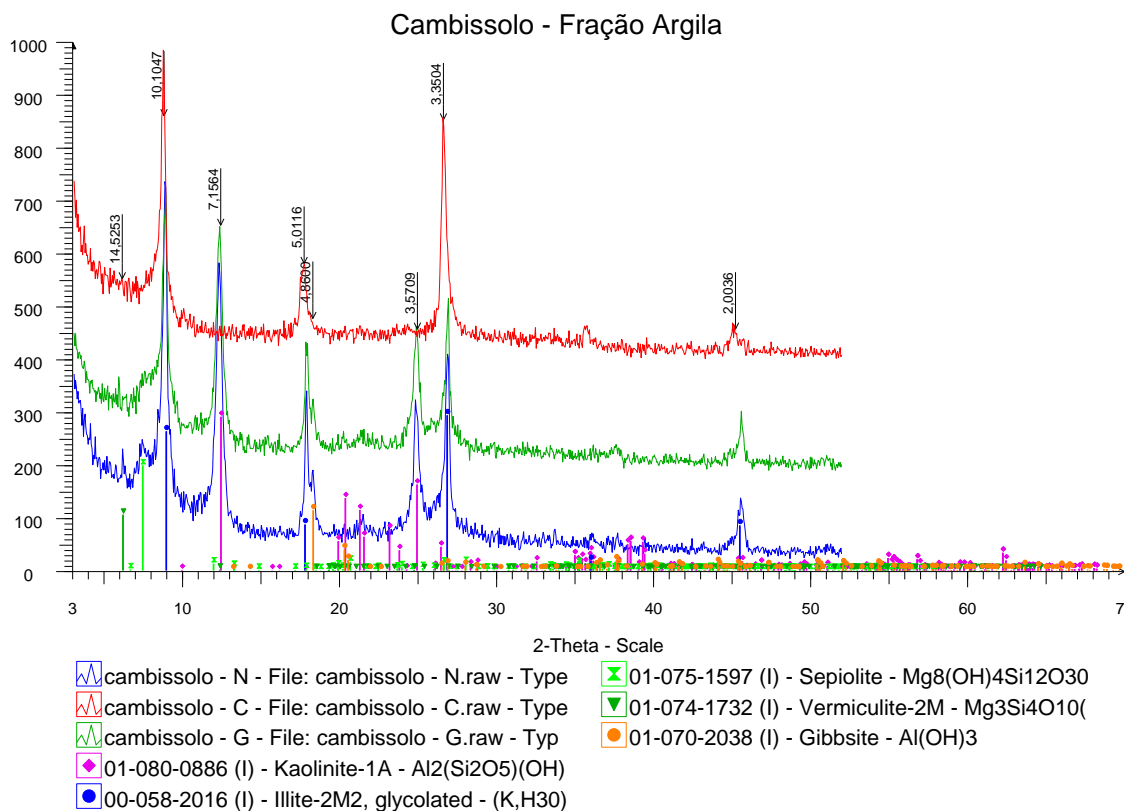


É possível observar a partir da análise do difratograma da amostra de Cambissolo (Figura 4.6 e 4.7), a presença dos seguintes minerais: quartzo, caulinita, illita, rutilo, muscovita, anortita, biotita, sepiolita, vermiculita e gibbsita. Dentre os minerais encontrados observa-se a ocorrência tanto de minerais primários (quartzo e illita) quanto secundários (caulinita e gibbsita). Esta observação indica que a amostra de Cambissolo se encontra em processo de intemperização, principalmente pela presença da illita, caulinita e gibbsita, visto ser o quartzo um mineral mais estável quanto aos processos de intemperismo.

A presença do argilomineral illita, confirma o fato de que este solo é pouco intemperizado, visto ser um mineral 2:1, quimicamente mais instável nas condições desse ambiente. A illita é um mineral que pode apresentar um comportamento expansivo. Contudo a expansão verificada no ensaio de pastilha é melhor relacionada pelo fenômeno de liberação de pressões de sucção, conforme elucidado por Sousa Pinto (2006), anteriormente apresentado no ensaio de pastilha. Jesus *et al.* (2009) realizaram ensaios de difratometria de raios-X em amostras

próximas às regiões de estudo (Município de Anápolis) e constataram a presença do mineral illita, comumente presentes em solos pouco alterados. Todavia, não ocorreram expansões no ensaio de difratometria com amostra glicolada o que indica a inexistência de minerais expansivos. Sendo assim os autores justificam que este fato pode se situar no campo da expansão estrutural do solo após secagem.

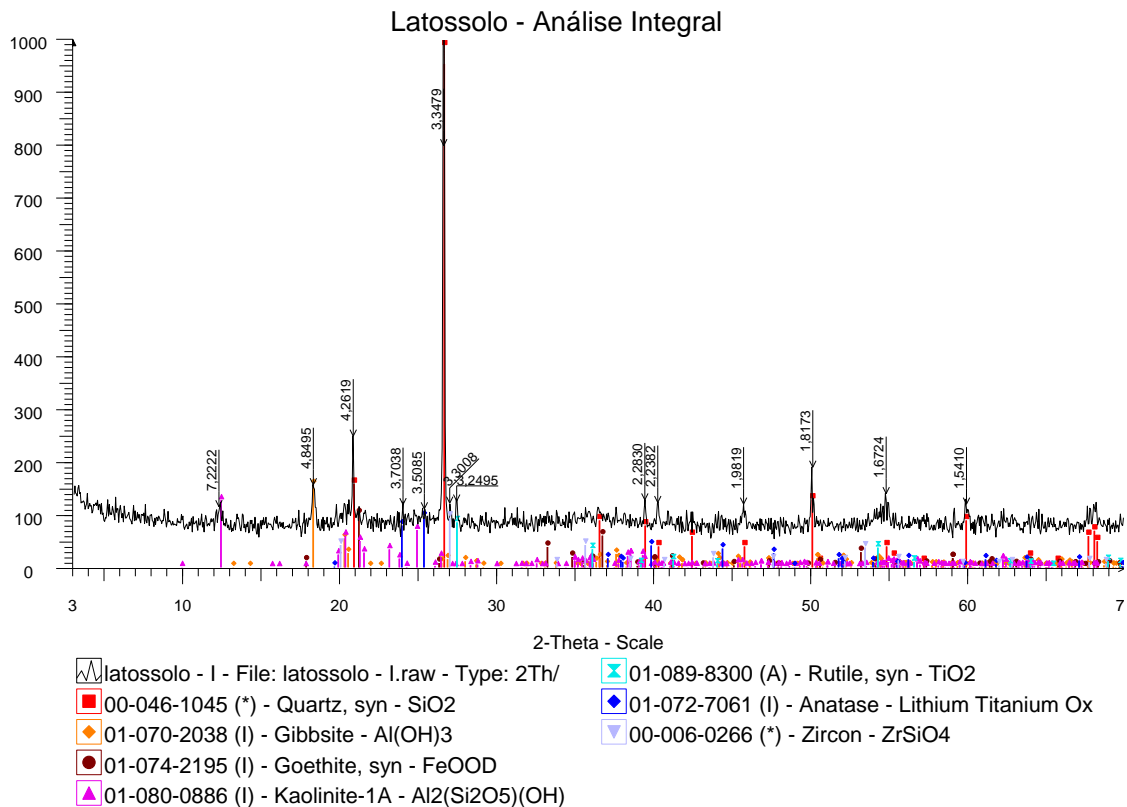
Figura 4.7 – Difratoograma de raios-X da fração argila da amostra de Cambissolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras



Ainda em paralelo com o ensaio de pastilha, a presença dos minerais caulinita e gibbisita corroboram o fato da amostra de Cambissolo ser enquadrada como laterítica. Ressalva-se ainda que a gibbisita presente no solo possa ser o principal mineral responsável pela coloração amarelada da amostra e pelas agregações presentes.

A classificação SUCS da amostra de Cambissolo, como areia argilo-siltosa (SC-SM), pode ser explicada devido à presença marcante do mineral de quartzo, principal componente da fração granular nos solos da região, originados de rochas xistosas e/ou quartzosas.

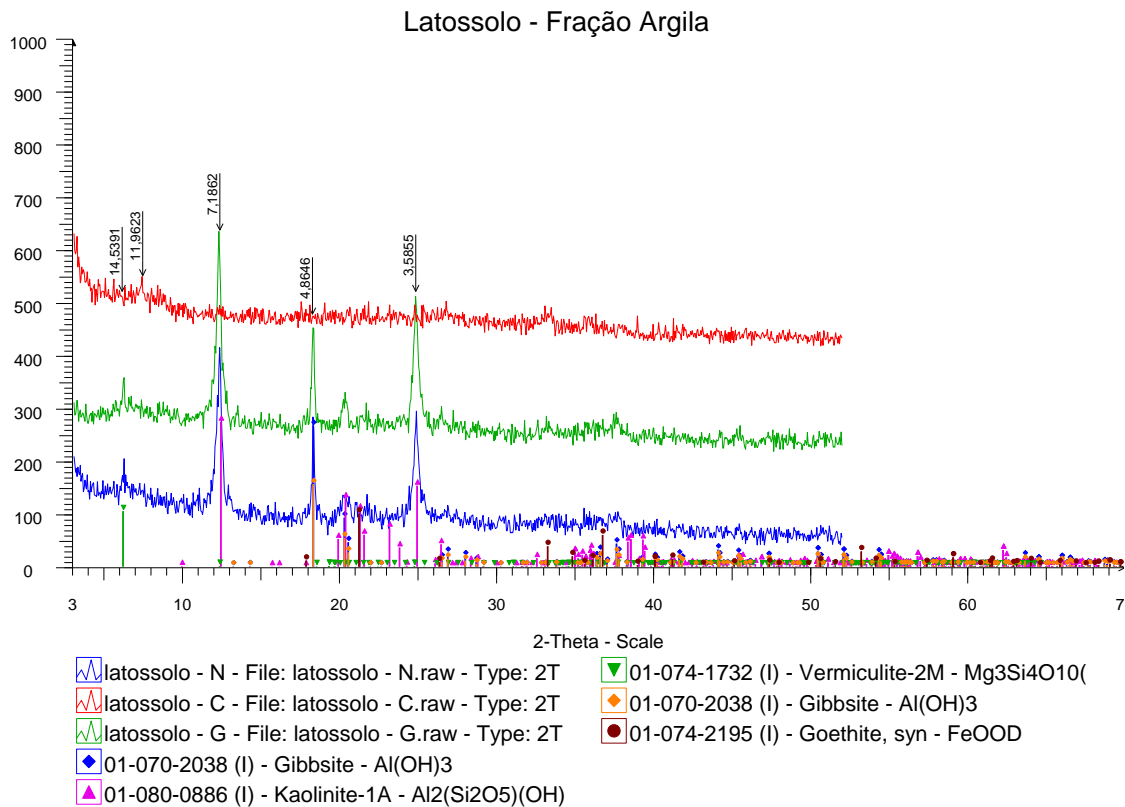
Figura 4.8 – Difratoograma de raios-X da amostra integral de Latossolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras.



A partir da análise do difratograma da amostra de Latossolo (Figura 4.8 e 4.9) foi possível notar a presença de: quartzo, gibbsita, goethita, caulinita, vermiculita, rutilo, anatásio e zircão. Apesar da presença de alguns minerais primários, como o quartzo, presente na maioria dos solos da região, a amostra de latossolo apresenta diversos minerais secundários, produtos de intenso processo de intemperismo, devido em especial à presença dos óxidos de ferro (goethita) e hidróxidos de alumínio (gibbsita).

Apesar de apresentarem coloração castanha à avermelhada, o rutilo e o anatásio, classificados como minerais primários, não foram encontrados na fração argila, descartando assim a hipótese de que esses minerais seriam os responsáveis pela coloração avermelhada do solo em estudo.

Figura 4.9 – Difratoograma de raios-X da fração argila da amostra de Latossolo fornecido pelo Laboratório de solos de Furnas / Eletrobras.



Resende *et al.* (2005) ressalta a existência de outras técnicas e pré-tratamentos para a identificação mais precisa de minerais existentes nas amostras, como a montagem orientada, a saturação com cátions, compostos orgânicos ou ambos (K^+ , Mg^{2+} , glicerol, etilenoglicol), aquecimento e tratamentos especiais destacando a concentração de certos componentes minerais. Sendo assim, suspeita-se que a hematita, mesmo ausente nos difratogramas da amostra de Latossolo, seja o argilomineral responsável pela coloração avermelhada do solo, pois a goethita e a gibbsita tendem a contribuir para uma coloração mais amarelada.

O pré-tratamento de amostras com NaOH + água destilada, é por exemplo um dos procedimentos que ajudam a visualizar melhor a hematita no ensaio de Difractometria por raios-x (UFBA, 2004).

König, Pollmann e Angélica (2002) relatam que minerais com hábitos na forma de agregados lamelares, como a hematita, apresentam fortes efeitos de textura na difração de raios-x. Sendo assim os autores realizaram diversos ensaios e procedimentos estatísticos para obter

intensidades exatas dos picos unitários de alguns minerais de Fe. Os seguintes métodos foram examinados pelos autores: redução dos efeitos de textura pela variação no tempo de moagem; utilização de diferentes métodos de moagem (planar, disco rotatório, gral de ágata) para reduzir o tamanho da partícula; uso de diferentes métodos de preparação (frontal, lateral e back) para reduzir o efeito de orientação preferencial das partículas; uso de diferentes tempos de contagem, tubos de voltagem e intensidades de corrente, no difratômetro de raios x; uso de várias fontes de radiação para reduzir o efeito de fluorescência das amostras ricas em Fe; utilização de medições múltiplas da mesma amostra com diferentes formas de preparação; e melhoria na estatística de partícula com redução dos efeitos de textura através da alternância dos testes.

Logo, a realização de ensaios de difratometria por raios-x seguindo algumas metodologias específicas para encontrar o argilomineral hematita tornar-se-ia interessante, pois assim confirmaria ou não, definitivamente, a presença deste mineral.

As análises dos difratogramas apresentaram coerência com os ensaios realizados do Método da Pastilha e do Método da Mancha. A amostra de Cambissolo foi enquadrada como solo laterítico (LA' - LG') pelo Método da Pastilha, sendo confirmada no ensaio de difratometria por raio-X, principalmente pela presença da gibbista. A amostra de Latossolo também apresentou óxidos e hidróxidos (goethita e gibbsita) em sua constituição, confirmando o seu caráter laterítico. No ensaio de adsorção de azul de metileno – Método da Mancha, ambos os solos foram correlacionados possuindo a caulinita como principal argilomineral existente, sendo que este mineral esteve presente nos difratogramas apresentados.

4.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS SOLO-ÁGUA (CCSA)

Conforme comentado na Metodologia (Item 3.3.3), ensaios com papel filtro foram executados para a obtenção das CCSAs das amostras de Latossolo e Cambissolo, sendo que nesta última foi realizado também o ensaio no aparelho WP4C. A partir das equações de ajuste de Durner (1994 *apud* OTÁLVARO; CORDÃO-NETO, 2011), obtiveram-se os gráficos de Sucção x Teor de umidade gravimétrico (Figura 4.10) e de Sucção x Grau de Saturação (Figura 4.11), referentes às amostras de Cambissolo e Latossolo. Nestas Figuras constam os valores experimentais e suas respectivas equações de ajustes.

A Tabela 4.4 apresenta os valores mais representativos dos parâmetros de ajuste matricial das equações de Durner (1994 *apud* OTÁLVARO; CORDÃO-NETO, 2011), para as amostras de Cambissolo e Latossolo.

