

BRAHMANI SIDHARTHA TIBÚRCIO PAES

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE CORTE RODOVIÁRIO EM PERFIL DE
SOLOS RESIDUAIS QUANTO AO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Campus Viçosa

T

P126a
2017
Paes, Brahmani Sidhartha Tibúrcio, 1990-
Avaliação geotécnica de corte rodoviário em perfil de solos
residuais quanto ao potencial de erodibilidade / Brahmani Sidhartha
Tibúrcio Paes. - Viçosa, MG, 2017.
xiv, 115f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Erosão - Viçosa (MG). 2. Rodovias. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22 ed. 631.458151


BRAHMANI SIDHARTHA TIBÚRCIO PAES

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE CORTE RODOVIÁRIO EM PERFIL DE SOLOS RESIDUAIS QUANTO AO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de março de 2017.


Giovani Levi Sant'Anna


Heraldo Nunes Pitanga
(Coorientador)


Taciano Oliveira da Silva
(Orientador)

Dedico este trabalho aos meus pais, amigos, familiares e a minha namorada Rebeca, que não mediram esforços e incentivos para que eu alcançasse e concluísse mais esta etapa na minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Justificativas	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo Geral.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Organização do trabalho.....	5
Referências Bibliográficas	6
2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE SOLOS RESIDUAIS: ESTUDO DE CASO APLICADO A CORTE RODOVIÁRIO PRESENTE NA BR120 EM VIÇOSA-MG	9
2.1. Introdução.....	10
2.2. Revisão bibliográfica.....	11
2.2.1. A formação de solos	11
2.2.2. Comportamento dos solos tropicais.....	12
2.2.3. Correlações entre os sistemas de classificação geotécnica de solos.....	23
2.3. Materiais e métodos.....	24
2.3.1. Área e solos de estudo	24
2.3.2. Métodos de ensaios	25
2.4. Resultados e discussões.....	28
2.4.1. Considerações iniciais.....	28

2.4.2.	Resultados das classificações USCS e TRB	29
2.4.3.	Resultados da classificação segundo a Metodologia MCT	30
2.5.	Conclusões.....	35
	Referências Bibliográficas	35
3.	ANÁLISE DE ERODIBILIDADE EM RELAÇÃO A CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS RESIDUAIS DE PERFIL DE CORTE RODOVIÁRIO	40
3.1.	Introdução.....	41
3.2.	Revisão bibliográfica.....	42
3.2.1.	Estudo da erodibilidade por meio de classificações dos solos.....	42
3.2.2.	Estudos relacionados na literatura	46
3.3.	Materiais e métodos.....	47
3.3.1.	Área e solos de estudo	47
3.3.2.	Métodos	48
3.3.3.	Ensaio de caracterização geotécnica	48
3.4.	Resultados e discussões.....	48
3.4.1.	Considerações iniciais.....	48
3.4.2.	Classificações USCS e TRB	49
3.4.3.	Classificação segundo a Metodologia MCT.....	49
3.4.4.	Comportamento dos solos perante a erodibilidade segundo as correlações entre as classificações USCS, TRB e MCT	50
3.5.	Conclusões.....	51
	Referências Bibliográficas	51
4.	RELAÇÃO ENTRE A ERODIBILIDADE E PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE SOLOS RESIDUAIS DE CORTE RODOVIÁRIO PRESENTE NA BR120, VIÇOSA-MG.....	55
4.1.	Introdução.....	56
4.2.	Revisão bibliográfica.....	57

4.2.1.	Comportamento do solo quanto à erodibilidade perante suas propriedades físicas e mecânicas	57
4.2.2.	Análise da erodibilidade de solos por meio de critérios de correlações com propriedades geotécnicas dos solos.....	59
4.2.3.	Estudos presentes na literatura relacionando os parâmetros físicos e geomecânicos de solos frente à erodibilidade	60
4.3.	Materiais e métodos.....	62
4.3.1.	Área e solos de estudo	62
4.3.2.	Métodos de ensaio	63
4.3.3.	Ensaio para a caracterização geotécnica	64
4.3.4.	Ensaio de resistência ao cisalhamento direto	64
4.4.	Resultados e discussões.....	64
4.4.1.	Classificações dos solos.....	65
4.4.2.	Critérios baseados na caracterização física dos solos.....	66
4.4.3.	Critérios baseados nos índices físicos.....	67
4.4.4.	Critérios baseados na resistência ao cisalhamento	68
4.5.	Conclusões.....	73
	Referências Bibliográficas	74
5.	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE DE SOLOS RESIDUAIS ATRAVÉS DE MÉTODOS DIRETO E INDIRETOS.....	79
5.1.	Introdução.....	80
5.2.	Revisão bibliográfica.....	81
5.2.1.	Solos não saturados.....	81
5.2.2.	Análise da erodibilidade	82
5.2.3.	Ensaio de desagregação	83
5.2.4.	Critérios baseados na Metodologia MCT	84
5.2.5.	Ensaio de Inderbitzen.....	89

5.3.	Materiais e métodos.....	91
5.3.1.	Área e solos de estudo	91
5.3.2.	Métodos de ensaio	91
5.4.	Resultados e discussões.....	98
5.4.1.	Critérios de avaliação do potencial de desagregação.....	98
5.4.2.	Critérios baseados na Metodologia MCT	101
5.4.3.	Critérios de avaliação segundo ensaio de Inderbitzen.....	104
5.5.	Conclusões.....	108
	Referências Bibliográficas	109
6.	CONCLUSÃO GERAL	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil típico de solo residual. Modificado de Nogueira (1995).	14
Figura 2 – Classificação MCT segundo Nogami e Villibor (1995).	20
Figura 3 – Exemplo de curva de deformação do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' . Fonte (FELTEN, 2005).	21
Figura 4 – Exemplo de curvas de compactação do mini-MCV na obtenção do coeficiente d' . Fonte: (FELTEN, 2005).	22
Figura 5 – Localização do corte rodoviário selecionado para o estudo proposto.	24
Figura 6 – Corte rodoviário em perfil de solos residuais selecionado para o estudo. 25	
Figura 7 – Etapas do procedimento para coleta das amostras indeformadas utilizando tubos de PVC.	25
Figura 8 – Acessórios que compõem o equipamento utilizado no ensaio de compactação mini-MCV.	27
Figura 9 – Acessórios utilizados para a obtenção do coeficiente P_i	27
Figura 10 – Ensaio de perda de massa por imersão: (a) corpos de prova antes da imersão em água; e (b) corpos de prova durante a imersão em água.....	28
Figura 11 – Curvas granulométricas dos solos estudados segundo escala da NBR 6502 (ABNT, 1995).	29
Figura 12 – Curvas do mini-MCV para obtenção dos parâmetros c' (coeficiente de deformabilidade) e d' (coeficiente de compactação) determinantes na classificação segundo a metodologia MCT para o solo BR120-A.....	31
Figura 13 – Curvas do mini-MCV para obtenção dos parâmetros c' (coeficiente de deformabilidade) e d' (coeficiente de compactação) determinantes na classificação segundo a metodologia MCT para o solo BR120-B.	32
Figura 14 – Curvas do mini-MCV para obtenção dos parâmetros c' (coeficiente de deformabilidade) e d' (coeficiente de compactação) determinantes na classificação segundo a metodologia MCT para o solo BR120-C.	33

Figura 15 – Ábaco de classificação segundo a metodologia MCT para as amostras estudadas.	34
Figura 16 – Corte rodoviário em perfil de solos residuais selecionado para o estudo.	47
Figura 17 – Localização do corte rodoviário selecionado para o estudo proposto. ...	62
Figura 18 – Perfil de solos residuais estudado.	63
Figura 19 – Curvas granulométricas obtidas para os solos estudados, segundo NBR 6502 (ABNT, 1995).	65
Figura 20 – Envoltórias de rupturas do solo BR120-A para as distintas condições de umidade.	69
Figura 21 – Envoltórias de rupturas do solo BR120-B para as distintas condições de umidade.	70
Figura 22 – Envoltórias de rupturas do solo BR120-C para as distintas condições de umidade.	71
Figura 23 – Critério de erodibilidade pela metodologia MCT segundo Nogami e Villibor (1995).	85
Figura 24 – Curva típica para estimativa do coeficiente de sorção (s) no ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT.	88
Figura 25 – Equipamento de Inderbitzen em sua concepção original.	89
Figura 26 – Equipamento proposto por Stepahn (2010) para o ensaio de Inderbitzen.	90
Figura 27 – Localização do corte rodoviário selecionado para o estudo proposto. ...	91
Figura 28 – Preparação de amostra para realização de ensaio de desagregação.	92
Figura 29 – Etapas de submersão de amostra BR 120 C na condição de umidade saturada preparada para realização do ensaio de desagregação.	93
Figura 30 – Equipamento utilizado para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT.	94

Figura 31 – Ensaio de perda de massa por imersão modificado.....	95
Figura 32 – Equipamento utilizado para a realização de ensaio de Inderbitzen.....	96
Figura 33 – Processo de moldagem de corpo de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura.....	96
Figura 34 – Declividade adotada para simular o corte em perfil de solos estudados.	97
Figura 35 – Amostras após o término do ensaio de desagregação para o solo BR120-A.....	100
Figura 36 – Amostras após o término do ensaio de desagregação para o solo BR120-B.....	100
Figura 37 – Amostras após o término do ensaio de desagregação para o solo BR120-C.....	100
Figura 38 – Gráfico de infiltrabilidade para determinação dos coeficientes de sorção (s) nas condições de umidade natural e seca ao ar para o solo BR120-A.....	102
Figura 39 – Gráfico de infiltrabilidade para determinação dos coeficientes de sorção (s) nas condições de umidade natural e seca ao ar para o solo BR120-B.....	102
Figura 40 – Gráfico de infiltrabilidade para determinação dos coeficientes de sorção (s) nas condições de umidade natural e seca ao ar para o solo BR120-C.....	102
Figura 41 – Representação gráfica do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para os solos estudados.....	104
Figura 42 – Resultados da perda de solo seco acumulado de material carregado por unidade de área do corpo de prova cilíndrico (g/cm^2) versus tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para os estados de umidade adotados para o solo BR120-A.....	105
Figura 43 – Resultados da perda de solo seco acumulado de material carregado por unidade de área do corpo de prova cilíndrico (g/cm^2) versus tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para os estados de umidade adotados para o solo BR120-B.....	105
Figura 44 – Resultados da perda de solo seco acumulado do material carregado por unidade de área do corpo de prova cilíndrico (g/cm^2) versus tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para os estados de umidade estudados para o solo BR120-C.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro de classificação de solos segundo a TRB.....	18
Tabela 2 – Valores típicos do coeficiente d' segundo Nogami e Villibor (1995).....	23
Tabela 3 – Correlação entre a Metodologia MCT e os sistemas USCS e TRB, segundo Nogami e Villibor (1995)	23
Tabela 4 – Limites de consistência, análise granulométrica e peso específico dos grãos dos solos estudados	29
Tabela 5 – Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas tradicionais USCS e TRB	30
Tabela 6 – Parâmetros e classificação geotécnica dos solos estudados segundo a metodologia MCT	34
Tabela 7 – Hierarquia para medida da erodibilidade segundo o sistema de classificação USCS	43
Tabela 8 – Propriedades típicas dos solos dos grupos da metodologia MCT	44
Tabela 9 – Limites de consistência, análise granulométrica e peso específico dos grãos sólidos dos solos estudados	49
Tabela 10 – Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas tradicionais USCS e TRB	49
Tabela 11 – Parâmetros e classificação geotécnica dos solos estudados segundo a metodologia MCT	50
Tabela 12 – Limites de consistência, análise granulométrica e massa específica dos grãos sólidos dos solos estudados	65
Tabela 13 – Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas USCS, TRB e MCT	66
Tabela 14 – Valores médios obtidos para os índices físicos dos solos in situ estudados	67

Tabela 15 – Resultados de índices físicos de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras do solo BR120-A nos variados estados de umidade estudados	68
Tabela 16 – Resultados de índices físicos de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras do solo BR120-B nos variados teores de umidade estudados	70
Tabela 17 – Resultados de índices físicos de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras do solo BR120-C nos variados teores de umidade estudados	71
Tabela 18 – Resultados médios obtidos nos ensaios de cisalhamento direto nas condições de umidade natural, seca ao ar e inundada para a tensão cisalhante máxima	72
Tabela 19 – Parâmetros de resistência do solo obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto para os distintos solos e condições de umidade estudadas	73
Tabela 20 – Comportamento das amostras do solo BR120-A para cada condição de umidade	98
Tabela 21 – Comportamento das amostras do solo BR120-B para cada condição de umidade	99
Tabela 22 – Comportamento das amostras do solo BR120-C para cada condição de umidade	99
Tabela 23 – Valores médios de coeficiente de sorção (s), perda de massa por imersão em água modificada (pi) e teores de umidade dos solos estudados	103
Tabela 24 – Perda de solo total acumulado por unidade de área do corpo de prova (g/cm ²) versus tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para as amostras de solo BR120-A	107
Tabela 25 – Perda de solo total acumulado por unidade de área do corpo de prova (g/cm ²) versus tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para as amostras de solo BR120-B	107
Tabela 26 – Perda de solo total acumulado por unidade de área do corpo de prova (g/cm ²) versus tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para as amostras de solo BR120-C	107

RESUMO

PAES, Brahmani Sidhartha Tibúrcio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2017. **Avaliação geotécnica de corte rodoviário em perfil de solos residuais quanto ao potencial de erodibilidade.** Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientadores: Heraldo Nunes Pitanga e Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar e identificar geotecnicamente o potencial de erodibilidade de três solos existentes num corte rodoviário em perfil de solos residuais, localizado na rodovia BR120, na microrregião de Viçosa, Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais. A metodologia aplicada consistiu em relacionar o comportamento erodível dos solos com suas propriedades físicas e geomecânicas. Para isso, foram realizadas as seguintes etapas: investigação de campo e ensaios de análises ditas diretas e indiretas. Ao avaliar de forma indireta, obtiveram-se as propriedades geotécnicas, por meio de ensaios de caracterização física, ensaios de cisalhamento direto, ensaios de desagregação, ensaios de infiltrabilidade e de perda de massa por imersão segundo a Metodologia MCT. Para avaliar de forma direta, utilizaram-se ensaios de Inderbitzen. Os solos foram nomeados e classificados em BR120-A (LG'), BR120-B (NS') e BR120-C (NG'). Os resultados obtidos mostraram que a correlação entre a erodibilidade por intermédio das classificações USCS e TRB foi insatisfatória. Os solos classificados como lateríticos apresentaram maior resistência à erodibilidade do que os solos não lateríticos. Para as correlações da erodibilidade com os índices físicos analisados, as propostas de Santos e Castro (1967) *apud* Sthepan (2010) e Bastos (1999) obtiveram resultados condizentes com o observado *in situ*, sendo o solo BR120-A classificado como de baixa erodibilidade, o solo BR120-B de alta erodibilidade e o solo BR120-C de baixa a média erodibilidade. O parâmetro de resistência mostrou-se insatisfatório porque seu valor é condicionado ao teor de umidade natural da amostra. Para o critério de erodibilidade segundo a Metodologia MCT, a perda de massa por imersão em água foi o fator que determinou o comportamento erodível das amostras analisadas. Já a avaliação direta foi a que melhor representou as características observadas *in situ*. Porém, concluiu-se que a abordagem por meio de critérios de correlações com as propriedades geotécnicas, físicas e mecânicas dos solos, quando consideradas isoladamente, não constituem

parâmetros definidores das características de erodibilidade de um solo, dada a elevada gama de parâmetros que interferem no processo erosivo.

ABSTRACT

PAES, Brahmani Sidhartha Tibúrcio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2017. **Geotechnical evaluation of a road section in a profile of residual soils, regarding the potential of erodibility.** Advisor: Taciano Oliveira da Silva. Co-advisors: Heraldo Nunes Pitanga and Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

The main objective of this research was to evaluate and identify geotechnically the erodibility potential of three types of soil found in a road section in a profile of residual soils, located on BR-120 highway, in the micro-region of Viçosa, Zona da Mata Norte in the state of Minas Gerais. The methodology used consisted of relating the erodible behavior of the soils to their physical and geomechanical properties. For such, the stages followed were field investigation and direct and indirect analysis tests. When evaluating indirectly, we obtained geotechnical properties by means of physical characterization tests, direct shear tests, slacking tests, infiltrability tests and tests of mass loss by immersion according to the MCT Methodology. In order to evaluate directly, we used the Inderbitzen tests. The soils were named and classified as BR120-A (LG'), BR120-B (NS') and BR120C (NG'). The results obtained showed that the correlation between the erodibility by means of USCS and TRB classifications was unsatisfactory. The soils classified as lateritic presented higher resistance to erodibility than non-lateritic soils. For the correlations between erodibility and the physical indexes analyzed, the proposals of Santos and Castro (1967) *apud* Stephan (2010) and Bastos (1999) obtained results which are in accordance with what was observed *in situ*, BR120-A soil being classified as low erodibility, BR120-B soil as high erodibility and BR120-C soil as low to medium erodibility. The resistance parameter proved unsatisfactory because its value is conditioned to the natural moisture content of the sample. For the erodibility criterion according to MCT Methodology, the mass loss by immersion in water was the factor that determined the erodible behavior of the samples which were analyzed. As for the direct evaluation, it was the one which best represented the characteristics observed *in situ*. However, we concluded that the approach by means of correlations criteria with the geotechnical, physical and mechanical properties of the soils, when considered individually, are not constitutive parameters which define the erodibility characteristics of a soil type, given the high range of parameters which interfere in the erosion process.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Generalidades

Para Santos (2015), o uso e manuseio inadequados do solo começaram a ser objeto de discussões mais intensivas a partir da década de 30, quando as alterações no equilíbrio geomorfológico foram diretamente associadas à intervenção humana, através do desmatamento, práticas agrícolas e urbanas, construções de vias e rodovias e outras ações. Como consequência imediata dessas intervenções, tem-se a erosão.

Bastos, Milititsky e Gehling (2000), de forma abrangente, citam que a erosão pode ser considerada como um conjunto de processos pelos quais as partículas de solo e rocha existentes na crosta terrestre são desagregadas, dissolvidas ou desgastadas e transportadas de um ponto a outro por agentes erosivos, capazes de modelar significativamente a superfície da Terra. Tais processos, que podem ser de ordem natural ou de ordem antrópica, são observados tanto em áreas rurais quanto urbanas (SANTOS, 2015).

Fernandes (2011) cita que as desses processos têm provocado, nos últimos anos, uma intensa investigação e debates sobre os parâmetros e mecanismos responsáveis pela erosão, além de conscientizar a comunidade geotécnica da necessidade de identificar o potencial erosivo dos terrenos antes da intervenção.

Avila, Nummer e Pinheiro (2010) afirmam que a erosão pode ser potencializada em um curto período de tempo pela ação do homem (antrópica), acelerando sua ação e intensidade, acarretando ou não em consequências desastrosas. Para Bastos (1999), quando essa ação antrópica é caracterizada como deflagradora dos processos de erosão, é adotado o termo “erosão acelerada”, e quando o agente responsável é a água, o termo adotado será “erosão acelerada hídrica”.

A erosão hídrica, que tem a chuva como principal agente erosivo, possui significativo impacto no planejamento urbano e rodoviário e, conseqüentemente, é a maior influenciadora nas mudanças impostas à superfície terrestre (MAGALHÃES, 2001).

Atualmente, ela tem sido a causa de sérios danos ambientais que geram impactos econômicos e sociais à população, como inundações, assoreamento de corpos d'água e poluição dos recursos hídricos, assolando principalmente os países tropicais.

De acordo com Lima (2003) e Santos (2015), em regiões tropicais, a grande maioria dos solos, em função das suas características físico-químicas originárias do processo de formação e pelo alto índice pluviométrico, apresentam alta porosidade e grande sensibilidade das ligações cimentícias em presença de água. Por estes motivos, são, frequentemente, mais susceptíveis à erosão hídrica.

O processo erosivo hídrico tem origem no momento em que a gota de água se choca com o solo, destacando as partículas sólidas que se encontram sob a superfície. À medida que a precipitação ocorre, os vazios do solo vão sendo preenchidos com água até o momento em que o solo esteja completamente saturado, ou quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração (COUTO, 2015).

Bastos (1999) explica que, a partir deste momento, surge o escoamento superficial, formando-se um fluxo d'água, que causa o desprendimento e a remoção progressiva de partículas de solo ou rocha. A lâmina superficial, que escoar em direção às cotas mais baixas do terreno, tende a se concentrar, gerando linhas de fluxo responsáveis pela formação dos sulcos em perfis de cortes em solos.

Bastos, Militisky e Gehling (2000) citam que, embora possa parecer de simples concepção, o fenômeno da erosão hídrica destaca-se, sobretudo, pela complexidade dos mecanismos envolvidos. As principais causas desta dificuldade são a multiplicidade e a inter-relação de fatores intervenientes no fenômeno. Os autores afirmam que esses fatores podem ser agrupados em quatro classes: fatores climáticos (chuva, temperatura, radiação solar e vento), fatores topográficos (declividade e comprimento de rampa), fator vegetação (cobertura vegetal) e fator solo (erodibilidade do solo).

A erodibilidade, por Bastos, Militisky e Gehling (2000), definida como a maior ou menor facilidade com que as partículas de solo ou rocha são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo, constitui uma propriedade que reúne o comportamento dos solos perante o efeito das características que determinam a velocidade de infiltração da água da chuva e a resistência à erosão pelo escoamento superficial.

Além disso, de acordo com Camapum de Carvalho et al. (2006), está diretamente relacionada com as características geológico-geotécnicas do solo, como a estrutura, textura, mineralogia, sucção e teor de matéria orgânica. Bigarella (2003) inclui, além

das características mencionadas por Camapum de Carvalho et al. (2006), a intensidade da chuva como fator que interfere na erodibilidade de um determinado solo.

Portanto, o conhecimento das diferentes formas de erosão e dos impactos oriundos do desenvolvimento econômico e das atividades produtivas humanas é fundamental para a conservação e uso dos recursos naturais como a água, o solo e o ar (GRANDO et al., 2009).

1.2. Justificativas

Para Molinero Júnior (2010), apesar de todos os cuidados que vêm sendo adotados com o meio ambiente, principalmente nos últimos anos, a intervenção humana na superfície terrestre tem sido necessária devido ao desenvolvimento e crescimento da nação. O combate aos processos erosivos, de um modo geral, torna-se difícil e oneroso, necessitando de acompanhamento e conservação constantes das soluções adotadas (DNIT, 2006). Devido às características desses processos, é mais fácil e são necessários menos recursos financeiros quando tratados no início, assim que o problema se instala.

Dentre as diversas formas de uso e ocupação do solo responsáveis pela aceleração destes processos, Molinero Júnior (2010) cita como exemplo as rodovias, principal modelo de transporte adotado no Brasil, que, com a demanda crescente da circulação de pessoas, mercadorias e serviços, necessitam ser dotadas de maior capacidade de tráfego e de carga.

Quando considerada a implantação de rodovias, o homem, ao produzir taludes de cortes, principalmente, interfere de maneira direta nos fatores causadores da erosão, potencializando e expondo o maciço às intempéries, principalmente à chuva, e às suas consequências (SANTOS, 2015).

Com a execução de cortes no solo, há remoção da cobertura vegetal, aumentando o impacto das gotas da chuva e oferecendo menor resistência ao escoamento superficial. Dessa forma, níveis elevados de erodibilidade do solo se tornam preocupantes pelos impactos gerados, exigindo alerta permanente nas regiões mais susceptíveis a tal processo. A fim de exemplificar tal situação, Menezes (2010) cita que o custo das obras corretivas necessárias à estabilização de feições erosivas atingiria cerca de 20% do orçamento do estado de São Paulo, o que, segundo ela, baseada em DAEE (1990),

demandaria altos investimentos com ações corretivas que, como soluções unitárias, não impediriam a aceleração de novos efeitos deletérios.

Este sucinto cenário da problemática da erodibilidade explica o avanço nos estudos sobre o assunto. Portanto, é possível verificar a necessidade de utilizar os conhecimentos geológico-geotécnicos, a fim de prever e minimizar os impactos da erosão dos solos, visto que a recuperação proveniente do equilíbrio é tardia e não soluciona os inúmeros problemas geotécnicos (MENEZES, 2010).

Logo, torna-se importante identificar e quantificar os potenciais de erodibilidade dos solos pertencentes a diferentes áreas em que esses maciços já sofreram ou não a ação antrópica, a fim de conhecer tal comportamento e buscar formas de prevenir os impactos gerados.

O presente trabalho se justifica pela tentativa de avaliar os efeitos da erodibilidade sob uma condição particular de amostragem dos solos: diferenciação de seus horizontes relacionados ao mesmo ambiente de intemperismo. Desta forma, os pontos amostrados deveriam estar presentes em um mesmo perfil de solo e apresentar um horizonte resistente à erosão e outro deteriorado pelos processos erosivos.

Essa avaliação, no meio geotécnico, é realizada por meio de ensaios de análise direta, como o ensaio de Inderbitzen (1961), e indireta, como ensaios de caracterização física, perda de massa por imersão e infiltrabilidade, critérios adotados na Metodologia MCT proposta por Nogami e Villibor (1995) e o ensaio de desagregação.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação geotécnica de corte rodoviário em perfil de solos residuais presente à margem da BR120, na microrregião de Viçosa, Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais, quanto ao potencial de erodibilidade.

1.3.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, citam-se:

- i. Correlacionar o comportamento erodível aos resultados de ensaios laboratoriais de caracterização física das amostras de solos estudadas, a saber:

- análise granulométrica, limites de Atterberg e massa específica dos grãos do solo;
- ii. Analisar os resultados de ensaios laboratoriais de perda de massa por imersão e compactação mini-MCV segundo a Metodologia MCT quanto ao potencial de erodibilidade;
 - iii. Analisar os resultados de ensaios de cisalhamento direto para a caracterização quanto às propriedades geomecânicas dos solos, correlacionando-os com a erodibilidade;
 - iv. Analisar os resultados de ensaios laboratoriais para avaliação direta da erodibilidade segundo o ensaio de Inderbitzen;
 - v. Analisar os resultados de ensaios laboratoriais para avaliação indireta da erodibilidade, a saber: ensaio de desagregação, ensaio de perda de massa por imersão em água modificada e ensaio de infiltrabilidade pela metodologia MCT; e
 - vi. Estimar a erodibilidade das amostras de solos investigados em função da análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados e mencionados acima.

1.4. Organização do trabalho

Apresenta-se neste item a estrutura geral do trabalho, com uma síntese do que trata cada capítulo. O trabalho consta de 6 capítulos, contabilizando o presente Capítulo 1 referente à Introdução Geral.

O Capítulo 2 aborda um estudo comparativo entre as classificações geotécnicas tradicionais de solos *USCS (Unified Soil Classification System)*, *TRB (Transportation Research Board System)* e a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), para um caso aplicado a corte rodoviário presente na BR120 em Viçosa-MG.

O Capítulo 3 apresenta as análises dos comportamentos quanto à erodibilidade segundo as classificações *USCS*, *TRB* e MCT para os solos estudados.

O Capítulo 4 apresenta o estudo da relação entre a erodibilidade e as propriedades físicas e mecânicas de solos residuais presentes em corte rodoviário nas margens da BR120 em Viçosa-MG, observando a veracidade de correlações existentes na literatura para os solos analisados.

O Capítulo 5 retrata a avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos residuais, quanto à observação empírica de campo, para os solos presentes no corte rodoviário escolhido para estudo. Para isso, foram utilizados métodos indiretos e diretos, como os ensaios de Inderbitzen, desagregação, perda de massa por imersão em água modificado e infiltrabilidade da Metodologia MCT.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão geral baseada nas análises individuais de cada capítulo de dados presente neste trabalho.

Referências Bibliográficas

AVILA, L, O. NUMMER, A. PINHEIRO, R, J, B. Erosão na microbacia do Arroio Sarandi: voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria/RS-Brasil. In: Seminário Latino-Americano de Geografia Física, 6.; Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, 2., 2010, Coimbra. **Anais eletrônicos...** Coimbra: VISLAGF, 2010. Disponível em: <<http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema4/luciele>>. Acesso em 18 de maio de 2016.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1999.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Y. Y. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, RS, v.1, p. 17-26. 2000.

BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. da UFSC, v. 3, 2003. p. 877-1436.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁCIO, J. A.; MOTTA, N.; FRANCISCO, R. A. Processos erosivos. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p 39-91.

COUTO, B. O. C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, MG, 2015.

DAEE (1990). **Controle de Erosão**. Secretaria de Energia e Departamento de Águas e Energia Elétrica. São Paulo, DAEE/IPT, 2 ed, 92p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 274p. 2006.

FERNANDES, J, A. **Estudo da Erodibilidade de Solos e Rochas de uma Voçoroca de São Valetim - RS**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2011.

GRANDO, A. MACIEL, C. B. CORSEUIL, C. W. MACCARINI, M. KOBİYAMA, M. HIGASHI, R. A. R. Erodibilidade do solo de uma microbacia experimental. **In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande, MS: ABRH, Anais...** Campo Grande, MS, 2009. 19p.

INDERBITZEN, A. L. **An erodin test for soils**. Materials Research Standards, Philadelphia, v.1, n.7, p 553-554, 1961.

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

MAGALHÃES, R. A. Erosão: definições, tipos e formas de controle. **SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 2001, Goiânia, GO. Anais...** Goiânia, GO, 2001. 11p.

MENEZES, M, B, M. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade.** 2010, 139f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

MOLINERO JÚNIOR, J. A. **Estudo geotécnico dos solos de erosões resultantes de intervenções em rodovias.** 2010, 117 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2010.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995. 204p.

SANTOS, L. M. **Erosão em taludes de corte: métodos de proteção e estabilização.** 2015. 73 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2015.

2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE SOLOS RESIDUAIS: ESTUDO DE CASO APLICADO A CORTE RODOVIÁRIO PRESENTE NA BR120 EM VIÇOSA-MG

Resumo – Este capítulo aborda um estudo comparativo entre as classificações geotécnicas tradicionais de solos, *USCS (Unified Soil Classification System)* e *TRB (Transportation Research Board System)*, e a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) para um corte rodoviário em perfil de solos residuais presente às margens da BR120, no município de Viçosa-MG. Os principais objetivos deste estudo são analisar correlações entre os sistemas geotécnicos tradicionais de classificação e a metodologia MCT. O programa de laboratório envolveu a realização dos seguintes ensaios: (i) granulometria conjunta; (ii) limites de Atterberg (LL e LP); (iii) massa específica dos grãos do solo; (iv) compactação Mini-MCV; e (v) perda de massa por imersão em água. Os resultados desta pesquisa possibilitaram verificar que as correlações entre os sistemas de classificações geotécnicas são condizentes para os solos estudados com aquelas propostas na metodologia MCT. Porém, destaca-se que prever o comportamento mecânico de solos tropicais através dos sistemas tradicionais TRB e USCS é uma prática perigosa, uma vez que os mesmos se baseiam apenas nas propriedades físicas (granulometria e limites de Atterberg), enquanto que, na classificação MCT, são investigadas as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos.

Palavras-Chave: Classificações geotécnicas; Metodologia MCT; Solos residuais; Solos tropicais.

Abstract - *This chapter discusses a comparative study between the traditional geotechnical classifications of soils, USCS (Unified Soil Classification System) and TRB (Transportation Research Board System), and the MCT Methodology (Miniature, Compacted, Tropical), for a road section found on the sides of BR120 highway, in Viçosa, state of Minas Gerais. The main objectives of this study are to analyze correlation between the traditional geotechnical systems of classification and MCT Methodology. The laboratory program involved the following tests: (i) particle-size analysis of soils; (ii) Atterberg limits (LL and PL); (iii) specific mass of the soil grains;*

(iv) Mini-MCV compaction; and (v) mass loss by immersion in water. The results of this research made it possible to verify that the correlations between the geotechnical classification systems are adequate for the soils studied with those proposed in the MCT Methodology. However, predicting the mechanical behavior of tropical soils by means of the traditional TRB and USCS is dangerous, since they are based solely on physical properties (granulometry and Atterberg limits) while on MCT classification mechanical and hydraulic properties of the soils are also investigated.