Tabela 4.4 – Parâmetros representativos de ajuste matricial das equações de Durner (1994 *apud* OTÁLVARO; CORDÃO-NETO, 2011), para as amostras de Cambissolo e Latossolo

Parâmetro	Cambissolo	Latossolo
e_{wL}	0,15	0,75
α_L	0,20	0,27
n_L	1,5	1,70
m_L	0,33	0,41
e_{wS}	0,31	0,44
α_S	$3,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
n_S	1,5	2,5
m_S	0,67	0,6

Pode-se observar que o Latossolo possui uma curva de formato bimodal, típica de solos tropicais lateríticos, homogêneo e com alto teor de agregação da fração argilosa, apresentando dois valores de entrada de ar, um na micro e outro na macroestrutura.

Por outro lado, a curva do Cambissolo é típica de solos com várias dimensões de poros, devido a não uniformidade da curva granulométrica deste material. Segundo Marinho 2005, solo com poros de diversos tamanhos possui uma redução gradual do teor de umidade com o incremento de sucção, o que é verificado na parte inicial dessa curva. Vale ressaltar que, abaixo de um grau de saturação de 20 %, a CCSW atua a nível microestrutural, devido à presença de um alto teor de argila (18 %).

Conforme comentado na Metodologia (Item 3.3.3), ensaios de WP4C também foram executados no Cambissolo a fim de ratificar os valores obtidos nos ensaios de papel filtro, visto que nesses ensaios não foi possível um bom contato entre o solo e o papel, devido às irregularidades da superfície das amostras. Assim, observa-se que os dados obtidos por meio do ensaio de WP4C foram próximos aos obtidos pelo ensaio de papel filtro. No entanto, não foi possível determinar no WP4C valores de sucção inferiores a 100 kPa.

Figura 4.10 – Curva característica solo-água (Sucção x Teor gravimétrico de água) das amostras de Cambissolo e Latossolo

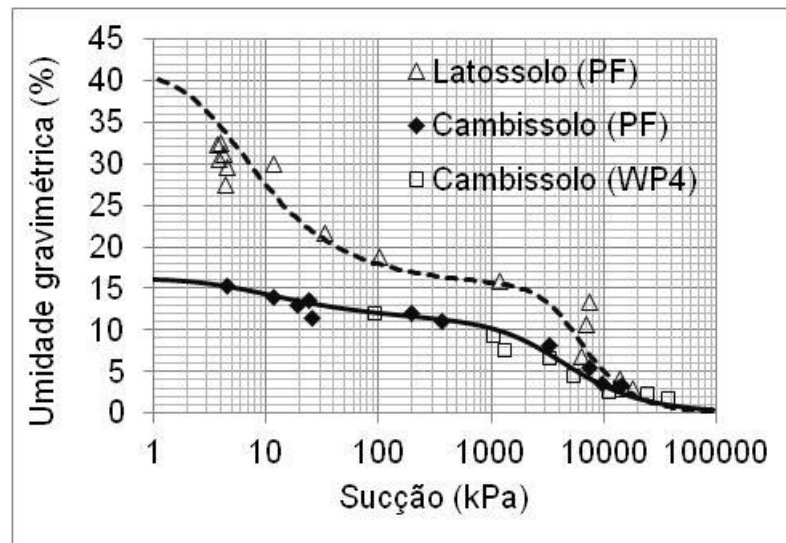
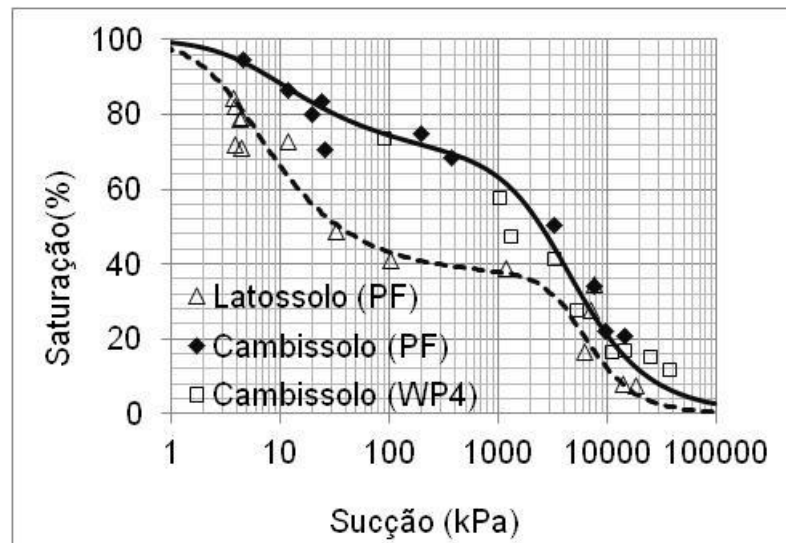


Figura 4.11 – Curva característica solo-água (Sucção x Grau de saturação) das amostras de Cambissolo e Latossolo



Vale ressaltar que as equações de ajuste são bastante úteis na análise das curvas características solo-água, facilitando as suas interpretações. As definições das umidades iniciais para execução dos ensaios de erodibilidade foram realizadas com base nos dados experimentais das CCSAs, antes da calibração das curvas de ajuste, procurando abranger todo o intervalo dessas curvas. Assim, a Tabela 4.5 apresenta os valores de umidade e sucção inicial nos quais foram ensaiados os CPs usados nos ensaios de erodibilidade.

Tabela 4.5 – Parâmetros pré e pós-ensaio de Inderbitzen e parâmetros iniciais dos CPs de Desagregação

	Cambissolo					Latossolo				
CP (Inderbitzen)	CI-1	CI-2	CI-3	CI-4	CI-5	LI-1	LI-2	LI-3	LI-4	LI-5
CP (Desagregação Total)	CT-1	CT-2	CT-3	CT-4	CT-5	LT-1	LT-2	LT-3	LT-4	LT-5
CP (Desagregação Parcial)	CG-1	CG-2	CG-3	CG-4	CG-5	LG-1	LG-2	LG-3	LG-4	LG-5
W_0 (%)	4	7	10	12	16	5	10	15	25	40
S_0 (%)	25	43	61	74	98	12	24	36	60	96
ψ_0 (kPa)	8011	3416	1165	117	1,66	10035	5187	1804	14,5	1,2
W_f (%) (Inderbitzen)	19	15	18	19	27	39	37	39	39	41
S_f (%) (Inderbitzen)	116	92	110	116	165	94	89	94	94	98
ψ_f (kPa) (Inderbitzen)	0	6	0	0	0	1,7	2,7	1,7	1,7	0,6

A escolha das umidades para a amostra de Cambissolo foi baseado na distribuição equitativa dos teores de umidade, variando desde a umidade higroscópica até a umidade de saturação. Logo foram adotadas as seguintes umidades iniciais: CPs-1 ($S_0 = 25\%$); CPs-2 ($S_0 = 43\%$); CPs-3 ($S_0 = 61\%$); CPs-4 ($S_0 = 74\%$); e CPs-5 ($S_0 = 98\%$).

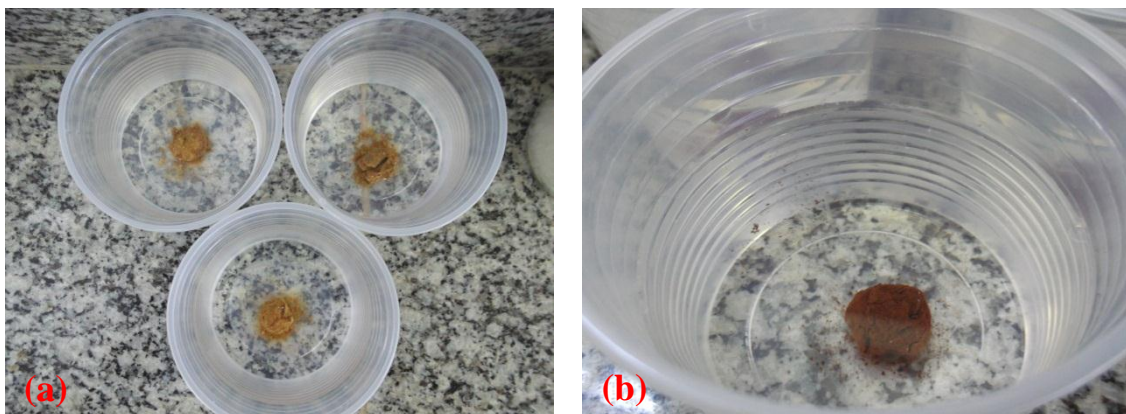
Por outro lado, as amostras do Latossolo apresentam as seguintes configurações: os CPs-1 ($S_0 = 12\%$) e os CPs-2 ($S_0 = 24\%$) encontram-se na região em que as sucções estão atuando nos microporos. Os CPs-3 ($S_0 = 36\%$) e os CPs-4 ($S_0 = 60\%$) situam-se na região de transição dos valores de sucção atuantes nos micro e macroporos. Por fim, os CPs-5 ($S_0 = 96\%$) encontram-se praticamente saturados, com sucção quase nula.

4.4 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

4.4.1 Ensaio de Torrão (*crumb test*)

A Figura 4.12 apresenta o ensaio de torrão para as amostras correspondentes aos solos do tipo Cambissolo e Latossolo. Foi possível notar que não há sinais de turvação no líquido de nenhuma das duas amostras, e que, portanto, essas amostras foram classificadas como de Grau 1 – Comportamento não-dispersivo. Ressalva-se que o presente ensaio não é muito indicado para solos tropicais, visto serem estes geralmente defasados em sódio.

Figura 4.12 – Ensaio de *crumb test*: (a) amostras de Cambissolo, sem sinal de turvação na água; (b) amostra de Latossolo, também sem sinal de turvação no água



4.4.2 Ensaio de Inderbitzen

Os ensaios de Inderbitzen foram executados nas amostras de Latossolo e Cambissolo, em cinco teores de umidades distintos, determinados conforme comentado no Item 4.3. Os valores iniciais e finais de umidade, saturação e sucção matricial de cada CP dos solos em

estudo foram apresentados na Tabela 4.5. Os valores de sucção foram obtidos por meio das CCSAs apresentadas anteriormente.

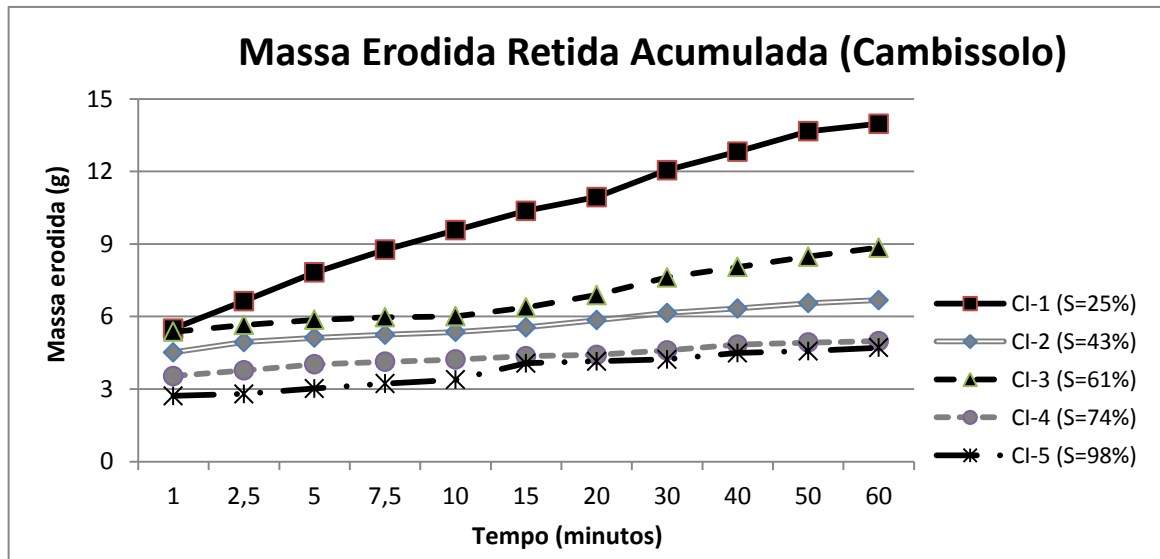
A Figura 4.13 e a Figura 4.14 representam os gráficos Tempo x Massa Erodida Retida Lavada Acumulada, das amostras de Cambissolo e Latossolo, respectivamente, com os cinco teores de umidades iniciais distintos. Ressalta-se que os valores apresentados correspondem aos valores retidos na peneira de abertura igual a 0,074 mm, sem a correlação com a curva granulométrica.

No entanto, considerando-se apenas os valores retidos na peneira nº 200, como normalmente é executado, despreza-se as partículas carregadas que são menores que 0,075 mm. Dessa forma, a massa erodida determinada é menor do que a real, visto que partículas menores também são carregadas.

A fim de considerar a fração erodida passante na peneira de 0,075 mm adotou-se a metodologia proposta por Almeida, Rocha e Gitirana Jr. (2013), que considera a existência de uma similaridade entre a porcentagem de solo erodido com a curva granulométrica. No entanto, estes autores utilizaram peneiras com aberturas de 0,053 mm, diâmetro esse geralmente obtido por meio do ensaio de sedimentação para obtenção das curvas granulométricas. Porém o peneiramento no ensaio granulométrico é realizado, geralmente, até a peneira de nº 200 (0,075 mm), logo se optou por adotar esta peneira como forma de padronizar as mensurações.

Outra importante alteração na metodologia foi a execução do peneiramento no solo erodido do corpo de prova para fazer uma correlação com a curva granulométrica com defloculante do solo ensaiado. Optou-se por adotar a curva granulométrica com defloculante, pois em geral, a fração obtida através do peneiramento é bastante semelhante entre as curvas com e sem defloculante, além de que a NBR 7181 (ABNT, 1984) prevê somente a caracterização com o uso de defloculante. Os resultados para o Latossolo e o Cambissolo são apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16, respectivamente.

Figura 4.13 – Massa erodida retida lavada acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Cambissolo



Observa-se que ocorreram boas correlações comparando o peneiramento do material desagregado no aparelho de Inderbitzen com o peneiramento fino utilizado na construção da curva granulométrica do Latossolo. Este resultado mostra que é razoável considerar que a distribuição granulométrica do material erodido segue a distribuição granulométrica do solo, justificando a metodologia adotada. Em relação ao Cambissolo, essa similaridade não ocorre para tamanhos de grãos referentes à areia grossa, o que deve estar relacionado à dificuldade de carregamento dessas partículas com a vazão aplicada no ensaio (50 ml/s).