Keywords: *Geotechnical Soil Classification, MCT Methodology, Residual soils; Tropical soils.*

2.1. Introdução

O conhecimento da origem do solo é de grande importância para estudar suas peculiaridades. Mas antes, é importante conceituar a palavra solo, que pode ser diferente de acordo com cada área de estudo. Na Engenharia Civil, por exemplo, o solo é definido como o material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter a presença de matéria orgânica (ABNT, 1995).

A origem do solo acontece devido ao resultado de fatores e processos de transformação da rocha e outros solos, os quais conferem características e propriedades químicas e físicas próprias. Por exemplo, um solo formado a partir de uma mesma rocha matriz pode apresentar características distintas devido ao processo de transformação que o mesmo sofreu.

Perante as diferentes finalidades de interesse da engenharia, buscou-se agrupar solos que apresentassem comportamentos semelhantes, associados a determinadas propriedades geotécnicas, criando os sistemas de classificações geotécnica dos solos.

Portanto, identificar e classificar os solos são trabalhos essenciais em quase todos os estudos geotécnicos para a construção de barragens, cortes e aterros, fundações de grandes estruturas e obras viárias (COZZOLINO e NOGAMI, 1993 *apud* SILVA, 2009).

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentada pelos diversos solos perante as diferentes finalidades de interesse da engenharia civil levaram a um

natural agrupamento dos mesmos em conjuntos distintos, aos quais podem ser atribuídas determinadas propriedades geotécnicas. É desta tendência racional de organização da experiência acumulada que surgiram os sistemas de classificação dos solos (PINTO, 2006).

Entre os sistemas de classificações utilizados na literatura, os mais difundidos na engenharia civil são: USCS (*Unified Soil Classification System*) e TRB (*Transportation Research Board*). Porém, devido à natureza extremamente variável do solo, é inevitável que, em qualquer sistema de classificação, ocorram casos em que é difícil enquadrar o solo em um único grupo.

Silva (2009) ressalta que estes dois sistemas de classificação foram desenvolvidos em países de clima temperado, podendo não apresentar resultados satisfatórios quando utilizados na classificação de solos tropicais, principalmente os de comportamento laterítico, segundo a visão de Nogami e Vilibor, cuja gênese é bastante diferenciada da apresentada nos solos de clima temperado. Essa peculiaridade levou à necessidade de se desenvolver um novo sistema de classificação para os solos tropicais. Nogami e Villibor, em 1979, propuseram uma nova classificação que passou a ser denominada MCT.

Diante do exposto, busca-se nesta pesquisa realizar um estudo comparativo entre as classificações geotécnicas tradicionais USCS e TRB e a metodologia MCT aplicadas a um estudo de caso envolvendo a caracterização geotécnica de corte rodoviário em perfil de solos residuais presente às margens da BR120, no município de Viçosa-MG.

2.2. Revisão bibliográfica

2.2.1. A formação de solos

Os processos responsáveis pela desintegração e decomposição das rochas ou maciços rochosos, quando expostos na superfície da Terra, e na formação dos solos são conhecidos como fenômenos de intemperismo. Estes fenômenos são provocados pela interação de vários fatores condicionantes determinados de agentes de intemperismo, podendo ser ocasionados por agentes físicos, químicos e biológicos (BRANCO, 2015).

A ação do intemperismo acontece através de modificações nas propriedades físicas e químicas dos minerais e rochas. Quando há o predomínio daquelas, fala-se em intemperismo físico, se há predomínio dessas, fala-se em intemperismo químico.

Quando há a participação de organismos vivos e de matéria orgânica, é classificado como intemperismo biológico, podendo ser comumente classificado em intemperismo físico-biológico ou químico-biológico (BRANCO, 2015).

Pires (2014) definiu os seguintes tipos de intemperismo e seus respectivos agentes:

- (i) Intemperismo físico: provoca a decomposição das rochas sem promover a formação de novos minerais. Os principais agentes físicos são: temperatura (as oscilações de temperatura que ocorrem com o passar do tempo acarretam a desagregação das rochas pelo aquecimento e resfriamento das mesmas); água (a água promove a erosão das rochas e solos); e vento (o vento tem ação erosiva e de transporte ao carregar resíduo finos);
- (ii) Intemperismo químico: promove a formação de novos minerais ao decompor as rochas onde ele atua. A ação química é favorecida por ambientes quentes e úmidos e com presença de vegetação. Os principais agentes causadores são: hidratação e solução, hidrólise, oxidação, redução, complexação e outros processos ácidos;
- (iii) Intemperismo biológico: provocado pela ação de bactérias que promovem a decomposição de matéria orgânica.

Estes agentes estão continuamente em atividade, alterando o solo e transformando as suas partículas em outras cada vez menores. Logo, o solo será o resultado da ação conjunta de todos os fatores de formação, a qual está diretamente relacionada com a intensidade destes agentes.

2.2.2. Comportamento dos solos tropicais

Pinto (2006) cita a classificação dos solos pela origem como um complemento importante para o conhecimento das ocorrências e para a transmissão de conhecimentos acumulados, sendo, em algumas vezes, tão ou mais útil do que a classificação sob o ponto de vista da constituição física. Logo, os solos podem ser classificados em dois grandes grupos, solos residuais e solos transportados, conforme descrição a seguir:

- (i) Solos residuais: são aqueles de decomposição da rocha que se encontram no próprio local em que se formaram (rocha matriz). Para que ocorram, é

necessário que a velocidade de decomposição de rocha seja maior que a velocidade de remoção por agentes externos; e

- (ii) Solos transportados: são aqueles que foram levados ao seu atual local por algum agente de transporte, tendo suas características definidas em função do agente transportador.

Os solos residuais apresentam-se em horizontes com graus de intemperismo decrescentes, identificados como camadas, cujas transições são gradativas (PINTO, 2006). Considerando este manto de intemperismo, os solos tropicais compreendem genericamente os solos saprolíticos (pouco intemperizados) e os solos lateríticos (profundamente intemperizados) (VILLIBOR et al., 2000).

Segundo Pessoa (2004), os solos tropicais de comportamento laterítico são nitidamente predominantes no Brasil, tanto em volume como em áreas de abrangência, fazendo-se necessário conceituar o que se entende por solos de comportamento tropical, no qual os tipos encontrados nas regiões tropicais apresentam comportamentos lateríticos ou não lateríticos.

Para Pinto (2006), as condições existentes nas regiões tropicais são favoráveis a degradações mais rápidas da rocha, razão pela qual as maiores ocorrências de solos residuais situam-se nessas regiões, entre elas o Brasil. Para Nogami e Villibor (1995), os solos tropicais são aqueles que apresentam comportamento e peculiaridades decorrentes da atuação de processos geológicos e pedológicos típicos nessas regiões.

Para Dias (2007), um solo será considerado tropical quando apresentar peculiaridades de interesse geotécnico de solos formados nessas regiões, não bastando que tenha sido apenas formado em regiões de clima tropical. Este conceito é o mesmo adotado frequentemente em pesquisas e descrito pelo *Committee on Tropical Soils of International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering* (1985).

2.2.2.1 Solos de comportamento laterítico

Os solos lateríticos são geralmente resultantes da atuação de processos pedológicos, em condições bem drenadas, clima úmido e tropical com regime de chuvas moderadas a intensas, altamente intemperizados e lixiviados, constituintes de horizontes pedológicos A e B, conforme apresentando na Figura 1, podendo atingir espessuras de uma dezena de metros. Estes se destacam pela uniformidade, isotropia e coloração

característica, podendo se apresentar nas cores vermelha, alaranjada ou amarela e raramente com outras cores (NOGAMI e VILLIBOR, 1988).

Segundo Nogami e Villibor (1981), a principal peculiaridade dos solos lateríticos, que os diferenciam dos solos de clima temperado, é uma cimentação natural causada devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Quando devidamente compactados e após secagem, os solos com presença de cimentantes (argilas tipo caulinita) adquirem um comportamento mecânico e hídrico caracterizado pela resistência elevada, permeabilidade e deformabilidade baixa em relação aos solos que não contêm essa cimentação. Depois de compactado, o solo apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água.

Quanto à microestrutura, apresentam-se constituídos por elementos predominantemente muito pequenos (diâmetro inferior a 2 microns). No entanto, com a cimentação, a granulometria resultante dos ensaios padronizados pode acusar elevada percentagem de grãos maiores nas frações silte e areia. Isto é ocasionado pela presença de agregados. Porém, com frequência, estes agregados são poucos estáveis diante de agentes defloculadores, a exemplo do hexametáfosfato e o ultrassom (PESSOA, 2004).

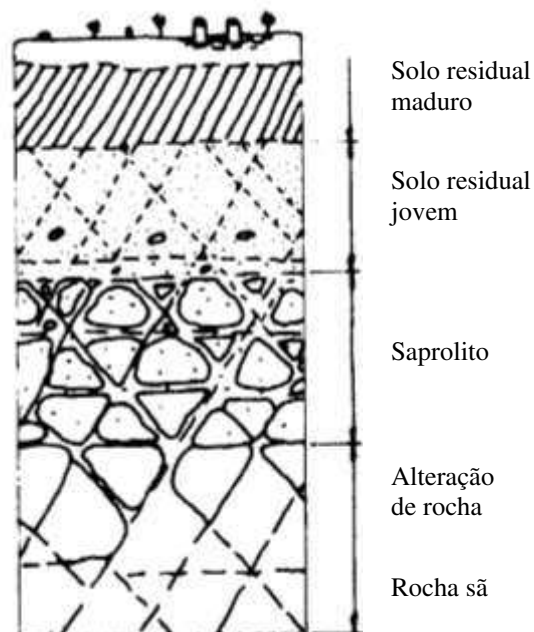


Figura 1 – Perfil típico de solo residual. Modificado de Nogueira (1995).

2.2.2.2 Solos de comportamento saprolíticos

Os solos saprolíticos são aqueles que resultam da decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha, mantendo nitidamente a estrutura da rocha que lhe deu origem (COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE, 1985). Os solos saprolíticos ocupam a parte mais profunda de um perfil de solo e, em suas condições naturais, quase sempre constituem o horizonte pedológico C, conforme apresentando na Figura 1, ou seja, a parte subjacente à camada de solo superficial de outro tipo genético de solo (normalmente solo laterítico), aparecendo na superfície do terreno apenas pela ação antrópica ou erosões violentas. Originam-se pela decomposição de rocha preexistente e, portanto, herdaram a estrutura da rocha matriz, apresentando uma mineralogia complexa, além de desenvolver outras feições decorrentes da heterogeneidade de atuação do processo de intemperismo (atuação da água das chuvas e subterrânea, da temperatura, etc.) (NOGAMI e VILLIBOR, 1988).

A sua cor é muito variada, podendo ocorrer partes com cores branca, preta, azul, verde, roxa, rósea, amarela e vermelha. São constantes as presenças de manchas e mosqueamentos com feições herdadas da rocha matriz ou desenvolvidas ao longo do processo de intemperismo, podendo apresentar-se excepcionalmente homogênea em pequenas porções. Geralmente, encontra-se sobrejacente a uma camada de rocha sã e contém, com frequência, intercalações desse material (PESSOA, 2004).

Além disso, segundo Pessoa (2004), as camadas saprolíticas têm sido designadas também como solos residuais jovens, em contraste com os solos superficiais lateríticos, que são designados por solos residuais maduros.

2.2.2.3 Sistemas de classificação de solo

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentada pelos diversos tipos de solos perante as diferentes finalidades de interesse da engenharia levaram a um natural agrupamento dos mesmos, em conjuntos distintos, aos quais podem ser atribuídas determinadas propriedades geotécnicas. É desta tendência racional de organização da experiência que surgiram os sistemas de classificação de solos (PINTO, 2006).

Do ponto de vista da engenharia, um sistema de classificação pode ser baseado no potencial de um determinado solo para uso em camadas de um pavimento, fundações

ou como outro material de construção. Silva (2009) explica que, devido à natureza extremamente variável do solo, é inevitável que em qualquer classificação ocorram casos onde é difícil se enquadrar o solo em uma única categoria, ou seja, sempre vão existir casos em que um determinado solo poderá ser classificado como pertencente a dois ou mais grupos. Do mesmo modo, o mesmo solo pode ser inserido em grupos que pareçam radicalmente diferentes, em diferentes sistemas de classificação.

Os sistemas de classificação mais difundidos no Brasil são: *USCS (Unified Soil Classification System)*, descrito pela norma americana D2488-09 (ASTM, 2009), e a classificação para fins rodoviários da *AASHTO*, o sistema de classificação *TRB (Transportation Research Board)*, descrito pela norma, também americana, D3282-15 (ASTM, 2015). Além destes sistemas, também se destaca o sistema de classificação pela Metodologia MCT, proposto pelos engenheiros Job Shuji Nogami e Douglas Fadul Villibor e descrito pela norma CLA 259 (DNER, 1996).

2.2.3.1 Classificação USCS

A classificação USCS é resultante do trabalho conjunto do *Bureau of Reclamation* e do *U. S. Corps of Engineers*, assistido pelo professor Arthur Casagrande, da Universidade de Harvard (SILVA, 2009). Este sistema de classificação baseia-se na identificação dos solos de acordo com as suas qualidades de textura e plasticidade, agrupando-os de acordo com os seus comportamentos quando usados em estradas, aeroportos, aterros e fundações (DNIT, 2006).

O princípio deste sistema de classificação é que os solos grossos podem ser classificados de acordo com a sua curva granulométrica, ao passo que o comportamento de engenharia dos solos finos está intimamente relacionado com a sua plasticidade. Ou seja, os solos cuja fração fina não existe em quantidade suficiente para afetar o seu comportamento são classificados de acordo com a sua curva granulométrica, enquanto que os solos cujo comportamento de engenharia é controlado pelas frações finas (silte e argila) são classificados de acordo com as suas características de plasticidade (SILVA, 2009).

Neste sistema de classificação geotécnica, todos os solos são identificados por um símbolo, derivado dos nomes correspondentes na língua inglesa: Pedregulho (G), Argila (C), Areia (S), Solos orgânicos (O) e Turfa (Pt). A única exceção para esta regra

advém do grupo silte, cuja letra representante, M, advém da língua sueca (VARGAS, 1977 *apud* SILVA, 2009).

2.2.3.2 Classificação TRB

O sistema de classificação TRB teve origem na classificação do *Public Roads Administration* e é baseado na granulometria, no limite de liquidez e no índice de plasticidade (LL e IP), sendo proposto para materiais de uso para subleito e de camadas de pavimentos. Para este sistema, os solos são reunidos em grupos e subgrupos em função da sua granulometria, limite de consistência e índice de grupo (SILVA, 2009).

Através do índice de grupo (IG), atribui-se um valor ao solo, o qual varia inversamente à capacidade de suporte do subleito sobre boas condições de drenagem e compactação, ou seja, se o solo possuir IG igual a zero será considerado bom material e, quanto mais elevado for o seu valor, pior será este material como camada para composição de estrutura de pavimento (PASTORE e FORTES, 1998).

Neste sistema de classificação geotécnica, os solos com menos de 35% passando na peneira de nº 200 (# 0,074mm) (solos grossos ou granulares) são divididos nos grupos A-1, A-2 e A-3. Os solos com percentual mínimo passante na peneira de nº 200 iguais a 35% (solos finos) são classificados em A-4, A-5, A-6 e A-7. Na Tabela 1, é apresentada a classificação de solos segundo o sistema de classificação geotécnica da TRB.

Determina-se o grupo do solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidirem, será a classificação correta (DNIT, 2006).

Tabela 1 – Quadro de classificação de solos segundo a TRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO-ARGILOSO			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % Passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 mín.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira Nº 40											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argiloso	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A-7-5 é igual ou menor do que o LL menos 30; se maior será A-7-6.

Fonte: (Manual do DNIT, 2006).

2.2.3.3 Classificação MCT

Freqüentemente, as classificações tradicionais são utilizadas inadequadamente para os solos das regiões tropicais e são adotados critérios de projeto incompatíveis com o desempenho desses solos e das peculiaridades climáticas inerentes das regiões tropicais, refletindo, diretamente ou indiretamente, nos custos das obras finais (principalmente viárias). Em função das dificuldades e deficiências encontradas na utilização das classificações tradicionais em solos de clima tropical, fez-se necessário desenvolver uma nova metodologia de estudo de solos, designada por Metodologia MCT (SILVA, 2009).

Com base nesta necessidade, Nogami e Villibor (1981, 1985) desenvolveram a classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) especialmente para o estudo de solos tropicais, baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas, obtidas de corpos de prova de dimensões reduzidas e compactados.

Em 1979, o engenheiro Job Shuji Nogami já chamava a atenção para o fato de que os critérios tradicionais, fundamentados em materiais e condições ambientais de clima

temperado e frio, típicos do hemisfério Norte, levavam a conclusões contraditórias dos resultados obtidos em relação ao observado na prática em campo. A exemplo, Felten (2005) cita que os resultados se demonstram muito pessimistas em relação aos solos lateríticos e otimistas demais em relação aos solos saprolíticos.

Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos das regiões tropicais apresentam uma série de peculiaridades decorrentes das condições climáticas, possuindo comportamento diferenciado em relações aos solos tradicionais de clima temperado. Assim, faz-se necessário caracterizar estes solos de peculiaridades tropicais, ou seja, tipos genéticos de solos encontrados em regiões tropicais.

A classificação MCT não utiliza a granulometria, os limites de liquidez e o índice de plasticidade, como acontece no caso das classificações geotécnicas tradicionais. Em lugar disso, realizam-se ensaios mecânicos e hidráulicos simplificados, mais diretamente correlacionáveis com o comportamento dos solos tropicais (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Esta classificação geotécnica divide os solos tropicais em duas grandes classes, os de comportamento laterítico (classe identificada pela letra L) e os de comportamento não laterítico (classe identificada pela letra N), entendendo-se por comportamento laterítico aquele creditado a solos de clima tropical e subtropical com substancial acúmulo de óxidos de ferro e alumínio: boa compatibilidade, elevada capacidade de suporte, baixa expansão e elevado módulo de resiliência (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Para fim de complementar a classificação, as frações do solo são designadas pelas letras G (argila), S (silte) e A (areia), e para os tipos de solo utilizam-se as letras A' (arenoso), G' (argiloso) e S' (siltoso).

A Figura 2 apresenta o ábaco proposto inicialmente para a classificação geotécnica de solos, de acordo com a Metodologia MCT.

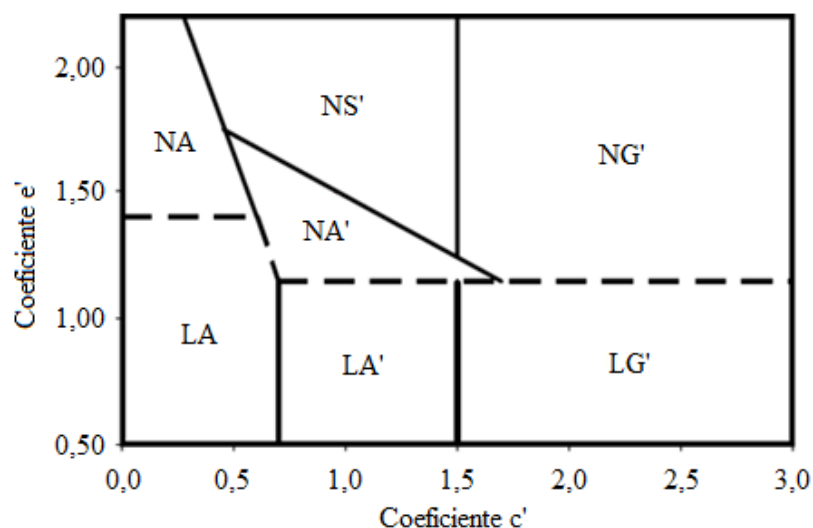


Figura 2 – Classificação MCT segundo Nogami e Villibor (1995).

Contudo, Silva (2009) aponta para o sistema de classificação MCT algumas dificuldades, como por exemplo: número de golpes requerido no ensaio de compactação mini-MCV, grande quantidade de dados e curvas a serem trabalhados e tempo necessário para a classificação dos solos em torno de 48 horas, dificultando a disseminação e emprego do sistema.

O ábaco apresentado na Figura 2 foi elaborado a partir da experiência acumulada na obtenção dos coeficientes c' (eixo da abscissa) e e' (eixo da ordenada), para um grande número de solos tropicais. A obtenção desses coeficientes é importante para a classificação de solos e devem ser completados pela determinação do coeficiente d' (FELTEN, 2005).

O coeficiente c' (coeficiente de deformabilidade) é obtido através do ensaio de compactação mini-MCV (*Moisture Condition Value*) que consiste, basicamente, na aplicação variável de energia de compactação através de golpes sucessivos crescentes, medindo-se as respectivas alturas dos corpos de prova. O ensaio é realizado para amostras com cinco teores de umidade uniformemente crescentes. Desta forma, obtém-se uma relação entre o número de golpes aplicados (1, 2, 3, 4, 6, 12, ..., n, ..., 4n) e a altura do corpo de prova (A1, A2, A3, ..., An, ..., A4n). Calculam-se, então, as diferenças de alturas e , em função disso, o peso específico aparente seco (FELTEN, 2005).

Com os dados obtidos para as cinco amostras, deve ser plotado um gráfico mono logarítmico, no qual, na abscissa, é indicado o número de golpes na escala logarítmica e, na ordenada, a correspondente diferença de altura ($A_n - A_{4n}$), como demonstrado na Figura 3. O número de golpes correspondente ao cruzamento de cada curva com o valor de diferença de altura ($A_n - A_{4n}$) = 2 mm é definido como B_n , e o valor mini-MCV para cada unidade de compactação é então definido conforme a **Equação 1**.

$$\text{mini-MCV} = 10 \cdot \log(B_n) \quad \text{Equação 1}$$

Nogami e Villibor (1995) citam que geralmente, nas argilas e solos argilosos, o c' é pouco variável ao longo de uma larga faixa de teores de umidade. Já nos solos siltsos e arenosos, o c' é variável, o que obriga, para fins classificatórios, a fixação da curva mini-MCV. Portanto, o coeficiente c' é obtido pela inclinação do trecho intermediário reto da prevista curva de deformabilidade para $B_n = 10$, conforme ilustrado no exemplo da Figura 3.

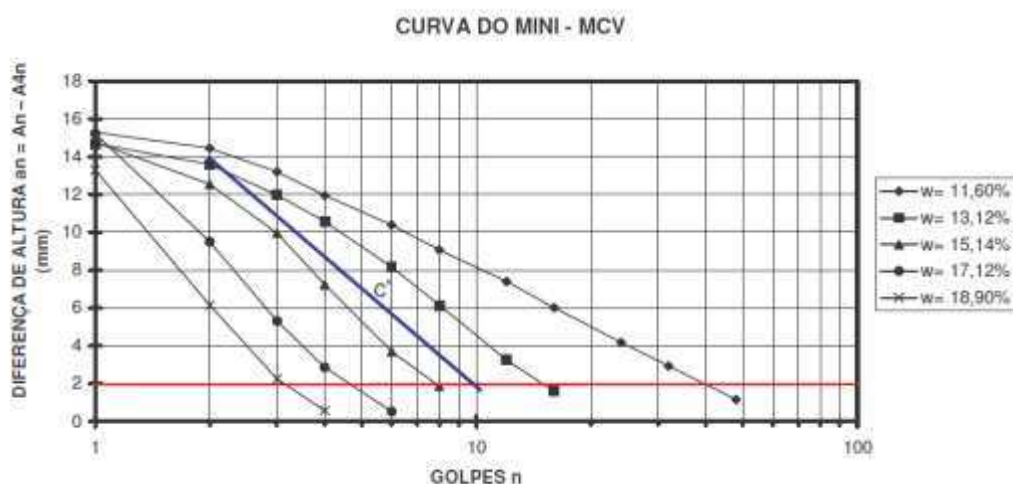


Figura 3 – Exemplo de curva de deformação do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' .
Fonte (FELTEN, 2005).

Segundo Nogami e Villibor (1995), o coeficiente c' correlaciona-se aproximadamente com a granulometria. Assim, um c' elevado (acima de 1,5) caracteriza as argilas e solos argilosos, enquanto que os valores baixos (abaixo de 1,0) caracterizam as areias e os siltes não plásticos ou pouco coesivos. Entretanto, entre 1,0 e 1,5, situam-se solos de vários tipos granulométricos, compreendendo areias siltsosas, areias argilosas, argilas arenosas, argilas siltsosas, etc.

O coeficiente e' é calculado a partir do coeficiente d' , inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes do ensaio mini-MCV,

e da perda de massa por imersão, Pi , porcentagem da massa desagregada em relação a 10 mm extrudados do corpo de prova, quando submetido à imersão em água por, no mínimo, 20 horas após o ensaio de mini-MCV. O parâmetro e' é calculado de acordo com a **Equação 2** (FELTEN, 2005).

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}} \quad \text{Equação 2}$$

em que:

e' – índice de classificação quanto ao comportamento laterítico;

Pi – porcentagem da massa desagregada em relação a 10 mm extrudados do corpo de prova; e

d' – coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes do ensaio de mini-MCV.

Segundo Felten (2005), a determinação do índice e' é de grande importância, pois permite identificar se um solo tem ou não comportamento geotécnico laterítico. A Figura 4 exemplifica uma família de curvas de compactação, em que se obtém o coeficiente d' .



Figura 4 – Exemplo de curvas de compactação do mini-MCV na obtenção do coeficiente d' .
Fonte: (FELTEN, 2005).

Nogami e Villibor (1995), a partir dos dados dispostos naquela época, afirmaram que as argilas lateríticas possuem geralmente d' acima de 20, ao passo que as argilas não lateríticas não atingem esse valor e, frequentemente, possuem valores inferiores a 10.

As areias puras também possuem d' baixo, mas as areias finas argilosas podem ter d' muito elevado, podendo ultrapassar 100. Os solos saprolíticos siltosos, micáceos e/ou caulíníticos possuem geralmente d' muito pequeno, frequentemente menor que 5 (cinco). Esses valores são apresentados, resumidamente, na Tabela 2. Esses dados sugerem a importância do coeficiente d' para classificação dos solos tropicais (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Tabela 2 – Valores típicos do coeficiente d' segundo Nogami e Villibor (1995)

Solo	d'
Argilas lateríticas	> 20
Argilas não lateríticas	$5 < d' < 20$ frequentemente = 10
Saprolíticos	< 5
Areias puras	valores baixos
Areias finas argilosas	≈ 100

Para Nogami e Villibor (2003), apesar da classificação MCT ter completado mais de 30 anos, não se pode afirmar que ela está perfeitamente consolidada. Acrescentam ainda que, regionalmente, há possibilidade de desenvolvimento de classificações geotécnicas mais específicas e mais simples.

2.2.3. Correlações entre os sistemas de classificação geotécnica de solos

Nogami e Villibor (1995) agruparam os solos dos sistemas de classificação USCS e TRB, propondo correlacioná-los à classificação segundo a Metodologia MCT. Essas correlações são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Correlação entre a Metodologia MCT e os sistemas USCS e TRB, segundo Nogami e Villibor (1995)

Classificações geotécnicas tradicionais	Classes e grupos da classificação MCT						
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
USCS	SP SM	MS SC ML	SM, CLML MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
TRB	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5 A-7-5	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

Fonte: Modificado de Nogami e Villibor (1995).

2.3. Materiais e métodos

2.3.1. Área e solos de estudo

A cidade de Viçosa está situada na Zona da Mata Norte mineira e caracteriza-se por estar no meio de um vale montanhoso, com relevo predominantemente acidentado. A cidade possui uma área de 299,418 km², a uma altitude que varia de 690 a 800 metros, tendo as seguintes coordenadas geográficas: Latitude (20°45'14,00" S); Longitude (42°52'54,00" W) (IBGE, 2017).

O município é servido pelas rodovias BR 120, que faz a ligação com a cidade de Ponte Nova e Belo Horizonte, BR 356, com a cidade de Porto Firme, BR 482 com a cidade de Conselheiro Lafaiete, e MG 280, com a cidade de Paula Cândido (IBGE, 2017).

A área de estudo selecionada consiste em um corte rodoviário em perfil de solos residuais, localizado às margens da BR 120, nas proximidades do Aeroporto de Viçosa-MG (Figura 5), com coordenadas geográficas Latitude (20°45'19,80" S), Longitude (42°50'26,30" W) e Altitude (meio do perfil) de aproximadamente 669m.



Figura 5 – Localização do corte rodoviário selecionado para o estudo proposto.

Fonte: (GOOGLE, 2014).

O corte rodoviário em perfil selecionado apresenta três horizontes em níveis distintos de erosão. Essas camadas foram selecionadas para estudo e foram referenciadas por BR120-A, BR120-B, e BR120-C, conforme apresentado na Figura 6.

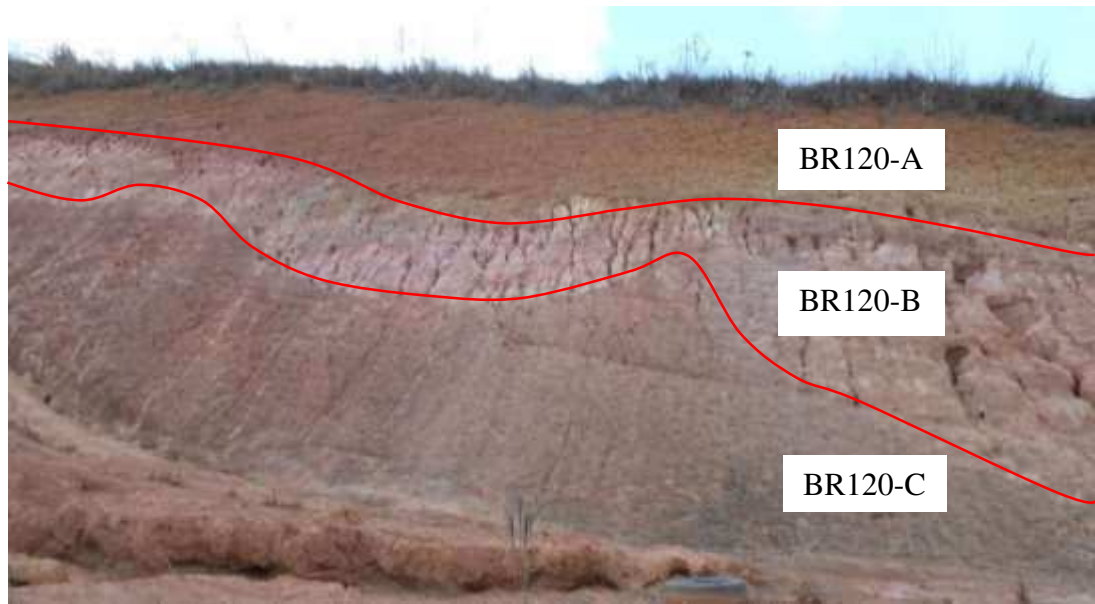


Figura 6 – Corte rodoviário em perfil de solos residuais selecionado para o estudo.

2.3.2. Métodos de ensaios

Após a seleção da área de estudo, procedeu-se à coleta de amostras deformadas e indeformadas dos solos oriundos de cada horizonte pedológico do perfil investigado. A Figura 7 ilustra as etapas do procedimento realizado na coleta das amostras indeformadas de solos, no qual foram retiradas três amostras por camada do perfil.

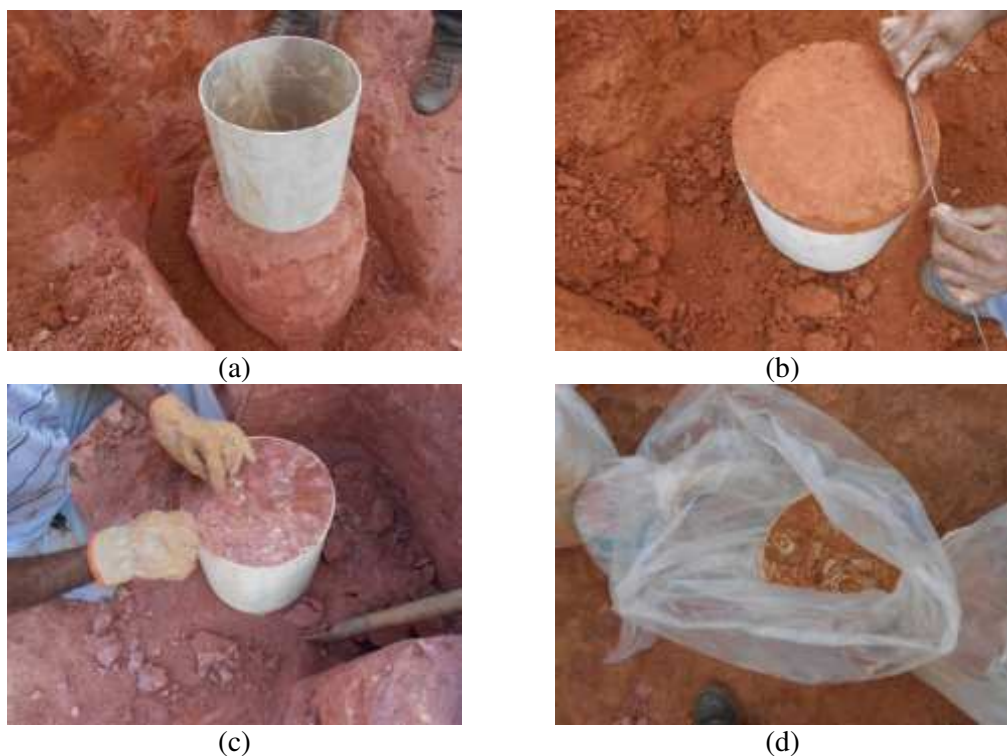


Figura 7 – Etapas do procedimento para coleta das amostras indeformadas utilizando tubos de PVC.

As referidas coletas de amostras dos solos foram realizadas conforme os procedimentos PRO 002 (DNER, 1994a) e PRO 003 (DNER, 1994b), respectivamente. Em seguida, foram adequadamente identificadas, acondicionadas e destinadas ao laboratório de Engenharia Civil e de Mecânica dos Resíduos da UFV para a realização dos procedimentos experimentais descritos a seguir.

2.3.2.1. Ensaios de caracterização geotécnica

Os ensaios geotécnicos para a caracterização tradicional das amostras foram: granulometria conjunta (ABNT, 1984a), limites de Atterberg (ABNT, 1984b) e (ABNT, 1984c) e massa específica dos grãos do solo (ABNT, 1984d).

2.3.2.2. Ensaios de caracterização pela Metodologia MCT

Para a classificação geotécnica das amostras de solos analisadas segundo a Metodologia MCT, foram realizados ensaios para a determinação dos coeficientes empíricos c' e d' . O procedimento para a classificação geotécnica é prescrito pelo método de classificação CLA 259 (DNER, 1996), conforme os ensaios listados a seguir:

- i) Compactação dinâmica mini-MCV, de acordo com o método de ensaio ME 258 (DNER, 1994c);
- ii) Perda de massa por imersão em água, de acordo com o método de ensaio ME 256 (DNER, 1994d).

Conforme preconizado, foram utilizadas amostras deformadas de solo, secas ao ar e passantes na peneira de malha de abertura de 2 mm (peneira #10 mm).

O ensaio de compactação dinâmica mini-MCV consiste na compactação com aplicação de energia variável, no qual os solos, com umidades variadas, foram compactados por números crescentes de golpes em moldes cilíndricos, obtendo-se corpos de prova com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e, aproximadamente, 5,0 cm de altura, até atingir a massa específica aparente máxima. A partir destes ensaios, foi possível obter os coeficientes classificatórios da Metodologia MCT (diretamente c' e d' , e indiretamente e').

A Figura 8 ilustra os acessórios empregados para a realização dos ensaios de compactação mini-MCV.

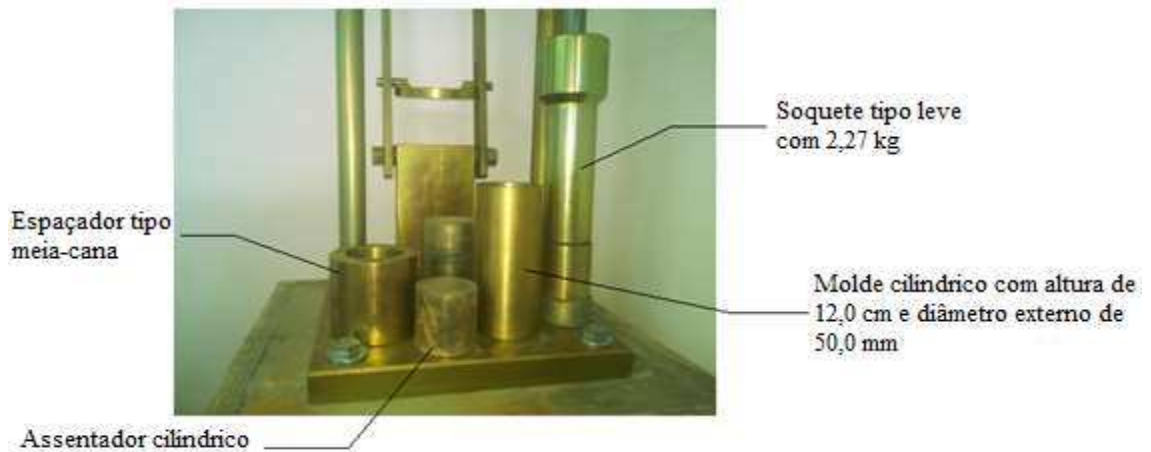


Figura 8 – Acessórios que compõem o equipamento utilizado no ensaio de compactação mini-MCV.

O ensaio de perda de massa por imersão em água, por sua vez, consiste na submersão dos corpos de prova compactados no ensaio de compactação mini-MCV por um período mínimo de 20 horas, no qual se obtém o coeficiente P_i , que em conjunto com o coeficiente d' permite o cálculo do coeficiente classificatório e' . A Figura 9 apresenta os acessórios utilizados para a realização deste ensaio.

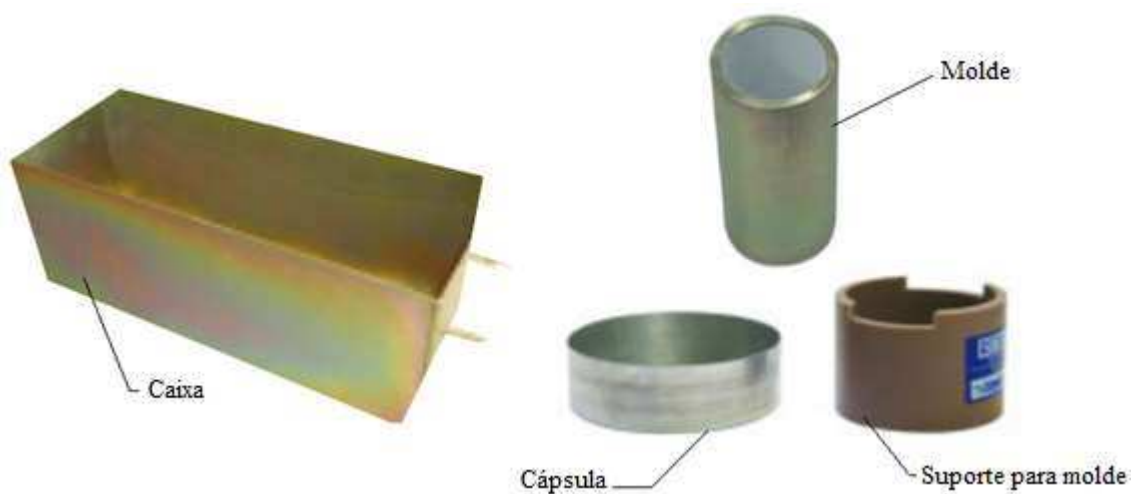


Figura 9 – Acessórios utilizados para a obtenção do coeficiente P_i .

Para a realização do ensaio, deslocou-se o corpo de prova compactado no ensaio mini-MCV do molde com o auxílio de um extrator, de maneira que o topo da amostra ficasse com, aproximadamente, 10 mm de solo extrudado do molde. Em seguida, transferiu-se o molde com o corpo de prova junto ao seu suporte para um recipiente de imersão, posicionando-o horizontalmente sobre o suporte e acima de uma cápsula de alumínio

a fim de receber o solo desagregado durante um período mínimo de 20 horas de imersão (Figura 10).



Figura 10 – Ensaio de perda de massa por imersão: (a) corpos de prova antes da imersão em água; e (b) corpos de prova durante a imersão em água.

Todo o solo desprendido do corpo de prova durante o ensaio de perda de massa por imersão em água foi seco em estufa e pesado para a obtenção dessa massa. Com este valor e a massa de solo correspondente a 10 mm do corpo de prova (obtido a partir da massa específica aparente máxima), determinou-se o coeficiente de perda de massa por imersão P_i conforme a **Equação 3**.

$$P_i = \frac{M_d \times 100}{M_e} \quad \text{Equação 3}$$

em que:

P_i – Perda de massa por imersão, expressa em porcentagem;

M_d – Massa de solo seco da porção desprendida do corpo de prova, em gramas; e

M_e – Massa de solo correspondente a 10 mm do corpo de prova, em gramas.

2.4. Resultados e discussões

2.4.1. Considerações iniciais

Na Tabela 4, encontram-se os resultados dos ensaios de limites de consistência, das análises granulométricas (Figura 11), segundo NBR 6502 (ABNT, 1995), bem como os pesos específicos dos solos estudados.

Tabela 4 – Limites de consistência, análise granulométrica e peso específico dos grãos dos solos estudados

Amostra	Limites de Consistência (%)			Análise Granulométrica (%)					Peso específico dos grãos sólidos γ_s (kN/m ³)
	LL	LP	IP	Areia			Silte	Argila	
				Grossa	Média	Fina			
BR120-A	81	47	34	5	10	11	7	67	27,17
BR120-B	44	24	20	12	18	15	35	20	26,39
BR120-C	70	35	35	1	2	11	57	29	29,78

LL - Limite de Liquidez; LP - Limite de plasticidade; IP - Índice de plasticidade.

A partir dos valores obtidos da análise granulométrica, foi possível classificar as amostras de solo BR120-A como argila, de solo BR120-B como areia siltosa e de solo BR120-C como silte argiloso.

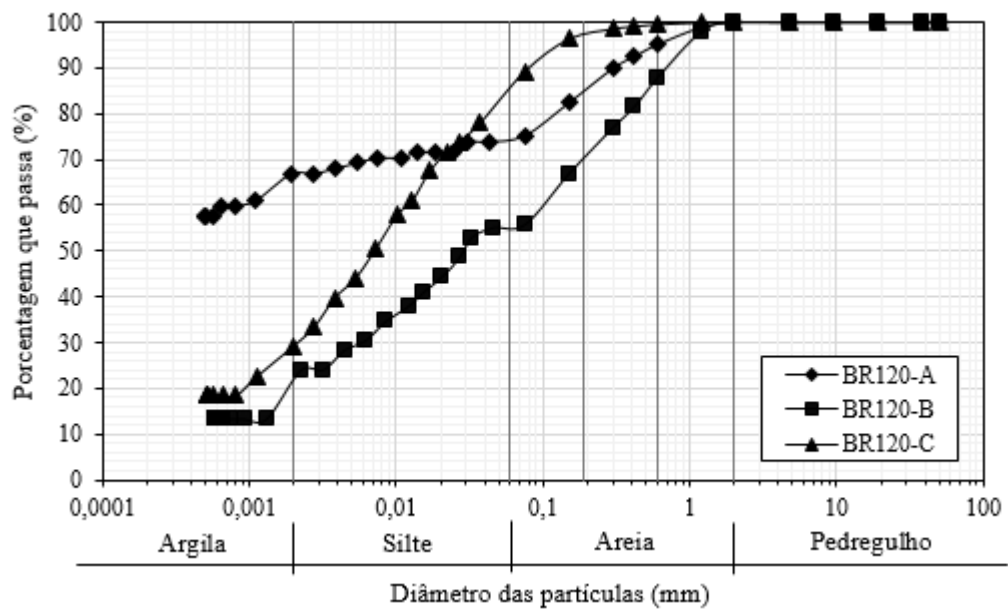


Figura 11 – Curvas granulométricas dos solos estudados segundo escala da NBR 6502 (ABNT, 1995).

2.4.2. Resultados das classificações USCS e TRB

Segundo os sistemas de classificação geotécnica USCS e TRB, os solos estudados são classificados conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas tradicionais USCS e TRB

Amostra	Classificação USCS	Classificação TRB
BR120-A	MH	A-7-5 (20)
BR120-B	CL	A-7-6 (9)
BR120-C	MH	A-7-5 (20)

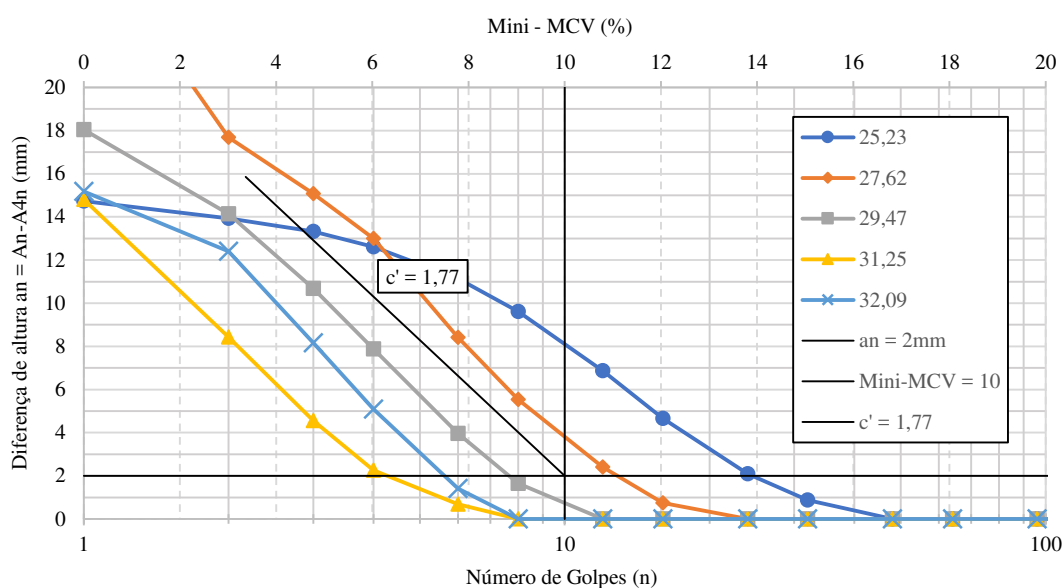
MH - Silte de alta compressibilidade; CL - Argila de baixa compressibilidade.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) apresenta correlações entre as classificações de solos USCS e TRB. Para as amostras BR120-A e BR120-C classificadas como A-7-5 pelo sistema TRB, a classificação obtida pelo sistema USCS foi solo MH, e para a amostra BR120-B, com classificação A-7-6, a classificação no sistema USCS é CL. Portanto, para as amostras analisadas, verifica-se que os resultados encontrados são condizentes com a referida literatura.

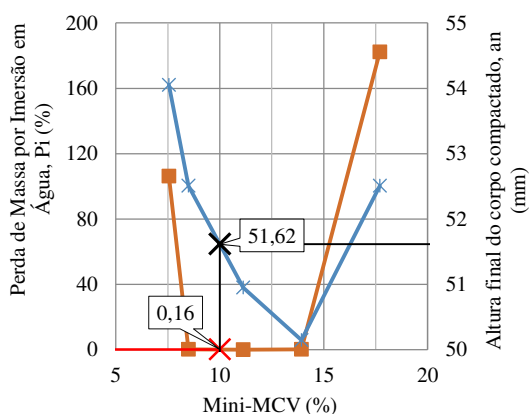
Em função dos índices de plasticidade, os solos BR120-A e BR120-C são caracterizados por terem comportamento semelhante a siltes de alta compressibilidade, e o solo BR120-B de argila de baixa compressibilidade.

2.4.3. Resultados da classificação segundo a Metodologia MCT

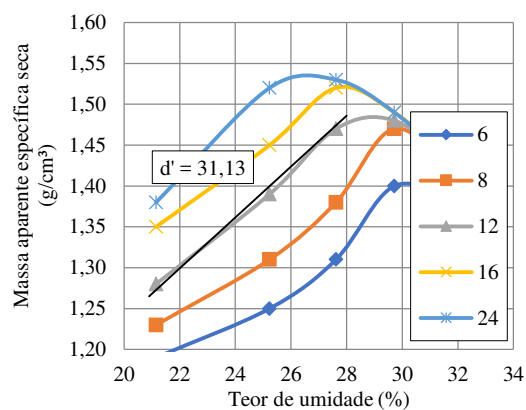
A partir dos ensaios propostos na CLA 259 (DNER, 1996) e com o auxílio das curvas de deformação e compactação do mini-MCV, foi possível determinar os coeficientes classificatórios c' e d' , conforme apresentado nas Figuras Figura 12, Figura 13 e Figura 14.



(a) Curva de deformação do mini-MCV



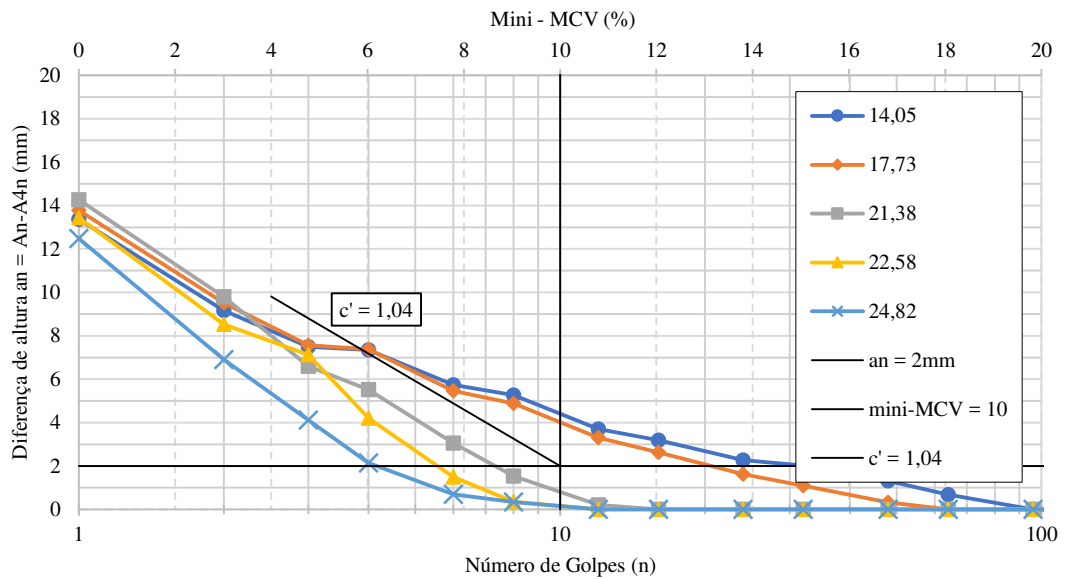
(b) Gráfico mini-MCV x altura final do corpo compactado e perda de massa por imersão



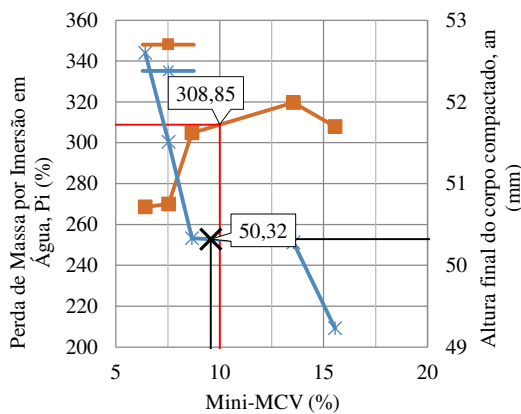
(c) Curva de compactação do mini-MCV

Figura 12 – Curvas do mini-MCV para obtenção dos parâmetros c' (coeficiente de deformabilidade) e d' (coeficiente de compactação) determinantes na classificação segundo a metodologia MCT para o solo BR120-A.

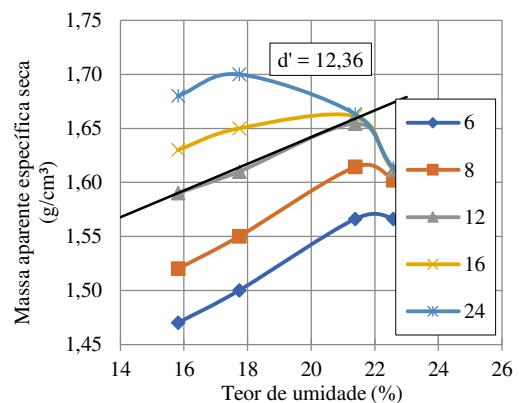
Tomando como base a Figura 12(a), é possível verificar que o valor encontrado para o coeficiente de deformabilidade c' foi de 1,77, valor este maior do que 1,5, que limita e classifica o solo BR120-A, segundo proposto por Nogami e Villibor (1995), em argilas e solos argilosos. Conforme a Figura 12(b), o valor da perda de massa por imersão P_i (%) foi 0,16%. O valor encontrado para o coeficiente de compactação d' foi 31,13, conforme Figura 12(c). Este valor indica que o solo tem comportamento semelhante a argilas lateríticas. Portanto, o esperado é que a amostra de solo BR120-A seja classificado como um solo argiloso laterítico (LG').



(a) Curva de deformação do mini-MCV



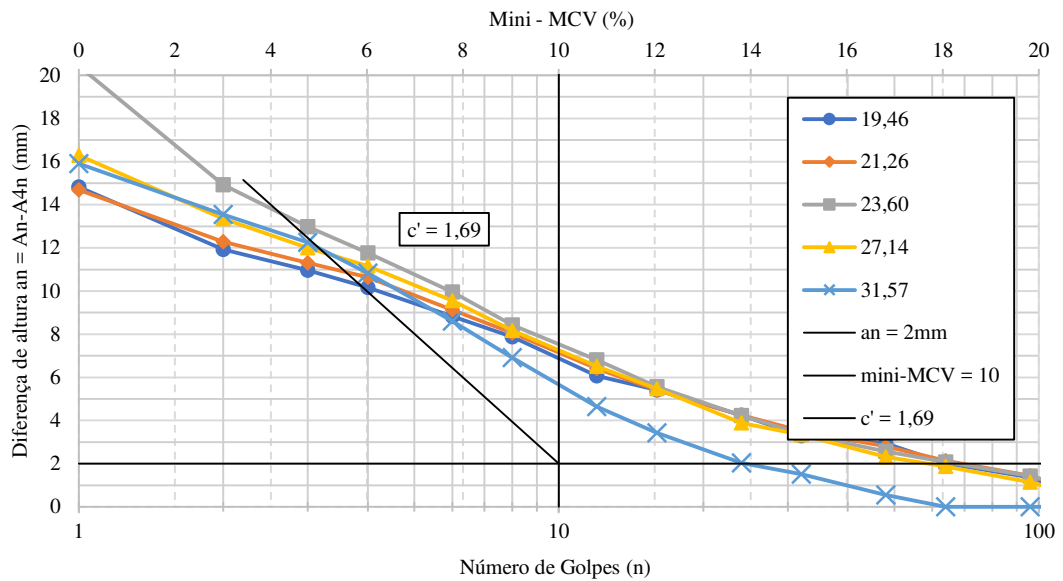
(b) Gráfico mini-MCV x altura final do corpo compactado e perda de massa por imersão



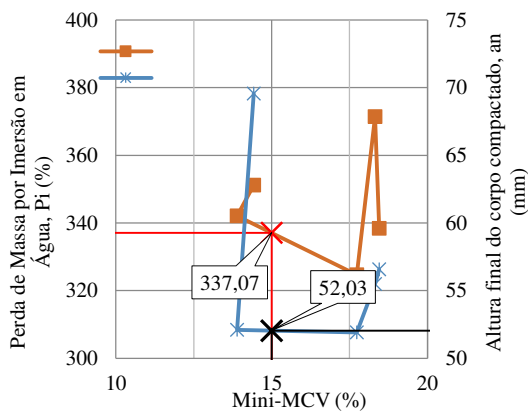
(c) Curva de compactação do mini-MCV

Figura 13 – Curvas do mini-MCV para obtenção dos parâmetros c' (coeficiente de deformabilidade) e d' (coeficiente de compactação) determinantes na classificação segundo a metodologia MCT para o solo BR120-B.

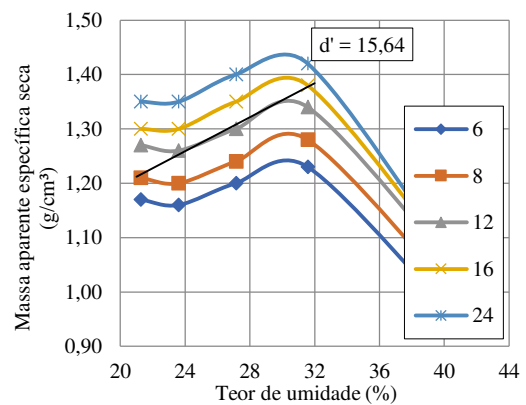
A partir da Figura 13(a), determinou-se o valor de 1,04 para o coeficiente c' do solo BR120-B. Segundo Nogami e Villibor (1995), este valor pode representar diversos solos como: areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas, argilas siltosas, etc. O valor da perda de massa por imersão em água P_i (%), obtido no ensaio, foi de 308,85%, conforme apresentado na Figura 13(b). Quando analisada a Figura 13(c), foi obtido para o coeficiente d' valor igual a 12,36, que, segundo Nogami e Villibor (1995), pode representar argilas ou siltes não lateríticos (NS' ou NG'), ao passo que esses não atingem valores maiores do que 20.



(a) Curva de deformação do mini-MCV



(b) Gráfico mini-MCV x altura final do corpo compactado e perda de massa por imersão



(c) Curva de compactação do mini-MCV

Figura 14 – Curvas do mini-MCV para obtenção dos parâmetros c' (coeficiente de deformabilidade) e d' (coeficiente de compactação) determinantes na classificação segundo a metodologia MCT para o solo BR120-C.

A Figura 14(a) apresenta o valor para c' igual a 1,69 para o solo BR120-C que, segundo estudos de Nogami e Vilibor (1995), representa argilas e solos argilosos. Na Figura 14(b), é apresentado o resultado do ensaio de perda de massa por imersão em água P_i (%) para o solo BR120-C, que foi de 337,07%. Por fim, o valor encontrado para o coeficiente de compactação d' foi 15,64, conforme Figura 14(c). Este valor indica que o solo estudado tem comportamento esperado semelhante a argilas ou siltes não lateríticos (NS' ou NG').

Após conhecer os comportamentos esperados para os solos estudados, com base nos coeficientes c' e d' , determina-se o índice e' que, juntamente com a perda de massa por imersão em água P_i (%), torna possível classificar as amostras quanto à

metodologia MCT. A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros classificatórios obtidos.

Tabela 6 – Parâmetros e classificação geotécnica dos solos estudados segundo a metodologia MCT

Amostra	Coefficiente de deformabilidade c'	Coefficiente d'	Perda de massa por imersão em água P_i (%)	Índice e'	Classificação MCT
BR120-A	1,77	31,13	0,16	0,864	LG'
BR120-B	1,04	12,36	308,85	1,676	NS'
BR120-C	1,69	15,64	337,07	1,669	NG'

LG' - Solo argiloso laterítico; NS' - Solo siltoso não laterítico; NG' - Solo argiloso não laterítico

Os valores obtidos para d' confirmaram a importância deste coeficiente para identificar o comportamento geotécnico laterítico dos solos estudados. O solo BR120-A apresentou o valor de 31,13 para o coeficiente d' , valor este característico de argilas lateríticas. Os solos BR120-B e BR120-C apresentaram valores de 12,36 e 15,64, respectivamente, característicos de solos finos não lateríticos.

A partir dos valores apresentados, foi possível classificar as amostras plotando os valores dos coeficientes c' e e' no ábaco de classificação segundo a metodologia MCT, conforme apresentado na Figura 15.

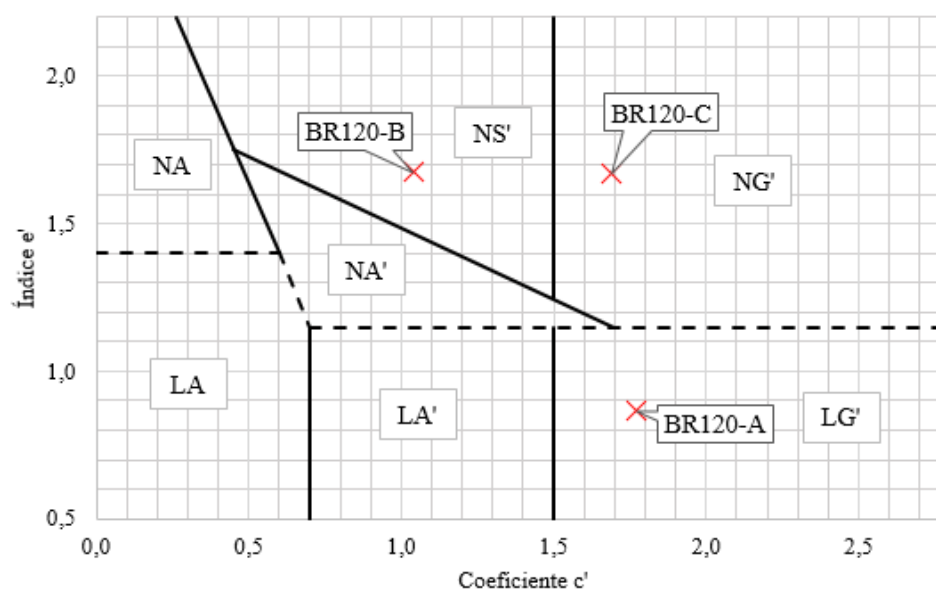


Figura 15 – Ábaco de classificação segundo a metodologia MCT para as amostras estudadas.

Com base nos resultados obtidos nos tópicos anteriores e nas correlações propostas entre a metodologia MCT e os sistemas tradicionais de classificação USCS e TRB, a amostra de solo BR120-A de comportamento argiloso laterítico, LG', apresenta classificação MH e A-7-5, a amostra de solo BR120-B de comportamento siltoso não laterítico, NS', apresenta classificação CL e A-7-6 e a amostra de solo BR120-C de comportamento argiloso não laterítico, NG', apresenta classificação MH e A-7-6. Portanto, para as amostras analisadas, verifica-se que os resultados encontrados são condizentes com o proposto pelos autores.

2.5. Conclusões

As classificações obtidas nesta pesquisa atingiram a expectativa de correlacionar os solos por meio dos sistemas classificatórios TRB, USCS e MCT, em que solos NS' são correlacionados a solos CL e A-7-6, e solos LG' e NG' a solos MH e A-7-5. Apesar dos procedimentos metodológicos para identificação dos solos pelos sistemas classificatórios apresentados serem muitos distintos, ao analisar as propriedades granulométricas desses grupos de solo, concluiu-se que é possível correlacioná-los.