Figura 4.14 – Massa erodida retida lavada acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Latossolo

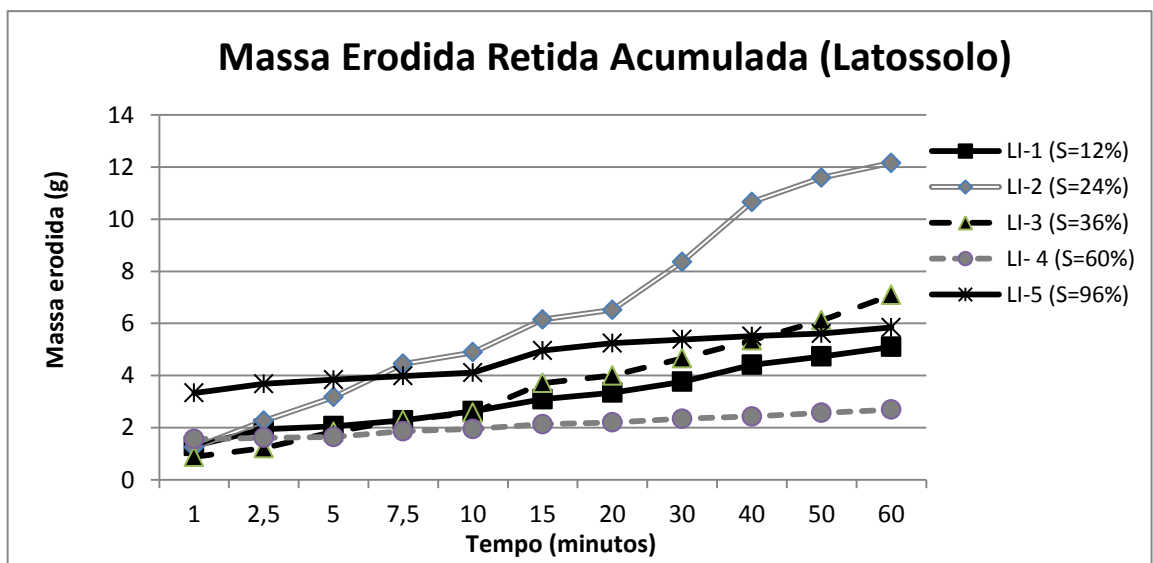


Figura 4.15 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica com defloculante, para os CPs de Latossolo

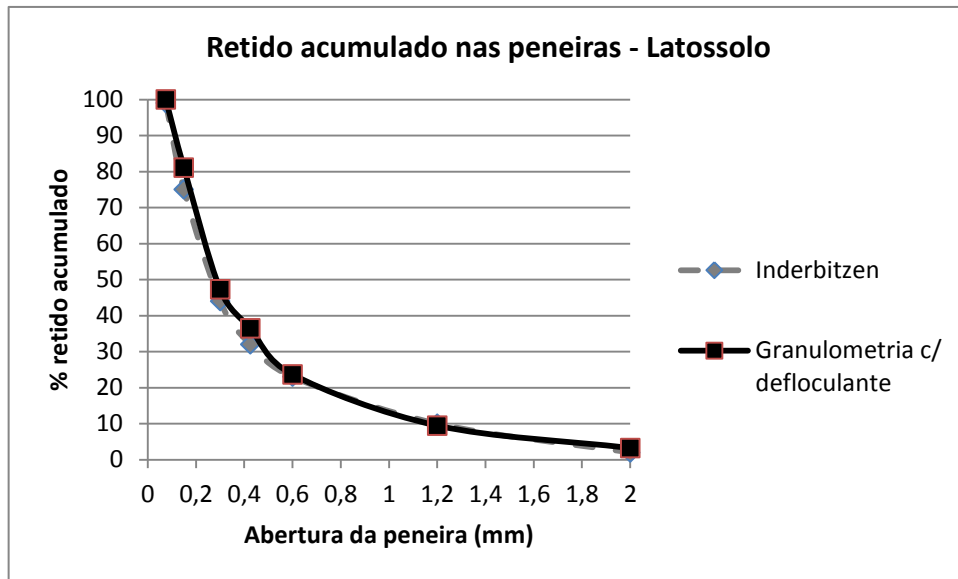
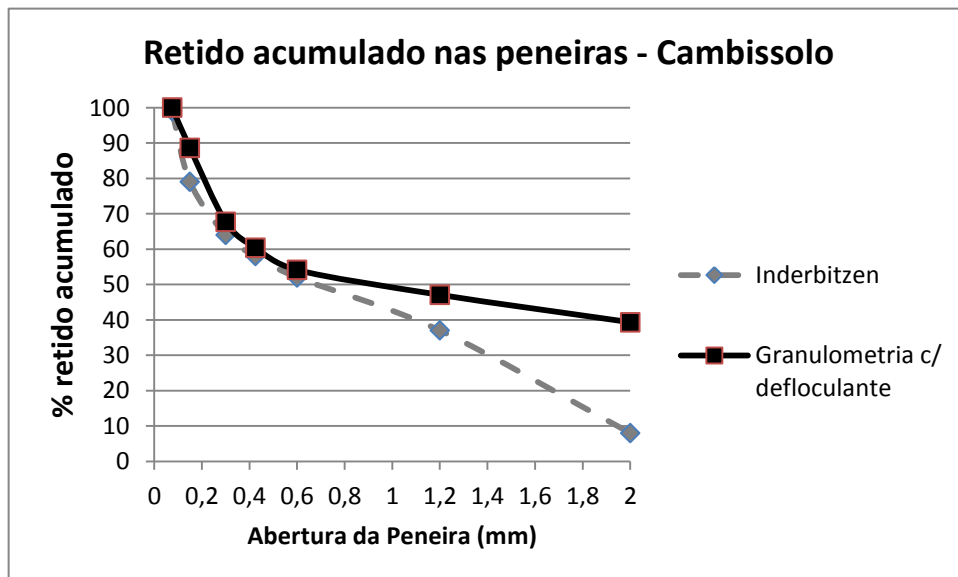


Figura 4.16 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica com defloculante, para os CPs de Cambissolo



Portanto, analisando as curvas granulométricas (Figura 4.1), das amostras de Cambissolo e Latossolo, nota-se que o percentual de material passante na peneira com 0,075 mm de abertura foi de 43,71 e 63,17%, respectivamente.

Com esses dados e realizadas as correlações supracitadas (Equação 3.1), Item 3.3.4, plotou-se os gráficos de Tempo x Massa Total Erodida Acumulada para ambos os solos, com cinco teores de umidades iniciais distintos, com a finalidade de analisar o comportamento erosivo de cada corpo de prova (CP) em função do tempo.

A Figura 4.17 e a Figura 4.18 representam os gráficos Tempo x Massa Total Erodida Acumulada, das amostras de Cambissolo e Latossolo, respectivamente, com os cinco teores de umidades iniciais distintos, considerando a proposta de metodologia apresentada neste trabalho.

Analisando a Figura 4.17, com exceção do CP CI-2 ($S_0 = 7\%$), em geral, notou-se uma tendência de que quanto menor o grau de saturação inicial da amostra, maior é a perda de massa. Quantitativamente, as perdas de massa, em ordem decrescente, para a amostra de Cambissolo foram: CP CI-1 (24,82 g), CI-3 (15,72 g), CI-2 (11,87 g), CI-4 (8,85 g) e CI-5 (8,37 g).

Figura 4.17 – Massa total erodida acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Cambissolo

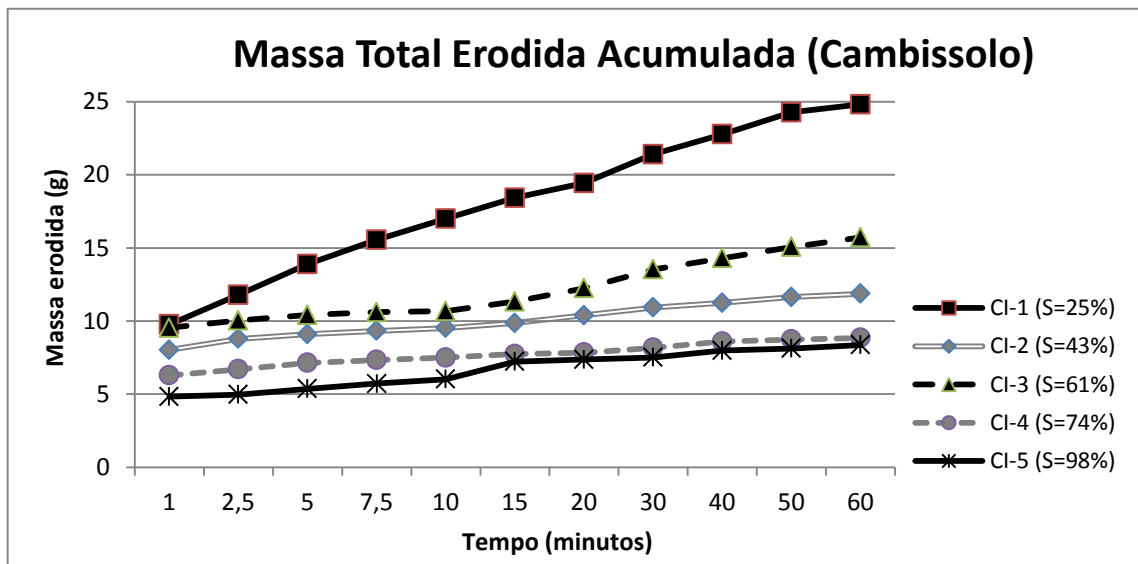
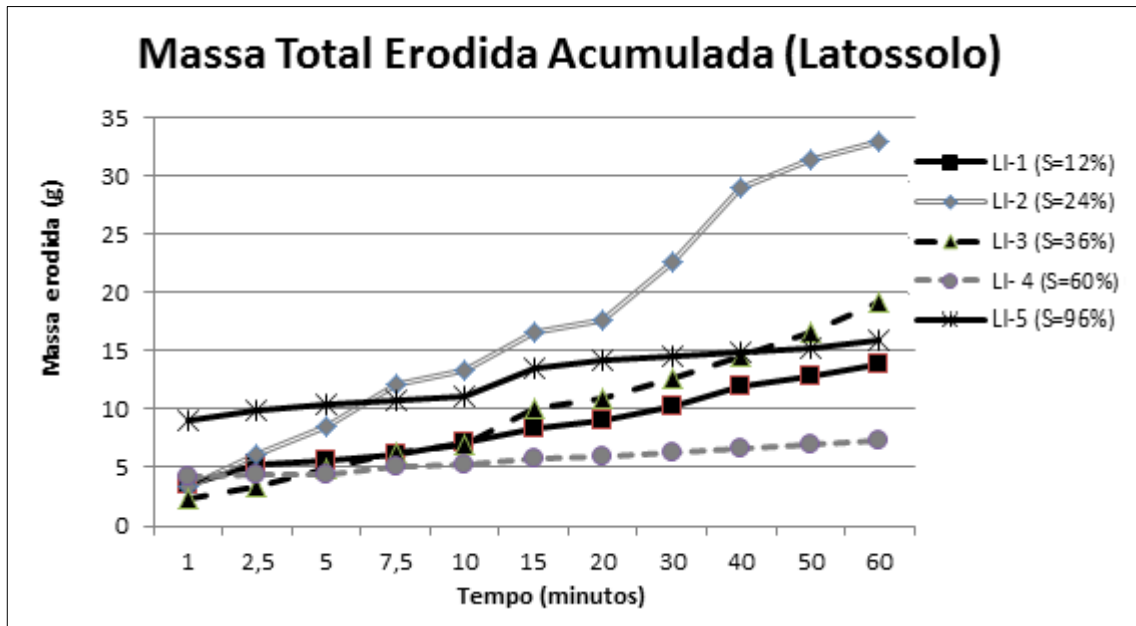
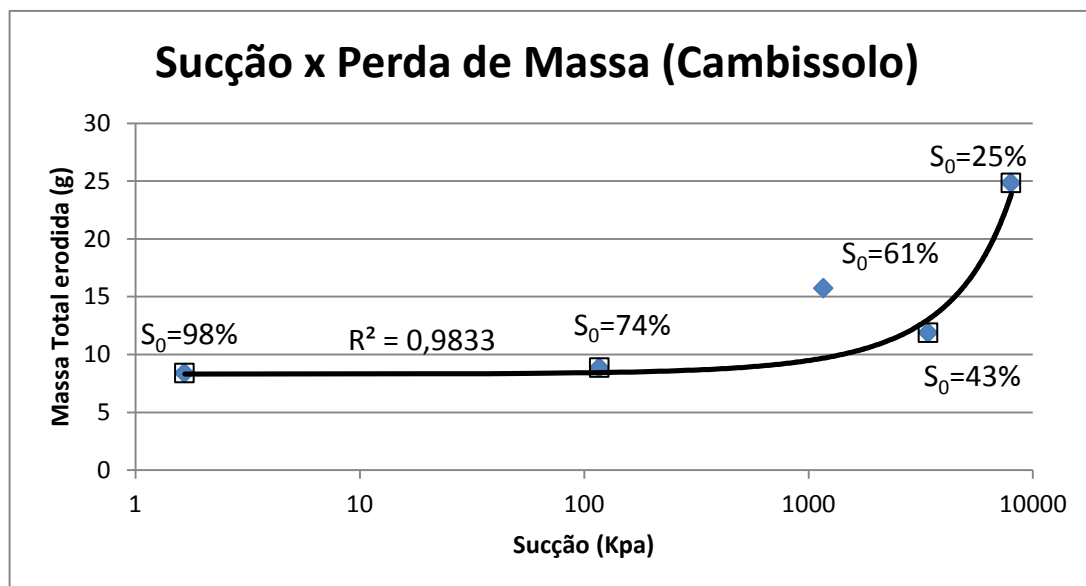


Figura 4.18 – Massa total erodida acumulada, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Latossolo



A fim de verificar a influência da sucção na perda de massa total erodida, foi plotado o gráfico de Sucção inicial x Massa Total Erodida (Figura 4.19). Dessa forma, observa-se mais nitidamente a descontinuidade do resultado esperado para o CI-2, que deveria apresentar maior erodibilidade laminar do que o CI-3. Adicionado uma linha de tendência, obteve-se uma correlação exponencial de $R^2 = 0,76$, contudo se considerarmos que o resultado do CI-3 possa estar fora dos padrões, o valor da correlação exponencial aumenta para $R^2 = 0,98$.

Figura 4.19 – Gráfico da sucção x massa total erodida no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Cambissolo



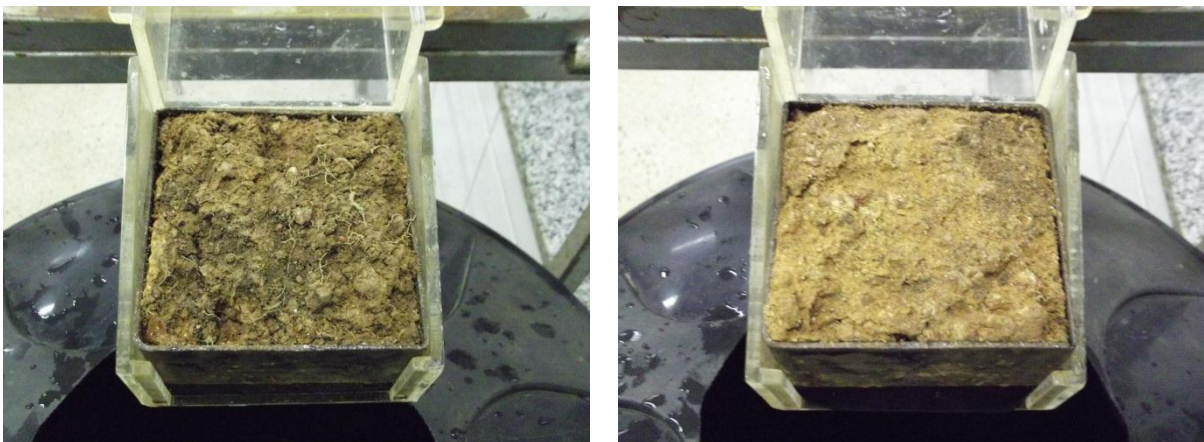
Com a finalidade de entender o motivo pelo qual ocorreu menor perda de massa no CI-2 do que do CI-3, moldou-se no bloco indeformado um corpo de prova extra e repetiu o ensaio para a umidade inicial referente ao CI-2 ($S_0 = 43\%$). Contudo os resultados apresentados foram semelhantes ao anterior. Para justificar o ocorrido, presume-se que o CI-3 possa ter perdido mais solo do o esperado devido à heterogeneidade do material, por sua própria característica no perfil, apresentando ainda parte da estrutura da rocha de origem, pelo atual estágio de intemperismo, conforme é ilustrado na Figura 4.20.

Quanto ao comportamento dos CPs CI-4 e CI-5, de erodirem praticamente a mesma quantidade de material, entende-se que ambos apresentam baixas sucções iniciais, não influenciando muito na perda de solo.

A Figura 4.21, representa a Massa Total Erodida Acumulada em função do tempo para as amostras de Latossolo. Neste caso, o CP LI-2, com grau de saturação inicial de 24%, foi o que apresentou maior perda de massa (33,02 g). Em seguida vieram os CPs LI-3 (19,25 g), LI-5 (15,86 g), LI-1 (13,85 g) e LI-4 (7,30 g).

Analogamente ao ocorrido na amostra de Cambissolo, pôde-se notar, com exceção dos CPs LI-1 e LI-5, que quanto menor o grau de saturação inicial, maior tende a ser a perda de solo por erosão laminar.

Figura 4.20 – Diferença entre os amostradores de Inderbitzen da amostra de Cambissolo: (a) CI-2 demonstrando ser um material mais granular; (b) CI-3 demonstrando ser um material mais maciço



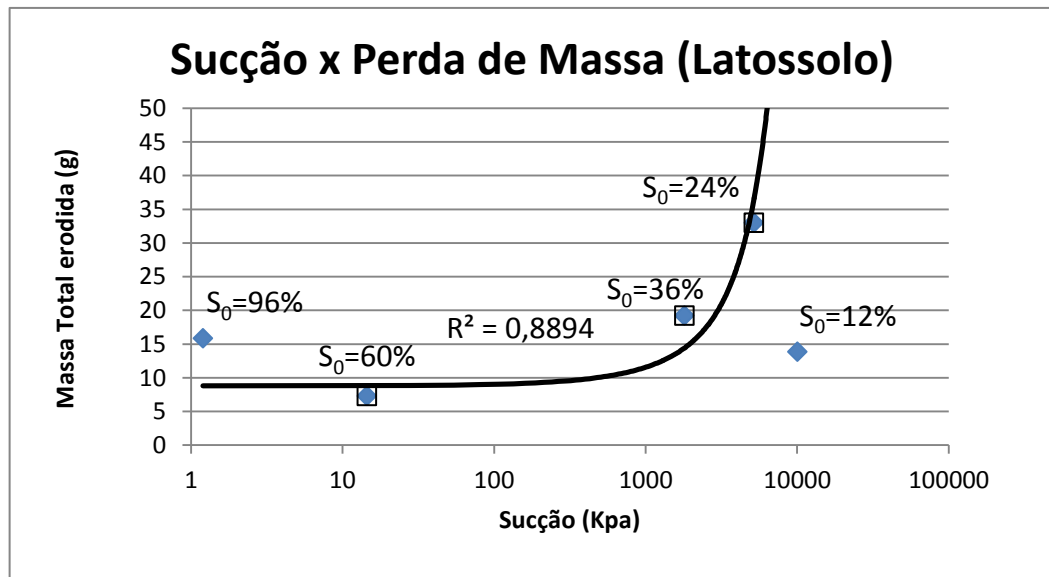
Quanto ao CP LI-1, o qual não apresentou grandes perdas de massa conforme era esperado, pode ser justificado pelo fato de que o valor de sucção corresponde a um valor inferior a entrada de ar nos microporos. Neste caso, a sucção ocorre devido ao fenômeno de adsorção e, portanto, não há meniscos capilares atuando nas interfaces interagregados. Dessa forma, a saturação do solo não está rompendo meniscos e provocando a redução da sucção. Segundo Bastos, Gehling e Bica (1998¹³ *apud* BASTOS; MILITITSKY; GEHLING, 2000), os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior perda de coesão com o umedecimento e inundação, pois são mais vulneráveis ao destacamento de partículas por cisalhamento hidráulico. Dessa forma, como neste caso a saturação do solo não consegue diminuir a coesão, a erodibilidade torna-se menor.

Conforme ocorrido na amostra de Cambissolo para os dois CPs mais úmidos CPs (CI-4 e CI-5), esperava-se que os CPs LI-4 e LI-5 erodissem quantidades semelhantes de material devido à pequena diferença de variação de sucção inicial entre ambos. Logo, moldou-se, no bloco indeformado, um CP extra e ensaiou-o conforme parâmetros iniciais do LI-5, apresentando resultados semelhantes. Contudo, a grande perda de massa do CP LI-5 pode ser explicada pelo fato de que a amostra sofreu exsudação (excesso de água) durante o processo de umedecimento (em ambos os LIs-5), ou seja, as moléculas de água reduziram as tensões entre as partículas sólidas. Pode-se notar que este CP foi o que apresentou maior perda no primeiro minuto (efeito inércia) e no restante do tempo apresentou perdas mínimas, semelhante ao comportamento do CP LI-4, o qual mais se aproximou da estabilidade de perdas durante todo o ensaio (menor inclinação da reta). Como a diferença de sucção do CP LI-4 para o LI-5 é mínima, pode-se inferir comportamentos semelhantes quanto ao processo erosivo laminar.

A Figura 4.18 apresenta o gráfico de Sucção inicial x Massa Total Erodida para a amostra de Latossolo. Os amostradores LI-2, LI-3 e LI-4 seguem uma tendência, com correlação exponencial de $R^2 = 0,89$. O amostrador LI-5 deveria tender ao mesmo comportamento, contudo o processo de exsudação acabou por alterar a lógica. Já o amostrador LI-1 tende a apresentar comportamento distinto, pois se encontra no nível microestrutural.

Um fato relevante ocorrido foi que, em termos gerais, os CPs da amostra de Latossolo tiveram maior perda de massa por erosão laminar do que os da amostra de Cambissolo, enquanto que o esperado seria que ocorresse o inverso, visto que o Latossolo apresenta maior fração argilosa, teoricamente mais resistente aos processos erosivos, devido principalmente à coesão.

Figura 4.21 – Gráfico da sucção x massa total erodida no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Latossolo

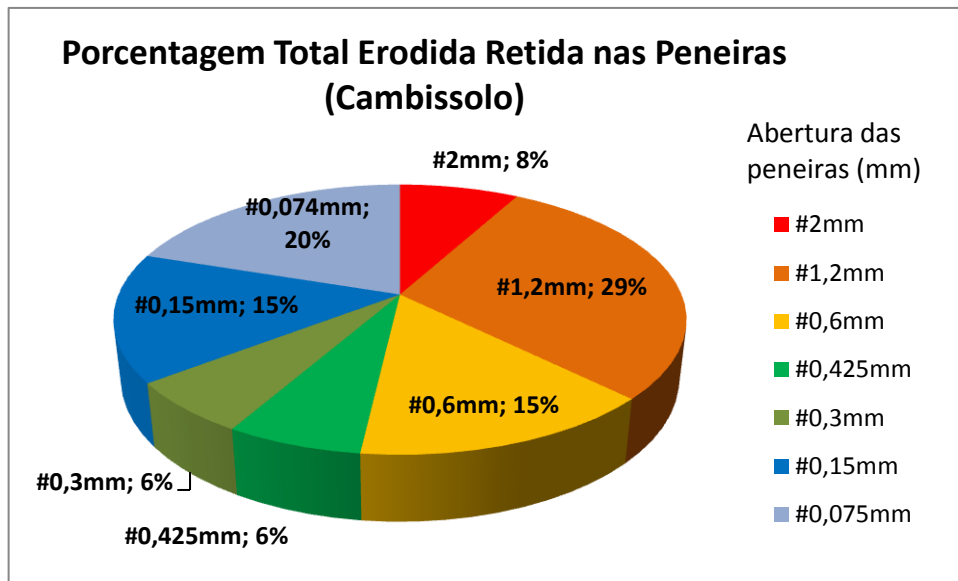


Este comportamento pode ser explicado com o auxílio das Figuras 4.22 e 4.23. A Figura 4.22 representa a porcentagem do total de material erodido dos CPs de Cambissolo, lavado na peneira de abertura de 0,074 mm, e posteriormente submetido ao peneiramento nas peneiras de abertura igual a: 4,8 mm; 2,0 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,425 mm; 0,3 mm; 0,15 mm; e 0,074 mm. Analogamente, a Figura 4.20 representa o mesmo procedimento para os CPs de Latossolo.

Dessa forma, analisando a porcentagem e o tamanho das partículas carregadas (Figuras 4.22 e 4.23) foi possível observar que a vazão utilizada nos ensaios (50 ml/s) apenas foi capaz de carrear partículas com diâmetro máximo menor que 4,8 mm.

Analisando as porcentagens retidas em cada peneira, pode-se explicar um dos motivos da amostra de Latossolo erodir mais do que a de Cambissolo. Devido à homogeneidade do Latossolo, tem-se que 67% do material erodido dessa amostra correspondem às peneiras de menor abertura (0,074mm; 0,15mm; e 0,3mm). Já a amostra de Cambissolo, bastante heterogênea, não apresentou predominância na perda de massa entre partículas maiores e menores. Houve um relativo equilíbrio entre a fração retida nas peneiras mais finas e nas maiores.

Figura 4.22 – Porcentagem total de solo erodido retido no peneiramento dos CPs de Cambissolo



A desproporcionalidade entre a porcentagem erodida e a curva granulométrica pode ser perceptível na Figura 4.16, a qual compara a porcentagem retida acumulada nas peneiras entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica. Nota-se que, para partículas inferiores a 0,6 mm, a porcentagem de tamanhos de partículas carregadas pelo escoamento superficial é similar às porcentagens da curva granulométrica deste material. Por outro lado, quando as partículas são superiores a 0,6 mm, as partículas são carregadas em proporção menores que suas porcentagens na curva granulométrica, conforme comentado anteriormente. Possivelmente, com o aumento da vazão, haverá correlação entre as proporções das partículas carregadas e da curva granulométrica.

Neste caminho, a Figura 4.24a apresenta imagem pós-ensaio do CP CAMB.01, onde é possível visualizar partículas de diâmetros maiores “soltas”, porém que não foram carregadas. Supõe-se que, com o aumento da vazão, estes materiais soltos seriam naturalmente transportados.

Comparando-se a porcentagem retida acumulada nas peneiras, entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica com defloculante, dos CP de Latossolo (Figura 4.15), nota-se claramente a homogeneidade do material. As curvas são praticamente coincidentes, entre o material erodido no ensaio e a curva granulométrica. A Figura 4.24b apresenta a imagem pós-ensaio do CP LI-1, onde é possível visualizar uma amostra mais homogênea quanto ao tamanho dos diâmetros das partículas.

Figura 4.23 – Porcentagem total de solo erodido retido no peneiramento dos CPs de Latossolo

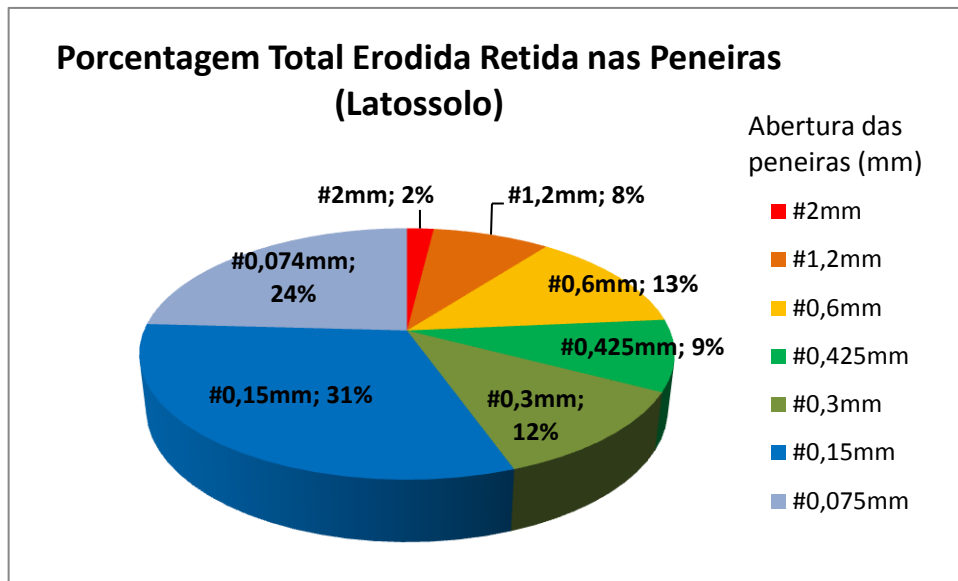
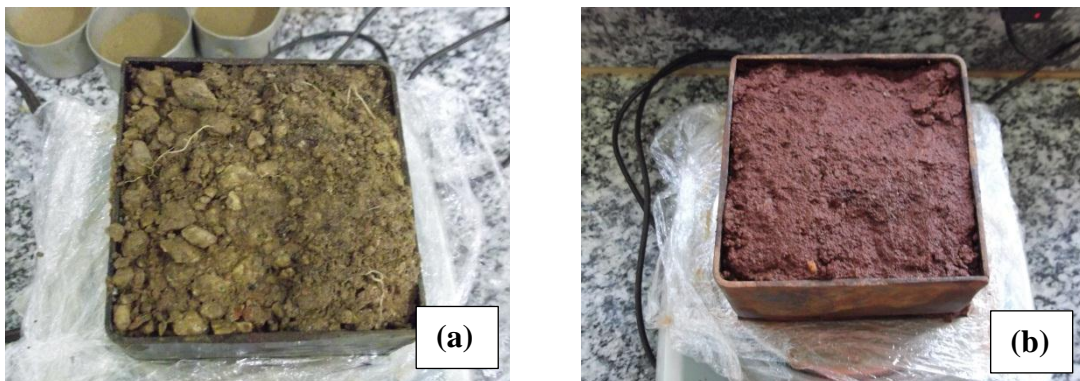


Figura 4.24 - Imagem pós-ensaio: (a) CP CAMB.01, onde é possível visualizar partículas de diâmetros maiores “soltas”, porém não carregadas pela lamina d’água; (b) CP LATO.01, onde é possível visualizar uma amostra mais homogênea quanto ao tamanho dos diâmetros das partículas

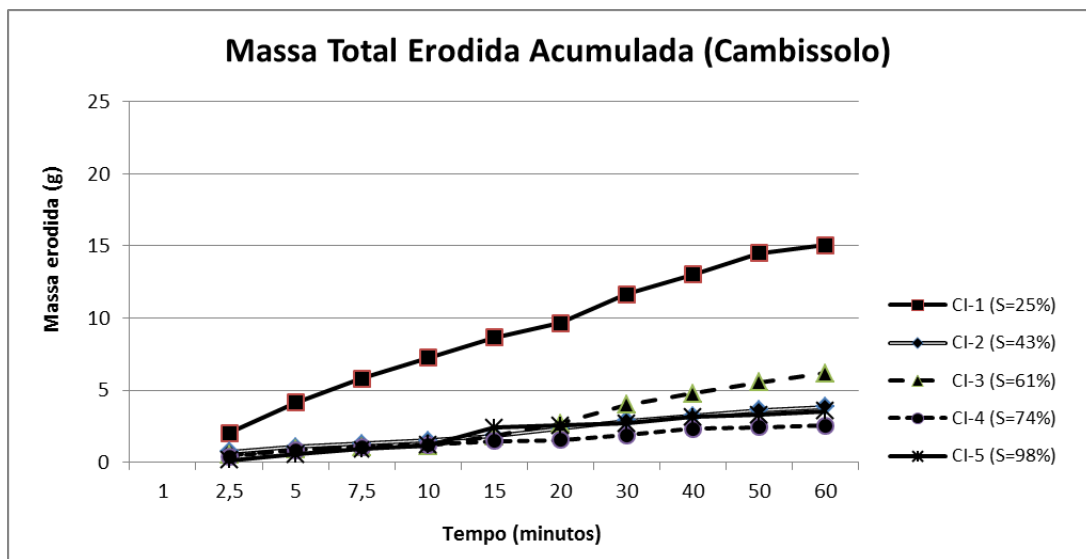


Foi realizada também uma segunda análise dos resultados obtidos no ensaio de Inderbitzen, porém agora desprezando o efeito inércia, ou seja, o primeiro contato da lamina de água com a amostra de solo. Nos gráficos que se seguem foram excluídos os valores erodidos no 1º minuto de ensaio.