Para Nogami e Villibor (1979), a classificação MCT tem o intuito de preencher uma lacuna deixada pelas classificações tradicionais dos solos e pela isolada abordagem de pedologia e geologia na tentativa de previsão de erosão em solos tropicais. Portanto, destaca-se que prever o comportamento mecânico de solos tropicais através dos sistemas tradicionais TRB e USCS é uma prática perigosa, uma vez que os mesmos se baseiam apenas nas propriedades físicas (granulometria e limites de Atterberg), enquanto que, na classificação MCT, são investigadas as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos.

Logo, apesar das boas respostas quanto às correlações estudadas, um mesmo solo pode ser equiparado a diferentes grupos de classificação. Portanto, deve-se utilizar destas correlações com os devidos cuidados, atentando-se para as peculiaridades dos solos.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2488-09**: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282-15**: Standard Practice for Description and Identification of Soils and Soil – Aggregate Mixtures for Highway Construction Purpose, West Conshohocken, PA, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise Granulométrica, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984a. 15p.

_____. **NBR 6459**: Solo, Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984b. 6p.

_____. **NBR 7180**: Solo, Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 1984c. 6p.

_____. **NBR 6508**: Solo, Determinação da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 1984d. 8p.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

BRANCO, P. M. **O intemperismo e a erosão**. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1313&sid=129>>. Acessado em: 16 nov. 2015.

COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE. **Peculiarities or geotechnical behavior of tropical laterítico and saprolitic soils: progress report**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, São Paulo, 1985. 449p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 002**: Coleta de amostras indeformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994a. 12p.

_____. **PRO 003**: Coleta amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994b. 4p.

_____. **ME 256:** Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994c. 6p.

_____. **ME 258:** Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Mini-MCV, Solos, Métodos. Rio de Janeiro, 1994d. 14p.

_____. **CLA 259:** Classificação de Solos Tropicais para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos-de-prova Compactados em Equipamentos Miniatura. Rio de Janeiro, 1996. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3ª Ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 274p. 2006.

DIAS, I. de M. **Estudo de solos tropicais para uso em pavimentação a partir de ensaios triaxiais estáticos.** 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

FELTEN, D. **Estudo sobre solos arenosos finos lateríticos da planície costeira sul do RS para emprego em pavimentação econômica.** 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio Grande, RS, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociência - Área Territorial Brasileira.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/area.php?nome=vi%E7osa&codigo=&submit.x=0&submit.y=0>>. Acessado em: 5 de janeiro de 2017.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, Krefeld, n.19, p. 196-199, 1979.

_____. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: Simpósio brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, 1981, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: COPPE/ABMS, 1981. p 30-40.

_____. Peculiarities of fine grained stabilized lateritics soils. **TropicalLS'85**, ABMS, p. 327-337, 1985.

_____. Nova Metodologia (MCT) de estudos geotécnicos suas aplicações em rodovias vicinais. In: I SENAVI, 1988, São Paulo, **Anais...**, São Paulo: 1988.

_____. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 204p.

_____. **Modificações recentes na classificação geotécnica MCT**. In: 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Campinas-SP. **Anais...**, Campinas: 2003. p 44-68.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos - Ensaio de laboratório**. Gráfica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1995.

PASTORE, E. L.; FORTES, R. M. Caracterização e classificação de solos. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. (eds), São Paulo: ABGE, 1998. p. 197-210.

PESSOA, F. H. C. **Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PIRES, J. M. M. **Erodibilidade de solos de taludes de corte de rodovias na microrregião de Viçosa - MG**. Projeto de Pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 27p. 2014.

SILVA, T. O. **Estudo de estradas não pavimentadas da malha viária do município de Viçosa - MG**. 2009. 119f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; BELIGNI, M. CINCERRE, J. R. **Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas**. ABPv/Universidade Federal de Uberlândia: São Paulo, 2000. 138p.

3. ANÁLISE DE ERODIBILIDADE EM RELAÇÃO A CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS RESIDUAIS DE PERFIL DE CORTE RODOVIÁRIO

Resumo – A erosão tem sido a causa de sérios danos ambientais que geram impactos econômicos e sociais à população. Portanto, o estudo de fatores condicionantes à erosão, no qual destaca-se a erodibilidade, torna-se fundamental para entender, compreender e prever o comportamento dos solos perante esse processo. Esse capítulo tem como objetivo analisar o comportamento, em relação às classificações geotécnicas quanto à erodibilidade, de três solos pertencentes a um corte rodoviário em perfil de solos residuais no município de Viçosa-MG. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, a fim de classificar os solos segundo os sistemas USCS, TRB e MCT. Além disso, as classificações foram correlacionadas, por meio de indicativo da erodibilidade dos solos, seguindo sistemas hierárquicos dos efeitos erodíveis esperados para cada classe de solo. A partir disso, verificou-se que, para a classificação segundo a Metodologia MCT, a hierarquia proposta obteve bons resultados, no qual, para os solos analisados, os solos de comportamento laterítico são mais resistentes aos processos erosivos do que os solos de comportamento não laterítico. A mesma resposta não foi observada para a proposta de correlações segundo os sistemas USCS e TRB. Logo, o solo BR120-B, classificado como NS', foi considerado mais erodível do que o solo BR120-C, classificado como NG', seguido do solo BR120-A, classificado como LG', conforme observações empíricas de campo.

Palavras-Chave: Sistemas de classificações de solos; Metodologia MCT; Erosão hídrica.

***Abstract** - Erosion has been the cause of serious environmental damage that has both economic and social impacts to the population. Hence, the study of factors which condition erosion, among which erodibility stands out, becomes fundamental to understand and predict how soils behave under these conditions. This chapter aims to analyze the behavior, in relation to geotechnical classifications of erodibility of three soils belonging to a road section in a profile of residual soils found in the city of Viçosa, Minas Gerais. For such, geotechnical characterization tests were carried out to classify soils according to the USCS, TRB and MCT systems. Besides that, the classifications were correlated by means of an erodibility index of the soils, following*

hierarchical systems of the expected erodible effects for each soil class. From this, it was verified that, for the classification according to the MCT Methodology, the proposed hierarchy obtained good results in which, for the soils analyzed, the soils of lateritic behavior are more resistant to the erosive processes than soils of non-lateritic behavior. The same response was not observed for the proposed correlations according to the USCS and TRB systems. Therefore, soil BR120-B, classified as NS', was considered more erodible than soil BR120-C, classified as NG', followed by soil BR120-A, classified as LG', according to empirical field observations.

Keywords: *Soils classification systems, MCT methodology, Water erosion.*

3.1. Introdução

Segundo Bastos (1999), o processo de erosão dos solos possui diversas condicionantes, como o clima, o relevo, a cobertura, a vegetação, a ação antrópica e a natureza do solo, tornando-o um sistema bastante complicado de ser analisado. Assim, constitui uma área de estudo de maior complexidade em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes.

Dentre as condicionantes do processo de erosão, a natureza do solo é o fator que determina a susceptibilidade à erosão dos terrenos, em função da capacidade de infiltração da água e da resistência à desagregação e transporte de partículas. Esse efeito integrado é, então, chamado de erodibilidade do solo (SILVA et al., 2009).

Bastos (1999) cita a erodibilidade como sendo um dos principais fatores condicionantes à erosão dos solos e a define como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo, em especial, a água. Com o tempo, as propriedades do solo podem ser alteradas e, conseqüentemente, a erodibilidade de um solo pode mudar em relação a outro (STEPHAN, 2010). As diferenças relacionadas às propriedades dos solos fazem com que alguns destes sejam mais erodíveis que outros, ainda que variáveis, como chuvas, declividade, cobertura, vegetação e práticas de manejo, sejam as mesmas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990 *apud* STEPHAN, 2010).

Uma forma de avaliar a erodibilidade é procurar correlacioná-la com propriedades geotécnicas do solo, facilmente determinadas e estudadas no meio geotécnico, como a granulometria e a plasticidade (STEPHAN, 2010). A partir desses ensaios, é possível

enquadrar os solos em grupos distintos com características e peculiaridades semelhantes e classificá-los em diferentes sistemas de classificação geotécnica de solos.

Portanto, é importante identificar os solos dentro de um grupo de classificação difundido, comparar e correlacionar as classificações aos comportamentos dos solos quanto à susceptibilidade à erodibilidade, verificando a possibilidade de relacionar os solos erodíveis a determinada classe classificatória.

Os sistemas de classificação mais difundidos no Brasil são o *USCS (Unified Soil Classification System)*, descrito pela norma americana D2488-09a (ASTM, 2009), e a classificação para fins rodoviários da *AASHTO*, o sistema de classificação *TRB (Transportation Research Board)*, descrito pela norma, também americana, D3282-15 (ASTM, 2015). Além destes sistemas, também se destaca a classificação da Metodologia MCT, proposta pelos engenheiros Job Shuji Nogami e Douglas Fadul Villibor e descrito pela norma CLA 259 (DNER, 1996).


3.2. Revisão bibliográfica

3.2.1. Estudo da erodibilidade por meio de classificações dos solos

Entre as principais propriedades dos solos que contribuem para uma maior ou menor resistência à ação erosiva das águas, ou seja, a erodibilidade, Oliveira e Brito (1998) fazem referência à textura, que influi na capacidade de infiltração e absorção da água, interferindo no potencial das chuvas no solo e, também, na maior ou menor coesão entre as partículas. Além de Oliveira e Brito (1998), Couto (2015) menciona que diversos autores enfatizam ser a textura um dos fatores mais relevantes na magnitude dos efeitos erosivos sobre um determinado solo.

Gray e Sotir (1996) mostraram que a classificação USCS sugere um indicativo da erodibilidade do solo, seguindo um sistema hierárquico dos efeitos da textura dos solos, baseando-se na análise granulométrica e em medidas de plasticidade em amostras de solos deformadas, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Hierarquia para medida da erodibilidade segundo o sistema de classificação USCS

Classificação USCS	Descrição do solo	Erodibilidade
GW	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia bem graduados, com poucos ou sem finos	<p style="text-align: center;">Menos erodível</p>  <p style="text-align: center;">Mais erodível</p>
GP	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia mal graduados, com poucos ou sem finos	
SW	Areias e areias pedregulhosas bem graduadas, com poucos ou sem finos	
GM	Cascalho siltoso, misturas de cascalho e areia, areia e silte	
CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada, argilas gordas	
CL	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada ou média, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras	
OL	Siltes orgânicos, siltes e argilas orgânicas de plasticidade baixa	
MH	Siltes inorgânicos, solos arenosos finos ou siltosos micáceos e diatomáceos, solos elásticos	
SC	Areias argilosas	
SM	Areias siltosas	
ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, pó-de-brita, areias finas siltosas ou argilosas e siltes argilosos pouco plásticos	

Fonte: Modificado de Couto (2015).

Segundo Menezes (2010), solos de textura arenosa são normalmente porosos, permitindo rápida infiltração das chuvas e dificultando o escoamento superficial. Ainda segundo a autora, como possuem baixa proporção de partículas argilosas, apresentam maior facilidade para a erosão, que se verifica mesmo em pequenas enxurradas. Porém, em alguns casos, dependendo da estrutura, solos argilosos podem se apresentar altamente porosos e até mais permeáveis que solos arenosos.

Para Pereira (2004), os solos argilosos podem apresentar comportamento erosivo na presença de fração argila, independentemente da ação da chuva. Isso pode acontecer pelo fato desses solos serem constituídos por argilominerais mais ou menos instáveis, de acordo com suas propriedades físicas e químicas.

Conforme Silveira (2002), os solos encontrados em regiões tropicais apresentam peculiaridades do ponto de vista dos seus comportamentos mecânico e hidráulico.

Nestes solos, é importante identificar o tipo e a quantidade do material encontrado na fração argila, visto que tal material, muitas vezes, governa seu comportamento.

Para os solos tropicais, é proposto o uso da classificação segundo a Metodologia MCT. Nogami e Villibor (1995) propuseram o uso da Tabela 8 com as consequentes propriedades derivadas do índice c' que se correlaciona aproximadamente com a granulometria.

Tabela 8 – Propriedades típicas dos solos dos grupos da metodologia MCT

GRANULOMETRIAS TÍPICAS Designações do TI-71 do DER-SP (equivalentes da Mississippi River Commission, USA)			argilas siltes (q,s)	areias siltosas	siltes (k, m) siltes arenosos	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltes argilosos	areias siltosas	areias argilosas	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltes argilosos	
k=caolínico m=micáceo s=sarístico q=quartzoso										
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico				L = Laterítico			
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'	
Propriedades	MINI CBR (%)	sem imersão perda por imersão	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B	
	EXPANSÃO		B	B	E	M, E	B	B	B	
	CONTRAÇÃO		B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E	
	COEF. PERMEABILIDADE		M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B	
	COEF. SORÇÃO		E	B, M	M, E	M, E	B	B	B	
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = Muito elevado (a) E = Elevado (a)			M = Médio (a) B = Baixo (a)				
Utilização	Base de pavimento		n	4°	N	n	2°	1°	3°	
	Reforço do subleito compactado		4°	5°	N	n	2°	1°	3°	
	Subleito compactado		4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°	
	Aterro (corpo) compactado		4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°	
	Proteção à erosão		n	3°	N	n	n	2°	1°	
	Revestimento primário		5°	3°	N	n	4°	1°	2°	
			n = não recomendado							
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas			USCS	SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
			TRB	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5 A-7-5	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

Fonte: DNIT (2006).

Para Pejon (1992), os solos têm características definidas de acordo com a sua classificação MCT. O autor descreve as características de cada solo, em relação à erodibilidade, conforme apresentado a seguir:

- i) LG' – As superfícies expostas são muito resistentes ao amolecimento e à desagregação. Agregados naturais ou resultantes de compactação

- bastante resistentes, proporcionando razoável estabilidade mesmo em estado solto e encharcado;
- ii) LA' – As superfícies expostas são moderadamente resistentes ao amolecimento e à desagregação. Variedades menos coesivas, desmancha-se facilmente quando solto e encharcado, podendo escoar com facilidade pela ação da água corrente;
 - iii) LA – Geralmente desfaz-se quando solto e encharcado, podendo escoar facilmente pela ação da água corrente. De uma maneira geral, predominam condições em que se comporta com grau elevado de erodibilidade;
 - iv) NG' – Geralmente muito resistente à ação da água corrente quando compactado e úmido. Quando solto e seco, submetido ao encharcamento, desagrega intensamente, dando origem a lama;
 - v) NS' – Comportamento variado quando encharcado em estado solto, havendo variedades com agregados finos, resistentes e outros com agregados não resistentes ao encharcamento. Geralmente com grau elevado de erodibilidade em quase todas as circunstâncias;
 - vi) NA' – Quando solto seco, desmancha-se com o encharcamento, podendo liquefazer pela ação de água corrente. De maneira geral, possui erodibilidade difícil de ser prevista apenas pelo conhecimento do grupo MCT; e
 - vii) NA – As superfícies expostas amolecem e desagregam facilmente, quando encharcado em estado solto, podendo liquefazer-se com facilidade pela ação de água corrente, o que o torna muito erodível.

Com base nas características de solos tropicais apresentadas por Pejon (1992), Molinero Júnior (2010) afirma que os solos lateríticos têm comportamento melhor em relação à resistência à erosão quando comparados aos solos não-lateríticos. Desta maneira, espera-se uma certa hierarquia dos solos tropicais quanto à susceptibilidade à erodibilidade. Assim, a sequência decrescente será: NA, NA', NS', NG', LA, LA' e LG'.

3.2.2. Estudos relacionados na literatura

Nos últimos anos, diversos autores têm estudado os processos e comportamentos de solos quanto à erodibilidade, buscando entender e compreender esses processos e suas peculiaridades. Villibor (1986), após estudos, enfatizou que solos dos grupos LA e LA' podem ser potencialmente erodíveis, dependendo das condições locais. Os dos grupos NS' podem apresentar diferentes níveis de erodibilidade (baixa, média ou elevada), dependendo de outros parâmetros intrínsecos (como mineralogia, plasticidade, matéria orgânica, etc.).

Nogami e Villibor (1995) buscaram estimar o potencial de erodibilidade de taludes de corte da região de Porto Alegre - RS, com base na resistência dos agregados e na perda de massa por imersão, obtidos por índices da classificação MCT. Os resultados obtidos em laboratório foram ratificados pelas observações de campo, com os solos erodíveis sendo classificados como NS', NA' e NA, e aqueles resistentes aos processos erosivos pertencentes ao grupo LG'.

Menezes (2010) observou o comportamento dos solos, correlacionando as propriedades intrínsecas dos solos com suas propriedades de infiltração e capacidade de absorção, para diferentes teores de umidade possíveis. Para isso, a autora concentrou o estudo em três regiões das cidades do interior paulista: São Carlos e São Pedro. Com base nos ensaios realizados, determinou-se a boa concordância da erodibilidade do solo com o observado em campo. A amostra da região de São Pedro, classificada como areia argilosa, foi a única que apresentou problemas quanto a erosão.

Molinero Júnior (2010) escolheu para estudo os solos de quatro locais da rodovia BR050, onde verificou existência de processos erosivos. Isso teve o objetivo de identificar, caracterizar e avaliar os fatores intrínsecos do solo que resultaram na evolução das erosões presentes naquela região. Foram coletadas 11 (onze) amostras, sendo elas classificadas em LA, LA', NS' e NA', segundo a metodologia MCT, em ML, SM, SC ou CL, segundo classificação USCS, e em A-7-5, A-4 e A-6, segundo a classificação TRB. Com base nos resultados, o autor concluiu que os pontos de erosão estão localizados principalmente onde predominam os solos do tipo A-4 pela classificação TRB.

Couto (2015) estudou quatro taludes de corte situados na região do Quadrilátero Ferrífero, designados por ITA, VAR, OBR e MRN, com o objetivo de estudar a

erodibilidade de solos por meio da associação a índices de ponderação, relativos a parâmetros físicos, químicos e mineralógicos dos solos, a partir de ensaios padronizados de laboratório. Os solos estudados foram classificados no sistema USCS em MH e ML, no sistema TRB em A-7-5, A-4 ou A-5 e segundo a metodologia MCT em NA, NA', NS' ou LG. Os resultados obtidos da metodologia MCT foram bem expressivos para o estudo, confirmando o caráter mais erodível de solos NA, NA' e NS'.

3.3. Materiais e métodos

3.3.1. Área e solos de estudo

A área de estudo selecionada consiste em um corte rodoviário em perfil de solos residuais localizado às margens da BR 120, nas proximidades do Aeroporto de Viçosa-MG, com coordenadas geográficas de Latitude ($20^{\circ}45'19,80''S$), Longitude ($42^{\circ}50'26,30''W$) e Altitude (meio do perfil) de aproximadamente 669m (GOOGLE, 2014).

O corte rodoviário em perfil selecionado apresenta três horizontes em níveis distintos de erosão. Por isso, essas camadas foram selecionadas para estudo e serão referenciadas por BR120-A, BR120-B, e BR120-C, conforme apresentado na Figura 16.



Figura 16 – Corte rodoviário em perfil de solos residuais selecionado para o estudo.

3.3.2. Métodos

Após a seleção da área de estudo, procedeu-se a coleta de amostras deformadas e indeformadas dos solos oriundos de cada horizonte pedológico do perfil investigado, conforme os procedimentos PRO 002 (DNER, 1994a) e PRO 003 (DNER, 1994b), respectivamente. Em seguida, foram adequadamente identificadas, acondicionadas e destinadas ao laboratório de Engenharia Civil e de Mecânica dos Resíduos da UFV para a realização dos procedimentos experimentais.

3.3.3. Ensaios de caracterização geotécnica

Os ensaios geotécnicos para a caracterização e classificação das amostras foram os que seguem: granulometria conjunta (ABNT, 1984a), limites de Atterberg (ABNT, 1984b) e (ABNT, 1984c), massa específica dos grãos do solo (ABNT, 1984d) e Metodologia MCT.

Para a classificação geotécnica das amostras de solos analisadas segundo a Metodologia MCT, foram realizados ensaios para a determinação dos coeficientes empíricos c' e d' . O procedimento para a classificação geotécnica é prescrito pelo método de classificação CLA 259 (DNER, 1996), conforme os ensaios listados a seguir:

- i) Compactação dinâmica mini-MCV, de acordo com o método de ensaio ME 258 (DNER, 1994c);
- ii) Perda de massa por imersão em água, de acordo com o método de ensaio ME 256 (DNER, 1994d).

Conforme preconizado, foram utilizadas amostras deformadas de solo secas ao ar e passantes na peneira de malha de abertura de 2 mm (peneira #10 mm).

3.4. Resultados e discussões

3.4.1. Considerações iniciais

A partir dos valores obtidos nos ensaios mencionados acima e apresentados na Tabela 9, foi possível classificar as amostras de solo BR120-A como argila, de solo BR120-B como areia siltosa e de solo BR120-C como silte argiloso.

Tabela 9 – Limites de consistência, análise granulométrica e peso específico dos grãos sólidos dos solos estudados

Amostra	Limites de Consistência (%)			Análise Granulométrica (%)					Peso específico dos grãos sólidos γ_s (kN/m ³)
	LL	LP	IP	Areia			Silte	Argila	
				Grossa	Média	Fina			
BR120-A	81	47	34	5	10	11	7	67	27,17
BR120-B	44	24	20	12	18	15	35	20	26,39
BR120-C	70	35	35	1	2	11	57	29	29,78

3.4.2. Classificações USCS e TRB

Segundo os sistemas de classificação geotécnica USCS e TRB, os solos estudados são classificados conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas tradicionais USCS e TRB

Amostra	Classificação textural	Classificação USCS	Classificação TRB
BR120-A	argila	MH	A-7-5 (20)
BR120-B	areia siltosa	CL	A-7-6 (9)
BR120-C	silte argiloso	MH	A-7-5 (20)

MH - Silte de alta compressibilidade; CL - Argila de baixa compressibilidade.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) apresenta correlações entre as classificações de solos USCS e TRB. Para as amostras BR120-A e BR120-C classificadas como A-7-5 pelo sistema TRB, a classificação obtida pelo sistema USCS foi solo MH, e para a amostra BR120-B, com classificação A-7-6, a classificação no sistema USCS é CL. Portanto, para as amostras analisadas, verifica-se que os resultados encontrados são condizentes com a referida literatura.

Em função dos índices de plasticidade, os solos BR120-A e BR120-C são caracterizados por terem comportamento semelhante a siltes de alta compressibilidade, e o solo BR120-B de argila de baixa compressibilidade.

3.4.3. Classificação segundo a Metodologia MCT

A Tabela 11 apresenta os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios de caracterização e classificação segundo a metodologia MCT.

Tabela 11 – Parâmetros e classificação geotécnica dos solos estudados segundo a metodologia MCT

Amostra	Coefficiente de deformabilidade c'	Coefficiente d'	Perda de massa por imersão em água P_i (%)	Índice e'	Classificação MCT
BR120-A	1,77	31,13	0,16	0,864	LG'
BR120-B	1,04	12,36	308,85	1,676	NS'
BR120-C	1,69	15,64	337,07	1,669	NG'

LG' - Solo argiloso laterítico; NS' - Solo siltoso não laterítico; NG' - Solo argiloso não laterítico

3.4.4. Comportamento dos solos perante a erodibilidade segundo as correlações entre as classificações USCS, TRB e MCT

Com base nos resultados obtidos nos tópicos anteriores e nas correlações propostas por Nogami e Villibor (1995) entre a metodologia MCT e os sistemas tradicionais de classificação USCS e TRB, a amostra de solo BR120-A, de comportamento argiloso laterítico, LG', apresenta classificação MH e A-7-5, a amostra de solo BR120-B, de comportamento siltoso não laterítico, NS', apresenta classificação CL e A-7-6, e a amostra de solo BR120-C, de comportamento argiloso não laterítico, NG', apresenta classificação MH e A-7-6. Portanto, para essas amostras analisadas, verifica-se que os resultados encontrados são condizentes com o proposto pelos autores.

O solo BR120-A é classificado pelo USCS como um solo MH, silte de alta compressibilidade. Este solo é o quarto mais erodível na escala de erodibilidade, conforme Gray e Sotir (1996). Para o sistema TRB, foi classificado como A-7-5. Porém, pela metodologia MCT, o solo obteve valores que o classificam como um solo LG' (solo argiloso laterítico), que, segundo Pejon (1992), é o solo menos erodível entre os grupos de solos da metodologia MCT. Esse comportamento dos solos LG' também foi verificado por Nogami e Villibor (1995) e por Couto (2015).

O solo BR120-B foi classificado no sistema USCS como CL, ou seja, argila de baixa plasticidade. Segundo o proposto por Gray e Sotir (1996), este solo é um solo de erodibilidade mediana. O sistema TRB o classifica como A-7-6, enquanto a classificação MCT atribui para este solo um comportamento de solo siltoso não laterítico (NS'), que, de acordo com o estudo realizado por Pejon (1992), apresenta elevado grau de erodibilidade em quase todas as circunstâncias.

Para o solo BR120-C, a classificação atribuída segundo o sistema USCS foi de um solo MH, ou seja, um silte de alta compressibilidade. Segundo Gray e Sotir (1996), esse solo se encontra na mesma posição que o solo BR120-A na escala de erodibilidade e no sistema TRB é classificado como A-7-5. Porém, segundo a metodologia MCT, o solo é classificado como NG', ou seja, possui comportamento de solo siltoso não laterítico, o que, de acordo com Menezes e Pejon (2010), também se refere a um solo de elevado grau de erodibilidade.

Quando observada a realidade encontrada em campo para os solos BR120-B e BR120-C, o proposto por Villibor (1986), que afirma que os solos NS' podem apresentar diferentes níveis de erodibilidade, faz-se verdadeiro. Entretanto, não foi possível verificar essa diferença nas classificações realizadas.

3.5. Conclusões

Os resultados obtidos permitem concluir que a hierarquia proposta por Pejon (1992), quanto à erodibilidade, é aceita para os solos estudados. Em contrapartida, a correlação proposta por Gray e Sotir (1996) não obteve bons resultados, devendo ser evitado o seu uso para solos da região.

Ao analisar os solos estudados, segundo análises empíricas de campo, foi possível concluir que o solo BR120-B é mais erodível do que o solo BR120-C, seguido do solo BR120-A, o menos erodível. Desta forma, confirma-se que os solos lateríticos são mais resistentes à erodibilidade do que os solos não lateríticos, dando importância maior para a classificação segundo a Metodologia MCT do que as classificações ditas tradicionais para estes solos.

Porém, é importante observar que a quantidade de amostras de solos analisadas foi relativamente baixa, não sendo suficiente para representar uma área maior de estudo. Logo, faz-se necessário um estudo de mais solos existentes na região a fim de confirmar tais comportamentos e hierarquia.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2488-09a**: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282-15**: Standard Practice for Description and Identification of Soils and Soil – Aggregate Mixtures for Highway Construction Purpose, West Conshohocken, PA, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise Granulométrica, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984a. 15p.

_____. **NBR 6459**: Solo, Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984b. 6p.

_____. **NBR 7180**: Solo, Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 1984c. 6p.

_____. **NBR 6508**: Solo, Determinação da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 1984d. 8p.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1999.

COUTO, B. O. C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, MG, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 002**: Coleta de amostras indeformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994a. 12p.

_____. **PRO 003**: Coleta amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994b. 4p.

_____. **ME 256**: Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994c. 6p.

_____. **ME 258:** Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Mini-MCV, Solos, Métodos. Rio de Janeiro, 1994d. 14p.

_____. **CLA 259:** Classificação de Solos Tropicais para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos-de-prova Compactados em Equipamentos Miniatura. Rio de Janeiro, 1996. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3ª Ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 274p.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control.** New York: John Wiley and Sons, 1996. 377p.

GOOGLE. **Google Maps Imagens.** Disponível em: <
<https://www.google.com.br/maps/@-20.753855,-42.8390181,2868m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>>. Acessado em: 12 novembro. 2014.

MENEZES, 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.** São Paulo, UNESP, Geociência, v. 29, n. 2, 2010.p. 211-228.

MOLINERO JÚNIOR, J. A. **Estudo geotécnico dos solos de erosões resultantes de intervenções em rodovias.** 2010, 117 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2010.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995. 204p.

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. 586p.

PEJON, O. L. **Mapeamento Geotécnico de Piracicaba (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos de caracterização e de apresentação dos atributos.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 1992. 224p.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão dos materiais da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, 2004. p. 24-105.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, 2009. p. 1811-1820.

SILVEIRA, L. L. L. **Elaboração da carta de suscetibilidade à erosão da Bacia dos Rios Araraquara e Cubatão – SP, Escala 1:50.000.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. 195p.

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen.** 2010.165 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S., FABBRI, G. T. P. **Proteção à erosão em pavimentos de baixo custo.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 21., 1986, Salvador, BA. **Anais...** Rio de Janeiro, ABPv, 1986. v.2. p. 413-430.

4. RELAÇÃO ENTRE A ERODIBILIDADE E PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE SOLOS RESIDUAIS DE CORTE RODOVIÁRIO PRESENTE NA BR120, VIÇOSA-MG

Resumo – As propriedades físicas e mecânicas do solo podem ser alteradas com o tempo e, conseqüentemente, a erodibilidade de um solo pode mudar em relação a outro, ainda que variáveis, como chuvas, declividade, cobertura, vegetação e práticas de manejo, sejam mantidas as mesmas. Desta forma, torna-se importante analisar as propriedades físico-mecânicas dos solos, a fim de verificar a relação que essas possuem com a erodibilidade. O objetivo principal desse capítulo é a avaliação da erodibilidade dos solos BR120-A, BR120-B e BR120-C, pertencentes a um perfil rodoviário de corte presente em Viçosa, MG. A metodologia aplicada consistiu no levantamento bibliográfico, investigações de campo e na etapa de laboratório. Nesta última, foram realizados os ensaios de caracterizações físicas e ensaios de resistência ao cisalhamento direto. Os resultados foram classificados segundo critérios de correlações propostos por autores presentes na literatura. Verificou-se que os limites propostos por Santos e Castro (1967) *apud* Sthepan (2010) e Bastos (1999) obtiveram resultados condizentes com o observado em campo, sendo o solo BR120-A classificado como de baixa erodibilidade, o solo BR120-B classificado como de alta erodibilidade e o solo BR120-C como de baixa a média erodibilidade. Porém, verificou-se que o uso de correlações entre a erodibilidade dos solos e os parâmetros físico-mecânicos e geotécnicos é extremamente comprometido dada a elevada gama de parâmetros que interferem no processo erosivo, não devendo assim, principalmente para solos tropicais, ser considerados isoladamente.

Palavras-Chave: Cisalhamento Direto; Erodibilidade; Índices físicos; Solos residuais.

Abstract - The physical and mechanical properties of the soil may be altered as time passes and, consequently, the erodibility of a soil may change in relation to another, although variables, such as rainfall, declivity, cover, vegetation and management practices, are kept the same. In this way, it is important to analyze the physical-mechanical properties of the soils, in order to verify how these relate to erodibility. The main objective of this chapter is to evaluate the erodibility of soils BR120-A, BR120-B and BR120-C, taken from a road section profile found in Viçosa, Minas

Geraiis. The applied methodology consisted of a bibliographical survey, field investigations and a laboratory stage. In the latter, physical characterization tests and direct shear tests were performed. The results were classified according to criteria of correlations proposed by authors found in the literature. It was verified that the limits proposed by Santos and Castro (1967) apud Sthepan (2010) and Bastos (1999) obtained results consistent with the one observed in the field, being soil BR120-A classified as low erodibility, soil BR120-B classified as high erodibility and soil BR120-C as low to medium erodibility. Yet, it was verified that the use of correlations between soil erodibility and physical-mechanical and geotechnical parameters is seriously compromised given the high range of parameters that interfere in the erosive process; therefore, it should not be considered in isolation, especially for tropical soils.