Para a amostra de Cambissolo (Figuras 4.25 e 4.26), pode-se observar um comportamento mais próximo do que se esperava, ou seja, a amostra CI-3 (S=61%) aproximou-se mais da linha de tendência, mas ainda assim apresentou perda de massa superior a amostra CI-2 (S=43%), conforme ilustra a Figura 4.26. Nota-se que o valor de R^2 , agora com todos os pontos sendo analisados, foi para $R^2 = 0,75$, resultado este razoavelmente satisfatório.

Já a amostra de Latossolo (Figuras 4.27 e 4.28), ainda excluindo o CP LI-1 (S = 12%), apresentou redução na correlação exponencial, agora com valor de $R^2 = 0,78$. Contudo a amostra LI-5 (S = 96%) mostrou-se mais congruente com o que se esperava, ou seja, apresentou perda de massa semelhante ao do CP LI-4 (S = 60%), visto que ambas as amostras apresentavam sucções iniciais baixas.

Figura 4.25 – Massa total erodida acumulada desprezando o primeiro minuto, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Cambissolo.



Ao final do ensaio mensurou-se a umidade final, coletando amostras do topo, meio e base do CP, para conseqüentemente obter o grau de saturação final de cada CP. Na amostra de Cambissolo, com exceção do CI-2, todos os CPs atingiram, teoricamente, a saturação completa ($S_r > 100$ devido a imprecisão do índice de vazios, ou mesmo, por uma possível expansão estrutural). Já na amostra de Latossolo, nenhum CP atingiu a saturação completa, possivelmente devido à dificuldade da água penetrar nos vazios intra-agregados, o que é coerente com o pequeno valor de perda de massa na amostra com menor teor de umidade.

Quanto ao fator da umidade final no topo, meio e base dos CPs, pôde-se verificar que em geral ocorreram pequenas variações de umidade ao longo do CP. As amostras de Latossolo mostraram-se mais homogêneas quanto ao teor de umidade ao longo do CP, obtendo um desvio padrão das médias igual a 1,45 de variação no teor de umidade entre os CPs. Já a amostra de Cambissolo apresentou um desvio padrão de 4,16 de variação no teor de umidade, conforme é apresentado na Tabela 4.6.

Figura 4.26 – Gráfico da sucção x massa total erodida, desprezando o primeiro minuto, no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Cambissolo.

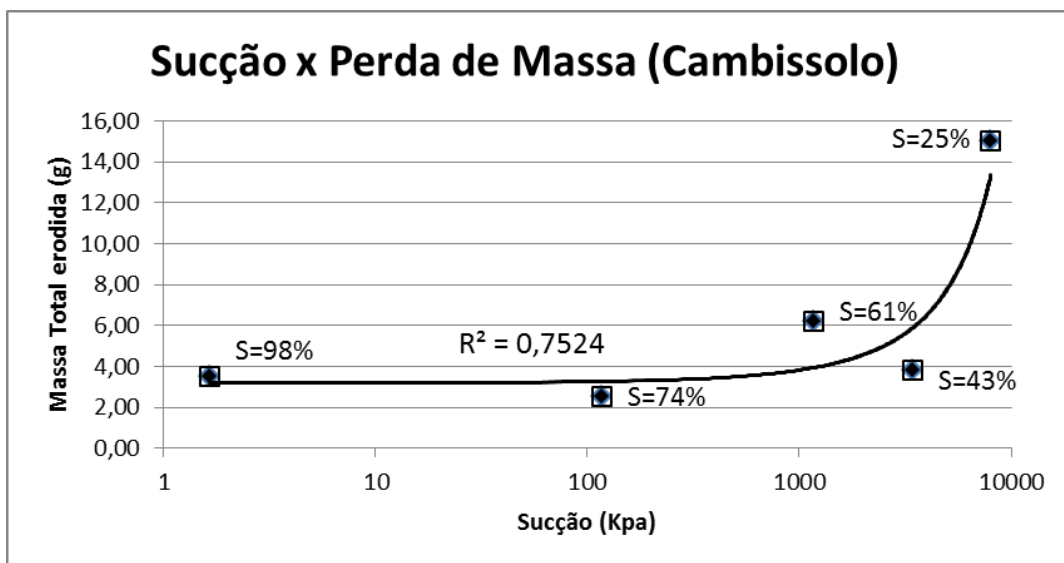


Figura 4.27 – Massa total erodida acumulada desprezando o primeiro minuto, obtida no ensaio de Inderbitzen, da amostra de Latossolo.

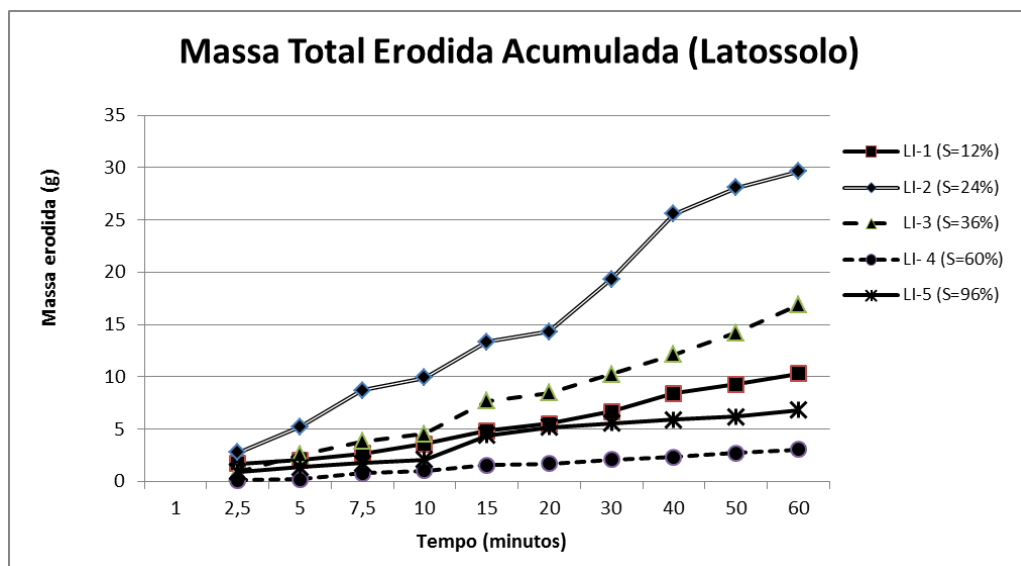


Figura 4.28 – Gráfico da sucção x massa total erodida, desprezando o primeiro minuto, no ensaio de Inderbitzen para a amostra de Latossolo.

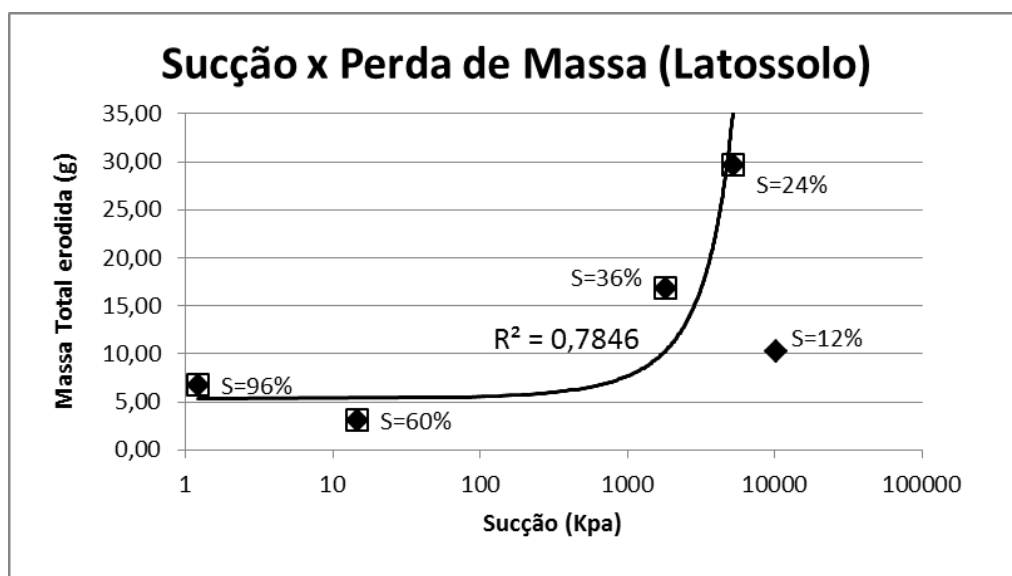


Tabela 4.6 – Variação dos teores de umidade ao longo dos CPs (topo, meio e base).

Amostra	CP	Teor de Umidade (%)			Média do CP (%)	Média dos CPs (%)	Desvio Padrão
		Topo	Meio	Base			
Cambissolo	CI-1	20,61	16,49	19,29	18,80	19,61	4,16
	CI-2	14,91	14,62	15,68	15,07		
	CI-3	15,37	18,93	19,57	17,96		
	CI-4	15,14	17,51	23,59	18,75		
	CI-5	29,38	29,37	23,65	27,47		
Latossolo	LI-1	37,66	38,61	40,09	38,78	39,09	1,45
	LI-2	37,74	35,82	37,13	36,90		
	LI-3	43,36	36,18	38,20	39,25		
	LI-4	38,83	38,41	39,95	39,07		
	LI-5	38,30	43,18	42,88	41,45		

4.4.3 Ensaio de Desagregação

Assim como no ensaio de Inderbitzen, o ensaio de Desagregação foi realizado com 05 (cinco) CPs de cada solo, em 05 (cinco) teores de umidade e saturação distintos, semelhantes aos teores de umidade e saturação iniciais adotados no ensaio de Inderbitzen, conforme apresentado anteriormente na Tabela 4.5.

4.4.3.1 Desagregação por imersão total

A Figura 4.29 apresenta os procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total, nos 05 (cinco) CPs da amostra de Cambissolo. Seguindo a metodologia de classificação de Holmgren e Flanagan (1977 *apud* SANTOS, 1997), o CP CT-1 ($S_0=25\%$) apresentou abatimento antes mesmo da total submersão, conforme pode ser visualizado na Figura 4.29b.

Ao término de um período de 24 h de submersão (Figura 4.29c), o CT-2 ($S_0=43\%$) apresentou desprendimento de solo das laterais (de pouco a médio), rachadura no meio da amostra (Figura 4.30a) e uma pequena quantidade de espuma na superfície da água, provavelmente devido à presença de bolhas de ar. Sendo assim, o CT-2 parece ter sofrido pequena influência dos fenômenos de abatimento e fraturamento.

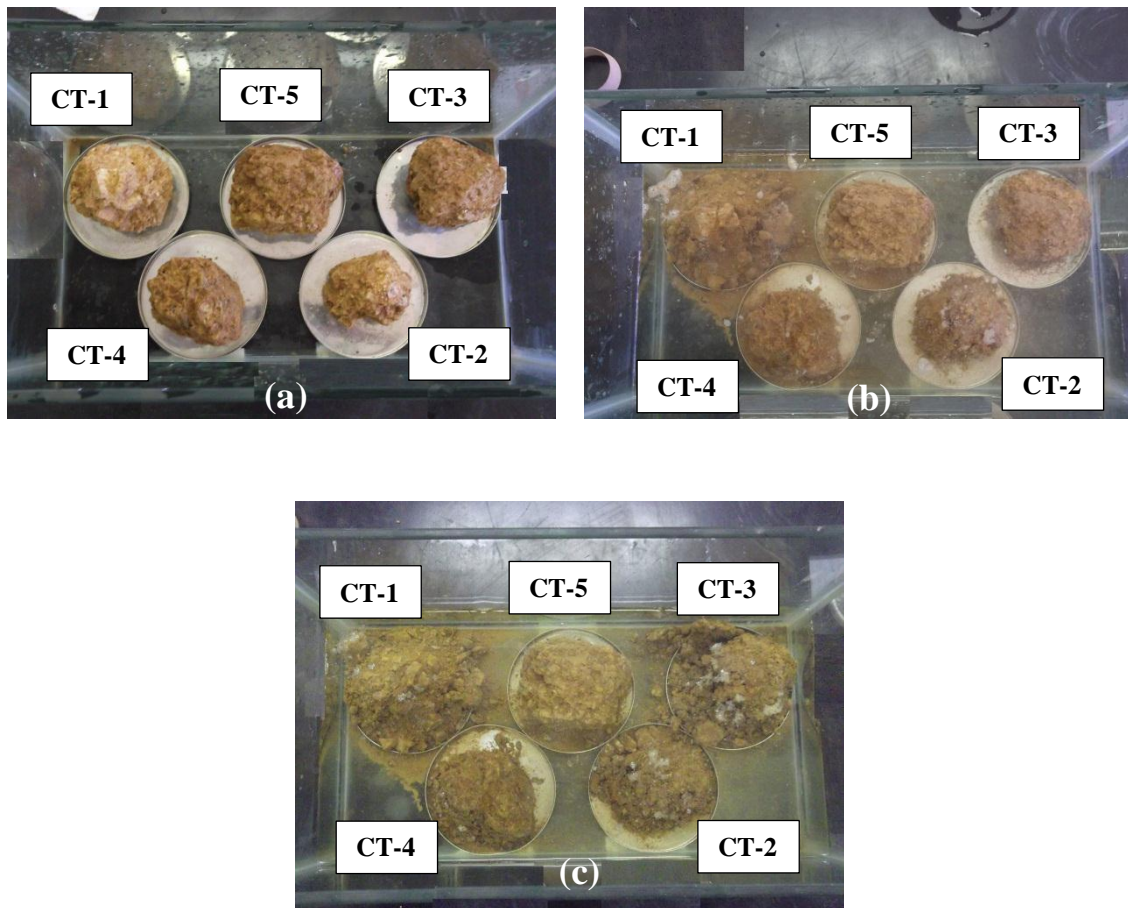
O CT-3 ($S_0=61\%$) apresentou um desprendimento em bloco em uma das faces (Figura 4.30b), desintegração das paredes variando entre pouco a média e o surgimento de uma pequena quantidade de bolhas de ar. Pôde-se notar a influência do fenômeno de fraturamento e início de um processo de abatimento.

Já os CPs CT-4 ($S_0=74\%$) e CT-5 ($S_0=98\%$) apresentaram perda mínima de solo, ficando praticamente intactos, mantendo suas formas e tamanhos originais, podendo ser classificados como “sem resposta”.

Os fenômenos atuantes nos CPs CT-1, CT-2 e CT-3 resumem-se aos fenômenos de geração de pressões positivas no interior das amostras, visto que as amostras apresentavam boa parte dos vazios ocupados por ar. Ao serem submersas rapidamente, os vazios continuaram ocupados por ar, porém agora oclusos. Teoricamente, a pressão exercida pela água externa reduz o volume dos CPs, aumentando as poropressões positivas e conseqüentemente

desestruturando os CPs, pois quanto maior a quantidade de ar ocluso, maior é a tendência da amostra à ruptura.

Figura 4.29 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Cambissolo; (a) CPs pré-ensaio; (b) CPs submergidos; (c) término do ensaio após 24h

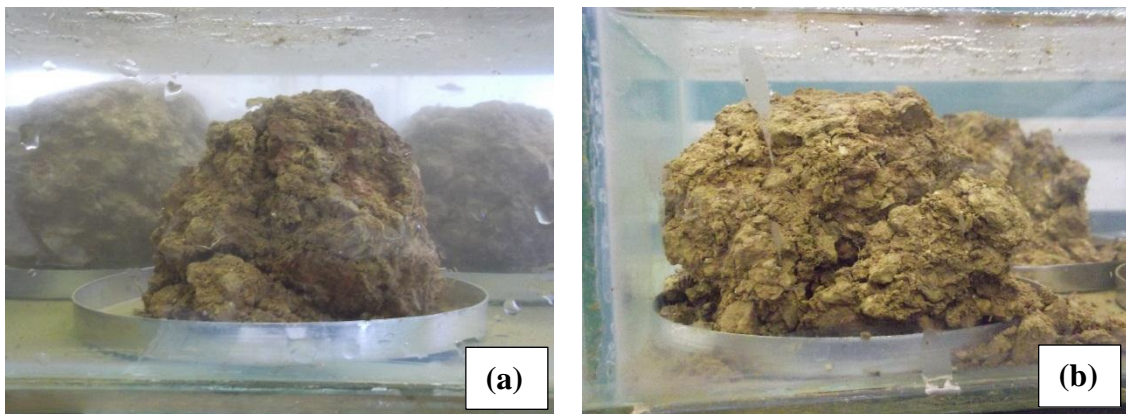


Quanto aos CPs CT-4 e CT-5, a quantidade de ar ocluso pareceu ser bastante reduzida, fazendo com que as tensões exercidas pela poropressão positiva fossem inferiores as tensões de coesão do solo.

O ensaio de desagregação por imersão total dos CPs da amostra de Latossolo pode ser visualizado na Figura 4.31. Os CPs LT-1 ($S_0=12\%$) e LT-2 ($S_0=24\%$) apresentaram rompimento na base (Figura 4.32a) no início do processo de enchimento do tanque, e após decorrido o tempo de 24 h, apresentaram desagregações em forma de grumos e diversas trincas nas arestas, conforme detalhe na Figura 4.32b. Pode-se notar ainda na

Figura 4.31c, o aparecimento de bolhas de ar. Assim como nos CPs mais secos, o LT-3 ($S_0=36\%$) também apresentou trincas na aresta e bolhas de ar na superfície da água. Pelo surgimento de trincas e por haver desprendimento de solo, os CPs LT-1; LT-2 e LT-3 não podem ser classificados como “sem resposta” e nem como abatimento, pois ainda apresentavam boa parte da estrutura coesa.

Figura 4.30 – Detalhes das amostras de Cambissolo: (a) rachadura no meio da amostra CT-2; (b) desprendimento em bloco de uma das faces do CT-3 (fenômeno de fraturamento)



O CP LT-4 foi o que menos sofreu desagregação, e o pouco que desagregou pareceu ter sido correspondente à fração fina. Assim como o LT-4, o LT-5 pode ser classificado como “sem resposta”, apesar do último ter apresentado uma perda ligeiramente maior e homogênea das arestas laterais, mas não o suficiente para o comprometimento de sua forma e tamanho originais.

Assim como nas amostras de Cambissolo, a geração de poropressão positiva foi a principal atuante nos processos de desagregação. Contudo, nas amostras correspondentes ao perfil do Latossolo, as pressões positivas geradas no interior do solo foram, aparentemente, menores que as tensões de coesão para os CPs LT-1, LT-2 e LT-3, pois os mesmos chegaram a apresentar trincas nas arestas, e em alguns casos houve desagregações localizadas. Já nos CPs CT-4 e CT-5 as pressões no interior do solo pareceram ser mínimas.

Figura 4.31 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Latossolo; (a) CPs pré-ensaio; (b) CPs submergidos; (c) término do ensaio após 24h

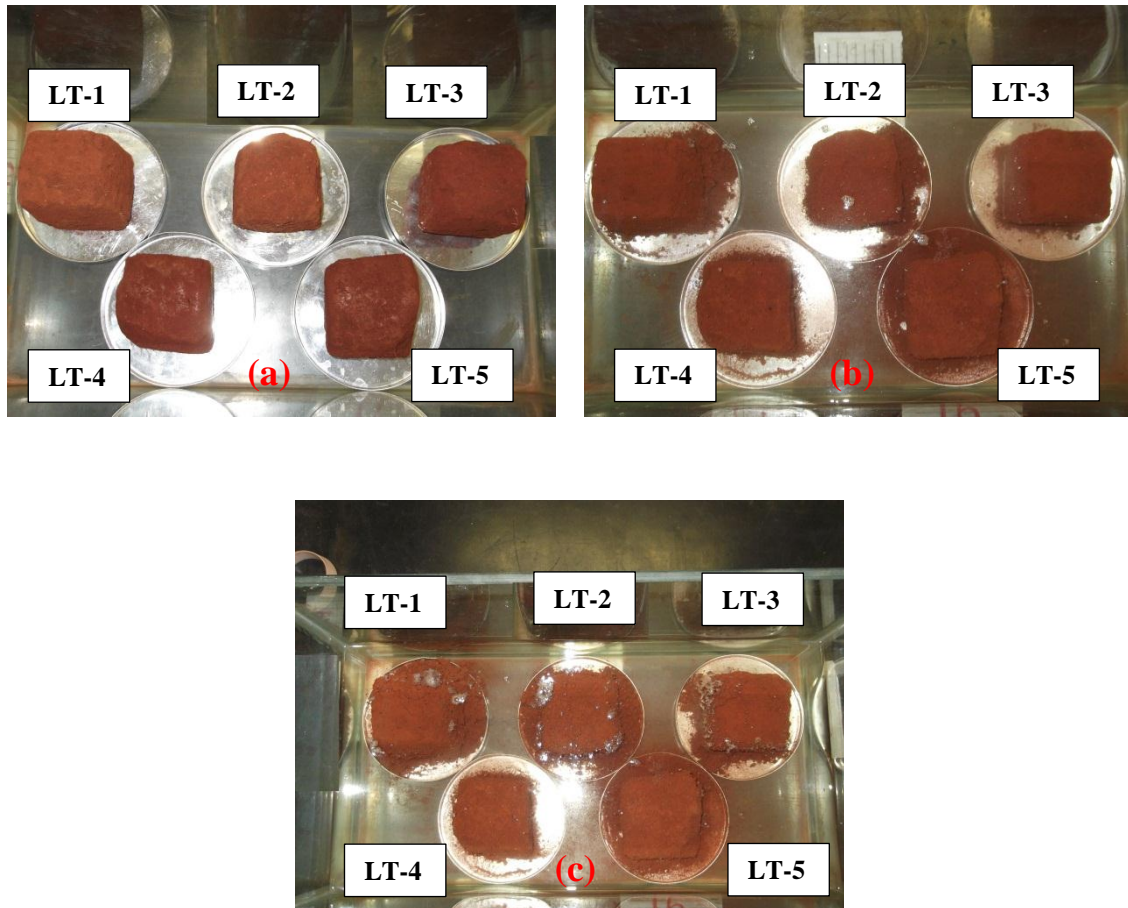
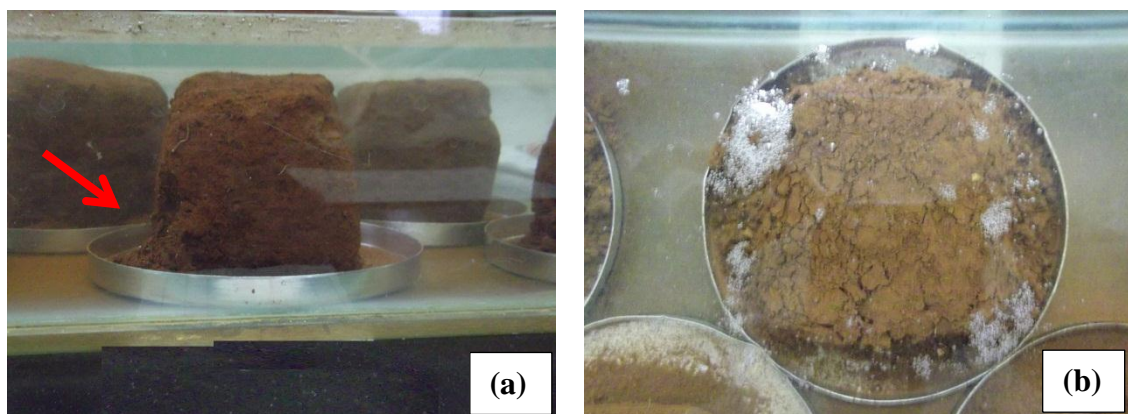


Figura 4.32 – Detalhe das amostras de Latossolo: (a) rompimento da base típica ocorrida nos CPs LT-1 e LT-2; (b) trincas típicas ocorridas nos CPs LT-1, LT-2 e LT-3.



4.4.3.2 Desagregação por imersão parcial

A Figura 4.33 representa os 05 (cinco) estágios do ensaio de desagregação por imersão parcial realizado nas amostras relativas ao perfil do Cambissolo. Durante a etapa de saturação por ascensão capilar da amostra, não houve perdas de massa em nenhum CP, conforme Figura 4.33a.

No segundo e terceiro estágio, em que a lâmina de água se encontra a 1/3 e 2/3 da altura do CP, respectivamente, o CG-1 ($S_0=25\%$) sofreu desagregações na base (Figuras 4.33b e 4.33c). Ao ser submergido totalmente, no CG-1 ocorreram desagregações em boa parte do CP, e ao decorrer das 24h, o CG-1 apresentava-se em estado de abatimento, ou seja, formando uma pilha de material desestruturado. Notou-se também a existência de bolhas de ar na superfície da água sobre esse CP.

Os CPs CG-2 ($S_0=43\%$) e CG-3 ($S_0=61\%$) apresentaram comportamentos semelhantes durante a execução do ensaio. Nas alturas de nível de água igual a 1/3 e 2/3, ambos apresentaram perdas de material variando de mínimas a pequenas (Figuras 4.33b e 4.33c). No início da etapa de submersão (Figura 4.33d), ocorreu um desmoronamento semelhante a um fraturamento no CG-2, porém as faces externas não mantiveram as formas originais (Figura 4.34a). Nessa etapa a perda de massa no CG-3 ainda foi pequena. Após o término do ensaio, ambas as amostras apresentavam características de abatimento, com presença de bolhas de ar na superfície da água.

Os CPs CG-4 ($S_0=74\%$) e CG-5 ($S_0=98\%$) também apresentaram características semelhantes durante as etapas de nível de água à 1/3, 2/3 e início de submersão, ou seja, ambos tiveram perdas mínimas de solo. Ao final do ensaio, o CG-4 encontrava-se íntegro e o CG-5 com uma rachadura (Figura 4.34b), provavelmente um início de processo de fraturamento, contudo ambas as amostras foram classificadas como “sem resposta”, pois conservaram suas formas e tamanhos originais.

Observa-se que no ensaio de desagregação por imersão parcial, desde o início do experimento, as amostras passaram por processos intermediários de saturação, em especial por capilaridade. Tal evento tende a expulsar a fase ar do solo, preenchendo os vazios com água, antes ocupados por ar. Para as amostras correspondentes ao perfil de Cambissolo, foi possível notar comportamentos semelhantes entre os ensaios por imersão total e parcial, pois

ambos apresentaram características de abatimento nas três amostras de menor grau de saturação inicial (25; 43; e 61)% e sem resposta para as duas amostras mais úmidas, ou seja, com teores de saturações iniciais elevados (74 e 98)%. Pode-se inferir que não ocorreu completamente o processo de saturação no ensaio por imersão parcial, devido provavelmente ao tempo entre as etapas serem insuficientes e/ou os vazios das amostras não se encontrarem bem interligados, devido à heterogeneidade da amostra, gerando assim poropressão, provavelmente devido à presença de ar ocluso.

A Figura 4.35 apresenta o ensaio de desagregação por imersão parcial das amostras de Latossolo. Conforme pode ser observado, todas as amostras podem ser classificadas como “sem resposta”, pois desde o início até o final do ensaio, os CPs se mostraram praticamente intactos. Contudo, vale ressaltar que o CP LG-5 apresentou sinais de trincas no topo, conforme Figura 4.36.

Assim como no ensaio de desagregação por inundação total, os resultados obtidos pela imersão parcial nas amostras de Latossolo foram semelhantes. Ao contrário do ocorrido nas amostras de Cambissolo (onde supostamente o tempo de saturação por capilaridade foi insuficiente e/ou os vazios de ar apresentaram-se mal conectados), as amostras de Latossolo parecem possuir seus vazios comunicantes entre si, pois não foram constatadas perdas e/ou sinais consideráveis devido à influência da poropressão positiva.

Ao serem analisados os ensaios de desagregação realizados nas respectivas amostras retiradas nos dois tipos de solo, foi possível se observar que em algumas amostras relativas ao Cambissolo ocorreram indícios do fenômeno de fraturamento, enquanto que nas amostras de Latossolo não foram constatados tais eventos.

Por fim, vale ressaltar que em ambos os ensaios realizados nas amostras dos dois tipos de solo, os CPs correspondentes ao segundo ponto mais úmido apresentaram-se, ao final dos ensaios, mais estáveis. As amostras mais úmidas também apresentaram comportamentos satisfatórios, porém apresentando perdas suavemente superiores, e geralmente apresentando trincas. Provavelmente, a fase de ar presente nesses CP, apesar de parecer mínima, foi relativamente maior nos CP de índices 4, atuando como sucção e dando maior agregação às partículas do solo. Nacinovic, Mahler e Avelar (2012) afirmam que “a sucção atua atraindo as

partículas do solo e reduzindo a ação da erosão. A resistência do solo pode variar sazonalmente, em função das variações de umidade e da sucção matricial.”