Keywords: *Direct shear; Physical indexes; Residual Soils; Tropical Soils; Water Erosion.*

4.1. Introdução

Couto (2015) refere-se à erodibilidade como um dos fatores mais importantes na compreensão do fenômeno erosivo dos solos, definindo-a, segundo Bastos (1999), como a maior ou menor facilidade com que as partículas de solo tendem a ser destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo, tal como a água. Além disso, Stephan (2010) cita que a erodibilidade constitui uma característica mecânica que reúne o comportamento dos solos perante o efeito das propriedades que determinam a velocidade de infiltração da água da chuva e a resistência à erosão pelo escoamento superficial.

Desta maneira, entre os fatores que influenciam a erosão, Silva et al. (2009) citam a importância da natureza do solo como aquele que determina a susceptibilidade à erodibilidade. Para Camapum de Carvalho et al. (2006), está diretamente relacionada com as características geológico-geotécnicas do solo, como a estrutura, textura, mineralogia, sucção e teor de matéria orgânica.

Stephan (2010) menciona que, com o tempo, as propriedades do solo podem ser alteradas e, conseqüentemente, a erodibilidade de um solo pode mudar em relação a outro. Para Bertoni e Lombardi Neto (1990) *apud* Stephan (2010), as diferenças

relacionadas às propriedades físicas e mecânicas fazem com que alguns destes solos sejam mais erodíveis que outros, ainda que variáveis, como chuvas, declividade, cobertura, vegetação e práticas de manejo, sejam mantidas as mesmas.

Desta forma, torna-se importante analisar as propriedades físico-mecânicas dos solos, a fim de verificar a relação que essas possuem com a erodibilidade. Uma forma de realizar esta avaliação, é promover a estimativa do potencial à erodibilidade, correlacionando-o com propriedades geotécnicas do solo que sejam fáceis de serem determinadas, como granulometria, índices físicos, parâmetros e resistência ao cisalhamento, permitindo, assim, a equiparação com outros solos.

O presente trabalho tem o objetivo de relacionar propriedades dos solos, representadas por índices físicos e parâmetros de resistência ao cisalhamento direto, com o grau de erodibilidade.

4.2. Revisão bibliográfica

4.2.1. Comportamento do solo quanto à erodibilidade perante suas propriedades físicas e mecânicas

Pejon (1992) relaciona a erodibilidade a dois fatores principais, a destacabilidade e a transportabilidade das partículas do solo, associadas, respectivamente, às forças de natureza superficial e às características físicas, como tamanho e forma das partículas.

Para Menezes e Pejon (2010), a intensidade da erosão irá depender do tipo de solo. Os autores mencionam que os solos finos costumam ser menos erodíveis que os solos grossos, pois a destacabilidade de suas partículas é dificultada pelas forças de coesão existentes. Já para o caso dos solos grossos, eles afirmam que dificilmente existem forças de coesão capazes de evitar a destacabilidade dos grãos, entretanto podem apresentar coesão aparente.

Para Fácio (1991), o comportamento pode ser diferente do esperado, quando analisadas somente as propriedades físicas e mecânicas, já que as características estruturais e mineralógicas também influenciam no aspecto dos solos, o que demonstra que essas propriedades não podem ser únicas na avaliação do comportamento erodível dos solos.

De uma maneira geral, Nogami e Villibor (1995) afirmam que as areias são estáveis em taludes, porém não em lâminas d'água. Já os siltes são instáveis em qualquer

condição. Os autores afirmam que as argilas texturais podem ter comportamentos variados. Como exemplo, citam o caso de uma argila estável num talude natural com agregação desenvolvida e forte, mas que passa a ter instabilidade, quando essa agregação é destruída por gotas de chuva, que possuem elevada energia cinética.

Em solos tropicais, por exemplo, o efeito do umedecimento do solo pode dissolver os agentes cimentantes, reduzindo a coesão e, conseqüentemente, diminuindo as tensões de sucção, causando bruscas reduções de volume e colapso do solo. Portanto, essas propriedades contribuem diretamente para a estabilidade do solo (MENEZES e PEJON, 2010).

Para Pereira (2004), os solos argilosos podem ser constituídos por argilominerais mais ou menos instáveis, de acordo com suas propriedades físicas e químicas. Um comportamento erosivo destes solos pode ser condicionado pela presença da fração argila (fina), independentemente da ação da chuva.

Para Fernandes (2015), solos com maior índice de plasticidade são menos erodíveis. Porém, no caso dos solos tropicais, a presença de oxi-hidróxido de ferro confere uma maior estabilidade e resistência ao solo, tornando-o menos erodível, mesmo apresentando uma baixa plasticidade.

Segundo Oliveira (1998), o modo como se arranjam as partículas de solo também influi na capacidade de infiltração e absorção da água da chuva e na capacidade de arraste de partículas de solo. Logo, a permeabilidade determinará a susceptibilidade do solo à erodibilidade, estando diretamente relacionada com a porosidade. Segundo Mendes (2006), quanto maior a estabilidade dos agregados, maior a permeabilidade do solo e, conseqüentemente, menor o escoamento superficial e o arraste de partículas individuais pela água.

Para Bender (1985) *apud* Fernandes (2015), a erosão é encarada como um problema de resistência ao cisalhamento, dependendo da coesão do solo alterada durante a infiltração da água da chuva. Para o autor, a coesão é o parâmetro mais adequado para avaliar a estabilidade à erosão de solos saprolíticos.

A resistência ao cisalhamento do solo nada mais é do que a máxima tensão cisalhante interna que o solo pode suportar. Conforme apontado por Fernandes (2015), o estudo

da resistência ao cisalhamento visa à determinação da envoltória de ruptura, que é a relação entre as tensões normal e cisalhante no estado de ruptura.

Machado (1998) avaliou a variação da coesão do solo com relação à sucção matricial, confirmando que, quanto maior a sucção matricial do solo, maior é a sua coesão. Quanto ao ângulo de atrito, o autor considerou que seu valor não varia com a sucção matricial do solo.

Bastos, Milititsky e Gehling (2001) mencionam a importância da coesão na interpretação da susceptibilidade à erodibilidade dos solos, confirmando que, para os solos estudados, o parâmetro Δc indica que os solos mais erodíveis apresentam maior redução da coesão com a saturação na condição de fluxo d'água superficial. Além disso, citam que solos altamente coesivos, independentemente do teor de umidade, não são erodíveis, enquanto que aqueles pouco ou não coesivos são altamente erodíveis.

4.2.2. Análise da erodibilidade de solos por meio de critérios de correlações com propriedades geotécnicas dos solos

A seguir, são apresentadas algumas correlações, existentes na literatura, entre as propriedades geotécnicas e o comportamento do solo quanto à erodibilidade:

- i) Meireles (1967) *apud* Stephan (2010) afirma que solos fortemente erodíveis apresentam baixa plasticidade, representada por $LL \leq 21\%$ e $IP \leq 8\%$; o autor também propôs que solos fortemente erodíveis têm % passante na peneira 200 ($\%P_{200}$) $< 20\%$, solos passíveis de forte erosão com $20\% \leq \%P_{200} \leq 40\%$ e solos pouco erodíveis quando $\%P_{200} > 40\%$;
- ii) Santos e Castro (1967) *apud* Stephan (2010) consideram que, quando $LL < 50\%$ e o IP é próximo a 20% , os solos são classificados como de baixa plasticidade e, portanto, altamente erodíveis;
- iii) Fácio (1991) propôs que quanto menor o grau de saturação (S) e maior a sucção, maior a capacidade do solo em absorver água. Com o umedecimento, reduz-se a coesão aparente e o ar presente nos vazios é comprimido, sendo capaz de gerar poropressão positiva, que, dependendo da estrutura do solo, pode desagregá-lo;
- iv) Bastos (1999) classifica os solos como potencialmente erodíveis quando apresentam $IP < 10\%$ e altamente erosíveis quando $IP \leq 5\%$. O autor

também distingue os solos facilmente erodíveis dos solos resistentes à erosão, quando os valores dos índices de vazios (e) são $e > 0,70$ e $e \leq 0,70$ respectivamente;

Em relação à análise granulométrica, classifica os solos como potencialmente erodíveis quando menos que 55% das suas partículas passam pela peneira 200 (%P₂₀₀);

Em termos do parâmetro Δc , Bastos (1999) identifica que solos com média a alta erodibilidade são aqueles que apresentam elevada variação de coesão com a inundação (igual ou superior a 85%). Essa análise permite entender a tendência de crescimento da taxa de erodibilidade e pode ser calculada pela **Equação 4**.

$$\Delta c = \frac{c_{nat} - c_{inu}}{c_{nat}} \quad \text{Equação 4}$$

em que:

Δc – variação de coesão;

c_{nat} – coesão na condição natural; e

c_{inu} – coesão inundada;

- v) Mendes (2006), que segue o proposto pelo DNER (1979), propõe que solos com $LP \leq 32\%$ e $IP \leq 17\%$ apresentam comportamento de bom a regular quanto à resistência à erosão;
- vi) Silva (2009) *apud* Molinero Júnior (2010) afirmou que os solos que têm $LL < 30\%$ e $IP < 15\%$ são altamente erodíveis. Os solos com $30\% < LL < 50\%$ e $15\% < IP < 30\%$ possuem média erodibilidade, e os solos com $LL > 50\%$ e $IP > 30\%$ têm baixa erodibilidade.

4.2.3. Estudos presentes na literatura relacionando os parâmetros físicos e geomecânicos de solos frente à erodibilidade

Para Alcântara (1997), a relação entre o teor de finos, o índice de plasticidade e a erodibilidade é insatisfatória para solos tropicais brasileiros. A principal razão disso, atribuída pelo autor, é a influência de características estruturais e mineralógicas peculiares aos solos lateríticos e saprolíticos, que, segundo Fernandes (2015),

apresentam comportamento geomecânico que não pode ser previsto somente pela granulometria e plasticidade.

Jacinto et al. (2006) consideraram a porosidade e a distribuição dos poros como as propriedades físicas mais relevantes na inter-relação com a erodibilidade. Segundo os autores, os fenômenos de sucção, coesão e permeabilidade são afetados pela estrutura em que se encontram as partículas do solo. Também propuseram a desconsideração do peso específico real dos grãos para os solos tropicais, visto que esse parâmetro é muito variável nesse tipo de solo.

Stephan (2010) propôs correlacionar a erodibilidade dos solos com parâmetros obtidos nos ensaios convencionais de laboratório. A autora comparou os parâmetros físicos com os resultados encontrados no ensaio de Inderbitzen e observou que as correlações em relação aos índices físicos nem sempre foram coerentes. Comportamento igual foi observado quando analisado o parâmetro Δc . A única correlação validada foi quanto ao índice de vazios (e) *versus* perdas de solo proposta por Bastos (1999).

Fernandes (2011) optou por avaliar a erodibilidade por meio da proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999). Porém, como conclusão, a autora citou que o critério baseado nos índices físicos que teve o melhor desempenho para os cinco solos selecionados, classificados como areias argilo-siltosas, argila silto-arenosa e como silte areno-argiloso, foi a porcentagem passante na peneira 200.

Fernandes (2015) cita que a erodibilidade dos solos se altera com eventos pluviométricos, em função da coesão na superfície do solo. Esse comportamento é esperado, devido ao efeito de sucção matricial que sofre uma redução considerável com a saturação do solo. A autora ainda enfatiza que a redução da perda de resistência é devida à poropressão negativa (sucção) e que a ação da água é que provoca a perda de cimentação das partículas e dos agregados. Quanto à saturação dos solos, a ação desagregadora, provocada pelas tensões internas, é devido aos mecanismos de hidratação e desaeração.

Fernandes (2015) verificou ainda, que nas condições de umidade natural e inundada, os valores mais elevados de coesão foram obtidos nos solos que apresentaram maior erodibilidade. Este comportamento foi totalmente contrário ao, até então, apresentado na literatura. Quando comparado a análise por meio de ensaios ditos diretos que melhor representaram a realidade de campo, a autora concluiu que as procedências de

amostras dos horizontes B e C são considerados erodíveis e do horizonte A não erodível. Esses valores foram contraditórios àqueles encontrados quando levado em conta apenas o parâmetro Δc , visto que o horizonte A foi considerado de média a baixa erodibilidade.

4.3. Materiais e métodos

4.3.1. Área e solos de estudo

Escolheu-se um corte rodoviário em perfil de solos residuais, conforme apresentado na Figura 17, localizado às margens da BR 120, nas proximidades do Aeroporto de Viçosa-MG, com coordenadas geográficas: Latitude ($20^{\circ}45'19,80''$ S), Longitude ($42^{\circ}50'26,30''$ W) e Altitude (meio do perfil) de aproximadamente 669m (GOOGLE, 2014).



Figura 17 – Localização do corte rodoviário selecionado para o estudo proposto.

O corte foi selecionado por conter solos pertencentes a um mesmo ambiente de intemperismo, apresentando três horizontes em distintos processos de erosão. Essas camadas de solos foram referenciadas por BR120-A, BR120-B e BR120-C (Figura 18).

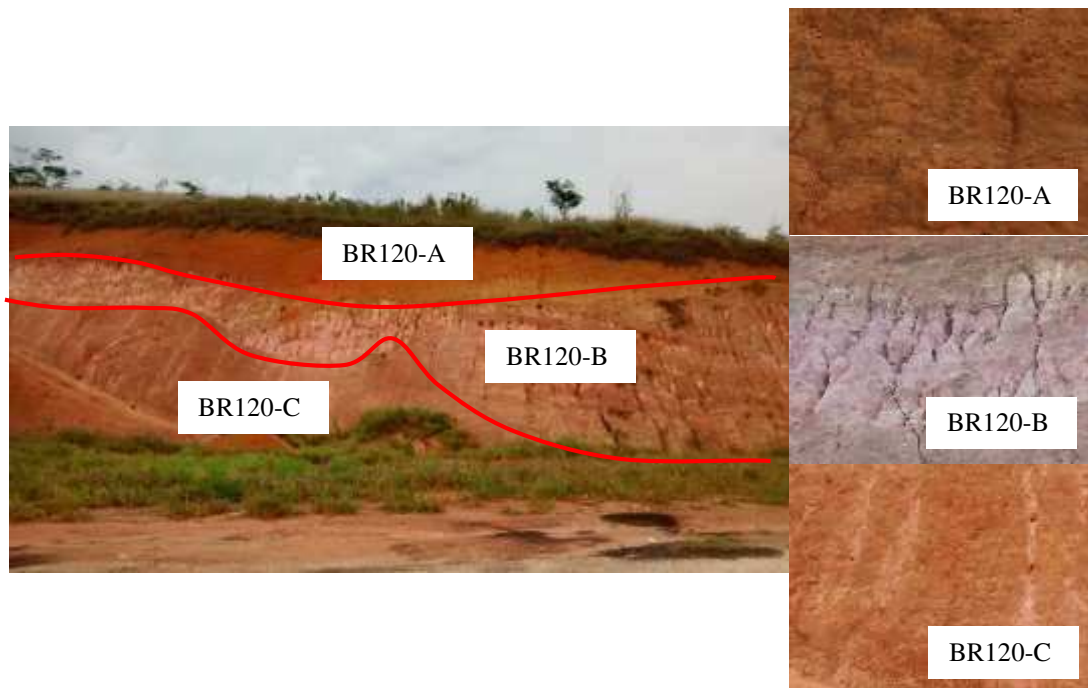


Figura 18 – Perfil de solos residuais estudado.

Em uma análise totalmente empírica deste perfil, no qual foram observados, visualmente, a profundidade e a largura dos sulcos existentes, verificou-se que o solo BR120-A foi o que sofreu menos com o ambiente de intemperismo que lhe é imposto diariamente, atribuindo-lhe, assim, um comportamento baixo quanto à erodibilidade. Quando analisado o solo BR120-B, a resposta é a maior do que os demais solos estudados, classificando-o como um solo de alto potencial erodível. Por fim, o solo BR120-C apresenta comportamento baixo a médio, exibindo pequenos aspectos erodíveis, menores do que os existentes no solo BR120-B e maiores do que o solo BR120-A.

4.3.2. Métodos de ensaio

Para realização dos ensaios, procedeu-se a coleta de amostras indeformadas e deformadas dos solos oriundos de cada horizonte pedológico do perfil investigado, conforme os procedimentos PRO 002 (DNER, 1994a) e PRO 003 (DNER, 1994b), respectivamente. Durante a coleta, teve-se o cuidado de escolher locais que não apresentassem excesso de matéria orgânica e outros materiais que pudessem alterar significativamente os resultados dos ensaios propostos.

4.3.3. Ensaios para a caracterização geotécnica

Para a caracterização geotécnica, foram realizados os seguintes ensaios: (a) análise granulométrica conjunta – NBR 7181 (ABNT, 1984a); (b) limites de Atterberg: limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 1984b) e limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 1984c); e (c) massa específica real dos grãos – NBR 6508 (ABNT, 1984d). As amostras deformadas de solo foram preparadas para os referidos ensaios de acordo com a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 1986).

4.3.4. Ensaios de resistência ao cisalhamento direto

Os ensaios de resistência ao cisalhamento direto foram realizados conforme norma técnica D3080 (ASTM, 1990). Estes ensaios foram realizados em três condições distintas de teores de umidade: (a) secas ao ar (secagem por, no mínimo, 72h); (b) na umidade natural; e (c) inundadas (por, no mínimo, 30min).

Os teores de umidade adotados tiveram a finalidade de simular as condições normais e extremas de campo a que o corte de perfil de solo está sujeito no decorrer dos períodos do ano. Foram analisadas as propriedades de engenharia do solo quando se encontra seco (período com baixa pluviosidade), inundado (período com alta pluviosidade) e no estado natural de teor de umidade.

Pitanga (2002) verificou que, para fins práticos, a velocidade de carregamento, para as magnitudes adotadas na pesquisa, e os solos ensaiados (comuns à mesma região de estudo), não influenciam significativamente a resistência ao cisalhamento direto, o que permite adotar a velocidade constante para o ensaio. Também concluiu que o tempo de inundação não tem influência, significativamente, na resistência ao cisalhamento dos solos.

Desta maneira, os ensaios de cisalhamento direto foram realizados considerando-se as tensões normais de 25, 50 e 100 kPa e cisalhados com a velocidade constante, pré-definida, de 0,142 mm/min, para cada teor de umidade distinto.

4.4. Resultados e discussões

Ensaio laboratoriais, em amostras deformadas e indeformadas, foram realizados para caracterizar e classificar as amostras selecionadas, a fim de avaliar a susceptibilidade de erodibilidade destes solos, a partir de critérios pré-estabelecidos para os índices

físicos e a resistência ao cisalhamento direto. Os resultados obtidos foram discutidos frente aos comportamentos dos solos, verificados visualmente em campo.

4.4.1. Classificações dos solos

Na Tabela 12, apresentam-se os resultados dos ensaios de limites de consistência, das análises granulométricas, dispostas também na Figura 19, bem como os pesos específicos para as amostras deformadas dos solos estudados.

Tabela 12 – Limites de consistência, análise granulométrica e peso específico dos grãos sólidos dos solos estudados

Amostra	Limites de Consistência (%)			Análise Granulométrica (%)					Peso específico dos grãos sólidos γ_s (kN/m ³)
	LL	LP	IP	Areia			Silte	Argila	
				Grossa	Média	Fina			
BR120-A	81	47	34	5	10	11	7	67	27,17
BR120-B	44	24	20	12	18	15	35	20	26,39
BR120-C	70	35	35	1	2	11	57	29	29,78

LL - Limite de Liquidez; LP - Limite de plasticidade; IP - Índice de plasticidade.

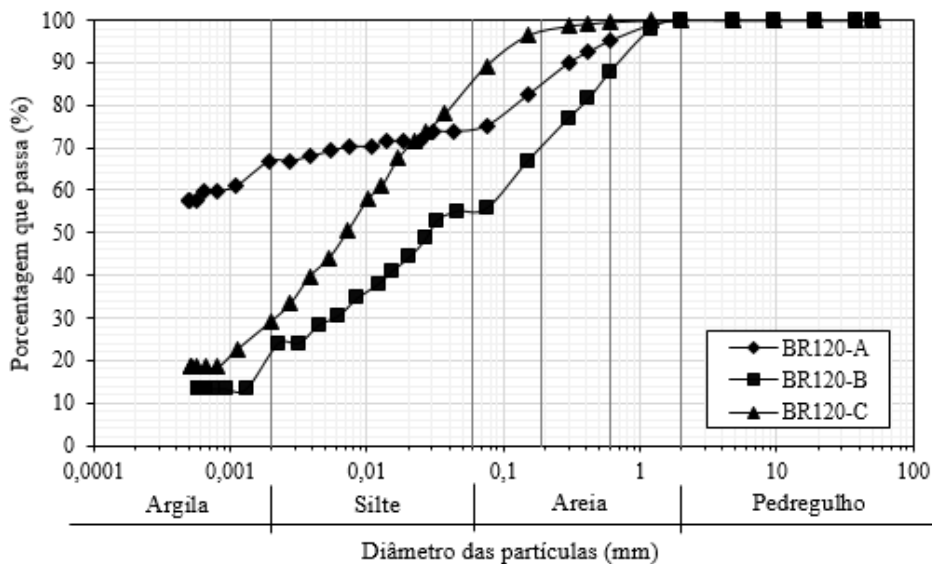


Figura 19 – Curvas granulométricas obtidas para os solos estudados, segundo NBR 6502 (ABNT, 1995).

Segundo os sistemas de classificação geotécnica USCS, TRB e MCT, os solos estudados são classificados conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas USCS, TRB e MCT

Amostra	Classificação textural	Classificação USCS	Classificação TRB	Classificação MCT
BR120-A	argila	MH	A-7-5 (20)	LG'
BR120-B	areia siltosa	CL	A-7-6 (9)	NS'
BR120-C	silte argiloso	MH	A-7-5 (20)	NG'

MH - Silte de alta compressibilidade; CL - Argila de baixa compressibilidade.

4.4.2. Critérios baseados na caracterização física dos solos

Quando analisados os critérios baseados nos limites de consistência, é possível verificar que, para Bastos (1999), os três solos analisados são classificados como de boa resistência quanto à erodibilidade, pois apresentam $IP > 10\%$. Já para Santos e Castro (1967) *apud* Stephan (2010), os solos de baixa plasticidade apresentam alto potencial erodível. Portanto, o solo BR120-B é classificado como de baixa plasticidade, logo, é altamente erodível ($LL < 50\%$ e $IP \approx 20\%$).

Meireles (1967) *apud* Stephan (2010) propôs que os solos fortemente erodíveis são representados pela baixa plasticidade, tendo limites de 21% e 8% para LL e IP, respectivamente. Portanto, segundo o critério apresentado, é esperado o baixo comportamento erodível a todos os solos.

Para Mendes (2006), todos os solos estudados têm comportamento de ruim a regular quanto a resistência à erosão ($LP > 32\%$ e $LL > 17\%$). Quanto aos critérios adotados por Silva (2009) *apud* Molinero Júnior (2010), os solos BR120-A e BR120-C têm baixa erodibilidade e o solo BR120-B possui erodibilidade média.

Logo, pode-se verificar que há certas contradições sobre os comportamentos dos solos esperados segundo os critérios apresentados acima quanto à erodibilidade. O critério que melhor representou os solos em estudos foi o apresentado por Santos e Castro (1967) *apud* Stephan (2010).

Quando o critério analisado passa a ser a análise granulométrica dos solos, tanto para Meireles (1967) *apud* Stephan (2010) quanto para Bastos (1999), os solos BR120-A e BR120-C têm pouco potencial erodível, pois o percentual que passa na peneira #200 é maior que o proposto pelos autores, 40% e 55%, respectivamente. Em contrapartida, o solo BR120-B, segundo Bastos (1999), é potencialmente erodível, pois seu

percentual passante na peneira #200 foi menor que 55%, porém maior que os 40% propostos por Meireles (1967) *apud* Stephan (2010).

Portanto, o critério proposto por Bastos (1999) conseguiu representar, com certa fidelidade, os comportamentos encontrados em campo, entretanto, sem distinguir o grau de erodibilidade entre os solos BR120-A e BR120-C.

Porém, Alcântara (1997) e Fernandes (2015) apontam que a análise da erodibilidade quanto ao teor de finos ou índice de plasticidade são insatisfatórios para solos tropicais, devido à influência de características estruturais e mineralógicas. A fim de exemplificar, Fernandes (2015) cita que a presença de oxi-hidróxido de ferro confere maior estabilidade e resistência ao solo.

4.4.3. Critérios baseados nos índices físicos

Os índices físicos obtidos através de ensaios laboratoriais nas amostras deformadas foram: teor de umidade, peso específico dos sólidos e peso específico natural. Na Tabela 14, apresentam-se os valores médios destes índices físicos dos solos *in situ*, sendo os demais índices determinados por meio de correlações.

Tabela 14 – Valores médios obtidos para os índices físicos dos solos *in situ* estudados

Amostra		w (%)	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	n (%)	S (%)
BR120-A	Média	23,23	15,58	27,17	12,65	1,15	53,46	56,02
	σ	1,10	0,73	0,11	0,50	0,08	1,84	6,54
	cv	1,20	0,53	0,01	0,25	0,01	3,40	42,79
BR120-B	Média	12,60	15,15	26,39	13,46	0,96	49,01	35,29
	σ	0,56	0,32	0,08	0,33	0,05	1,26	0,99
	cv	0,31	0,10	0,01	0,11	0,00	1,60	0,99
BR120-C	Média	26,96	13,70	29,78	10,79	1,52	60,00	49,21
	σ	0,23	0,14	0,14	0,10	0,03	0,34	1,36
	cv	0,05	0,02	0,35	0,02	0,00	0,00	0,35

w - Teor de umidade; γ - Peso específico natural; γ_s - Peso específico dos sólidos; γ_d - Peso específico aparente seco; e - Índice de vazios; n - Porosidade; S - Grau de Saturação; σ - Desvio Padrão; e cv - Coeficiente de Variação.

Quando analisados os critérios relacionados aos índices físicos, em especial, considerando-se o índice de vazios (e), os solos, segundo proposto por Bastos (1999), são classificados como solos facilmente erodíveis, uma vez que os valores foram superiores a 0,70. O critério é deficiente, demonstrando que o índice de vazios é incapaz de identificar a resistência à erosão para os solos lateríticos, classificação em que se

enquadra o solo BR120-A, visto que estes solos, mesmo com índice de vazios elevado, apresentam estabilidade frente à erosão.

O solo BR120-B, dentre aqueles ensaiados, é o que apresenta menor grau de saturação, valor igual a 34,25%, portanto, segundo Fácio (1991), tem o maior potencial erodível entre os três solos. Mas o critério também é deficiente, já que o grau de saturação é facilmente influenciável pelo ganho de umidade do solo. Eventos pluviométricos ocorridos previamente à data de amostragem dos solos poderiam ter alterado os índices calculados, classificando erroneamente o solo BR120-B como resistente à erosão, o que de fato não ocorre, em acordo com o comportamento visualizado em campo.

4.4.4. Critérios baseados na resistência ao cisalhamento

A seguir, são apresentadas as influências do teor de umidade e do grau de saturação da amostra nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para os três solos objetos de estudo deste trabalho, analisando-os quanto a susceptibilidade à erodibilidade

4.4.4.1 Solo BR120-A

Apresenta-se, na Tabela 15, um quadro resumo dos valores individuais e médios do teor de umidade e do grau de saturação para o solo BR120-A, considerando-se as tensões normais aplicadas.

Tabela 15 – Resultados de índices físicos de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras do solo BR120-A nos variados estados de umidade estudados

Amostra	Tensão normal (kPa)	Natural			Inundada			Seca ao ar			
		w (%)	S (%)	τ (kPa)	w (%)	S (%)	τ (kPa)	w (%)	S (%)	τ (kPa)	
BR120-A	25,0	23,68	59,6	109	62,78	99,8	19	5,28	11,6	109	
		24,14	56,1	61	63,11	100,0	21	5,04	11,2	101	
		24,06	56,7	92	63,12	100,0	22	-			
	50,0	23,68	55,1	132	62,32	99,5	43	4,85	10,3	107	
		24,18	54,8	104	59,99	98,0	50	5,06	12,3	109	
		23,58	53,5	128	61,05	98,7	31	-			
	100,0	23,59	66,2	251	62,56	99,7	73	5,49	12,1	155	
		23,47	53,7	167	63,02	100,0	59	5,57	12,7	191	
		24,14	53,7	169	62,34	99,5	61	-			
		Média	23,84	56,6	-	62,25	99,5	-	5,22	11,7	-
		Desvio Padrão	0,29	4,1	-	1,06	0,7	-	0,28	0,9	-

A Figura 20 apresenta as envoltórias de ruptura resultantes, considerando-se as respectivas envoltórias para cada estado de umidade individualmente.

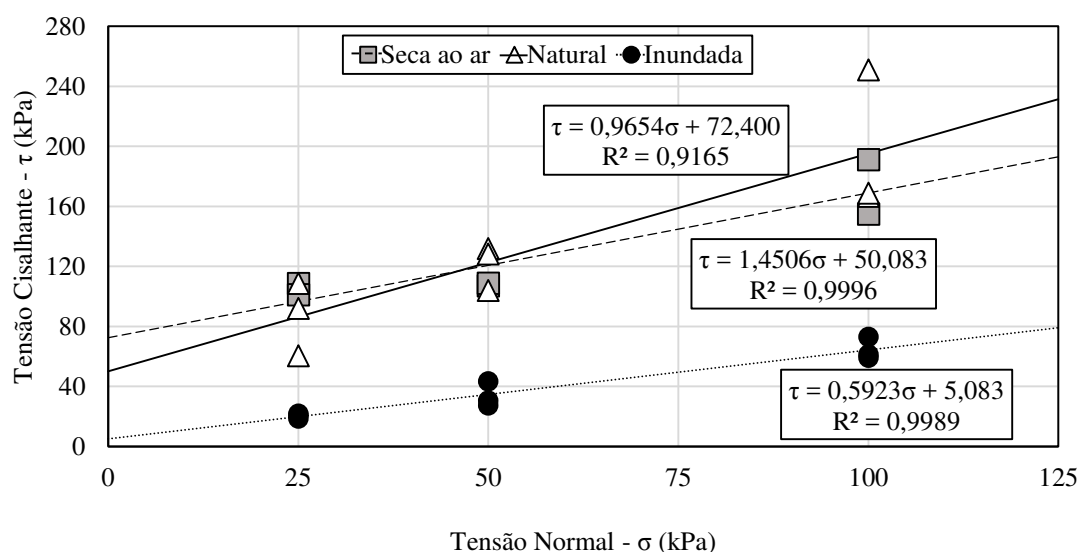


Figura 20 – Envoltórias de rupturas do solo BR120-A para as distintas condições de umidade.

É possível observar que, com a redução do teor de umidade e do grau de saturação, as tensões de ruptura no ensaio de cisalhamento direto se mantiveram, praticamente, com mesmo comportamento, quando comparado os resultados nas condições de umidade no estado seca ao ar e natural. Em contrapartida, na condição inundada, a coesão reduziu bruscamente, praticamente anulando o efeito de sucção, o que faz com que a resistência passe a ser determinada, predominantemente, pelo atrito entre suas partículas.

4.4.4.2 Solo BR120-B

Na Tabela 16, apresentam-se os valores individuais e médios dos teores de umidade e dos graus de saturação, obtidas para o solo BR120-B, considerando-se as tensões normais aplicadas.

Tabela 16 – Resultados de índices físicos de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras do solo BR120-B nos variados teores de umidade estudados

Amostra	Tensão normal (kPa)	Natural			Inundada			Seca ao ar		
		w (%)	S (%)	τ (kPa)	w (%)	S (%)	τ (kPa)	w (%)	S (%)	τ (kPa)
BR120-B	25,0	12,30	35,4	54	34,15	68,2	18	4,36	8,2	55
		12,50	35,1	43	30,09	63,2	17	4,38	8,0	83
		12,41	34,3	40	32,97	66,8	12	4,31	7,9	69
	50,0	10,33	32,0	47	33,32	67,2	30	4,23	8,3	75
		12,85	36,7	78	35,02	69,2	28	4,38	8,0	112
		11,85	36,6	88	34,71	68,8	35	4,39	8,0	103
	100,0	13,32	40,0	115	33,04	66,9	31	4,42	9,2	145
		13,01	37,9	139	34,36	68,4	72	4,54	8,8	155
		13,17	39,9	142	33,31	67,2	14	4,44	8,7	149
	Média	12,42	36,4	-	33,44	67,32	-	4,38	8,3	-
Desvio Padrão	0,91	2,6	-	1,46	1,8	-	0,09	0,5	-	

A Figura 21 apresenta as envoltórias de ruptura resultantes, considerando-se as respectivas envoltórias de cada estado de umidade individualmente.

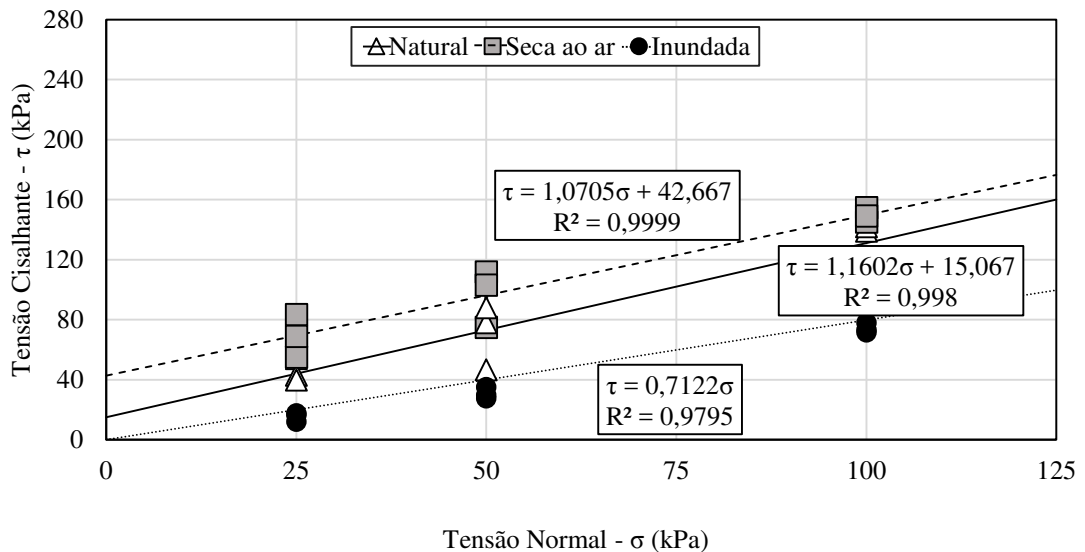


Figura 21 – Envoltórias de rupturas do solo BR120-B para as distintas condições de umidade.

Analisando a Figura 21, observa-se que, com a redução do teor de umidade e do grau de saturação, houve ganho de resistência ao cisalhamento direto, obtendo-se perda da coesão dos corpos de prova. O valor nulo da coesão na condição inundada indica uma maior predisposição à erodibilidade. Este comportamento é explicado pela baixa

sucção existente nos solos quando elevado o teor de umidade, provocando a perda de cimentação das partículas e agregados, levando o solo ao colapso.

4.4.4.3 Solo BR120-C

A Tabela 17 apresenta os valores individuais e médios dos teores de umidade e dos graus de saturação, obtidos para o solo BR120-C, considerando-se as tensões normais aplicadas.

Tabela 17 – Resultados de índices físicos de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras do solo BR120-C nos variados teores de umidade estudados

Amostra	Tensão normal (kPa)	Natural			Inundada			Seca ao ar			
		w (%)	S (%)	τ (kPa)	w (%)	S (%)	τ (kPa)	w (%)	S (%)	τ (kPa)	
BR120-C	25,0	28,65	49,9	80	56,98	71,6	17	1,15	2,8	70	
		26,70	46,7	88	56,02	71,0	29	1,12	2,9	52	
		26,42	44,9	87	55,12	70,4	26	1,16	2,9	53	
	50,0	29,08	51,2	99	55,77	70,8	36	1,13	3,2	46	
		27,13	45,9	97	56,34	71,2	45	1,11	2,9	58	
		27,04	45,6	94	50,12	67,1	43	1,14	3,0	85	
	100,0	28,14	44,6	112	54,98	70,3	69	1,18	3,3	114	
		26,68	45,1	127	55,04	70,4	66	1,15	3,0	147	
		26,73	45,0	136	56,39	71,2	75	1,19	3,1	138	
		Média	27,40	46,5	-	55,20	70,4	-	1,15	3,0	-
		Desvio Padrão	0,97	2,4	-	2,02	1,3	-	0,03	0,2	-

Na Figura 22, apresentam-se as envoltórias de ruptura resultantes.

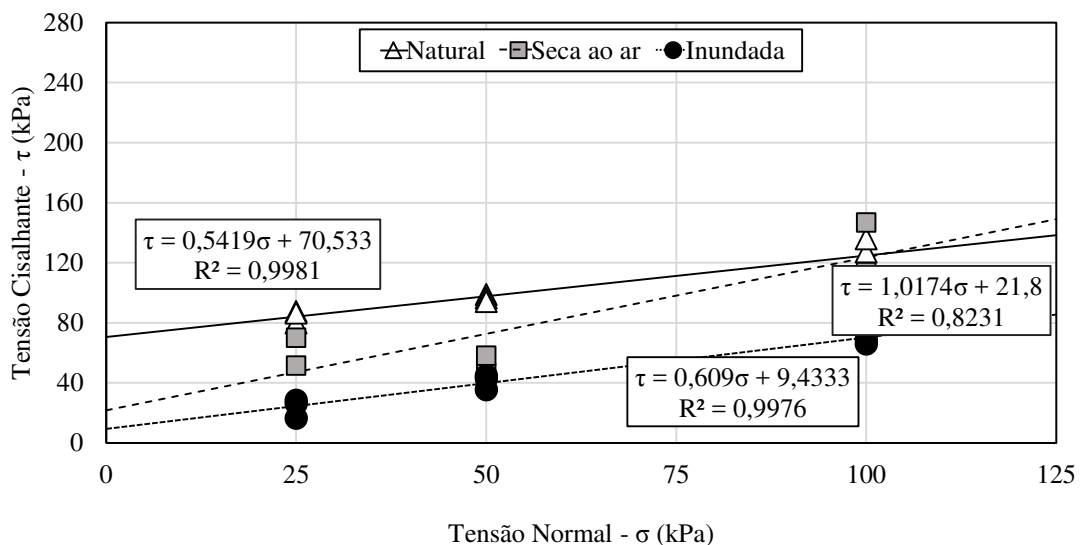


Figura 22 – Envoltórias de rupturas do solo BR120-C para as distintas condições de umidade.

No caminho inverso dos solos BR120-A e BR120-B, a amostra BR120-C, na condição natural, apresentou coesão maior do que quando no estado seco, no qual o grau de saturação é menor, não podendo, assim, afirmar que a redução da coesão está diretamente ligada à redução do grau de saturação.

Após análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as distintas condições de umidade analisadas, para todos os três solos, têm-se, na Tabela 18, resumidamente, os valores médios de resistência determinados.

Tabela 18 – Resultados médios obtidos nos ensaios de cisalhamento direto nas condições de umidade natural, seca ao ar e inundada para a tensão cisalhante máxima

Amostra	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)		
		Condição natural	Condição inundada	Condição seca ao ar
BR120-A	25,0	87	21	105
	50,0	121	34	108
	100,0	196	65	173
BR120-B	25,0	46	15	69
	50,0	71	31	97
	100,0	132	74	150
BR120-C	25,0	85	24	61
	50,0	97	41	52
	100,0	125	70	130

Analisando os valores e as envoltórias de rupturas, observa-se que a inundação reduz bruscamente os picos de tensão cisalhante máxima para todos os níveis de tensão aplicados nos ensaios.

4.4.4.4 Erodibilidade dos solos segundo os dados de cisalhamento direto

Na Tabela 19, apresenta-se os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) obtidos nas envoltórias, além do parâmetro Δc , proposto por Bastos (1999).

Tabela 19 – Parâmetros de resistência do solo obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto para os distintos solos e condições de umidade estudadas

Amostra	Condição natural		Condição seca ao ar		Condição inundada		Δc (%)
	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	
BR120-A	55	50	44	72	31	5	91
BR120-B	49	15	47	43	39	0	100
BR120-C	29	71	47	23	31	9	69

A análise em termos do parâmetro Δc , conforme **Equação 4**, segundo Bastos (1999), permite entender a tendência de crescimento da taxa de erodibilidade com a variação da coesão. Tomando como base este parâmetro e os valores apresentados na Tabela 19, têm-se os valores de Δc de 91%, 100% e 69% para os solos BR120-A, BR120-B e BR120-C, respectivamente. Logo, o solo BR120-C pode ser identificado como solo de baixa erodibilidade, uma vez que é o único a apresentar valor inferior a 85% para a variação da coesão Δc .

Este critério contradiz a observação realizada em campo, na qual foi atribuída ao solo BR120-A a característica de boa resistência à erodibilidade, comportamento esse não obtido pelo critério de Bastos (1999). Segundo Fernandes (2015), isso ocorre devido à redução da perda de resistência, originada em função da sucção e da ação da água, que provocam a perda de cimentação interpartículas e agregados.

4.5. Conclusões

Entre os critérios avaliados, verificou-se que os limites propostos por Santos e Castro (1967) *apud* Sthepan (2010), para análise quanto ao índice de plasticidade, e Bastos (1999), para análise quanto a porcentagem passante na peneira de número duzentos, obtiveram resultados condizentes com o observado empiricamente em campo.

Para estes critérios, o solo BR120-A foi classificado como de comportamento pouco erodível; já o solo BR120-B foi classificado como de baixa resistência a erodibilidade; o solo BR120-C, como um solo de baixa a média erodibilidade.

Em relação ao parâmetro Δc , verificou-se que o teor de umidade condicionado às amostras naturais tem influência nos resultados obtidos. Caso as amostras sejam coletadas após períodos chuvosos, essas podem apresentar teores de umidade elevados, impactando na classificação da erodibilidade, podendo classificar solos

erodíveis como não erodíveis. Sendo assim, para que o parâmetro seja utilizado por outros estudos, é importante que sejam verificadas as condições do solo durante a retirada das amostras.

Porém, a abordagem utilizada no estudo de análises da erodibilidade dos solos por meio de critérios de correlações com propriedades geotécnicas, físicas e mecânicas dos solos mostrou que, em geral, os índices físicos e o parâmetro de resistência, considerados isoladamente, não constituem parâmetros definidores das características de erodibilidade de um dado solo, devendo, portanto, ser inserida num contexto maior de fatores que influenciam na natureza e na magnitude dos processos erosivos.

Portanto, foi possível verificar que o uso de correlações entre a erodibilidade dos solos e os parâmetros físico-mecânicos e geotécnicos é extremamente comprometido, dada a elevada gama de parâmetros que interferem no processo erosivo. Os comportamentos e os resultados obtidos podem ser verificados por meio de ensaios diretos (ensaio de Inderbitzen, por exemplo), que simulam a ação do escoamento d'água sobre a superfície do solo.

Referências Bibliográficas

ALCÂNTARA, M. A. T. **Aspetos geotécnicos da erodibilidade de solos**. São Carlos-SP, 1997. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080-90**: Standart test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. Philadelphia, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise Granulométrica, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984a. 15p.

_____. **NBR 6459**: Solo, Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984b. 6p.

_____. **NBR 7180**: Solo, Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 1984c. 6p.

_____. **NBR 6508**: Solo, Determinação da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 1984d. 8p.

_____. **NBR 6457**: Amostra de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1999.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Y. Y. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, RS, n.2, 2001. p. 9-18.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁCIO, J. A.; MOTTA, N.; FRANCISCO, R. A. Processos erosivos. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p 39-91.

COUTO, B. O. C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, MG, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisas. **Recomendações para proteção de taludes contra erosão**. Rio de Janeiro: IPR/DNER, 1979. 59p.

_____. **PRO 002**: Coleta de amostras indeformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994a. 12p.

_____. **PRO 003**: Coleta amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994b. 4p.

FACIO, J. A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. 107f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Brasília, Brasília, 1991.

FERNANDES, J, A. **Estudo da Erodibilidade de Solos e Rochas de uma Voçoroca de São Valetin - RS**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2011.

FERNANDES, L. P. **Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria - RS**. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2015.

GOOGLE. **Google Maps Imagens**. Disponível em: <
<https://www.google.com.br/maps/@-20.753855,-42.8390181,2868m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>>. Acessado em: 12 novembro. 2014.

JACINTHO, E. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F. B. F.; SANTOS, 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**. Brasília, Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p. 93-156.

MACHADO, S. L. **Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998. 361 p.

MENDES, C. A. R. **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim - RJ**. 2006, 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MENEZES, 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.** São Paulo, UNESP, Geociência, v. 29, n. 2, 2010.p. 211-228.

MOLINERO JÚNIOR, J. A. **Estudo geotécnico dos solos de erosões resultantes de intervenções em rodovias.** 2010, 117 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2010.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995. 204p.

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. 586p.

PEJON, O. L. **Mapeamento Geotécnico de Piracicaba (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos de caracterização e de apresentação dos atributos.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 1992. 224p.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão dos materiais da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada.** Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, 2004. p. 24-105.

PITANGA, H. N. **Influência da velocidade de carregamento e do tempo de inundação na resistência ao cisalhamento de solos estruturados.** 2002, 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2002.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, 2009. p. 1811-1820.

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen**. 2010.165 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE DE SOLOS RESIDUAIS ATRAVÉS DE MÉTODOS DIRETO E INDIRETOS

Resumo – Este capítulo aborda um estudo da erodibilidade de três solos presentes em um perfil de corte rodoviário, pertencente às margens da BR120, no município de Viçosa, MG. O objetivo principal desta pesquisa foi analisar o potencial à erodibilidade desses solos, por meio de métodos diretos e indiretos. Para avaliar de forma indireta, utilizou-se o ensaio de desagregação e o critério de erodibilidade, obtido através dos ensaios de perda de massa por imersão em água modificado e infiltrabilidade, segundo a Metodologia MCT. Para a forma direta, a análise foi realizada através do ensaio de Inderbitzen. Observou-se que o ensaio de desagregação possui bons resultados quanto ao comportamento observado *in situ*. A Metodologia MCT também apresentou boa relação de correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos nos locais estudados. Como desvantagem ao critério de erodibilidade segundo a Metodologia MCT e ao ensaio de desagregação, verificou-se a dificuldade na determinação da classificação para níveis intermediários de erodibilidade. Já a avaliação direta foi que melhor representou as características observadas empiricamente em campo. Com as taxas encontradas, obteve-se que o solo BR120-B, altamente erodível, apresentou menor resistência, quando comparado hierarquicamente aos solos BR120-A e BR120-C, respectivamente.

Palavras-Chave: Inderbitzen; Ensaio de Desagregação; Erodibilidade; Metodologia MCT.

Abstract - This chapter discusses a study of erodibility in three soils found in a road section profile, found alongside BR120, in the city of Viçosa, Minas Gerais. The main objective of this research was to analyze the potential erodibility of these soils by means of direct and indirect methods. In order to evaluate indirectly, we used a slaking test and the erodibility criterion, obtained using the modified mass loss tests by water immersion and infiltrability tests, according to the MCT Methodology. For the direct form, the analysis was carried out by using the Inderbitzen test. It was observed that the slaking test yields good results when it comes to the behavior observed in situ. The MCT methodology also showed a good correlation between the results of the tests and

the behavior of the soils in the sites studied. As a disadvantage to the erodibility criterion according to the MCT Methodology and to the slaking test, it was difficult to determine the classification for intermediate levels of erodibility. The direct evaluation was the one that best represented the characteristics observed empirically in the field. With the rates found, we were able to determine that BR120-B soil, which is highly erodible, presented lower resistance when compared to BR120-A and BR120-C soils respectively.

Keywords: *Inderbitzen; Slaking Test; MCT Methodology; Water Erosion; Tropical Soils; Residual Soils.*

5.1. Introdução

O processo erosivo hídrico tem origem no momento em que a gota de água se choca com o solo, destacando as partículas sólidas que se encontram sob a superfície. A medida que a precipitação ocorre, os vazios do solo vão sendo preenchidos com água até o momento em que o solo esteja completamente saturado, ou quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração (COUTO, 2015).

Bastos (1999) explica que, a partir deste momento, surge o escoamento superficial, formando-se um fluxo d'água que causa o desprendimento e a remoção progressiva de partículas de solo ou rocha. A lâmina superficial que escoar em direção às cotas mais baixas do terreno tende a se concentrar, gerando linhas de fluxo responsáveis pela formação dos sulcos em perfis de cortes em solos.

Dentre as condicionantes do processo de erosão, a natureza do solo é o fator que determina a susceptibilidade dos terrenos à erosão, em função da capacidade de infiltração da água e da resistência à desagregação e transporte de partículas. Esse efeito integrado é, então, chamado de erodibilidade do solo (SILVA et al., 2009).

Neste contexto, o objetivo geral do presente trabalho é analisar e avaliar os solos residuais presentes no corte rodoviário escolhido para estudo, quanto ao potencial de erodibilidade, através de métodos indiretos e diretos de avaliação.

Para alcançar o objetivo, utilizaram-se métodos indiretos e diretos de análise, obtidos a partir de ensaios geotécnicos como: ensaio de Inderbitzen, ensaio de desagregação, ensaio de infiltração e de perda de massa por imersão modificado segundo Metodologia MCT. Estes métodos são capazes de simular o comportamento das

amostras perante a instabilidade de desagregação das partículas dos solos. Para complementar o estudo, foi realizada a classificação dos solos estudados quanto à erodibilidade, conforme o critério do grau de erodibilidade, segundo a Metodologia MCT.

5.2. Revisão bibliográfica

5.2.1. Solos não saturados

Fredlund (1993) *apud* Menezes (2010) menciona que a diferença básica entre os solos não-saturados e os solos saturados é que os primeiros se caracterizam por terem uma pressão negativa da água nos poros, que acontece quando os solos situam acima do nível d'água, sendo a pressão exercida pela água (poropressão) nos poros negativa em relação à pressão do ar. Menezes (2010) também cita que a condição não saturada se deve à ocorrência de ar nos vazios em quantidade que varia de acordo com o grau de saturação.

Embora a condição de saturação dos solos se mostre a mais crítica numa diversidade de situações, nem sempre esta situação extrema está associada ao pior efeito do comportamento do solo. Além disso, o solo exposto às condições ambientais naturais nem sempre alcançará um estado de saturação completa (MENEZES, 2010).

Jucá (1990) *apud* Menezes (2010) menciona que, em regiões com clima tropical, grande parte dos problemas geotécnicos estão associados ao comportamento de solos parcialmente saturados ou não-saturados. Paixão e Camapum de Carvalho (1994) *apud* Camapum de Carvalho (2006) citam que, nestas localidades, a grande maioria dos solos, em função das suas características físico-químicas originárias do processo de formação, apresentam alta porosidade e grande sensibilidade das ligações cimentícias em presença de água.

Borma (2004) expõe que o fluxo de água e a umidade entre a superfície do solo e a atmosfera é um processo complexo, que tem como um dos fatores condicionantes a habilidade do solo em transmitir água, função da condutividade hidráulica e das características de armazenamento e retenção de água.

Menezes (2010) apresenta que essa pressão da água intersticial, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, quando quantificada em função da umidade relativa é chamada sucção total, cujo componente de maior interesse aos solos não-

saturados é a sucção matricial. Essa sucção está associada ao fenômeno da capilaridade, ao tipo de partículas e ao seu arranjo estrutural.

Machado (1998) avaliou a variação da coesão do solo com relação à sucção matricial, confirmando que quanto maior a sucção matricial do solo, maior é a sua coesão. Quanto ao ângulo de atrito, o autor considerou que seu valor não varia com a sucção matricial do solo.

A formação dos solos não-saturados em áreas de clima tropical faz com que ocorra intensa lixiviação dos finos no horizonte superficial, criando uma estrutura porosa e muito permeável, o que resulta normalmente em nível freático profundo com espessas camadas de solo não-saturado (LOBO, 1997 *apud* MENEZES, 2010).

Menezes (2010) acrescenta a este comportamento o efeito da cimentação, que confere ao material um aspecto de enrijecimento ao da sucção. A sucção por sua vez pode ser eliminada pelo umedecimento do solo e a cimentação pode ser destruída por remoldagem. O aumento do teor de umidade também pode dissolver os agentes cimentantes, além de diminuir as tensões, causando bruscas reduções de volume e colapso estrutural do solo.

Levando em consideração este fato, Oliveira (1992) destaca a importância de conhecer os minerais constituintes de um solo para saber se são facilmente intemperizáveis, já que, a depender do mineral encontrado, pode-se ter estabilidade sob ação de condições tropicais à subtropicais, úmidas à subúmidas.

5.2.2. Análise da erodibilidade

Os processos erosivos podem ser determinados, caracterizados e mensurados por meio de ensaios de análise direta e indireta para a avaliação da erodibilidade. Na literatura, encontram-se diferentes ensaios geotécnicos, que sozinhos ou combinados, segundo Fernandes (2015), têm sido utilizados para o estudo da erodibilidade dos solos e rochas.

A avaliação indireta da erodibilidade pode ser determinada por ensaios de desagregação, ensaio de perda de massa por imersão modificado e infiltrabilidade da metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979). Para a avaliação direta da erodibilidade, é utilizado o ensaio proposto por Inderbitzen (1961). Estes ensaios são apresentados detalhadamente a seguir.

5.2.3. Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação, proposto por Santos (1997) *apud* Jacintho et al. (2006), tem como objetivo a verificação da instabilidade à desagregação de uma amostra de solo circular ou cúbica, quando submersa em água, preconizando a identificação de solos dispersos através da imersão gradual de uma amostra de solo em água. Assim, é considerada como uma avaliação indireta, visual e qualitativa da estabilidade, porém não normatizada (FERNANDES, 2011).

Bastos, Milititsky e Gehling (2000) citam que a desagregação nada mais é do que o processo de ruína de uma amostra de solo não confinada, exposta ao ar e na sequência imersa em água. Fernandes (2011) afirma que solos erodíveis tendem a desagregar em água e que essa desagregação está associada a fenômenos de dispersão e de desaeração de solos não saturados. Segundo Bastos (1999), os solos considerados altamente erodíveis desagregam totalmente em água. Porém, não se verifica uma relação direta entre o potencial de desagregação e os níveis intermediários e baixos de erodibilidade.

A aplicação deste ensaio, para fins geotécnicos, foi idealizada, segundo Fernandes (2015), pela engenheira Anna Margarida Fonseca, ao estudar propriedades dos solos para fins de fundações durante a construção de Brasília. Santos (1997) *apud* Jacintho et al. (2006) indicou o ensaio como critério preliminar na avaliação qualitativa da erodibilidade, devido ao fato de considerar um ensaio simples e de derivar bons resultados, auxiliando no direcionamento de outros ensaios de determinação da erosão.

Santos (1997) *apud* Jacintho et al. (2006), ao ensaiar amostras de solo de voçorocas no município de Goiânia, concluiu que a desagregação verificada nas amostras ocorreu pelo processo de abatimento causado pela hidratação e desaeração geradas na fase de inundação das amostras, sendo que o processo de saturação das amostras anula a sucção matricial e gera poropressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo.

Lima (1999) *apud* Jacintho et al. (2006) realizou ensaios em amostras de solo em erosões da cidade de Manaus, coletadas entre 5,0 e 8,5 m de profundidade, sendo submersas totalmente durante sete dias, não mostrando nenhuma desagregação, tendo como resultados a associação da estrutura geológica ao processo de evolução da erosão. Fernandes (2011) verificou que, independente da condição de umidade, as amostras de solo de uma voçoroca da cidade de São Francisco de Assis – RS

mostraram que a presença de matéria orgânica, raízes e óxido de ferro tende a estabilizar os agregados.

Fernandes (2015), ao ensaiar amostras de solo de Santa Maria – RS, observou que as condições nas quais se encontravam as amostras analisadas, natural ou seca ao ar, não foram um fator de influência, pois, em ambas as condições, apresentaram mesmo comportamento. A autora concluiu que o ensaio apresenta boa relação de correspondência entre o comportamento dos solos nos locais estudados, comprovando sua aplicabilidade aos solos analisados.

5.2.4. Critérios baseados na Metodologia MCT

Os ensaios propostos na Metodologia MCT, inicialmente desenvolvidos para os solos tropicais e subtropicais em aplicações para uso em rodovias e estradas vicinais, serviram de base para que Nogami e Villibor (1979) atribuíssem critérios possíveis de prever o comportamento desses solos perante à erosão.

Segundo Nogami e Villibor (1979), esses critérios fundamentam-se em dois parâmetros: o coeficiente de sorção (s), obtido a partir do ensaio de infiltrabilidade, e o coeficiente de perda de massa por imersão em água modificado (π), obtido pelo ensaio de perda de massa por imersão em água modificado, similar ao estabelecido pelo método de ensaio ME 256 (DNER, 1994).

Segundo Bastos (1999), o coeficiente de sorção (s) representa a velocidade de ascensão capilar dos solos, diretamente relacionada à capacidade do solo de infiltrar a água da chuva e à formação de lâmina d'água, que ocorre devido ao fluxo superficial. A perda de massa por imersão em água (π), por sua vez, representa o potencial do solo de desagregar pela ação direta da água da chuva.

Através da divisão do coeficiente “ π ” pelo coeficiente “ s ”, é que a classificação dos solos em relação ao grau de erodibilidade é sugerida. A partir dessa divisão, Nogami e Villibor (1979) sugeriram que os solos considerados erodíveis apresentassem a relação π/s superior a 52.

Pejon (1992) estabeleceu algumas vantagens desta metodologia devido à utilização de amostras indeformadas e à consideração do efeito de secagem, o que possibilita inferir propriedades de desagregabilidade e infiltração do solo. Baseando-se, assim, em um

maior número de ensaios, o autor propôs uma modificação no limite do critério, passando π/s de 52 para 40.

Silva (2016) explica que as avaliações segundo os critérios estabelecidos sofrem significativa variabilidade devido às respectivas características que cada solo poderá possuir. Essa variância acontece não apenas em razão dos diferentes teores de umidade, mas, também, em virtude de sua composição, o que influencia a granulometria, porosidade, entre outras características, motivo pelo qual há a possibilidade de inconsistências em alguns ensaios.

Mais tarde, o mesmo critério de classificação foi expresso de maneira gráfica por Nogami e Villibor (1995), baseando-se em um número maior de ensaios, conforme apresentado na Figura 23.

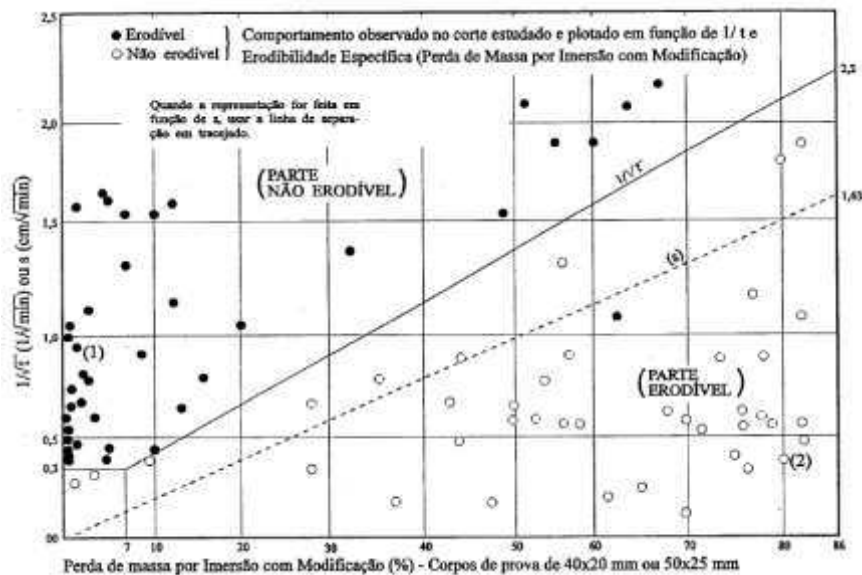


Figura 23 – Critério de erodibilidade pela metodologia MCT segundo Nogami e Villibor (1995).

Fernandes (2011), ao estudar a erodibilidade dos horizontes de uma voçoroca no município de São Francisco de Assis, assim como Bastos (1999), no estudo da erodibilidade de solos residuais não saturados na região metropolitana de Porto Alegre, confirmaram os critérios de erodibilidade baseados na Metodologia MCT.

Grando et al. (2009), com o objetivo de determinar áreas susceptíveis à erosão dentro da microbacia do Planalto Norte de Santa Catarina, verificaram que, das 13 amostras de solo analisadas, 11 delas foram classificadas como solos argilosos lateríticos. Quando aplicados os critérios de erodibilidade MCT, apenas duas amostras foram

consideradas não erodíveis. As demais amostras, em sua maioria, apresentaram valores médios para π/s superiores a 300, chegando a atingir valores superiores a 1331 para a amostra de solo LG' e ML.

Molinero Júnior (2010) estudou os solos pertencentes ao trecho Uberlândia – Uberaba da BR050, com o intuito de correlacionar os procedimentos de análise com a erodibilidade dos solos da região. A maioria dos solos estudados apresentou comportamento não laterítico, sendo classificados como NA' (mistura de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico, solos arenosos). Para os solos analisados, todos aqueles classificados como NA' apresentaram valores de π/s superiores a 100. Assim, foram identificados como solos erodíveis.

Dentre as amostras de solos, aquela classificada como LA (areia laterítica), apresentou, para a relação π/s , valor igual a 15,6. Este valor foi inferior aos critérios sugeridos por Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), e, portanto, foi considerada como não erodível. O autor apresentou como justificativa para tal comportamento o fato da dispersibilidade desta amostra ser nula, confirmando sua laterização, o que lhe confere maior agregação dos grãos e, conseqüentemente, uma grande resistência à erosão.

Fernandes (2015), ao analisar os horizontes A, B e C que compõem o perfil de solo típico da região de Santa Maria – RS, verificou que os estados de umidade em que as amostras se encontraram para determinação do critério de erodibilidade foi de grande relevância nos resultados obtidos. As amostras pré-umidecidas, devido à sorção baixa, foram classificadas como erodíveis. Para a condição de umidade das amostras secas ao ar, o coeficiente de sorção (s) e a perda por imersão (π) foram mais elevados quando comparados com amostras na umidade natural, exceto para o horizonte A. A autora afirma que essa exceção se deve ao fato desse solo possuir inúmeras raízes, que fazem com que as amostras não desagreguem facilmente, apresentando baixo valor de π .

A seguir, são apresentados os métodos de ensaios que possibilitam a determinação do coeficiente de perda de massa por imersão em água modificado (π) e do coeficiente de sorção (s), respectivamente.

i) Ensaios de perda de massa por imersão em água modificado

O ensaio de perda de massa por imersão em água modificado, também chamado de ensaio de erodibilidade específica, consiste em avaliar o potencial de desagregação do

solo (amostra indeformada) frente à imersão em água. O ensaio se difere do originalmente proposto pela metodologia MCT, preconizado através do método de ensaio ME 256 – “Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão” (DNER, 1994), devido às amostras terem alturas reduzidas para 2,5 cm e serem amostras indeformadas, e não compactadas.