Figura 4.33 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial nas amostras de Cambissolo: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras até umedecimento por ascensão capilar; (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras por 15 min.; (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras; (d) submersão total das amostras; (e) final do ensaio após 24h

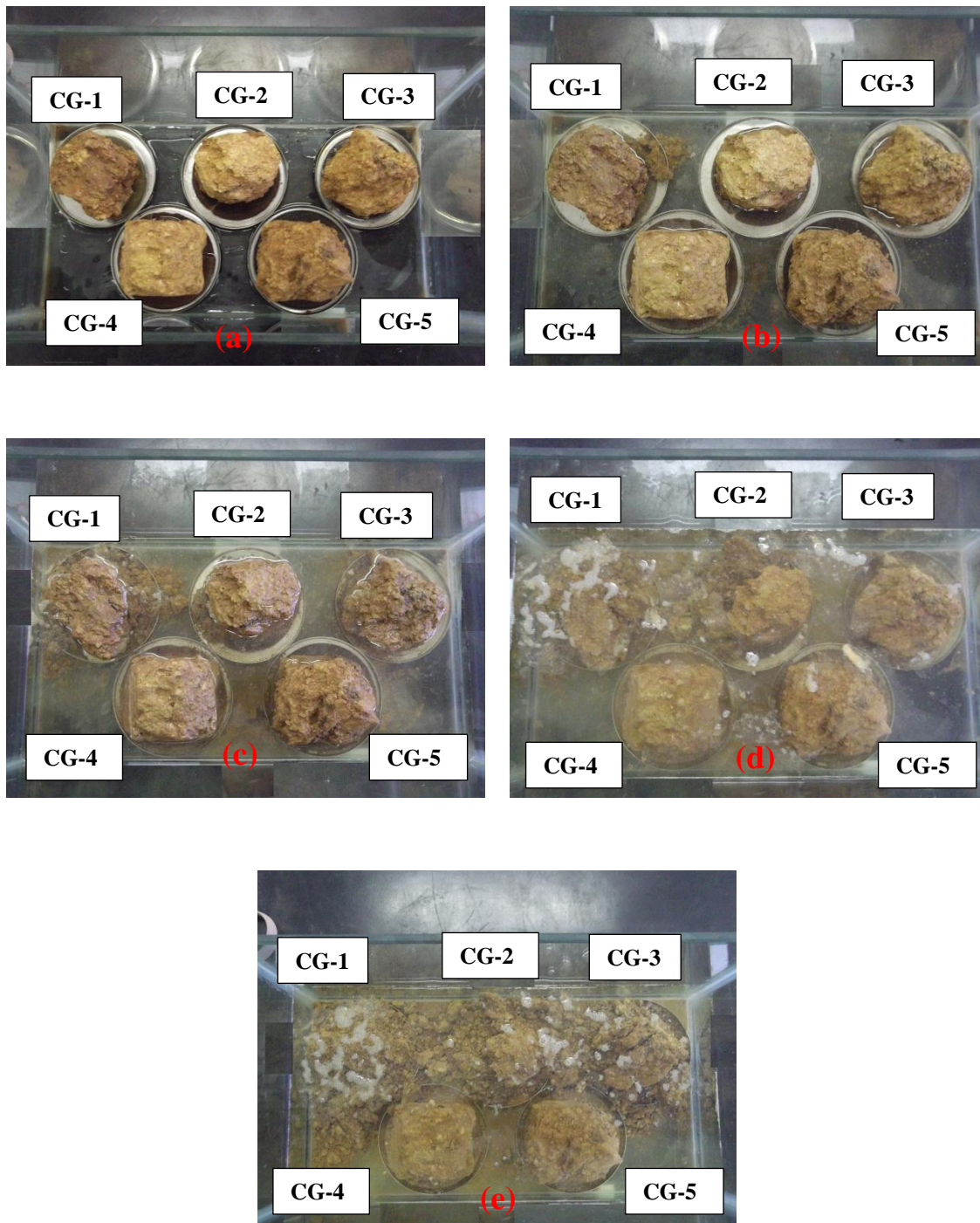


Figura 4.34 – Detalhes ocorridos no ensaio de desagregação parcial nos CPs da amostra de Cambissolo (a) desmoronamento semelhante a um processo de fraturamento, no CG-2, porém as faces externas não mantiveram as formas originais; (b) rachadura na amostra CG-5, provável início de processo de fraturamento

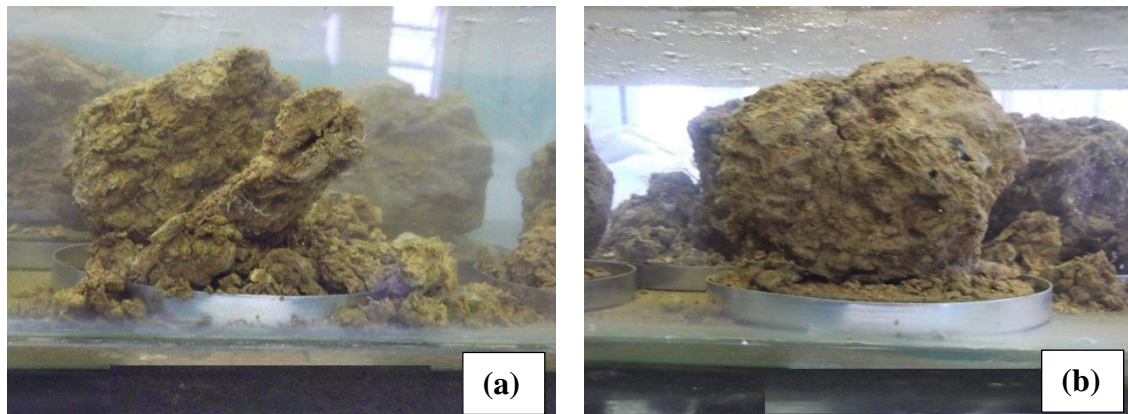
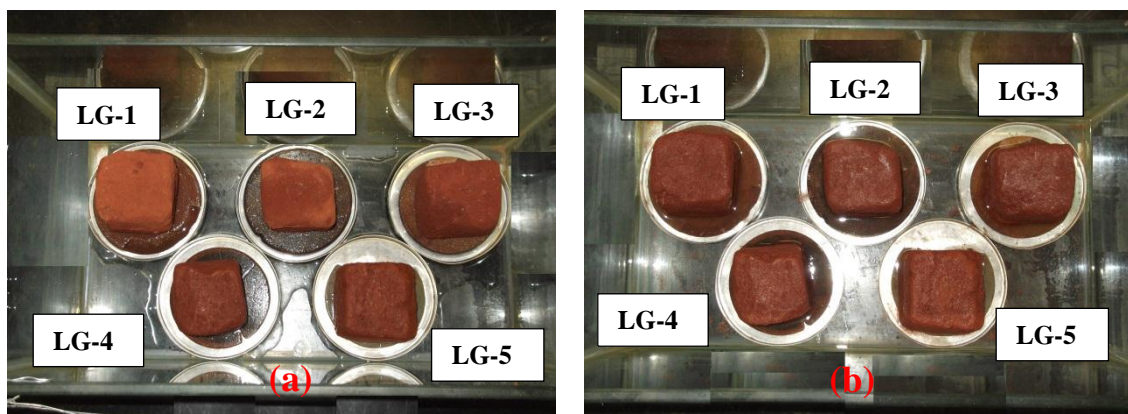


Figura 4.35 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial nas amostras de Lambissolo: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras por 30 min.; (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras por 15 min.; (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras; (d) submersão total das amostras; (e) final do ensaio após 24h



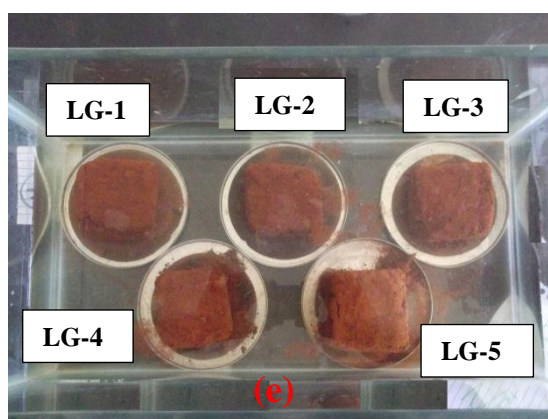
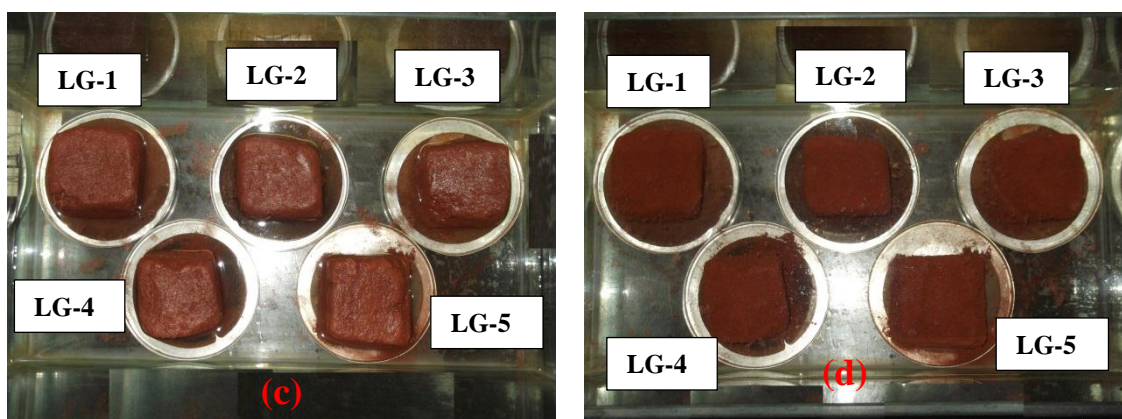


Figura 4.36 – Trincas ocorridas no topo do CP LG-5



A Tabela 4.7 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas amostras de Cambissolo e Latossolo nos ensaios de Inderbitzen, Desagregação Total e Desagregação Parcial, para os cinco teores de umidade pré-ensaios.

Tabela 4.7 – Resumo dos resultados obtidos nas amostras de Cambissolo e Latossolo nos ensaios de Inderbitzen, Desagregação Total e Desagregação Parcial, para os cinco graus de saturação pré-ensaios

	Cambissolo					Latossolo				
S_0 (%)	25	43	61	74	98	12	24	36	60	960
CP (Inderbitzen)	CI-1	CI-2	CI-3	CI-4	CI-5	LI-1	LI-2	LI-3	LI-4	LI-5
	+	++	++	+++	+++	++	+	++	+++	++
CP (Desagregação Total)	CT-1	CT-2	CT-3	CT-4	CT-5	LT-1	LT-2	LT-3	LT-4	LT-5
	+	++	++	+++	+++	++	++	++	+++	+++
CP (Desagregação Parcial)	CG-1	CG-2	CG-3	CG-4	CG-5	LG-1	LG-2	LG-3	LG-4	LG-5
	+	+	+	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Legenda: (+++) Amostra estável; (++) Amostra intermediária; (+) Amostra instável										

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Conforme se pôde observar durante esta pesquisa, os estudos sobre processos erosivos são bastante abrangentes, envolvendo desde fatores externos, como o relevo, a pluviosidade e o uso do solo, até fatores intrínsecos do solo, como a mineralogia, a granulometria e o grau de saturação. A erodibilidade, fator de resistência do solo aos processos erosivos, foi o principal tema abordado e ensaiado nesta pesquisa. Ao analisar os resultados dos ensaios realizados para as amostras de Cambissolo (areia argilo-siltosa) e Latossolo (silte de baixa compressibilidade) puderam-se notar algumas semelhanças e diferenças quanto à erodibilidade de cada amostra.

Dentre as semelhanças observadas entre as amostras, pôde-se observar uma relativa porcentagem elevada de finos e agregações presentes nas amostras, sendo que a amostra de Latossolo apresentou Teor de Agregação (TA) igual a 100% e a amostra de Cambissolo, TA = 49,2%. Tal fato era esperado na amostra de Latossolo, mas não na de Cambissolo, pois, geralmente, são solos jovens, com baixos teores de agregados. Porém, o ensaio de pastilha demonstrou que esta amostra de Cambissolo é relativamente bem intemperizada, enquadrando-se como em transição entre um solo arenoso laterítico e argiloso laterítico (LA` - LG`). Já a amostra de Latossolo foi classificada como um solo argiloso laterítico.

A atividade das argilas e constituição mineralógica principal das amostras também apresentaram semelhanças quando correlacionadas no ensaio de adsorção de azul de metileno e a partir dos dados de caracterização, pois ambas as amostras foram classificadas como inativas, possuindo a caulinita como principal argilomineral.

Sendo assim, foi realizado o ensaio de difratometria por raios-X, confirmando que o Cambissolo se encontra em processo de laterização, em estágio intermediário, pois apresenta em sua constituição, minerais em diferentes graus de intemperismo, variando desde a illita (menos estável), passando pela caulinita, e ainda com presença de goethita (óxidos de ferro, mais estáveis). Já na amostra de Latossolo como era esperado, encontraram-se minerais

bastantes intemperizados (caulinita; goethita; e gibbsita), além do quartzo, resistente aos processos de intemperismo e bastante comum nos solos da região.

Ao gerar as curvas características solo-água (CCSAs) observou-se que a amostra de Latossolo possui uma curva de formato bimodal, típica de solos tropicais lateríticos, homogêneo e com alto teor de agregação da fração argilosa, apresentando dois valores de entrada de ar, um na micro e outro na macroestrutura. Por outro lado, a curva do Cambissolo é típica de solos com várias dimensões de poros, devido a não uniformidade da curva granulométrica deste material, possuindo uma redução gradual do teor de umidade com o incremento de sucção, verificado principalmente na parte inicial dessa curva. Vale ressaltar que devido ao alto teor de argila na amostra de Cambissolo, a CCSA da mesma atua em nível microestrutural com teor de umidade abaixo de 3 % ou grau de saturação menor do que 20%.

De posse dos valores de sucção x teor de umidade, selecionaram-se cinco umidades iniciais distintas para realização dos ensaios de erodibilidade. Comparando, em termos gerais, os dois tipos de solo no ensaio de Inderbitzen, pôde-se observar que a amostra de Cambissolo apresentou-se menos erodível laminarmente do que a amostra de Latossolo. Tal fato parece ter ocorrido devido à vazão de ensaio no aparelho de Inderbitzen (50 ml/s) ser baixa para carrear partículas a partir de 0,6 mm de diâmetro, as quais ficaram livres (“soltas”) sobre os CPs da amostra de Inderbitzen. Contudo, para vazões maiores espera-se que a amostra de Latossolo seja mais resistente aos processos erosivos laminares, devido às forças de coesão entre as partículas de argila.

Ao se analisar a erodibilidade laminar com o teor de umidade inicial dos amostradores no aparelho de Inderbitzen, foi possível observar que, em geral, quanto maior era a sucção inicial do solo no CP, maior foi a perda de massa. Na amostra de Cambissolo esta tendência não foi seguida apenas entre o CI-2 e CI-3, no caso o primeiro apresentou menor perda que o segundo. Tal fato pode ser explicado pela heterogeneidade da amostra de Cambissolo, visto que o CI-2 aparentemente demonstrava ser um material mais granular e o CI-3 apresentando ser um material mais maciço.

Na amostra de Latossolo, as exceções ocorreram nos amostradores LI-1 e LI-5. No primeiro caso ocorreram pequenas perdas de massa, enquanto se esperava maior perda para as amostras de Latossolo. Contudo, ao se analisar a umidade inicial do LI-1, nota-se que a sucção

principal atuante neste CP é oriunda dos microporos, apresentando menor perda de coesão com o umedecimento, e conseqüentemente mais resistentes ao cisalhamento hidráulico. Quanto ao LI-5 esperava-se que o mesmo apresentasse a menor perda ou perdas semelhantes ao LI-4, pois a sucção inicial atuante era mínima. Contudo, no processo de umedecimento do LI-5, observou-se exsudação, excesso de água, no CP, e conseqüentemente as ligações cimentíceas das partículas devem ter reduzido consideravelmente, contribuindo para uma perda maior de massa.

No ensaio de desagregação pôde-se notar que a amostra de Latossolo apresentou-se bem estável, tanto no ensaio de desagregação por imersão total, quanto parcial. As poropressões positivas geradas no interior das amostras foram menores do que as forças de coesão existentes no solo, ocorrendo na maioria dos casos perdas variando entre pouca à mínima.