A perda de massa por imersão neste ensaio (p_i em %) é calculada através da relação entre o peso do solo seco desagregado e o peso do solo seco total da amostra, de acordo com a **Equação 5**, representando o grau de desagregação do solo sob a ação estática da água.

$$p_i (\%) = \frac{p_d}{p_{d \text{ total}}} \quad \text{Equação 5}$$

em que:

p_i – perda de massa por imersão modificada;

p_d – peso desagregado de solo seco da amostra; e

$p_{d \text{ total}}$ – peso total da mostra de solo seco.

ii) Ensaio de infiltrabilidade

Segundo Bastos (1999), a infiltrabilidade é uma propriedade hidráulica dos solos não saturados, a qual representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície. Nos climas tropicais e subtropicais úmidos, apesar da elevada pluviosidade, devido à forte evapotranspiração e à boa drenagem da maioria dos solos residuais, a infiltrabilidade é mais representativa como uma propriedade que regula a quantidade de escoamento superficial do que a permeabilidade saturada (BASTOS, 1999).

O ensaio de infiltrabilidade proposto na metodologia MCT tem como objetivo quantificar a velocidade de ascensão capilar em amostras de solo, obtida através da determinação do coeficiente de sorção (s). O coeficiente de sorção é obtido associando o processo de infiltrabilidade ao fluxo de água que ascende pela amostra de solo, por força das tensões capilares relacionadas à sucção do solo, determinando o movimento da água ao longo de um tubo capilar horizontal. Este movimento de água (distância percorrida pelo menisco capilar no tubo) deve ser medido com o auxílio de régua graduada em tempos que seguem uma relação quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 minutos e assim por diante), até o deslocamento cessar.

Com os dados referentes ao deslocamento do menisco no tubo capilar, em cm, e da raiz quadrada do tempo, em $\text{min}^{1/2}$, plota-se um gráfico, conforme a Figura 24, no qual se observa um trecho com tendência retilínea seguido por outro de tendência quase horizontal, significando que a frente de umidade atingiu o topo do corpo de prova (BASTOS, 1999). A inclinação do trecho inicial dos pontos é onde se mede o coeficiente de sorção (s em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$), expresso pela **Equação 6**.

$$s = \frac{S \cdot (L_b - L_a)}{10A \cdot (t_b - t_a)} \quad \text{Equação 6}$$

em que:

s – coeficiente de sorção, em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$;

S – área da seção do tubo capilar, em cm^2 ;

A – área da seção do corpo de prova, em cm^2 ;

L_a – leitura da distância percorrida pelo menisco no tempo t_a ;

L_b – leitura da distância percorrida pelo menisco no tempo t_b .

t_a – tempo de leitura a, em $\text{min}^{1/2}$; e

t_b – tempo de leitura b, em $\text{min}^{1/2}$.

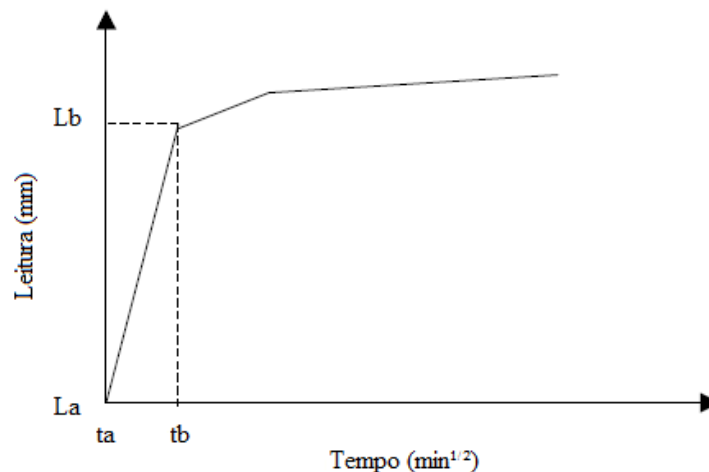


Figura 24 – Curva típica para estimativa do coeficiente de sorção (s) no ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT.

Fonte: (Bastos, 1999).

5.2.5. Ensaio de Inderbitzen

Segundo Bastos (1999), o ensaio de Inderbitzen, originalmente proposto por Inderbitzen (1961), consiste num dos mais simples ensaios utilizando escoamento em canais, o qual apresenta a concepção de um canal hidráulico em que é medida a perda de solo em amostras cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável, por onde passa um fluxo d'água com vazão controlada. Um esquema do equipamento idealizado por Inderbitzen, em sua concepção original, é apresentado na Figura 25.

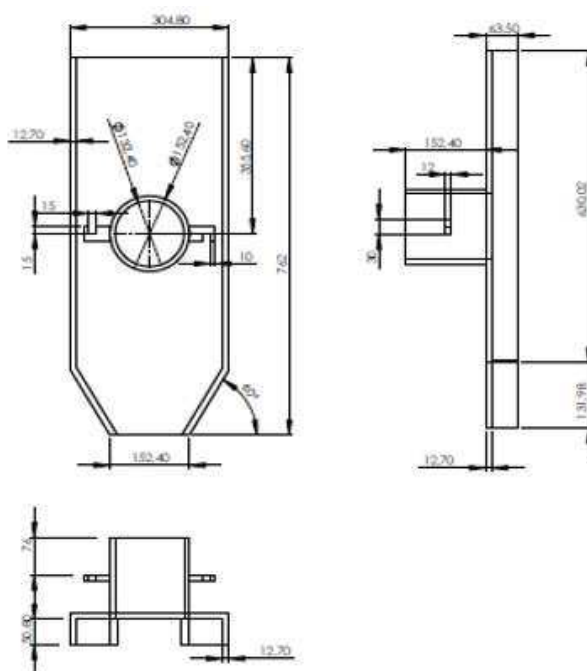


Figura 25 – Equipamento de Inderbitzen em sua concepção original.
Fonte: Stephan (2010).

O ensaio teve seu uso difundido no meio geotécnico desde os trabalhos do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal), ainda na década de 1960, e foi introduzido no Brasil na pesquisa IPR/COPPE/TRAFECON “Estabilidade de Taludes” (DNER, 1979).

Vários autores, com o objetivo de aprimorar a qualidade dos resultados obtidos no ensaio de Inderbitzen, sugeriram modificações no equipamento de Inderbitzen LNEC, dentre os quais podem ser mencionados aqueles citados por Stephan (2010): Bastos (1999), Fragassi (2001), Menezes et al. (2006) e Mendes (2006).

Na tentativa de melhorar os resultados dos ensaios obtendo uma estimativa mais realística da erodibilidade, Stephan (2010) propôs uma versão do equipamento mais

versátil, variando o orifício existente na rampa hidráulica para fixar os corpos de prova, aumentando o comprimento e a rigidez da estrutura, visando garantir a uniformidade do fluxo d'água, conforme ilustrado na Figura 26.

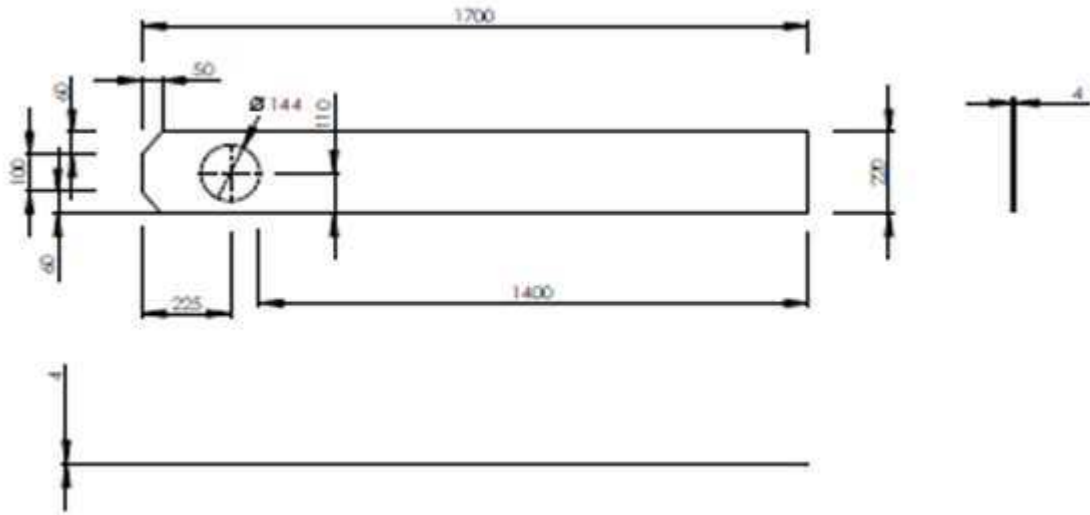


Figura 26 – Equipamento proposto por Stepahn (2010) para o ensaio de Inderbitzen.
Fonte: Stephan (2010).

Nesta nova versão do equipamento, as rampas tiveram as bases reduzidas, quando comparadas com a proposta por Inderbitzen (1961) e Bastos (1999), de forma que a parede lateral tangenciasse o orifício (agora com 144 mm) para implantação do corpo de prova através da fixação de perfis de alumínio em toda a extensão, para que o fluxo d'água escoasse apenas sobre as amostras de solo ensaiadas (STEPHAN, 2010).

Para Fernandes (2011), o equipamento busca simular condições próximas da realidade de campo, da forma como o solo se comporta frente a um fluxo d'água superficial, permitindo analisar a influência de fatores como a compactação do solo, suas propriedades hidráulicas, a declividade da rampa, a vazão e a duração do fluxo. Porém, não é possível simular o fenômeno da desagregação de partículas provocado pelo impacto da água em uma precipitação.

Os resultados obtidos por Bastos (1999), em termos de perda de solo por unidade de área e de tempo *versus* tensão cisalhante hidráulica do ensaio, confirmaram o comportamento erodível verificado *in situ* para solos saprolíticos, independentemente da condição de umidade do solo. Os solos lateríticos indicaram baixa erodibilidade na condição de umidade natural e pré-umedecidos.

5.3. Materiais e métodos

5.3.1. Área e solos de estudo

Escolheu-se um corte rodoviário em perfil de solos residuais localizado às margens da BR 120, nas proximidades do Aeroporto de Viçosa-MG (Figura 17), com coordenadas geográficas: Latitude (20°45'19,80" S), Longitude (42°50'26,30" W) e Altitude (meio do perfil) de aproximadamente 669m (GOOGLE, 2014).

Este corte foi selecionado por conter solos pertencentes a um mesmo ambiente de intemperismo, apresentando três horizontes em distintos processos de erosão. Essas camadas de solos foram referenciadas por: BR120-A, BR120-B e BR120-C (Figura 27).

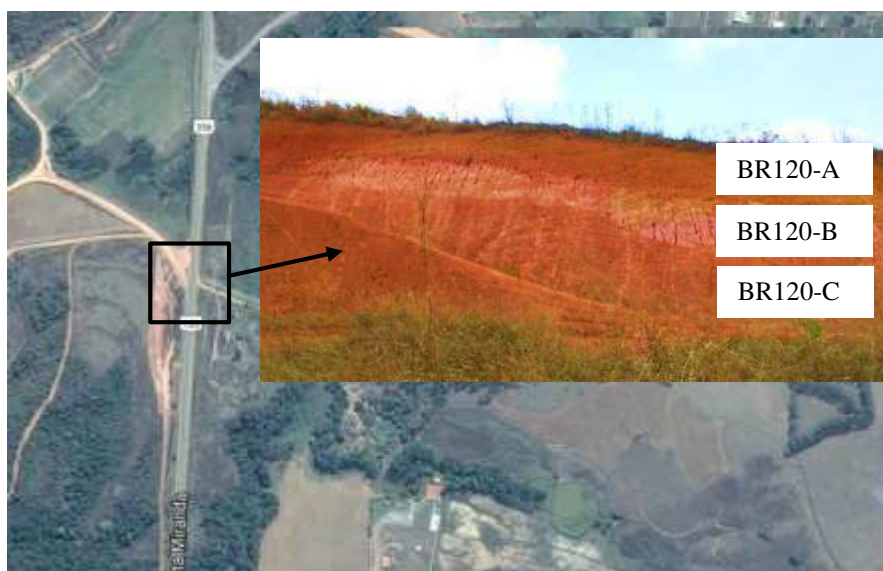


Figura 27 – Localização do corte rodoviário selecionado para o estudo proposto.

5.3.2. Métodos de ensaio

Para as amostras de solos analisadas, foram utilizados o ensaio de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961), conforme equipamento proposto por Stephan (2010), para avaliação direta do potencial de erodibilidade. Utilizaram-se o ensaio de desagregação, conforme proposto por Santos (1997) *apud* Jacintho et al. (2006), e os ensaios de perda de massa por imersão em água modificada e infiltrabilidade da metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979), para avaliação indireta do potencial de erodibilidade das amostras investigadas. A seguir, são descritos cada um dos ensaios mencionados.

5.3.2.1. Ensaio de desagregação

O método empregado foi baseado no proposto por Santos (1997) *apud* Jacintho et al. (2006), no qual moldaram-se amostras cilíndricas com 10,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura com o auxílio de anéis biselados de PVC, e, em seguida, as amostras foram condicionadas a situações distintas de umidade, a saber: na condição natural, seca ao ar (por, no mínimo, 72 horas) e inundada (por, no mínimo, 30 minutos). Cuidadosamente, as amostras foram retiradas de seus respectivos anéis de PVC e dispostas sobre papel filtro e pedra porosa, conforme ilustrado na Figura 28, e submetidas a um processo lento de submersão em água, segundo os seguintes estágios:

- (a) Com o nível d'água na base da amostra, por 30 minutos;
- (b) Com o nível d'água a 1/3 e 2/3 da amostra, por períodos de 15 minutos; e
- (c) Com a submersão total da amostra, permanecendo por 24 horas.

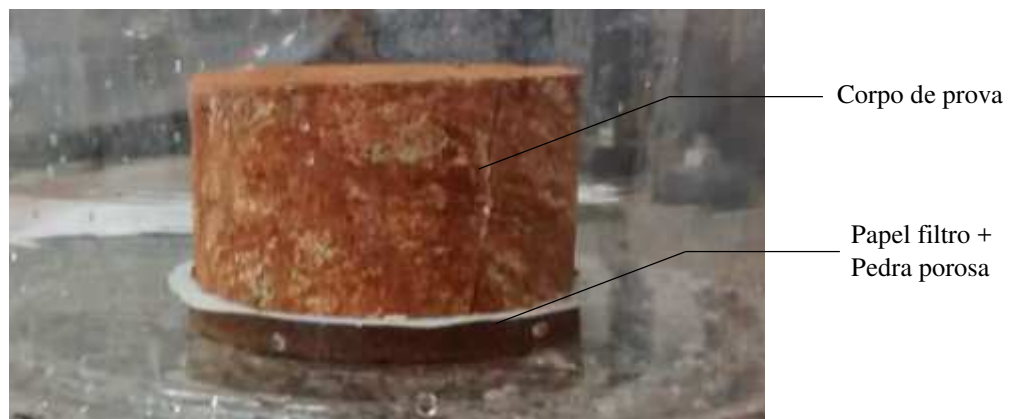
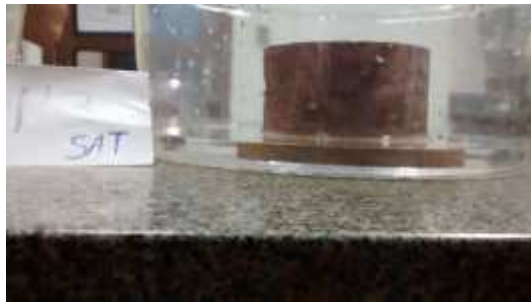


Figura 28 – Preparação de amostra para realização de ensaio de desagregação.

Em cada uma das etapas, foram registrados os comportamentos das amostras de solos, descrevendo o caráter, a intensidade e a velocidade dos processos atuantes: umedecimento, expansão, abatimentos, fraturas, rupturas e dispersão. A Figura 29 ilustra o processo de submersão em água a que as amostras selecionadas foram submetidas.



(a) nível d'água na base da amostra, por 30 minutos



(b) nível d'água a 1/3 da amostra, por 15 minutos



(c) nível d'água a 2/3 da amostra, por 15 minutos



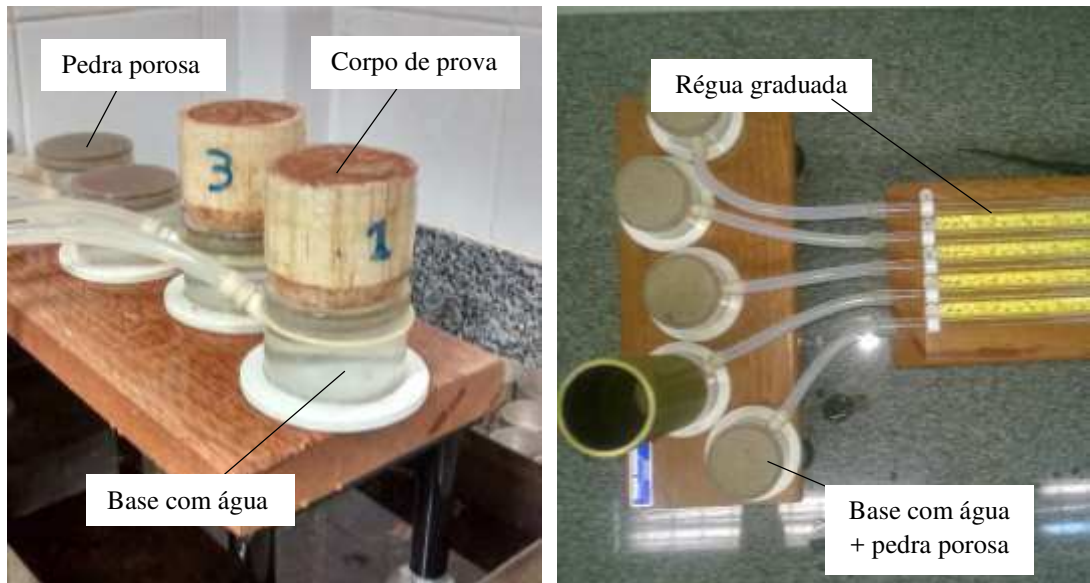
(d) submersão total da amostra, permanecendo por 24 horas

Figura 29 – Etapas de submersão de amostra BR 120 C na condição de umidade saturada preparada para realização do ensaio de desagregação.

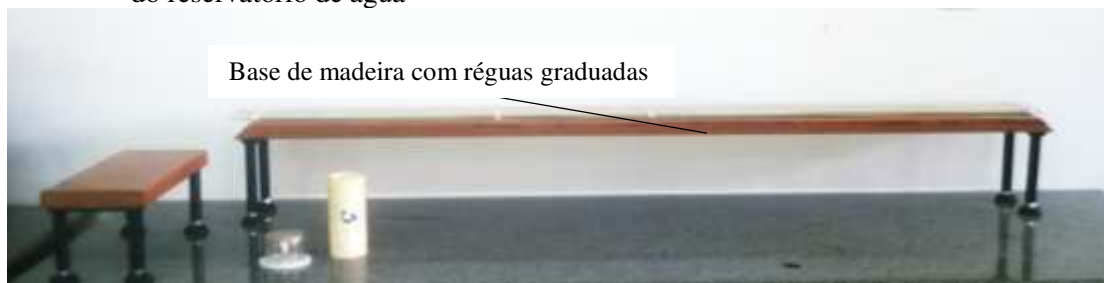
5.3.2.2. Ensaio de infiltrabilidade

Para a realização do ensaio de infiltrabilidade, utilizou-se do método da Metodologia MCT, proposto por Nogami e Villibor (1979). Assim, foram utilizadas amostras indeformadas de solo, na condição de umidade natural e seca ao ar (por, no mínimo, 72 horas), confinadas em anéis cilíndricos de PVC com 5,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro.

Conforme apresentando na Figura 30, o equipamento para realização do ensaio consiste em um plano de madeira, onde existem acoplados réguas graduadas e tubos capilares de vidro com 6,0 mm de diâmetro, estando ligados a um reservatório composto por pedra porosa de granulação aberta com topo livre, sobre as quais foram colocadas as respectivas amostras de solo. O tubo capilar é preenchido por água até que a mesma extravasasse no topo do reservatório da pedra porosa, sendo colocado, neste lugar, um papel filtro logo após o transbordamento. As amostras indeformadas de solos são confinadas em seus moldes cilíndricos de PVC sobre o filtro e o reservatório.



(a) amostra de solo sobre a pedra porosa e do reservatório de água (b) disposição dos reservatórios de água



(c) tubos capilares acoplados a uma base de madeira com régua graduada

Figura 30 – Equipamento utilizado para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT.

As leituras dos deslocamentos do menisco dentro do tubo capilar foram realizadas em uma relação de tempo quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 minutos e assim por diante) até o momento em que o deslocamento cessou, conforme procedimento descrito por Nogami e Villibor (1995). Com o uso da **Equação 6**, determinou-se o valor do coeficiente de sorção, dado pela letra s , para cada amostra de solo, atendendo aos teores de umidade pré-estabelecidos.

5.3.2.3. Ensaio de perda de massa por imersão modificado

Para a realização do ensaio de perda de massa por imersão modificado, utilizou-se do método presente na Metodologia MCT, proposto por Nogami e Villibor (1979), no qual foram utilizadas amostras indeformadas dos solos, estando essas confinadas em anéis cilíndricos de PVC, com dimensões semelhantes àquelas estabelecidas originalmente pela Metodologia MCT, através do método de ensaio ME 256 (DNER, 1994), diferenciando-se pela redução das alturas dos corpos de prova de 5,0 cm para 2,5 cm e colocando-se papel filtro e pedra porosa na parte interna do anel.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi formado por um berço de concreto que suporta a amostra confinada, sendo esta colocada na horizontal, igual ao utilizado no ensaio de perda de massa por imersão proposto pela Metodologia MCT. Abaixo das amostras, foram colocadas cápsulas para recolhimento do material desagregado do solo confinado no anel cilíndrico de PVC, durante o período em que o sistema esteve imerso em água (mínimo de 20 horas), conforme descrito por Nogami e Villibor (1995). A Figura 31 ilustra o esquema do equipamento utilizado.



Figura 31 – Ensaio de perda de massa por imersão modificado.

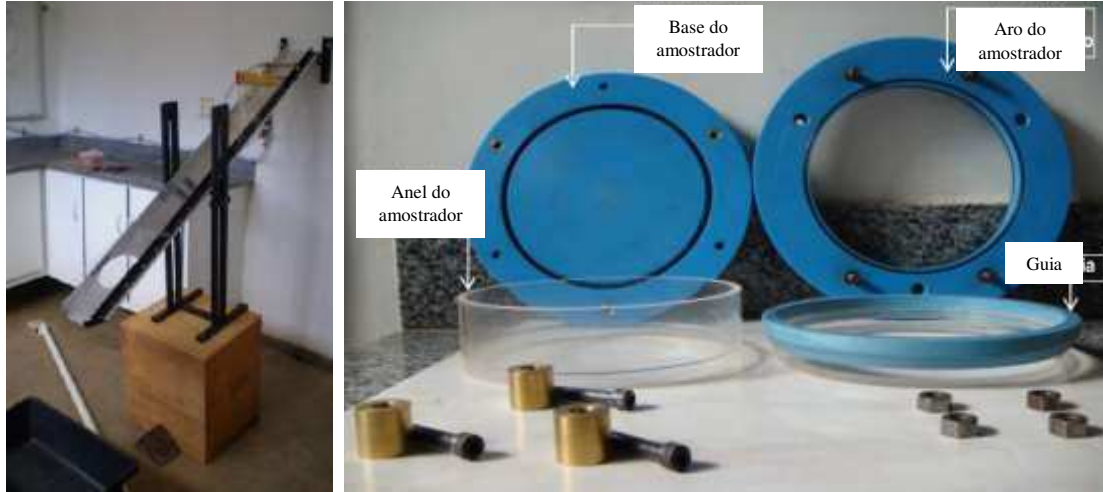
Com o término do ensaio, a água foi retirada cuidadosamente do recipiente que continha o solo desprendido durante o processo de imersão. O solo desprendido e o solo remanescente do anel foram recolhidos, levados à estufa e, posteriormente, pesados no estado seco. Na sequência, determinou-se o parâmetro π , expresso em percentagem, calculado conforme a **Equação 5**.

5.3.2.4. Ensaio de Inderbitzen

Os ensaios de Inderbitzen foram realizados com a finalidade de quantificar a erodibilidade e também avaliar o efeito da umidade inicial nas amostras quanto ao potencial à erosão hídrica devido ao escoamento superficial de água. A seguir, serão apresentados os procedimentos adotados para realização dos ensaios.

i) Equipamento utilizado

Para a realização dos ensaios de Inderbitzen, foi utilizado o equipamento desenvolvido por Stephan (2010), baseado no aparelho proposto inicialmente por Inderbitzen (1961), conforme apresentado na Figura 32.



(a) sistema móvel que permite a variação da inclinação da rampa

(b) amostrador circular de 144,0 mm de diâmetro

Figura 32 – Equipamento utilizado para a realização de ensaio de Inderbitzen.
Fonte: Stephan (2010).

ii) Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados, primeiramente, com o auxílio de um anel em acrílico biselado reforçado em PVC. Logo após, este foi retirado, encaixando-se o amostrador para inserção do corpo de prova, rasando sua extremidade superior.

Em seguida, o corpo de prova foi extraído do bloco, rasando-se sua extremidade inferior, unindo-a em uma base circular de PVC, e esta ao aro amostrador, através de parafusos, conforme apresentado na Figura 33.



(a) Fixação do anel amostrador com o corpo de prova e a base do amostrador

(b) União do anel amostrador, base do amostrador e anel superior do amostrador

Figura 33 – Processo de moldagem de corpo de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura.

iii) Variáveis adotadas

Antes de iniciar o ensaio, ajustou-se, com auxílio de nível digital, a inclinação da rampa até obter o valor de 34°. Essa declividade foi adotada buscando simular o corte em perfil, objeto de estudo na pesquisa, conforme apresentando na Figura 34.



(a) Inclinação média de 34° para o corte de perfil

(b) Inclinação da rampa do ensaio de 34°

Figura 34 – Declividade adotada para simular o corte em perfil de solos estudados.

A vazão de 1,0 L/min foi adotada em função da capacidade de escoamento da rampa e da sensibilidade dos valores de perda de solos medidos. Também foi considerada a intensidade média da chuva na região de estudo, para um tempo de recorrência de 10 anos e tempo de duração de 15 minutos. O tempo de ensaio foi de 15 minutos, com medições em intervalos de tempo predefinidos de 1, 3, 5 e 15 minutos.

iv) Realização dos ensaios

Após a preparação dos corpos de prova, estes foram pesados, obtendo-se o peso da massa do corpo de prova com o solo no estado de teor analisado (natural, seco ao ar ou inundado) mais o peso do amostrador. Em seguida, o conjunto foi posicionado no orifício da rampa e fixado nesta através de parafusos. Depois, deixou-se a água fluir sobre a rampa, cobrindo a superfície do corpo de prova com uma proteção plástica, até que se verificou uma uniformidade do fluxo d'água na rampa.

Depois de verificadas a uniformidade do fluxo d'água e a constância da vazão, a proteção plástica foi removida, dando início ao ensaio, tendo continuidade por 15 minutos. Durante este período, os sedimentos carregados foram coletados em baldes plásticos, de diferentes volumes, nos intervalos de tempo predefinidos.

O material carregado foi deixado em repouso até que ocorresse a total sedimentação dos grãos do solo; em seguida, retirou-se o excesso da água superficial e colocou-se o solo sedimentado em cápsula, encaminhando à estufa para secagem durante um período

mínimo de 24 horas. Por fim, o solo obtido foi destorroado e transferido para um conjunto de peneiras (n° 4, n° 10, n° 40, n° 100 e n° 200), pesando-se o material retido em cada uma delas.

v) Dados obtidos

Com os valores das massas de solo carregado e pesadas em cada peneira nos intervalos de tempo predefinidos, foi possível obter dados para a plotagem dos gráficos em função do tempo (em minutos) *versus* perda de solo seco acumulado por área da amostra (g/cm²).

5.4. Resultados e discussões

5.4.1. Critérios de avaliação do potencial de desagregação

As Tabelas Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22 apresentam as análises feitas segundo proposto na metodologia do ensaio de desagregação.

Tabela 20 – Comportamento das amostras do solo BR120-A para cada condição de umidade

Amostra	Condição de umidade	Teor de umidade (%)	Comportamento da amostra
BR120-A	Natural	23,02	Rápida ascensão capilar, ocorrendo baixa expansão da base da amostra nos minutos iniciais. Ocorreu inchamento da amostra. Durante a total imersão, iniciou-se a desagregação nas bordas da amostra, permanecendo nestas condições até o término do ensaio.
	Seca ao ar	5,65	Rápida ascensão capilar, porém, mais lenta quando comparada à condição natural de umidade. Lenta desagregação das partículas, não desintegrando completamente, somente nas bordas.
	Inundada	62,39	Desagregação praticamente inexistente das partículas do solo. Ao final do ensaio, foi possível observar a formação de fissuras no corpo de prova.

Tabela 21 – Comportamento das amostras do solo BR120-B para cada condição de umidade

Amostra	Condição de umidade	Teor de umidade (%)	Comportamento da amostra
BR120-B	Natural	12,87	Total ascensão capilar aos 30 minutos iniciais, com apresentação de expansão da base da amostra. Desagregação das partículas já nos minutos seguintes, chegando à desagregação completa antes de 2 horas de ensaio.
	Seca ao ar	4,67	Ascensão capilar mais lenta do que na condição natural, com apresentação de expansão da base da amostra mais elevada. No decorrer do tempo, há intensificação da desagregação até desintegrar por completo antes de 2 horas de ensaio.
	Inundada	37,42	Lenta e baixa desagregação das partículas do solo e ruptura das bordas do corpo de prova.

Tabela 22 – Comportamento das amostras do solo BR120-C para cada condição de umidade

Amostra	Condição de umidade	Teor de umidade (%)	Comportamento da amostra
BR120-C	Natural	28,03	Ascensão capilar completa aos 30 minutos iniciais, com expansão significativa da base. Inchamento da amostra e desintegração dos bordos da amostra quando imerso por completo, permanecendo nestas condições até o término do ensaio.
	Seca ao ar	1,23	Ascensão capilar mais lenta do que na condição natural, maior expansão da base. Formação de rachaduras e trincas no topo da amostra. Após completada a imersão, a amostra desintegrou praticamente por completo.
	Inundada	55,39	Desagregação praticamente inexistente das partículas do solo. Ao final do ensaio, foi possível observar a formação de fissuras e trincas na lateral da amostra.

As Figuras Figura 35, Figura 36 e Figura 37 ilustram o relatado para cada uma das amostras, após às 25 horas de imersão, ou seja, final do ensaio.



(a) Condição de umidade natural (b) Condição de umidade seca (c) Condição de umidade inundada

Figura 35 – Amostras após o término do ensaio de desagregação para o solo BR120-A.



(a) Condição de umidade natural (b) Condição de umidade seca (c) Condição de umidade inundada

Figura 36 – Amostras após o término do ensaio de desagregação para o solo BR120-B.



(a) Condição de umidade natural (b) Condição de umidade seca (c) Condição de umidade inundada

Figura 37 – Amostras após o término do ensaio de desagregação para o solo BR120-C.

Quando comparados os diferentes solos estudados, o solo BR120-B é aquele que apresenta maior índice de desagregação e atinge a desintegração quase que por completa com menor tempo de imersão, independente da condição de umidade analisada.

Segundo Fernandes (2011), os materiais desagregáveis em água possuem maior facilidade de serem carregados pelo escoamento superficial, uma vez que suas partículas estão individualizadas. Portanto, o solo BR120-B pode ser considerado como um solo com alto potencial erodível, uma vez que este solo apresentou alto índice de desagregação, comportamento contrário ao apresentado no ensaio do solo BR120-A.

O solo BR120-C apresentou desagregação mais elevada na condição de umidade seca do que na condição de umidade natural. No estado seco, a desintegração ocorreu nas

primeiras horas de ensaio e, ao término do ensaio, a amostra apresentou-se mais desestruturada. No estado natural, esse processo levou mais tempo e o material desintegrado apresentou-se menos desestruturado.

Constatou-se, também, que as condições de umidade nas quais se encontravam as amostras dos solos BR120-A e BR120-B, natural ou seca ao ar, não foram um fator de influência no ensaio, pois, em ambas as condições, as amostras apresentaram uma desagregação semelhante, principalmente por abatimento, formando uma pilha de material desestruturado. Condições contrárias foram obtidas para o solo BR120-C.

A partir da análise do comportamento dos ensaios realizados, fica evidente a relação entre o potencial de desagregação e a erodibilidade dos solos ensaiados.

Apesar do predomínio da fração argila (45%) no solo BR120-B, o solo apresentou a menor resistência à desagregação de partículas. Devido à maior quantidade de argila, que geralmente resulta em alta cimentação, era esperado que o solo tivesse como característica mais resistência à desagregação do que os demais solos. Porém, ao comparar a amostra de solo no estado seco ao ar com o inundado, fica evidente este comportamento. Portanto, fica clara a importância de estudar a mineralogia dos solos antes de comparar o potencial de erodibilidade com o predomínio de frações argilosas presentes nos solos analisados, o que não foi objeto de estudo deste trabalho.

5.4.2. Critérios baseados na Metodologia MCT

As Figuras Figura 38, Figura 39 e Figura 40 apresentam as curvas médias do deslocamento de água infiltrada (cm) pela raiz quadrada do tempo ($\sqrt{\text{min}}$) para cada amostra de solo analisado. A partir destas curvas, foram determinadas as médias dos coeficientes de sorção (s).

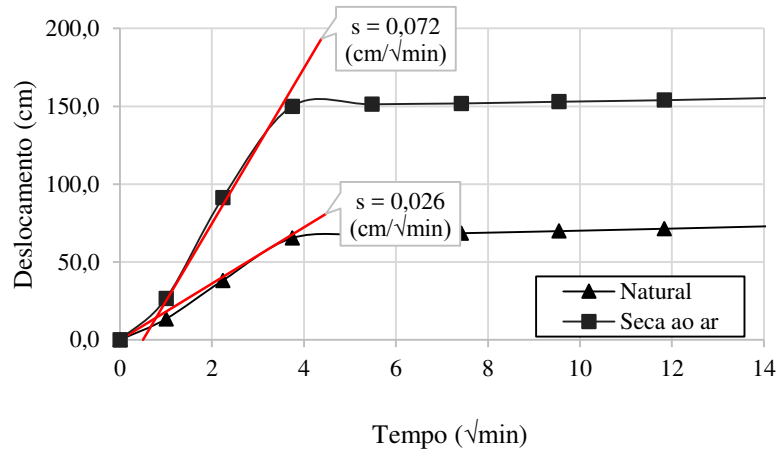


Figura 38 – Gráfico de infiltrabilidade para determinação dos coeficientes de sorção (s) nas condições de umidade natural e seca ao ar para o solo BR120-A.

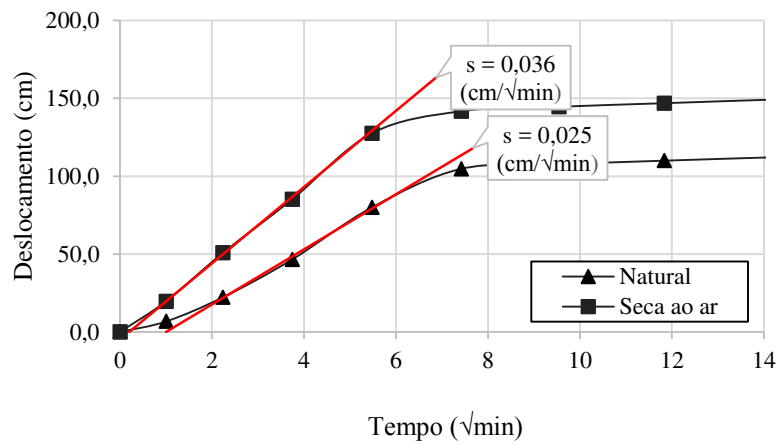


Figura 39 – Gráfico de infiltrabilidade para determinação dos coeficientes de sorção (s) nas condições de umidade natural e seca ao ar para o solo BR120-B.

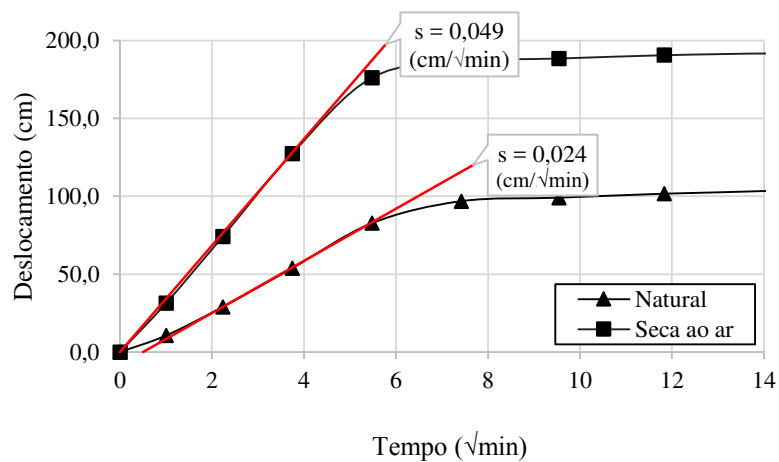


Figura 40 – Gráfico de infiltrabilidade para determinação dos coeficientes de sorção (s) nas condições de umidade natural e seca ao ar para o solo BR120-C.

A Tabela 23 apresentam os valores obtidos nos ensaios de infiltrabilidade, perda de massa por imersão em água modificada, segundo a Metodologia MCT, e as respectivas relações π/s para os três solos analisados.

Tabela 23 – Valores médios de coeficiente de sorção (s), perda de massa por imersão em água modificada (π) e teores de umidade dos solos estudados

Amostra	Condição natural				Condição seca ao ar			
	w (%)	s* (cm/min ^{1/2})	π (%)	π/s (cm/min ^{1/2}) ⁻¹	w (%)	s* (cm/min ^{1/2})	π (%)	π/s (cm/min ^{1/2}) ⁻¹
BR120-A	22,15	0,026	0,84	32,3	5,98	0,072	24,33	337,9
BR120-B	11,92	0,025	76,73	3.069,0	4,01	0,036	68,84	1.912,2
BR120-C	28,61	0,024	2,14	89,2	1,17	0,049	73,11	1.492,0

*A média foi calculada pela inclinação da curva média e não pela média individual dos coeficientes.

O coeficiente de sorção apresentado para todos os solos no ensaio de infiltrabilidade foi relativamente baixo. Isso indica que os solos não possuem características de alta permeabilidade para a situação em que se encontram. Portanto, para estes solos, a perda de massa por imersão é que comanda o comportamento do solo quanto à erodibilidade.

As amostras de solo BR120-B, no estado de umidade natural, foram as que apresentaram maior perda de massa por imersão. Para a condição seca ao ar, o solo BR120-C foi o que apresentou maior valor.

Aplicando os limites para o coeficiente de erodibilidade sugerido por Nogami e Villibor (1979) e Pejon (1992), apenas o solo BR120-A, na condição natural de umidade, pode ser caracterizado como um solo não erodível. Os demais solos, independente da condição de umidade analisada, caracterizam-se como solos erodíveis. Portanto, o solo BR120-B e BR120-C são considerados erodíveis.

Esse critério foi aplicado e mostrou-se eficiente na identificação de solos erodíveis por Alcântara (1997) e Bastos (1999). Nogami e Villibor (1995) expressaram de maneira gráfica a determinação de potencialidade de solos erodíveis. Essa representação é apresentada na Figura 41 para as amostras de solo analisados.

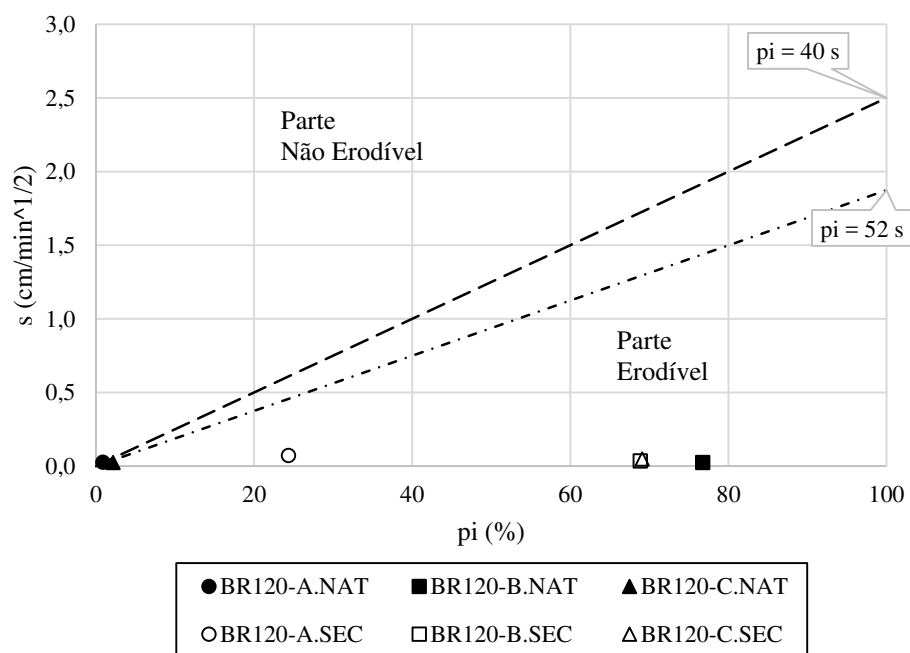


Figura 41 – Representação gráfica do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para os solos estudados.

Para a amostra de solo BR120-B, os valores da relação π/s obtidos são exorbitantes quando comparados aos demais solos, o que o caracteriza como o de maior susceptibilidade à erosão.

5.4.3. Critérios de avaliação segundo ensaio de Inderbitzen

Com o objetivo de analisar e avaliar a perda de solos em decorrência dos processos erosivos provocados pelo escoamento superficial de água, as Figuras Figura 42, Figura 43 e Figura 44 mostram a variação média da perda de solo seco acumulado do material erodido em relação à área superficial do corpo de prova (orifício circular com diâmetro de 144,0 mm e área de 162,86 cm²) com relação ao tempo de ensaio para os três horizontes de solos analisados nas condições de umidade natural, seca ao ar e inundado.

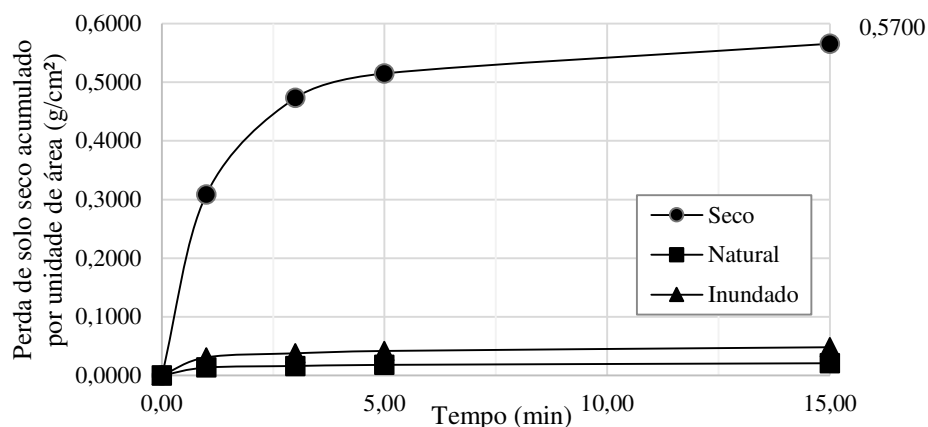


Figura 42 – Resultados da perda de solo seco acumulado de material carregado por unidade de área do corpo de prova cilíndrico (g/cm^2) *versus* tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para os estados de umidade adotados para o solo BR120-A.

A perda de material carregado foi maior para o solo BR120-A (argila, laterítico argiloso), na condição de umidade seca, atingindo a estabilidade aos $0,5700\text{g}/\text{cm}^2$, do que para as demais condições de umidade. Nas condições de umidade natural e inundado, as perdas de material foram significativamente menores do que quando comparadas à condição seca. No estado natural de umidade, a quantidade de material carregado foi menor do que quando a amostra foi inundada.

Este comportamento pode ser explicado devido à alta presença de finos, visto que, com a redução do teor de umidade, ocorre intensa lixiviação desses finos no horizonte superficial, criando uma estrutura com partículas individualizadas e leves, que são facilmente carregadas pelo escoamento superficial.

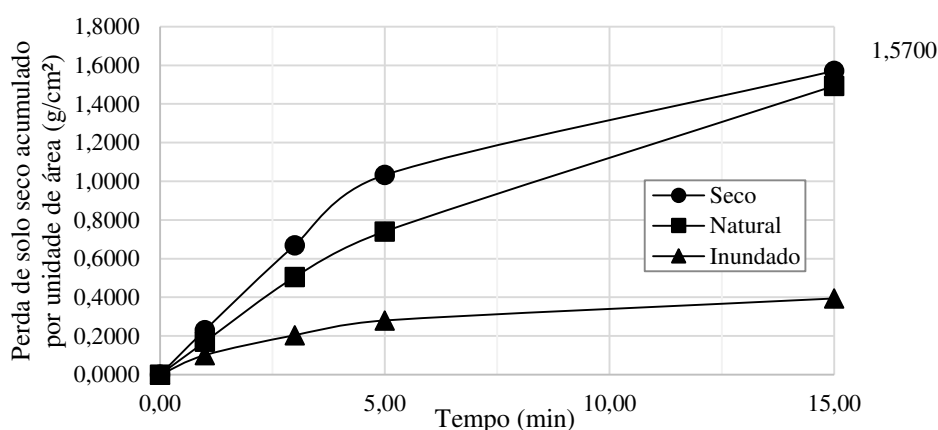


Figura 43 – Resultados da perda de solo seco acumulado de material carregado por unidade de área do corpo de prova cilíndrico (g/cm^2) *versus* tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para os estados de umidade adotados para o solo BR120-B.

Para o solo BR120-B, a maior perda de solo ocorreu para as amostras no estado seco, seguidas do estado natural de umidade e inundado, respectivamente. Para esta simulação, a taxa alcançou valores de 1,5700g/cm². Este valor foi superior em três vezes a taxa alcançada no solo BR120-A, o que indica que o solo BR102-B é mais erodível do que o solo BR120-A. Essa diferença é ainda maior quando comparados os ensaios para as condições naturais.

Ao contrário do comportamento apresentado pelo solo BR120-A, no solo BR120-B não foi verificada uma estabilização da perda de solo durante a realização dos ensaios. Na condição inundada, a estabilização foi maior do que nas demais condições de umidade. As estabilizações destas condições poderiam ter sido alcançadas aumentando o tempo em que os solos foram submetidos à simulação do escoamento superficial.

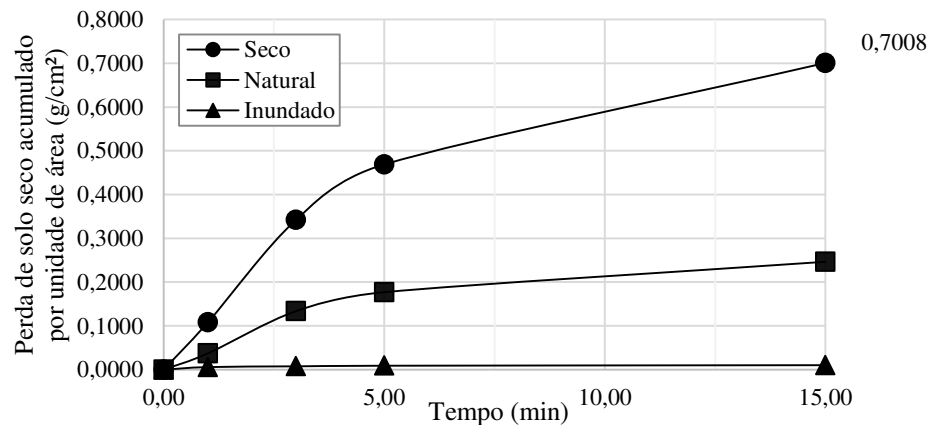


Figura 44 – Resultados da perda de solo seco acumulado do material carregado por unidade de área do corpo de prova cilíndrico (g/cm²) *versus* tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para os estados de umidade estudados para o solo BR120-C.

Para o solo BR120-C, a perda de solo no estado seco de umidade foi maior do que quando comparada as demais situações de umidade. Nas amostras inundadas, a perda foi praticamente inexistente, chegando a estabilizar já nos minutos iniciais. Este fato pode ter ocorrido devido ao aumento do teor de umidade não ter sido suficientemente alto a ponto de anular por completo a sucção matricial ou de provocar o rompimento das cimentações entre as partículas ou agregados do solo. Comportamento contrário foi apresentado nas demais condições de umidade adotadas.

As Tabelas Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26 obtidas através dos ensaios de Inderbitzen, para os três solos e condições de umidade estudados, apresentam as médias da perda

de solo total acumulado por unidade de área do corpo de prova (g/cm²) e o teor de umidade para qual foram ensaiadas.

Tabela 24 – Perda de solo total acumulado por unidade de área do corpo de prova (g/cm²) *versus* tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para as amostras de solo BR120-A

Amostra		Natural		Seco ao ar		Inundado	
		Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)	Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)	Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)
BR120-A	1	22,44	0,0224	4,66	0,5086	74,43	0,0306
	2	23,37	0,0249	4,49	0,5665	71,63	0,0628
	3	23,38	0,0159	5,31	0,6214	70,90	0,0513
	Média	23,06	0,0211	4,82	0,5655	72,32	0,0482
	Desvio Padrão	0,534	0,005	0,432	0,056	1,863	0,016

Tabela 25 – Perda de solo total acumulado por unidade de área do corpo de prova (g/cm²) *versus* tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para as amostras de solo BR120-B

Amostra		Natural		Seco ao ar		Inundado	
		Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)	Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)	Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)
BR120-B	1	13,80	2,4927	4,76	2,4448	33,11	0,8811
	2	13,42	1,9863	5,20	2,2690	33,71	0,3019
	Média	13,61	2,2395	4,98	2,3569	33,41	0,5915
	Desvio Padrão	0,269	0,358	0,311	0,124	0,424	0,410

Tabela 26 – Perda de solo total acumulado por unidade de área do corpo de prova (g/cm²) *versus* tempo de ensaio de Inderbitzen (min) para as amostras de solo BR120-C

Amostra		Natural		Seco ao ar		Inundado	
		Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)	Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)	Teor de umidade (%)	Perda acumulada por área (g/cm ²)
BR120-C	1	26,39	0,2389	1,42	0,8336	56,85	0,0108
	2	26,37	0,3009	1,94	0,9382	55,70	0,0120
	3	26,44	0,1985	1,19	0,3306	56,62	0,0082
	Média	26,40	0,2461	1,52	0,7008	56,39	0,0103
	Desvio Padrão	0,036	0,052	0,383	0,325	0,609	0,002

Observa-se que, com a redução do teor de umidade das amostras estudadas, que em certa quantidade lhe confere uma parcela de resistência (fenômeno de sucção), a tensão

transmitida pelos contatos entre as partículas (tensão efetiva) propiciou maior desagregação e transporte de material, em comparação com as amostras em condição de umidade natural ou inundada. Este comportamento também foi comprovado por Fernandes (2011) e Fernandes (2015).

Em todas as condições, foi possível verificar que, entre os solos analisados, o que apresentou o maior valor de massa de solo acumulado foi o solo BR120-B no estado de umidade seco, seguido do solo BR120-B na condição natural de umidade. Portanto, constata-se que o desprendimento das partículas foi superior e ocorreu mais rapidamente do que nos outros solos.

No caminho contrário, o solo BR120-A, nos estados natural e seco ao ar, foi o que apresentou menor perda de massa durante os ensaios, apresentando maior dificuldade no desprendimento das partículas, tornando a erosão deste solo mais lenta do que nos demais.

Logo, conclui-se que, ao analisar os resultados obtidos pelo ensaio de Inderbitzen, o solo BR120-B está mais susceptível à erodibilidade do que os solos BR120-C e BR120-A.

5.5. Conclusões

De um modo geral, os ensaios de avaliação direta e indireta da erodibilidade que foram realizados, apresentaram resultados satisfatórios, conforme esperados para a área de estudo selecionada. Essa identificação foi possível, visto que a maioria dos resultados obtidos mostrou que o solo BR120-B teve um potencial de erodibilidade maior do que os solos BR120-A e BR120-C, o que condiz totalmente com a realidade de campo. As principais conclusões foram as que seguem.

Em relação ao ensaio de desagregação, o solo BR120-B apresentou maior índice de desagregação, chegando à desintegração quase que completa em um menor tempo de ensaio. Porém, assim como nos demais solos, a amostra ensaiada no estado inundado praticamente não apresentou desagregação. Este fato pôde ser explicado devido à fração fina presente nestes solos, que confere uma alta cimentação das partículas na presença de água. No caso do solo BR120-C, este apresentou elevada desagregação para a condição seca ao ar, contradizendo o comportamento encontrado para os demais solos.

Analisando os resultados para os critérios baseados na Metodologia MCT, tem-se que, para o perfil estudado, a perda de massa por imersão em água foi o fator que governou o comportamento erodível das amostras, uma vez que os coeficientes de sorção obtidos apresentaram baixos valores, para todos os aspectos analisados.

O solo BR120-A no estado natural foi o único solo considerado não erodível, pois apresentou valor para a razão π/s menor do que os limites propostos por Nogami e Villibor (1995) e Santos (1997) *apud* Jacintho et al. (2006), de 52 e 40, respectivamente. Para o solo BR120-B, nas duas situações de umidade analisadas, o solo apresentou elevados valores de π/s , indicando alta erodibilidade.

O ensaio de Inderbitzen proporciona uma medida direta da taxa de erodibilidade do solo, pois foi, dentre os ensaios realizados, o que melhor simulou o comportamento do solo frente a um fluxo d'água. Os resultados demonstraram que as amostras de solos ensaiadas na condição seca apresentaram maiores perdas de massa.

A taxa de erodibilidade encontrada para o solo BR120-B, na condição seca ao ar, foi de 1,57g/cm², cerca de três vezes maior do que para o solo BR120-A e duas vezes maior do que para o solo BR120-C. Essas taxas comprovaram que o solo BR120-B é mais erodível, sendo considerado como altamente erodível.

Deste modo, no ensaio de desagregação, os solos foram classificados próximos à realidade encontrada em campo. A Metodologia MCT também apresentou boa relação de correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos nos locais estudados. Já a avaliação direta, por meio do ensaio de Inderbitzen, foi o ensaio que melhor representou as características observadas empiricamente em campo.

Para melhores resultados, chama-se a atenção quanto à clara importância de estudar a mineralogia dos solos antes de comparar o potencial de erodibilidade com o predomínio de frações argilosas presentes nos solos analisados, o que não foi objeto de estudo deste trabalho

Referências Bibliográficas

ALCÂNTARA, M. A. T. **Aspetos geotécnicos da erodibilidade de solos**. São Carlos-SP, 1997. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1997.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1999.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Y. Y. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, RS, n.2, 2001. p. 9-18.

BORMA, L. S. **Aspectos teóricos da modelagem do balanço hídrico no sistema solo-planta-atmosfera**. Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Solos não saturados, Vol. 1. EESC, USP. São Carlos, SP, 2004. p. 217 – 222.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁCIO, J. A.; MOTTA, N.; FRANCISCO, R. A. Processos erosivos. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p 39-91.

COUTO, B. O. C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, MG, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisas. **Recomendações para proteção de taludes contra erosão**. Rio de Janeiro: IPR/DNER, 1979. 59p.

_____. **ME 256: Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão, Solos, Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1994c. 6p.

FERNANDES, J, A. **Estudo da Erodibilidade de Solos e Rochas de uma Voçoroca de São Valetim - RS**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2011.

FERNANDES, L. P. **Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria - RS**. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2015.

GOOGLE. **Google Maps Imagens**. Disponível em: <
<https://www.google.com.br/maps/@-20.753855,-42.8390181,2868m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>>. Acessado em: 12 novembro. 2014.

GRANDO, A. MACIEL, C. B. CORSEUIL, C. W. MACCARINI, M. KOBAYAMA, M. HIGASHI, R. A. R. Erodibilidade do solo de uma microbacia experimental. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande, MS: ABRH, **Anais...** Campo Grande, MS, 2009. 19p.

INDERBITZEN, A. L. **An erodin test for soils**. Materials Research Standards, Philadelphia, v.1, n.7, p 553-554, 1961.

JACINTHO, E. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F. B. F.; SANTOS, 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**. Brasília, Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p. 93-156.

MACHADO, S. L. **Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998. 361 p.

MASCARENHA, M. M. A. **Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis**. 2003.141 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal de Brasília,

MENEZES, M, B, M. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. 2010, 139f. Dissertação

(Mestrado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

MOLINERO JÚNIOR, J. A. **Estudo geotécnico dos solos de erosões resultantes de intervenções em rodovias**. 2010, 117 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2010.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, Krefeld, n.19, p. 196-199, 1979.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 204p.

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. 586p.

PEJON, O. L. **Mapeamento Geotécnico de Piracicaba (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos de caracterização e de apresentação dos atributos**. 1992. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 1992.

SILVA, A. E. **Análise da Erodibilidade de Solos Residuais da Bacia do Itacorubi - SC**. 2016. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, 2009. p. 1811-1820.

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen**. 2010.165 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

6. CONCLUSÃO GERAL

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram relacionar as propriedades geotécnicas à erodibilidade dos três solos selecionados, pertencentes a um perfil de corte rodoviário, na cidade de Viçosa, MG. Segundo análises empíricas em campo, concluiu-se que o solo BR120-B é mais erodível do que o solo BR120-C, seguido do solo BR120-A, sendo, esse último, o menos erodível.

Ao relacionar a erodibilidade destes solos quanto às classes, o estudo mostrou que a classificação, segundo a Metodologia MCT, pode ser utilizada para estimar o comportamento de forma hierárquica, no qual o solo BR120-A (LG') apresentou-se mais resistente aos processos de erosão do que os solos BR120-B (NG') e BR120C (NS'). Desta forma, a pesquisa confirmou o proposto por Pejon (1992), segundo o qual solos lateríticos são mais resistentes à erodibilidade do que os solos não lateríticos.

Ao analisar os resultados obtidos, a partir das correlações entre as propriedades físicas e a erodibilidade, as principais conclusões foram:

- Com relação à curva granulométrica, segundo Bastos (1999), foi possível identificar que os solos BR120-A e BR120-C têm boa resistência à erosão, contrário ao solo BR120-B. Porém, Jacintho *et al.* (2006) alertam que os solos tropicais possuem características de serem agregados quando intemperizados, sendo, portanto, um equívoco a relação direta entre a granulometria do solo e a erodibilidade;
- Quanto à plasticidade dos solos, observou-se que os critérios propostos por Santos e Castro (1967) *apud* Sthepan (2010) mostraram-se satisfatórios, pois as baixas plasticidades dos solos indicaram a baixa susceptibilidade à erosão, sendo os solos com $LL < 50\%$ e $IP \approx 20\%$ classificados como erodíveis. O solo BR120-B é dito de baixa plasticidade, enquanto os solos BR120-A e BR120-C são de alta plasticidade;
- Analisando o índice de vazios e o grau de saturação das amostras, as propostas de correlações apresentadas não se apresentaram satisfatórias, pois os resultados demonstram que o solo BR120-A, mesmo com índice de vazios elevado, apresenta estabilidade frente à erosão. Já o grau de saturação é facilmente influenciável pelo ganho de umidade do solo, devendo-se considerar que eventos pluviométricos ocorridos previamente à data de amostragem dos solos poderiam ter alterado os índices calculados, classificando erroneamente qualquer solo como resistente à erosão; e

- Na análise dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto, obtiveram-se, para o fator de variação de coesão Δc , valores maiores que 85, à exceção do solo BR120-C, que, de acordo com Bastos (1999), corresponde a solos de alta erodibilidade. O solo BR120-B teve valor igual a 100% para o fator Δc , indicando ser o solo com maior potencial entre os analisados, seguido do solo BR120-A. Neste critério, o solo BR120-C é classificado como não erodível. Porém, a amostra de solo BR120-C, na condição natural, apresentou coesão maior do que quando no estado seco, cujo grau de saturação é menor, não podendo assim afirmar que a redução da coesão está diretamente ligada à redução do grau de saturação.

Ainda em relação ao parâmetro Δc , verificou-se que o teor de umidade condicionado às amostras naturais tem influência nos resultados obtidos. Caso as amostras sejam coletadas após períodos chuvosos, essas podem apresentar teores de umidade elevados, impactando na classificação da erodibilidade, podendo classificar solos erodíveis como não erodíveis. Sendo assim, para que o parâmetro seja utilizado por outros estudos, é importante que sejam verificadas as condições do solo durante a retirada das amostras.

Alcântara (1997) e Fernandes (2015) apontam que a análise da erodibilidade quanto ao teor de finos ou índice de plasticidade é insatisfatória para solos tropicais, devido à influência de características estruturais e mineralógicas, como, por exemplo, a presença de oxi-hidróxido de ferro que confere maior estabilidade e resistência ao solo.

Analisando os resultados para os critérios baseados na Metodologia MCT, tem-se que, para o perfil estudado, a perda de massa por imersão em água foi o fator que governou o comportamento erodível das amostras. Isso ocorreu porque os coeficientes de sorção obtidos apresentaram baixos valores para todos os aspectos analisados.

O solo BR120-A no estado natural foi o único solo considerado não erodível, pois apresentou valor para a razão π/s menor do que os limites propostos por Nogami e Villibor (1995) e Pejon (1992), de 52 e 40, respectivamente. Para o solo BR120-B, nas duas situações de umidade analisadas, o solo apresentou elevados valores de π/s , indicando alta erodibilidade.

Em relação ao ensaio de desagregação, o solo BR120-B apresentou maior índice de desagregação, chegando à desintegração quase que completa em um menor tempo de ensaio. Porém, assim como os demais solos, a amostra ensaiada no estado inundado

praticamente não apresentou desagregação. Este fato pode ser explicado devido à fração fina presente nestes solos, que confere uma alta cimentação das partículas na presença de água. No caso do solo BR120-C, a amostra apresentou elevada desagregação para a condição seca ao ar, contradizendo o comportamento encontrado para os demais solos.

Na análise dos resultados do ensaio de Inderbitzen, a perda de material carregado foi maior para a condição de umidade seca ao ar para o solo BR120-B. Portanto, é o solo de maior potencial à erosão, proporcionando uma medida direta da taxa de erodibilidade do solo. Nas demais condições, as perdas de material foram significativamente menores do que quando comparadas à condição seca.

A taxa de erodibilidade encontrada para o solo BR120-B, na condição seca ao ar, foi de 1,57g/cm², cerca de três vezes maior do que para o solo BR120-A e duas vezes maior do que para o solo BR120-C. Essas taxas comprovam que o solo BR120-B é mais erodível, sendo considerado altamente erodível.

Verificou-se, portanto, que, a abordagem utilizada no estudo de análises da erodibilidade dos solos por meio de critérios de correlações com as propriedades geotécnicas, físicas e mecânicas mostrou que, em geral, os índices físicos e o parâmetro de resistência, quando considerados isoladamente, não constituem parâmetros definidores das características de erodibilidade. Assim, esses parâmetros devem ser inseridos num contexto maior de fatores que influenciam na natureza e na magnitude dos processos erosivos.

Logo, nem todos os critérios apresentados para determinação da potencialidade de solos a processos erodíveis se mostraram satisfatórios. Os resultados obtidos, contraditórios aos esperados, mostraram que as avaliações e correlações analisadas devem ser utilizadas com alguns cuidados.