Já as amostras de Cambissolo, apresentaram-se em sua maioria bastante instáveis frente aos processos de umedecimento, principalmente no caso das três amostras mais secas, nas quais as poropressões de ar positivas superaram as forças de coesão, causando o fenômeno de abatimento. Já nas duas amostras mais úmidas o Cambissolo apresentou-se mais estável, sendo classificada como “sem resposta”.

Analisando o fenômeno de dispersão, o qual influencia bastante nos processos erosivos internos, também denominados de *piping*, observou-se na amostra de Latossolo comportamento não dispersivo em ambos os ensaios (*crumb test* e sedimentométrico comparativo). Já o Cambissolo mostrou-se não dispersivo no ensaio de *crumb test* e de média dispersibilidade no sedimentométrico comparativo.

Dentre as sugestões e recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a realização de ensaios de difratometria por raios-x seguindo algumas metodologias específicas para encontrar o argilomineral hematita, pois assim confirmaria ou não, definitivamente, a presença deste mineral.

Recomenda-se também, principalmente no ensaio de Inderbitzen e para amostras heterogêneas, a realização do ensaio com mais de um CP por umidade ensaiada, pois muitas vezes a heterogeneidade pode não refletir bem o comportamento geral, conforme ocorrido no CP CI-3.

O conhecimento das formas dos grãos, das massas específicas dos sólidos de diferentes granulometrias e a massa específica dos grumos do solo laterítico podem auxiliar bastante no entendimento do arraste de partículas durante o ensaio de Inderbitzen, visto que para uma determinada vazão quanto menor for a massa específica, maior será a tendência dessas partículas erodirem.

Ainda com relação ao ensaio no aparelho de Inderbitzen, sugere-se a criação de uma metodologia padrão de execução e análise, pois algumas medidas tomadas na execução do ensaio podem refletir consideravelmente a erodibilidade de cada material, como é o caso da interrupção do fluxo de água, que acarreta na perda de mais solo nas primeiras lâminas do fluxo de água, devido ao efeito de inércia. A retirada do amostrador do aparelho de Inderbitzen também acarreta perdas de massa de solo, às vezes superiores ao próprio fluxo de água. Outro fator interessante a ser recomendado é a respeito da variação da vazão, pois assim será possível analisar mais precisamente a vazão necessária para carrear as partículas de cada diâmetro.

Recomenda-se também a realização de ensaios variando a profundidade no perfil do solo, assim é possível verificar a predominância dos minerais presentes a cada profundidade e também o comportamento do solo frente aos processos erosivos.

Por fim, observa-se que a maior erodibilidade do solo ocorre em amostras secas quando sofrem saturação devido ao escoamento superficial da água ou inundação abrupta. Dessa forma, fazendo um paralelo com a prática, a erodibilidade dos solos aumentaria no início do período chuvoso, devido à ação das chuvas intensas e do baixo grau de saturação do solo. Portanto, o conceito de erodibilidade, tradicionalmente associado às propriedades físicas e mineralógicas do solo, também depende da forma e intensidade do umedimento, que estão relacionadas ao ciclo pluviométrico da região.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181** - Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a. 13 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459** – Solo - determinação do limite de liquidez. São Paulo, 1984b. 6 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508** - Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984c. 8 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180** – Solo - determinação do limite de plasticidade. São Paulo, 1984d. 3 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457** – Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986a. 9 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604** – Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986b. 9 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10838** – Solo – determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro, 1988. 4 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502** – Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13601** – Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*). Rio de Janeiro, 1996a. 2 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13602** – Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, 1996b. 5 p.

ABREU, A. de A. **Dossiê Técnico. Voçorocas:** medidas de prevenção e contenção em áreas rurais. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. 2007.

AGUIAR, de V. G. **Bacia hidrográfica do córrego granada – Aparecida de Goiânia – GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana.** 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil – PPG-GECON, Goiânia, 2009.

ALBERS, A. P.F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X.** 1 ed. São Paulo: Editora Cerâmica, 2002 . v.48. n. 305.

ALMEIDA, J. G. R.; ROCHA, M. F.; GITIRANA JR., G. de F. N. A influência da sucção na erodibilidade de um solo compactado: estudo de caso em um solo erosivo do Córrego Barreiro. *In:* 3º SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA

REGIÃO CENTRO-OESTE E 6º SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS – GEOCENTRO, 2013, Cuiabá - MT, 2013.

ARAÚJO, R. da C. de. Avaliação da adequabilidade dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração como indicativos da erodibilidade de solos: estudo de caso com solos da formação Macacu, Rio de Janeiro. *In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG / V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS – GEOJOVEM*, ABMS: Porto de Galinhas – PE, 2012. Documento eletrônico em CR-ROM.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 7, n. 1. p. 9-18, 2006.

BACELLAR, L. de A.P. **Processos de formação de voçorocas e medidas preventivas e corretivas**. II SIMEA. Viçosa. 2006. Disponível em:

<http://www.ufv.br/dec/simea/apresentacoes/Luiz%20Prado_apresentacao.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2011.

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y.; MILITITSKY, J. **A relação entre a erodibilidade e propriedades geomecânicas de solos residuais não saturados**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências. *In: TEORIA E PRÁTICA NA ENGENHARIA CIVIL*, nº. 1. Porto Alegre, 2000. p.17-25.

BASTOS, C. A. B.; J.; GEHLING, W.; MILITITSKY, J. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. *In: Teoria E PRÁTICA NA ENGENHARIA CIVIL*, ISSN 1677-3047, n.º 2. 2001a.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Proposta metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados. *In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO*. Goiânia, 2001b.

BASTOS, C. U. B. **Mecânica dos Solos: notas de aula**. Universidade do Rio Grande, Escola de Engenharia – FURG, Rio Grande, 2007. Disponível em: <<ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20FURG%20Solos/>>. Acessado em: 10/04/2013.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS dos, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 1ª ed. Florianópolis: UFSC, 1994. v.1.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. Os solos: natureza e propriedades, características pedológicas, classificação e ambientes geográficos. *In: Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais: intemperismo biológico, pedogênese, laterização, bauxitização e concentração de bens minerais*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996. v. 2. p.: 453-530.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MORTARI, D.; ARAKI, M. S.; PALMEIRA, E. M. **Aspectos relativos à colapsividade da argila porosa de Brasília, Distrito Federal**. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, 1994.

- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEROUEIL, S. Modelo de normalização da curva característica. *In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*. Brasília/DF, 2000. v.1, p.175-183.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LIMA, M. C.; e MORTARI, D. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. *In: 7º SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO*, ABGE. Goiânia – GO, 2001. Documento eletrônico em CR-ROM.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C.; PEREIRA, J. H. F. Courbes de retention d'eau d'un profil d'alteration. *In: Proc. 3TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS*, 3, Recife: A.A. Balkema Publishers, 2002, V. 1, p. 289-294.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MELO, M. T. da S. **A erosão à luz da legislação ambiental**. *In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Org.). Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro*. 1ª ed. Brasília: FINATEC, 2006, v 1, 01-37p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, da N. O.; FRANCISCO, R. A. **Processos erosivos**. *In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Org.). Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. 1ª ed. Brasília: FINATEC, 2006. v 1, 39-88p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. Os solos não saturados no contexto de alguns problemas socioambientais no Brasil. *In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS*. Pirenópolis: Editora Kelps, 2011. 444p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M.; GITIRANA JR., G.de F. N. **Contribuição ao entendimento do comportamento dos solos não saturados**. *In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG / V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS – GEOJOVEM*, ABMS: Porto de Galinhas – PE, 2012. Documento eletrônico em CR-ROM.
- CAMPOS, P. M.; LACERDA, M.P.C.; PAPA, R. de A.; GUIMARÃES, E. M.; COSTA NETO da, S. F. Difractometria de raios-X aplicada na identificação de gibbsita e caulinita em latossolos do Distrito Federal. *In: IX Simpósio Nacional Cerrado e II Simpósio Internacional Savanas Tropicais*. Brasília, 2008.
- CARDOSO, F. B. F. **Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso**. 1995. 142f. Dissertação - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1995.
- CARDOSO, F. B. F. **Caracterização físico-química e estrutural de solos tropicais do Distrito Federal**. 2002, 357 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília, 2002.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.
- COZZOLINO, V. N. M.; NOGAMI, J. S. Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n. 2, p 77-91, 1993.
- DECAGON DEVICES. **WP4C- Dewpoint PotentiaMeter - Operator's Manual**. Version 3. Pullman, 2010.

- DELGADO, A. K. C. Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado. 2002, 200f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília, 2002.
- DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S.A. do Estado de São Paulo. **Diretrizes para identificação expedita do solo laterítico – “Método da Pastilha.”** São Paulo, 2006.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação.** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.
- DURNER, W. **Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure.** Water Resour. Res., 30(2), 1994. p. 211–223.
- FABBRI, G.T.P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno.** Tese de Doutorado, EESC, USP, 1994.
- FÁCIO, J. A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal.** 1991. 122p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, 1991.
- FARIAS, W. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SILVA da, G.F.; CAMPOS, I. C. O.; SANTOS NETO, P. M. Influência da compactação nos micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. *In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS.* Pirenópolis: Editora Kelps, 2011. 444p.
- FORTES, R. M.; ZUPPOLINI NETO, A.; MERIGHI, J. V. Proposta de normalização do método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. *In: 11ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA.* Porto Alegre, 2002.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soil.** John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 1993, 517p.
- GITIRANA JR., G. de F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-water characteristic curve equation with independent properties. *In: JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING.* ASCE, 2004. p. 209-212.
- IBGE. **Manual técnico de pedologia.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Rio de Janeiro, 2ª ed., 2007.
- IBGE. Seplan. **Arquivo vetorial - Shapes das unidades de paisagem do Zoneamento Ecológico-Econômico da Área do Aglomerado Urbano de Goiânia.** 1994. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br>> - Acessado em: 16/março/2012.
- JACINTHO, E. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F. B. da F.; SANTOS, dos R. M. M.; GUIMARÃES, R. C.; LIMA, M. C. G. **Solos tropicais e o processo erosivo.** *In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Org.). Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. 1ª ed. Brasília: FINATEC, 2006. v 1, p 93-147.*
- JESUS, A. S.; GUIMARÃES, E. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LOPES, L. M. **Caracterização física e mineralógica da boçoroca contorno em Anápolis (GO).** *In: 8º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2009, São Paulo. 8º Simpósio Nacional de Controle de Erosão.* São Paulo: 8º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2009. p. 1-12.
- KONIG, U.; POLLMANN, H.; ANGELICA, R. S. **O Refinamento de Rietveld como um método para o controle de qualidade de minérios de ferro.** *Rem: Rev. Esc. Minas* [online]. 2002, vol.55, n.2 [cited 2014-08-26], pp. 111-114 . Available from:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672002000200007&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0370-4467. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672002000200007>.

LAN, T.N. **Lessai au bleu de méthylène** - Avant-projet de Mode Opératoire, Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées, Département de Géotechnique. Section de minéralogie et pétrographie appliquées, 1979,16 p.

LIMA, M. C. **Contribuição ao estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus**. 1999. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 1999.

LIMA, M. C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas**. 2003. 336f. Tese (Doutorado em Geotecnia). – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. *In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES*. Foz do Iguaçu: 1994. v2. 9p, 1994.

MARINHO, F. A. M. Nature of soil–water characteristic curve for plastic soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, V. 131, 2005.

MASCARENHA, M. M. dos A. **Influência da microestrutura no comportamento hidromecânico de uma argila Siltosa não saturada incluindo pequenas deformações**. 2008. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

MEIRELLES, M. C.; DAVISON DIAS, R. Estudo da erodibilidade de solos residuais do complexo granitognáissico – município de Santo Amaro da Imperatriz, SC. *In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS*. São Carlos / SP, 2004. p. 465-470.

MENEZES, de M. B. M.; PEJON, O. J. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. C. C. Curvas características de sucção do solo laterítico da Região de Londrina/PR. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 12, nº 24, p. 63-74, 2006.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**, Wiley, New York, 1976.

MOLINERO JUNIOR, J. A.; BORGES, K. R.; SILVA, da F. A. F.; FRANCO, M. A. M.; MAIA, C. S. Avaliação da erodibilidade de solos da BR-050 (Uberlândia – Uberaba). *In: V SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE*. Brasília: Editora Ipanema, 2011. p399.

MORTARI, D. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Distrito Federal**. 1994. Dissertação (mestrado em Geotecnia)-Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília. 1994.

MOTTA, N. O. **Caracterização geotécnica e dos processos erosivos na cidade de Campo Grande – MS**. 2001. 179 p. Dissertação (mestrado em Geotecnia)-Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília. 2001.

NACINOVIC, M. G. G.; MAHLER, C. F.; AVELAR, A. S. Estudo de erosão mediante caracterização dos solos e curvas características. *In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE*

MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG. Porto de Galinhas/PE, 2012.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 1. ed. São Paulo, 1995. 213 p.

OTÁLVARO C. I. F.; CORDÃO-NETO, M. P. Características de la curva de retención de agua en un suelo tropical compactado. *In*: 2011 PAN-AM CGS GEOTECHNICAL CONFERENCE. Toronto, 2011.

PAIXÃO, M. M. O. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Influência da microestrutura no colapso de um solo de Brasília. *In*: II SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1994, Recife – PE. *Anais: II SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS*. Recife: UFPe, 1994. v.1. p. 105 – 110.

PEJON, O.J. **Mapeamento geotécnico da Folha de Piracicaba - SP (Escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. 1992. 225f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos em São Carlos. v. 2. 1992.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE de, S. B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. 1ª ed. Lavras/MG: Editora UFLA, 2005.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Uso das relações K_i e K_r na estimativa da mineralogia para classificação de latossolos. *In*: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3, 1988.

ROLIM, G. de S.; CAMARGO, M. B. P. de; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. de. **Classificação climática de Koppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agrícolas para o Estado de São Paulo**. Campinas/SP: Bragantia, v. 66, n. 4, p.711-720, 2007.

ROMÃO, P. de A. **Mapeamento geotécnico da região de águas claras (DF): Utilização de recursos de geoprocessamento e de novos métodos de ensaio para caracterização de solos tropicais**. 1995. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 1995.

SALOMÃO, F. X. de T. **Controle e prevenção dos processos erosivos**. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA da, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p 229-267.

SANTOS, dos R. M. M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia**. 1997. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

SANTOS dos, C. A.; SOBREIRA, F. G.; COELHO NETO, A. L. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto – MG. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 55(4), p. 285-290. 2002.

SILVA, R. de C. **Investigação de jazidas de solos tropicais para uso em pavimentação na região metropolitana de Goiânia – GO**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SILVA, M. S.; SANTANA, G. P. Caulinita: estrutura cristalina, técnicas físicas de estudo e adsorção. **Scientia Amazonia**, Amazonas, v. 2, n.3, 54-70, 2013.

SOUSA PINTO, de. C. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

UFBA: UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. Laudo resumo de ensaios e análises efetuadas para a Opera Prima - Arquitetura e Restauro. 2004. *In*: PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Laudos técnicos: testes laboratoriais Galpões da Gamboa**. Rio de Janeiro, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. T. Van. **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VERTAMATTI, E.; ARAÚJO, F. A. R. de. **Elaboração de Ábaco de Erodibilidade de Solos Tropicais**. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998, Brasília. Anais: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Brasília: 1998. v. 1, p. 573-579.

VILAR, O. M. **Ensaio de campo em solos não saturados**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 1997, Rio de Janeiro. Anais: **III Simpósio brasileiro de solos não saturados**. Rio de Janeiro: Editora Freitas Bastos, 1997. v. 2, p. 491-503.